

MEC6513

Rapport de Laboratoire barre à double billes

Stefan Bracher

1339143

11. octobre 2006

1. Introduction

Des testes « barre à double billes » dans le plan X-Y ont été réalisés sur la machine « Matsuura » du laboratoire d'usinage de l'École Polytechnique de Montréal le 20 septembre 2006.

Pour cinq vitesses d'avance différentes, des trajectoires circulaires ont été effectués dans le sens horaire et anti-horaire en utilisant les articulations X et Y. Le logiciel « Renishaw Ballbar 5 » a enregistré les changements de la distance entre les billes durant les testes et ensuite produit les figures et valeurs numériques utilisé pour l'analyse.

Dans ce rapport les résultats des testes sont présentés et analysés.

2. Résultats expérimentaux

Test 1

Machine: Matsuura
Date: 20.09.2006
Vitesse d'avance: 1000mm/min
Longueur de barre: 150 mm

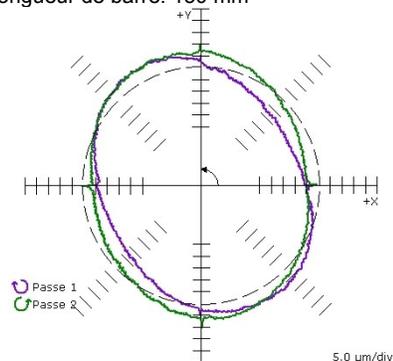


Figure 1: Tracé produite avec « Renishaw Ballbar 5 » pour le test 1

Test 2

Machine: Matsuura
Date: 20.09.2006
Vitesse d'avance: 2000mm/min
Longueur de barre: 150 mm

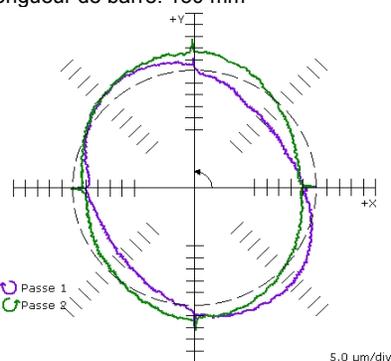


Figure 2: Tracé produite avec « Renishaw Ballbar 5 » pour le test 2

Test 3

Machine: Matsuura
Date: 20.09.2006
Vitesse d'avance: 3000mm/min
Longueur de barre: 150 mm

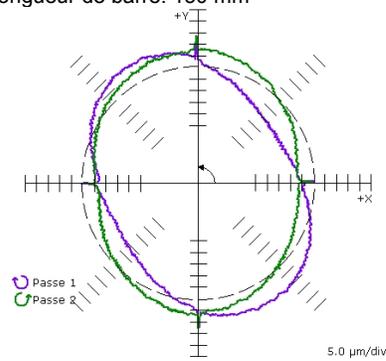


Figure 3: Tracé produite avec « Renishaw Ballbar 5 » pour le test 3

Test 4

Machine: Matsuura
Date: 20.09.2006
Vitesse d'avance: 4000mm/min
Longueur de barre: 150 mm

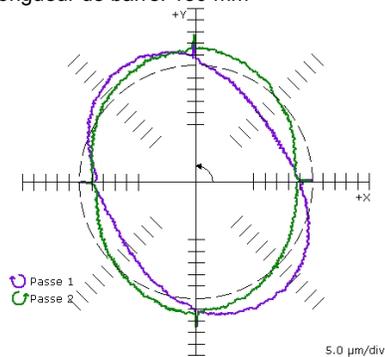


Figure 4: Tracé produite avec « Renishaw Ballbar 5 » pour le test 4

Test 5

Machine: Matsuura
Date: 20.09.2006
Vitesse d'avance: 5000mm/min
Longueur de barre: 150 mm

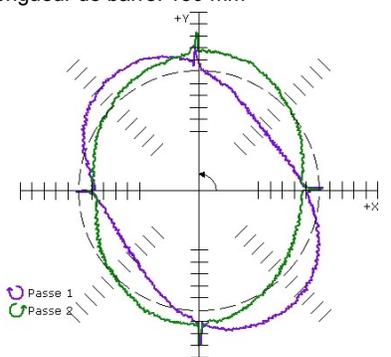


Figure 5: Tracé produite avec « Renishaw Ballbar 5 » pour le test 5

3. Analyse de résultats

a) Analyse individuel des tests

Test 1: 1000mm/min

Analyse numérique calculé avec le logiciel « Renishaw Ballbar 5 »:

