



**HAL**  
open science

## Étude de l'influence de la séquence débridage/retournement/rebridage sur les distorsions en fraisage d'une pièce en alliage d'aluminium 7050-T7

Lucas Ranchin, Guillaume Fromentin, Fabien Viprey, Eric Monteiro, Philippe  
Lorong, Habib Karaoui, Théo Dorlin

► **To cite this version:**

Lucas Ranchin, Guillaume Fromentin, Fabien Viprey, Eric Monteiro, Philippe Lorong, et al.. Étude de l'influence de la séquence débridage/retournement/rebridage sur les distorsions en fraisage d'une pièce en alliage d'aluminium 7050-T7. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. hal-04011645

**HAL Id: hal-04011645**

**<https://hal.science/hal-04011645v1>**

Submitted on 2 Mar 2023

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

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



## Étude de l'influence de la séquence débridage/retournement/rebridage sur les distorsions en fraisage d'une pièce en alliage d'aluminium 7050-T7

**Lucas Ranchin<sup>\*(a), (b)</sup>, Guillaume Fromentin<sup>(a)</sup> Fabien VIPREY<sup>(a)</sup>, Eric Monteiro<sup>(c)</sup>, Philippe Lorong<sup>(c)</sup>, Habib Karaouni <sup>(b)</sup>, Théo Dorlin<sup>(b)</sup>**

*(a) Arts et Métiers Institute of Technology, LABOMAP, Université Bourgogne Franche-Comté, HESAM Université, F-71250 Cluny, France*

*(b) Safran S.A, Research & Technology Center, F78772, Magny-Les-Hameaux, France,*

*(c) Laboratoire PIMM, Arts et Métiers Institute of Technology, CNRS, Cnam, HESAM Université, 151 boulevard de l'Hopital, 75013 Paris, France*

\*Mail : lucas.ranchin @ensam.eu

L'étude du processus d'usinage fait toujours l'objet de nombreuses recherches pour décrire et comprendre les phénomènes présents. C'est notamment le cas dans l'industrie aéronautique où les tolérances géométriques sont exigeantes pour garantir un fonctionnement optimal de la pièce ainsi que la sécurité de l'appareil. Encore peu d'études s'intéressent à l'effet de la séquence de bridage. Ainsi, la mise au point de gammes d'usinage et notamment le positionnement des points de bridage nécessitent encore une optimisation vis-à-vis de la géométrie à usiner et de l'état de contrainte dans la pièce. Ainsi, cet article propose une étude de différentes configurations d'usinage permettant d'évaluer l'influence du nombre de phases et de la stratégie d'usinage sur les distorsions obtenues à l'issue du processus. Pour cela, une rainure et un surfaçage ont été usinés sur une éprouvette parallélépipédique en alliage d'aluminium aéronautique 7050-T7. Ces deux opérations ont été séquencées différemment selon les éprouvettes en vue de caractériser l'influence de l'ordonnancement des opérations en plusieurs phases sur les écarts géométriques en  $2^{1/2}$  axes. Enfin, deux techniques de bridage ont été mises en place pour comparer une stratégie de retournement en 4 axes (i.e. en une phase sans débridage) avec la stratégie  $2^{1/2}$  axes en plusieurs phases.

**Mots clés :** Distorsions, bridage, écarts géométriques, mesure *in situ*, effet de bridage

## 1 Introduction

Les alliages d'aluminium 7050-T7 occupent une place de choix dans l'aéronautique. Les exigences géométriques strictes liées à l'utilisation des différentes pièces dans cette nuance de matériau demandent une maîtrise de l'entièreté du processus de fabrication. La gamme de fabrication des bruts se compose souvent d'une mise en forme puis d'un traitement thermique assurant un durcissement structural. Cette obtention du brut introduit des contraintes résiduelles qui, lors de l'usinage, vont devenir génératrices de distorsions [Denkena ; 2008], [Cerutti ; 2016], [Yang,2014]. Selon [Wang, 2018], la probabilité qu'une pièce soit non conforme à cause de ces distorsions est de presque 50%. Il est donc important d'être capable de maîtriser au mieux l'ensemble du processus d'usinage.