Erreur	Amplitudes		Erreur	Amplitudes
	Sens: -horaire	-anti-horaire		
Jeu à l'inversion X [μm]	0,4	-0,4	Différence d'échelle [μm]	-18,1
Jeu à l'inversion Y [μm]	-1,4	0,4	Pas erreur cyclique X [mm]	2,5
Pics d'inversion X [μm]	4,2	4,5	Pas erreur cyclique Y [mm]	19,05
Pics d'inversion Y [μm]	2,8	4,8	Erreur d'échelle X [ppm]	-119,2
Jeu latéral X [μm]	-2,8	-4	Erreur d'échelle Y [ppm]	-58,8
Jeu latéral Y [μm]	1,5	0	Vitesse d'avance calculée [mm/min]	1001
Erreur cyclique X [μm]	0,6	0,4	Excentration X [μm]	-50,7
Erreur cyclique Y [μm]	0,4	0,4	Excentration Y [μm]	22,9
Différence d'asservissement [ms]	0,22		Rayon parfait [mm]	149,9866
Équerrage [$\mu\text{m}/\text{m}$]	57,2		Circularité [μm]	19,6
Rectitude X [μm]	-0,4		Tolérance de position [μm]	87,3
Rectitude Y [μm]	0,2			

Écarts de machine avec effet visible:

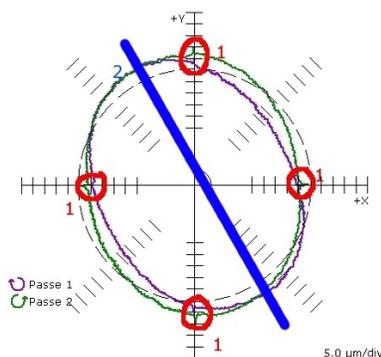


Figure 6: Localisation des écarts avec effet visible sur le tracé

Regardant l'image du tracé (figure 6) il y a deux effets bien visible:

1. Des pics à 0° , 90° , 180° et 270° pour les deux passes
2. Une forme ovale des deux passes. En plus la passe 1 est tourné d'environ -25°

Le premier effet, les pics sont clairement des pics d'inversion qui ce produisent en moment que le moteur de l'axe est arrêté pour inverser la direction, à cause de cet arrête ou d'une compensation ne pas bien ajusté.

Le deuxième effet est plus difficile: La forme ovale pourrait être produit par un erreur d'échelle, un erreur d'orthogonalité, ou une différence d'asservissement. Sauf, un erreur d'échelle ne peut pas expliquer la rotation de l'axe de l'ovale de la première passe et pour un erreur d'orthogonalité, la rotation devrait ce passer dans la même direction. Et l'erreur d'asservissement finalement devrait tourner les ovales des deux passes dans des différents directions.

Il doit alors s'agir d'une combinaison de plusieurs effets. Peut-être que c'est un erreur d'orthogonalité, superposé avec un erreur d'asservissement.

Test 2: 2000mm/min

Analyse numérique calculé avec le logiciel « Renishaw Ballbar 5 »:

Erreur	Amplitudes		Erreur	Amplitudes
	Sens: -horaire	-anti-horaire		
Jeu à l'inversion X [μm]	-0,3	-1,5	Différence d'échelle [μm]	-19,1
Jeu à l'inversion Y [μm]	-1,6	-1,1	Pas erreur cyclique X [mm]	2,5
Pics d'inversion X [μm]	5,1	4,9	Pas erreur cyclique Y [mm]	10,08
Pics d'inversion Y [μm]	4,8	5,6	Erreur d'échelle X [ppm]	-119,3
Jeu latéral X [μm]	-3,8	-5,4	Erreur d'échelle Y [ppm]	-55,8
Jeu latéral Y [μm]	1,2	-2,3	Vitesse d'avance calculée [mm/min]	2001
Erreur cyclique X [μm]	0,7	0,6	Excentration X [μm]	-49,7
Erreur cyclique Y [μm]	0,4	0,5	Excentration Y [μm]	21,3
Différence d'asservissement [ms]	0,16		Rayon parfait [mm]	149,9869
Équerrage [$\mu\text{m}/\text{m}$]	58,8		Circularité [μm]	23,6
Rectitude X [μm]	-1		Tolérance de position [μm]	87,5
Rectitude Y [μm]	-0,2			

Écarts de machine avec effet visible:

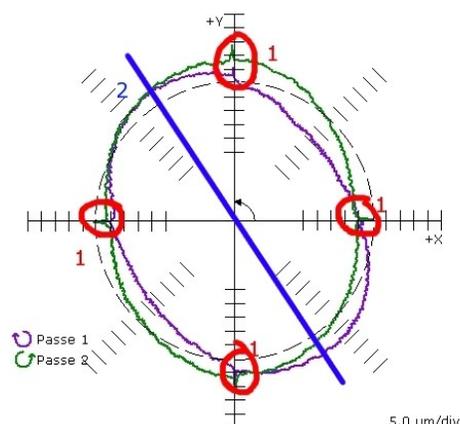


Figure 7: Localisation des écarts avec effet visible sur le tracé

Encore une fois les pics d'inversion sont bien visible (effet 1 dans le figure 7).

Les tracés sont devenue plus ovales (2), ce que supporte la théorie qu'un erreur d'asservissement dans les contrôleurs des moteurs est inclus, parce que l'effet d'un telle erreur grandit avec la vitesse d'avance, comparé à un erreur d'orthogonalité ou un erreur d'échelle qui est indépendant de la vitesse d'avance.

Une autre théorie serait que la rotation de la première passe et causé par un erreur du test, par exemple le fil, qui, tournant dans une direction, est poussé, et tiré en tournant dans l'autre. Malheureusement il n'y a pas de records, si le fil était plutôt poussé à la première passe ou dans la deuxième passe et si l'orientation du fil était constante pour tout les testes ou si elle à changé.

Test 3: 3000mm/min

Analyse numérique calculé avec le logiciel « Renishaw Ballbar 5 »:

Erreur	Amplitudes		Erreur	Amplitudes
	Sens: -horaire	-anti-horaire		
Jeu à l'inversion X [μm]	-0,3	-1,9	Différence d'échelle [μm]	-22,3
Jeu à l'inversion Y [μm]	-1,5	-0,8	Pas erreur cyclique X [mm]	2,5
Pics d'inversion X [μm]	5,7	5,9	Pas erreur cyclique Y [mm]	10,08
Pics d'inversion Y [μm]	5,7	6,5	Erreur d'échelle X [ppm]	-151,7
Jeu latéral X [μm]	-1,8	-3,4	Erreur d'échelle Y [ppm]	-77,3
Jeu latéral Y [μm]	0,7	-2	Vitesse d'avance calculée [mm/min]	3005
Erreur cyclique X [μm]	0,7	0,4	Excentration X [μm]	-51
Erreur cyclique Y [μm]	0,4	0,5	Excentration Y [μm]	20,6
Différence d'asservissement [ms]	0,16		Rayon parfait [mm]	149,9828
Équerrage [$\mu\text{m}/\text{m}$]	62,1		Circularité [μm]	24,9
Rectitude X [μm]	0,4		Tolérance de position [μm]	109,2
Rectitude Y [μm]	-0,9			

Écarts de machine avec effet visible:

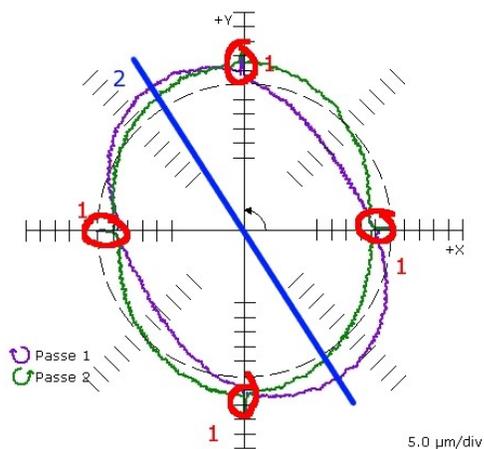


Figure 8: Localisation des écarts avec effet visible sur le tracé

Les pics d'inversion (1) ont seulement grandit un petit peu.

La grande différence au figure du teste précédent est que l'ovalité a encore une fois augmenté, pendant l'angle à de décalage de l'ovale de la première passe est resté presque constant.

Regardant les numéros de la différence d'asservissement calculé par le logiciel, on voit que la différence est la même pour les deux testes, soit 16 ms. Mais il est claire que si on augmente la vitesse d'avance, ces 16 ms ont un effet plus grande sur la tracé.

Test 4: 4000mm/min

Analyse numérique calculé avec le logiciel « Renishaw Ballbar 5 »:

Erreur	Amplitudes		Erreur	Amplitudes
	Sens: -horaire	-anti-horaire		
Jeu à l'inversion X [μm]	-0,1	-2,5	Différence d'échelle [μm]	-21,1
Jeu à l'inversion Y [μm]	-2,2	-1,3	Pas erreur cyclique X [mm]	2,5
Pics d'inversion X [μm]	7,2	7	Pas erreur cyclique Y [mm]	20
Pics d'inversion Y [μm]	6,5	8,1	Erreur d'échelle X [ppm]	-277,3
Jeu latéral X [μm]	-3,9	-5,2	Erreur d'échelle Y [ppm]	-206,9
Jeu latéral Y [μm]	2	-3,9	Vitesse d'avance calculée [mm/min]	4009
Erreur cyclique X [μm]	0,4	0,6	Excentration X [μm]	-48,6
Erreur cyclique Y [μm]	0,4	0,7	Excentration Y [μm]	17,8
Différence d'asservissement [ms]	0,14		Rayon parfait [mm]	149,9636
Équerrage [$\mu\text{m}/\text{m}$]	65,5		Circularité [μm]	30,6
Rectitude X [μm]	-0,1		Tolérance de position [μm]	211,8
Rectitude Y [μm]	-0,8			

Écarts de machine avec effet visible:

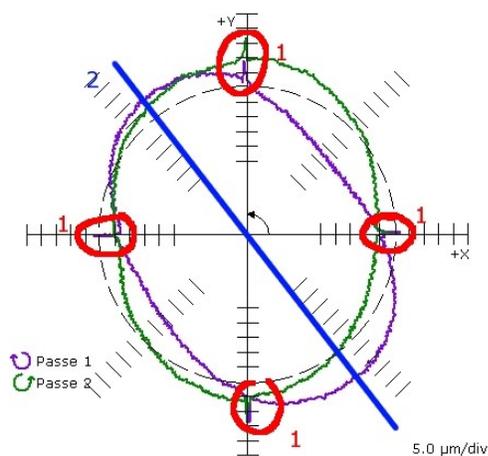


Figure 9: Localisation des écarts avec effet visible sur le tracé

Les formes de tracés commencent maintenant à s'approcher à une arachide.