Pour cela, il est souhaitable de s'intéresser à la gamme d'usinage. En effet, l'ordonnancement des opérations influe fortement la distorsion sur des pièces en aluminium [Denkena, 2008], [Hassini, 2015]. Dans ses travaux, Hassini [Hassini, 2015] étudie différentes stratégies d'usinage afin de minimiser les déformations après débridage de plaques en alliage d'aluminium mais aborde peu la problématique du bridage. Quelques études s'intéressent à l'influence de la gamme d'usinage sur les distorsions post-usinage notamment Tang [Tang, 2013] qui travaille sur une pièce en aluminium 7050-T7. Ce dernier développe une méthodologie multi-couplage pour réaliser des prédictions de distorsions. Enfin, [Siebenaler, 2006] a réalisé des simulations par éléments finis pour mieux comprendre les phénomènes de distorsions liés au bridage. Ils analysent l'influence de la densité du maillage et de la surface de contact (sphérique ou plane) sur les distorsions observées en simulations. Selon lui, la densité du maillage est bien plus importante que la forme de l'interface de contact. Ainsi, l'influence de ce paramètre sur les distorsions une fois la pièce débridée est encore mal connue. L'étude bibliographique a permis de mettre en évidence que la vitesse de coupe n'avait pas d'influence sur les contraintes résiduelles maximales dans la pièce mais plutôt sur la profondeur affectée et les contraintes de tensions en surface. Une vitesse de coupe peu élevée permet d'éviter d'avoir des contraintes résiduelles de traction en surface et donc de réduire le gradient de contrainte dans la pièce. La profondeur de passe n'ayant que très peu d'influence, celle-ci est faible afin de limiter les efforts de coupe [Ping, 2020], [Denkena, 2008]. La lubrification sera utilisée dans toutes les opérations pour, notamment, pouvoir négliger les effets de la thermique. Dans sa thèse, [Garcia, 2010] conclut que le chargement thermique lors du fraisage à sec d'un alliage d'aluminium 7449 n'affecte pas la sub-surface et les contraintes résiduelles d'usinage. Ainsi, cela permet d'évaluer au mieux les seuls effets de la séquence bridage/débridage/rebridage et de rééquilibrage des contraintes internes.

L'étude bibliographique montre qu'encore peu de recherches ont été effectuées sur l'impact de l'enchaînement des phases d'usinage sur les distorsions d'une pièce. Ainsi le présent travail est dédié à la caractérisation des distorsions durant le processus d'usinage et plus particulièrement l'effet de la séquence bridage/débridage/rebridage. L'étude de cas présentée en section 2 porte sur l'usinage de pièce parallélépipédique en aluminium 7050 - T7. Dans un premier temps l'influence du nombre de phases est présentée. Dans un second temps l'influence de l'ordonnancement des différentes phases

est étudiée. Enfin, une stratégie en 4 axes est comparée à une stratégie en  $2^{1/2}$  axes et les impacts sur l'état géométrique de la pièce obtenue sont comparés.

## 2 Etude de cas

La gamme d'usinage se compose d'une ou plusieurs rainures (opération A) et d'un ou plusieurs surfacages (opération B) pouvant être effectués dans différents ordres. L'éprouvette utilisée est un parallélépipède d'alliage d'aluminium 7050-T7 traité de  $78 \times 98 \times 10 \text{ mm}^3$ . La géométrie finale obtenue est illustrée en Figure 1 et Figure 5. L'éprouvette est mise en position et maintenue en position lors des opérations par deux systèmes de bridage. Le premier (A, associé à l'opération A), visible en Figure 2, est une plaque. Les 3 pions permettent de venir réaliser la mise en position tandis que 4 brides viennent assurer le maintien en position. Le second (B associé à l'opération B) est une mise en position et un maintien en position en étau.

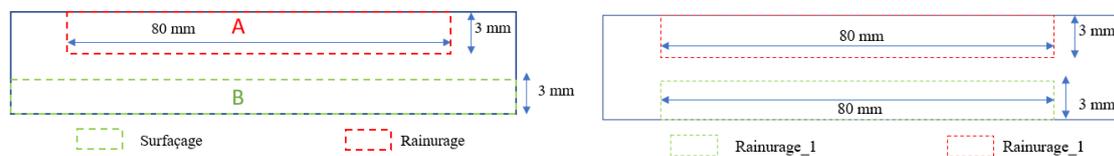


Figure 1 : Géométrie de l'éprouvette réalisée en  $2^{1/2}$  axes (à gauche) et en 4 axes (à droite)

### 2.1 Mise en œuvre des essais

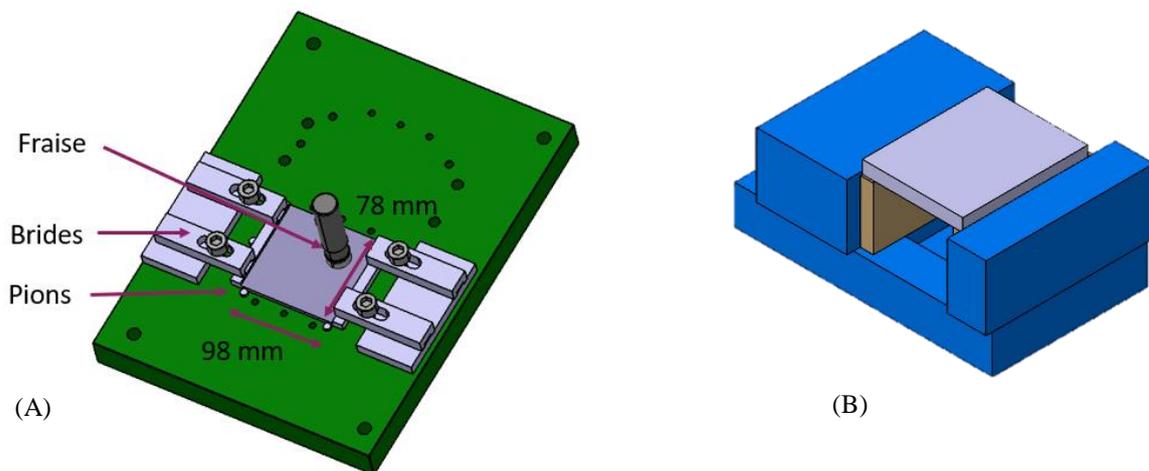


Figure 2 : Montages d'usinage (A) Plaque (B) Etau

La Figure 2 présente l'organigramme de la première série d'essais. Différentes gammes d'usinage sont testées, ce qui consiste à réaliser d'abord l'opération A ou l'opération B. Dans un premier temps, 3 mm de matière sont enlevés à chaque phase. Les conditions de coupe retenues sont :  $V_c = 350 \text{ m/min}$ ,  $a_p = 0,5 \text{ mm}$  ;  $f_z = 0,09 \text{ mm/dent}$  pour chaque phase. Dans un second temps, afin de tester l'influence du nombre de retournement sur les distorsions, de nouvelles phases d'usinage sont introduites dans la séquence puisqu'au lieu d'enlever 3 mm à chaque phase, seulement 1,5 mm sont retirés. Ainsi, certaines éprouvettes sont réalisées en 3 phases (Figure 3). Une éprouvette fait l'objet d'une stratégie en 4 phases. Un centre de fraisage 5 axes HSM600U iTNC 530 est

utilisé pour les opérations ainsi qu'une fraise carbure monobloc Montupet, diamètre 20 mm ayant 4 dents, un angle d'hélice de 20°.