Comme les pics d'inversion restent à leur place, on peut définitivement dire qu'il n'y a pas de rotation de tracé. Selon la documentation de Renishaw cela veut dire que la Software à bien enregistré les données du test et n'était pas en retard par rapport aux mouvements réel.

Test 5: 5000mm/min

Analyse numérique calculé avec le logiciel « Renishaw Ballbar 5 »:

Erreur	Amplitudes		Erreur	Amplitudes
	Sens: -horaire	-anti-horaire		
Jeu à l'inversion X [μm]	-0,3	-2	Différence d'échelle [μm]	-22,6
Jeu à l'inversion Y [μm]	-1,6	-0,4	Pas erreur cyclique X [mm]	2,5
Pics d'inversion X [μm]	7,3	7	Pas erreur cyclique Y [mm]	19,05
Pics d'inversion Y [μm]	7,2	8,8	Erreur d'échelle X [ppm]	-343,4
Jeu latéral X [μm]	-2,8	-3,8	Erreur d'échelle Y [ppm]	-268
Jeu latéral Y [μm]	-0,3	-1,9	Vitesse d'avance calculée [mm/min]	5019
Erreur cyclique X [μm]	0,7	0,5	Excentration X [μm]	-49,6
Erreur cyclique Y [μm]	0,6	0,7	Excentration Y [μm]	19
Différence d'asservissement [ms]	0,14		Rayon parfait [mm]	149,9541
Équerrage [$\mu\text{m}/\text{m}$]	67,3		Circularité [μm]	29,9
Rectitude X [μm]	0,9		Tolérance de position [μm]	264,7
Rectitude Y [μm]	-0,9			

Écarts de machine avec effet visible:

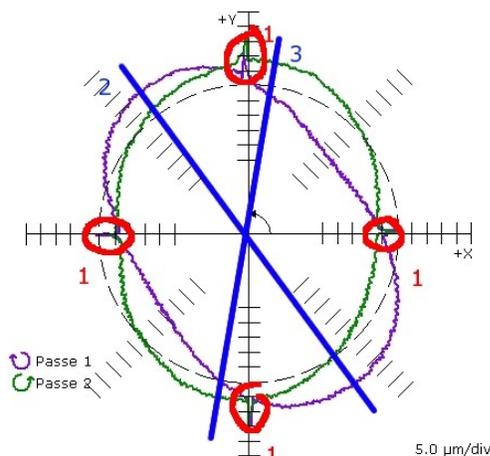


Figure 10: Localisation des écarts avec effet visible sur le tracé

À part des pics d'inversion (1) qui on agrandi un peu et la forme de tracé qui devient de plus en plus une arachide. On peut voir maintenant que ne pas seulement la tracé de la première passe est tourné (2), mais que aussi la tracé de la deuxième passe commence à être visuellement tourné (3), mais dans le sens contraire.

L'idée mentionnée lors du premier test peut alors être repris: Il est bien possible qu'on voit ici une superposition d'un erreur d'orthogonalité entre les axes X est Y, qui n'est pas influencé par la vitesse d'avance, superposé avec un erreur d'asservissement qui agrandit avec la vitesse d'avance.

b) Analyse des changements entre les tests

Dans les tracés produit par le logiciel, il était déjà possible de voir des changements des traces de façon qualitative. Pour qu'on ait un survol quantitative sur les changements dû à la vitesse d'avance, tout les erreurs calculés sont ensuite comparé d'un teste à l'autre.

Jeu d'inversion

Le jeu d'inversion est un erreur qui est basé sur la géométrie de la machine et on peut donc assumer qu'il est indépendant de la vitesse d'avance.

Regardant figure 11, il n'y pas de simple règle qui relie la vitesse d'avance avec le jeu d'inversion, mais on peut quand même voir une tendance que l'amplitude du jeu augmente avec la vitesse.

Une explication de ce fait pourrait être que les conditions pour le stick-slip varient avec la vitesse d'avance, parce que de plus celle est grande, de plus grande est le choc cinématique, ce que augmente la chance pour « slip ».