Enfin, une dernière série d'essais en 4 axes est consacrée à la comparaison d'une stratégie en 2 phases avec retournement manuel et une phase réalisée avec un retournement à l'aide des axes machines. Ces essais ont nécessité le développement d'un montage spécifique représenté en Figure 4. La géométrie de l'éprouvette usinée correspond à celle décrite en Figure 1 (droite). La rainure réalisée en 1<sup>ère</sup> phase est nommée rainure\_1, la seconde est appelée rainure\_2. Un essai supplémentaire a été réalisé avec un raidisseur, il s'agit d'un vérin mécanique qui vient en contact de la pièce lors de la 2<sup>ème</sup> phase. Une plaque taraudée est mise en position dans les trous indiqués en Figure 4. Cette vis est placée au centre de l'éprouvette comme un appui supplémentaire.

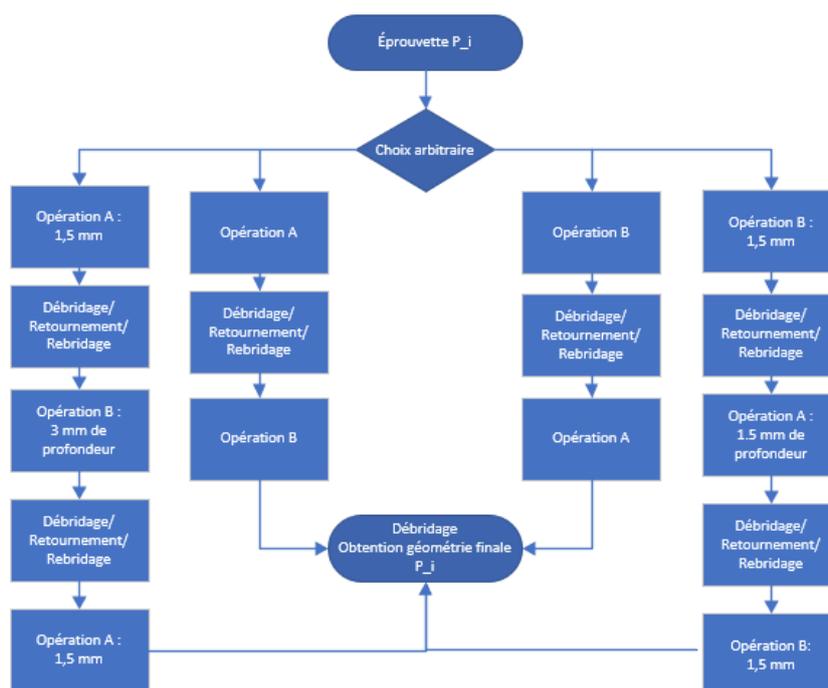


Figure 3 : Démarche générale d'un essai multi-phases

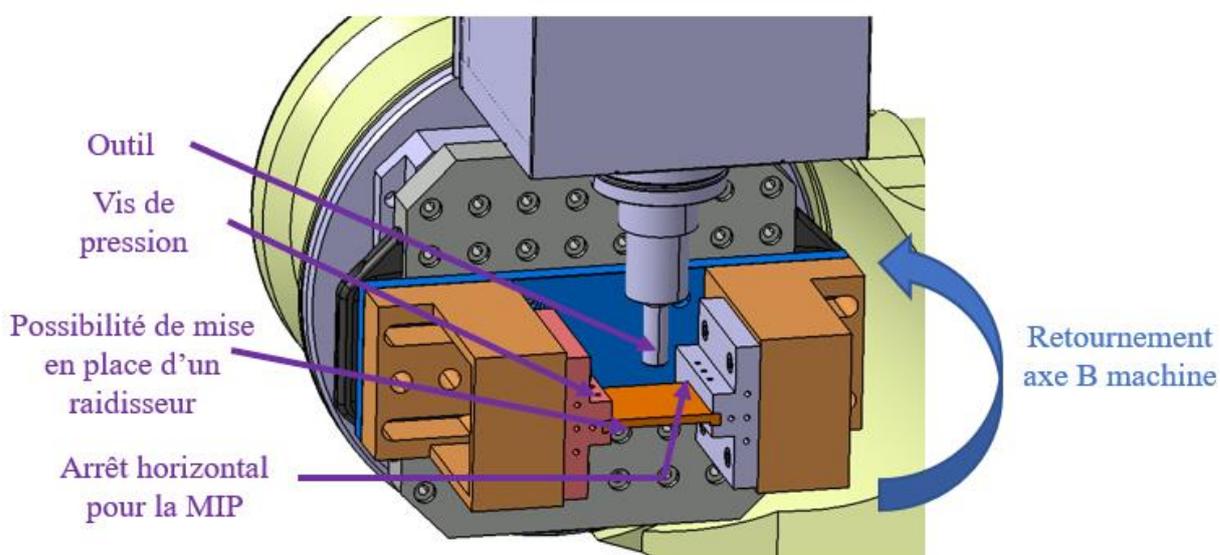


Figure 4 : Montage 4 axes

Après chaque opération, un contrôle du défaut de planéité est réalisé à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle DEA Pioneer Performance. Cet instrument présente une incertitude de  $1.5 \mu\text{m} + 400/L$ . Ces contrôles sont effectués sur la face surfacée et sur le plan qui correspond au fond de la rainure venant d'être réalisée. Si la rainure n'a pas encore été réalisée, le plan opposé au surfacage est alors mesuré.

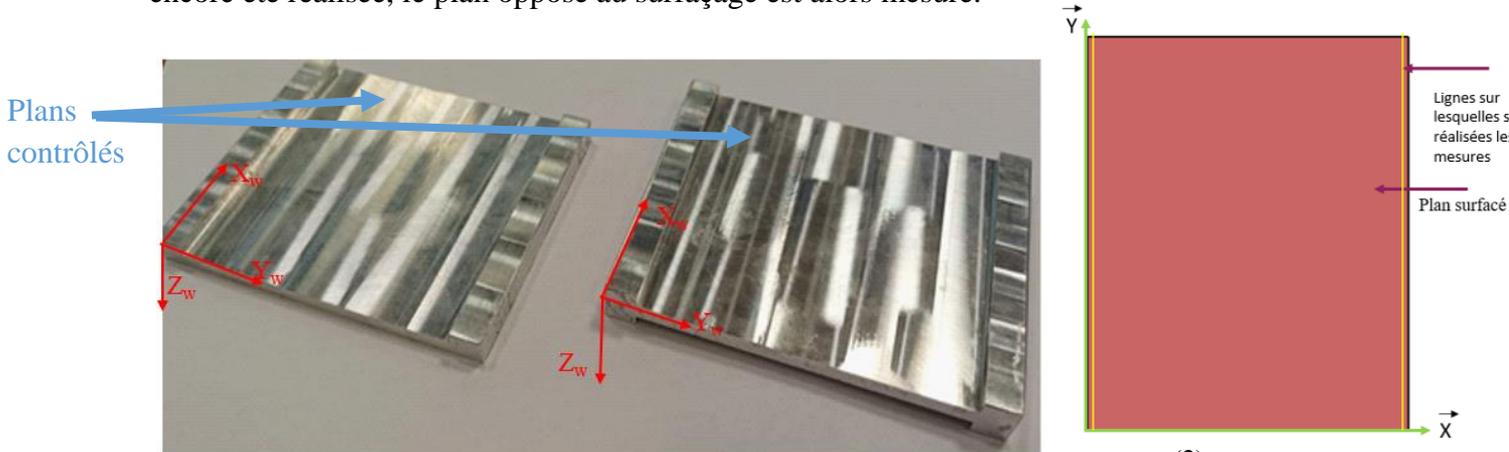


Figure 5 : (1) Géométrie de l'éprouvette réalisée en  $2^{1/2}$  axes (à gauche) et en 4 axes (à droite) (2) Méthode de palpage

### 3 Résultats

#### 3.1 Influence de l'ordonnancement des phases sur le défaut de planéité.

La Figure 6 présente l'évolution du défaut de planéité (en micromètres) au cours de la séquence d'usinage pour 3 éprouvettes ayant eu un séquençage différent. La photo du montage permet de connaître l'opération réalisée lors de la phase. Les pièces sont mesurées une fois débridées. L'allure du défaut de forme (i.e. défaut de planéité) est symbolisée par les petits traits orange.