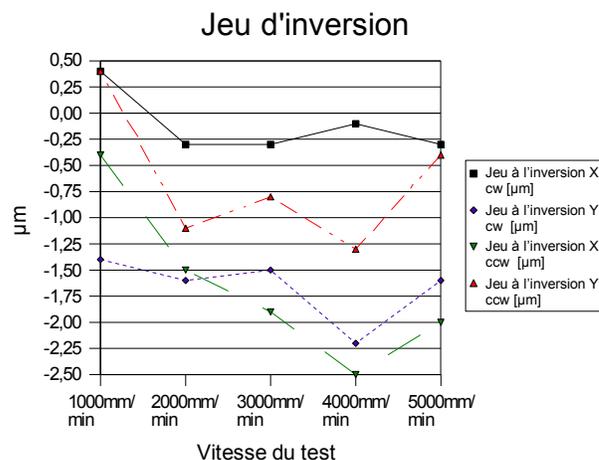


Figure 11: Jeu d'inversion

Pics d'inversion

C'est bien visible que les pics d'inversion deviennent plus grande de plus la vitesse d'avance augmente.

Il y a deux explications possible:

Premièrement, comme pour la jeu d'inversion, les forces sur les membrures de la machine lors du choc de changement de direction sont plus grandes avec une vitesse augmenté. Il se peut que le moteurs ne sont pas capable de compenser complètement ses forces.

Deuxièmement, le moment d'inversion et le problème en résultant sont bien connu, alors il est bien possible que le contrôleur de la machine possède une fonction de compensation pour ce cas, qui n'a pas la même performance pour toutes les vitesses d'avance.

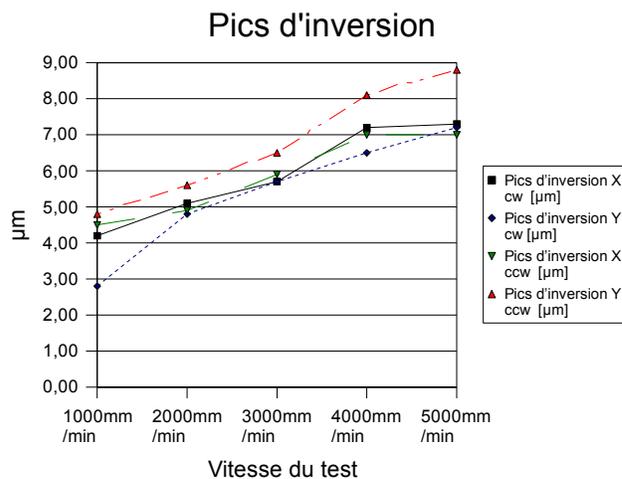


Figure 12: Pics d'inversion

Jeu latéral

Pour le jeu latéral il existe une grande différence entre les directions. En plus une tendance de devenir plus négative peut être observé. Le dernier est un peu étrange, comme on pourrait, comme pour le jeu d'inversion, attendre une augmentation du valeur du jeu avec la vitesse à cause des conditions changé du stick-slip. Mais peut être ici aussi, il y a des fonction dans le contrôleur qui nous ne permettent pas de voir un résultat qui est dû seulement à la mécanique.

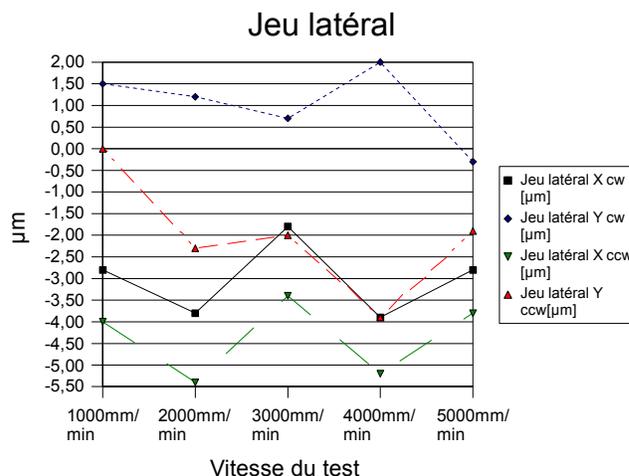


Figure 13: Jeu latéral

Erreur cyclique

Comme attendu, à cause du fait que l'erreur cyclique dépend plutôt de la position que de la vitesse d'avance, le changement de l'erreur cyclique à aucune relation avec la la vitesse d'avance.

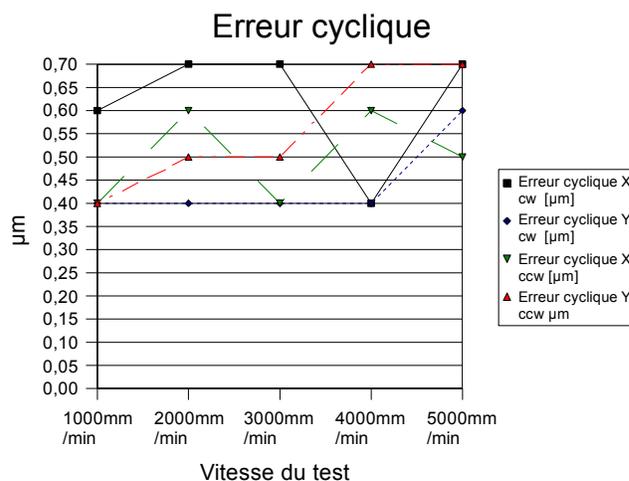


Figure 14: Erreur cyclique

Différence d'asservissement

On voit ici que la différence d'asservissement à diminué avec l'augmentation de la vitesse du test.

Bien probable que la machine essayé à compenser pour les vitesses plus hautes. Mais si la diminution n'est pas assez grande, l'erreur qui se voit sur la tracé va quand même augmenter, ce qu'on a probablement vu dans notre série de testes.

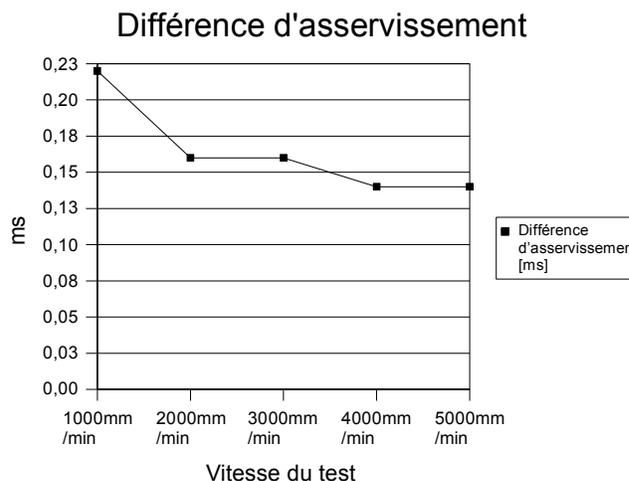


Figure 15: Différence d'asservissement

Équerrage

Étant directement relié à la géométrie des guides de membrure, c'est très étrange qu'on voit une augmentation avec la vitesse. Peut être que les forces augmenté avec une haute vitesse font possible un roulement plus grand.

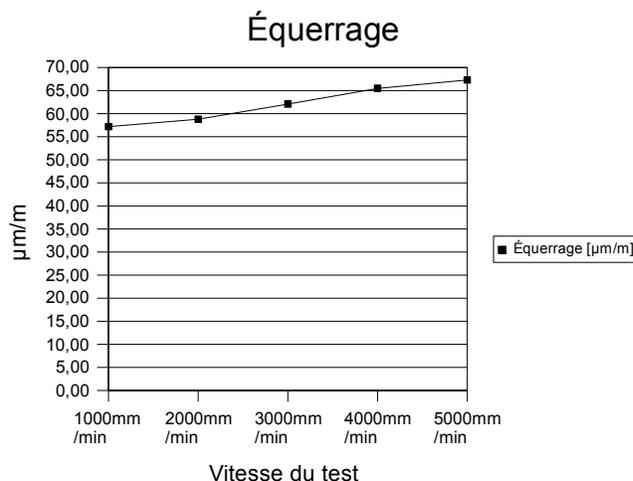


Figure 16: Équerrage

Rectitude

La rectitude elle aussi ne devrait pas changer avec la vitesse. On voit qu'elle change, mais avec des valeurs assez petites est dans des directions inverse d'une passe à l'autre.

Le valeur qu'on voit se trouve probablement à la limite de ce que peut être détecté avec le barre à double bille et est plutôt du bruit que des vrai valeurs significatives.

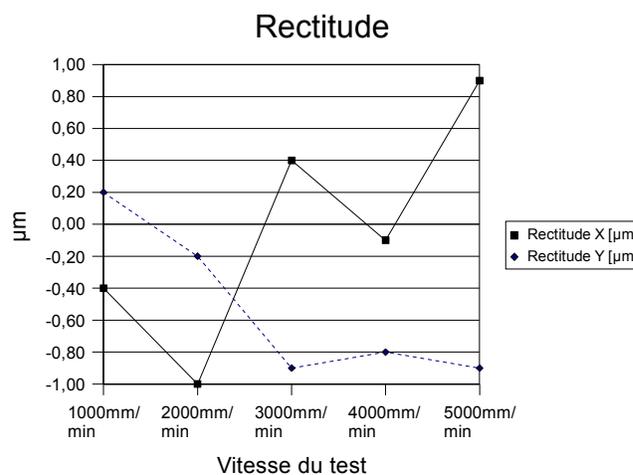


Figure 17: Rectitude

Différence d'échelle

Étant aussi dépendant de la géométrie ou des paramètres constants pour la contrôle des moteurs, un grande changement de la différence d'échelle n'est pas attendu.

Une tendance vers le négative est quand même visible dans la figure 18.

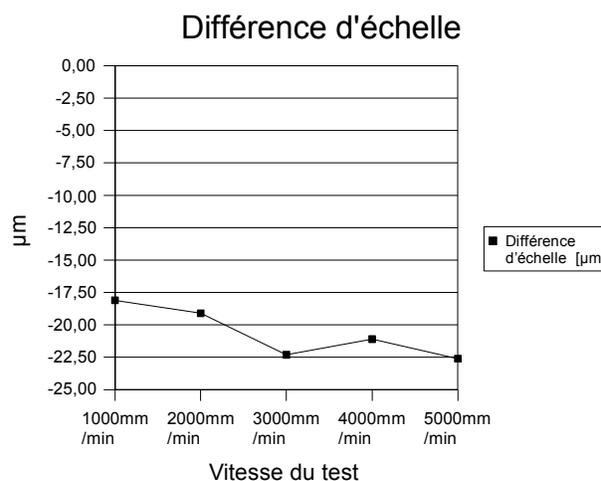


Figure 18: Différence d'échelle

Pas d'erreur cyclique

Le pas d'erreur cyclique devrait lui-aussi être constant parce qu'il dépend de la géométrie de la vis à bille. Ce que est bien confirmé pour l'axe Y. Dans le cas de l'axe X par contre en à « deux » valeurs. 10 mm et 20 mm. Ce que est frappant est que un 20 et exactement 10 fois deux.

Probablement qu'il existe une « répétitivité de chiffre » de façon « $f=k*f1$ », comparable aux fréquences critique dans la domaine des vibrations.

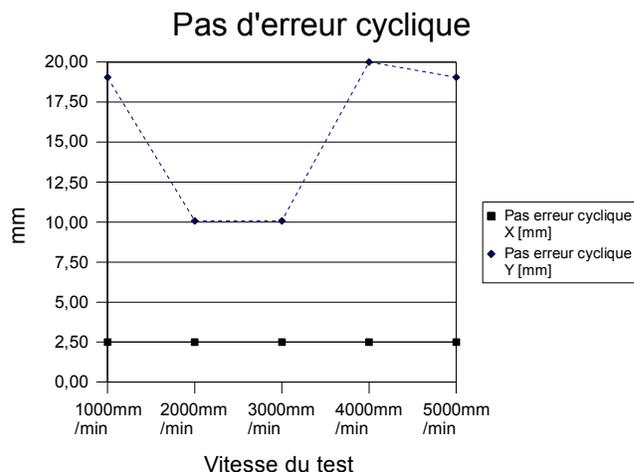


Figure 19: Pas d'erreur cyclique

Erreur d'échelle

Encore plus que la différence d'échelle, l'erreur d'échelle tend vers des numéros plus négatives avec une vitesse d'avance augmentée, ce que n'est absolument pas attendu. Plus de testes devraient être fait pour voir si la répétitive de ce phénomène est donné.

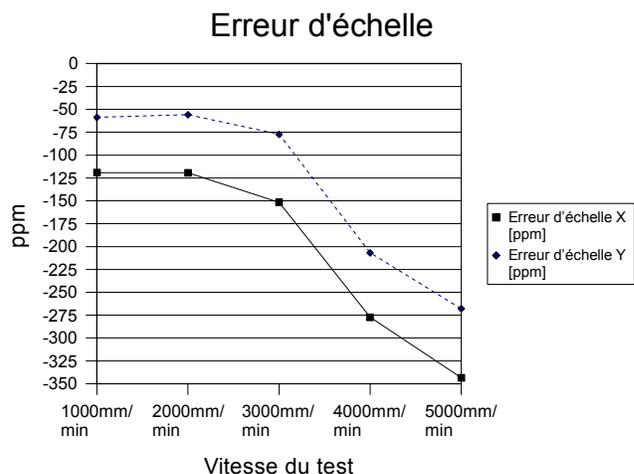


Figure 20: Erreur d'échelle

Erreur de vitesse d'avance

L'erreur relative de vitesse d'avance augmente avec la vitesse. Il se peut que le contrôleur de la machine à une performance inférieur avec des vitesses plus grandes.

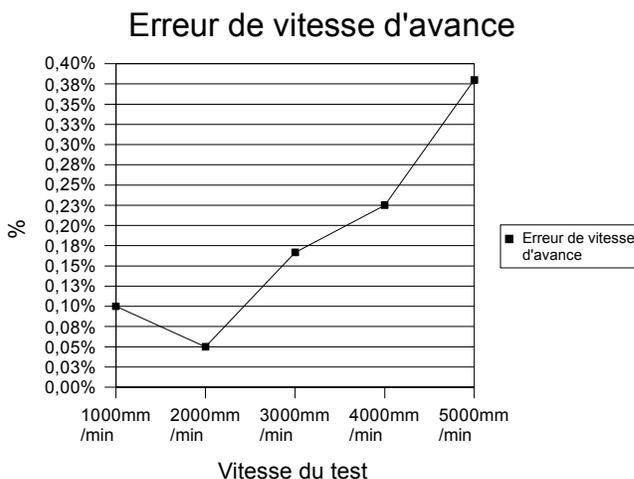


Figure 21: Erreur de vitesse d'avance

Excentration

La dépendance de la direction vient peut-être de la commande.

En fait on sait pas vraiment comment Renishaw calcul l'excentration et qu'est-ce que c'est la signifiante d'une excentricité négative. Un vecteur d'excentricité serait beaucoup plus utile.

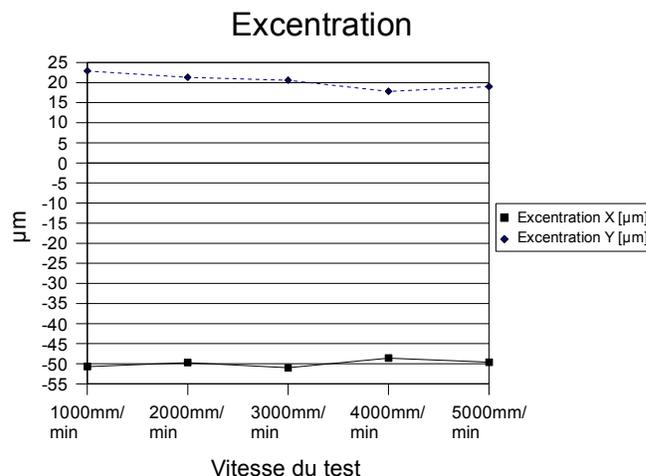


Figure 22: Excentration

Erreur de Rayon

La machine semble vraiment d'être moins performante avec des vitesses plus grandes, comme l'erreur de Rayon, lui aussi devient plus extrême avec l'augmentation de la vitesse.

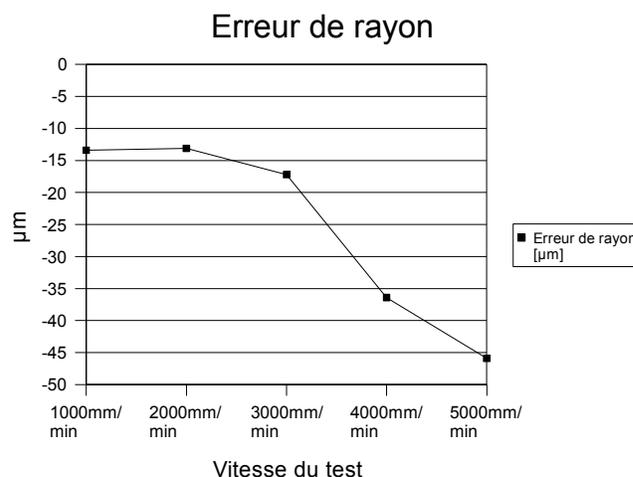


Figure 23: Erreur de rayon

Circularité / Tolérance de position

Pendant que la tolérance de position augmente avec la vitesse, la circularité reste plutôt constant.

Le premier peu être expliqué avec des problèmes de contrôle à des vitesses augmentés, et le deuxième par le tracé circulaire qui à été demandé pour le teste, sur lequel beaucoup d'effets s'éliminent à cause de la symétrie.

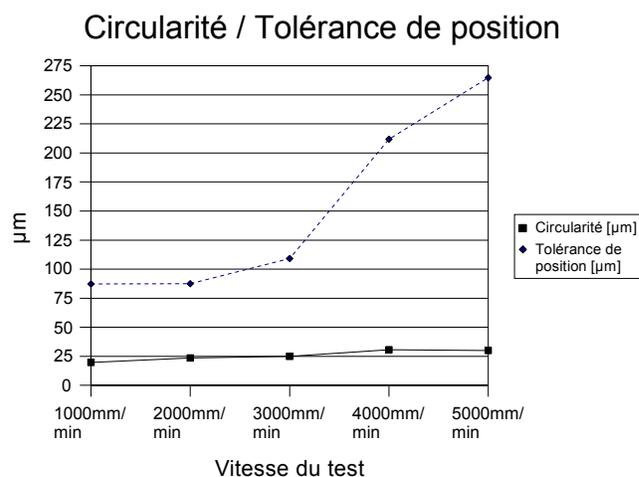


Figure 24: Circularité / Tolérance de position

4. Conclusion

Le test à montré que la machine produise un erreur au moment de l'inversion de la direction de mouvement des axes (les pics d'inversion) ainsi qu'un autre erreur (les ovales partiellement tournés) qui est probablement une superposition d'un erreur orthogonalité et de différence d'asservissement.

Malheureusement, comme c'est le première teste qu'on vient de faire, on n'a rien pour comparer les valeurs avec. Alors on peut dire que qualitativement, il y a des problèmes, mais on n'as pas d'idée si qualitativement ces problèmes sont graves ou même dans des limites exceptionnels.

Il serait aussi intéressant de refaire le test sans toutes les compensations inclus dans le contrôleur, pour voir la précision de la machine elle même.