Eprouvette P1			
Phase	1	2	3
Coté Plan ( $\mu\text{m}$ )	50	148	247
Fond rainure ( $\mu\text{m}$ )	48	140	181
Eprouvette P2			
Phase	1	2	3
Coté Plan ( $\mu\text{m}$ )	43.5	149	271
Fond rainure ( $\mu\text{m}$ )		126	234
Face Rainure ( $\mu\text{m}$ )	41		
Eprouvette P3			
Phase	1	2	3
Coté Plan ( $\mu\text{m}$ )	50	142	234
Fond Rainure ( $\mu\text{m}$ )	50	120	212

Figure 6 : Défaut de planéité obtenu à l'issue des différentes phases

Le défaut de planéité du plan est similaire puisque compris entre 41 et 50  $\mu\text{m}$  quelle que soit l'opération réalisée en phase 1. Cette constatation est encore une fois valide à l'issue de la seconde opération puisque le défaut de planéité est compris dans un intervalle de 7  $\mu\text{m}$  pour les 3 éprouvettes. En revanche, une plus grande dispersion est observée pour le défaut de planéité de la rainure avec un écart maximal de 20  $\mu\text{m}$ . Enfin, une augmentation de 100  $\mu\text{m}$  du défaut est observée après la troisième opération puisque l'éprouvette P2 présente un défaut de planéité jusqu'à 16 % plus important, soit 37  $\mu\text{m}$ . Cette augmentation s'élève jusqu'à 30 % (53  $\mu\text{m}$ ) pour la rainure.

### 3.2 Influence du nombre de phases sur le défaut de planéité et répétabilité

Deux gammes d'usinage sont comparées. La première est effectuée en deux phases (éprouvettes P5 et P6, ce qui permet d'observer aussi la répétabilité de la gamme) tandis que la seconde comporte 4 phases (éprouvette P4). La séquence d'usinage est similaire à celle présentée en Figure 3. Au lieu de faire une opération en plusieurs passes sur 3 mm celle-ci est réalisée en 2 phases où 1,5 mm sont enlevés. Chacune des gammes amène à une géométrie finale théoriquement identique. Les tableaux en Figure 7 et Figure 8 représentent les résultats de caractérisation géométriques à l'issue des deux gammes. La première opération de chaque gamme ne joue pas un rôle prépondérant puisque les défauts de planéité constatés sont compris dans un intervalle de 9  $\mu\text{m}$ . En revanche, le défaut de planéité augmente de 400 % pour la rainure et de 360 % pour le plan surfacé lors de la seconde phase dans le cas des éprouvettes P5 et P6. Une telle augmentation n'est pas constatée sur l'éprouvette P4 même si le défaut a doublé. Il faut cependant noter que l'enlèvement de matière n'est que de 1.5 mm pour chaque phase après la seconde opération pour cette éprouvette.

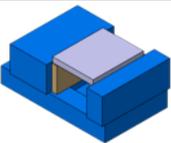
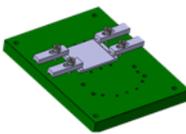
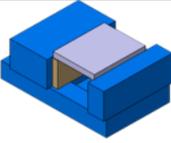
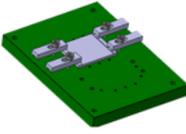
Eprouvette P4								
	Phase	1	2	3	4	3	4	
Coté Plan ( $\mu\text{m}$ )	37	74	242	267				
Fond rainure ( $\mu\text{m}$ )		63	210	244				
Face Rainure ( $\mu\text{m}$ )	39							

Figure 7 : Défaut de planéité après chaque phase pour l'éprouvette P4

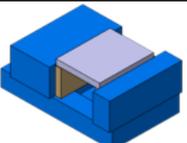
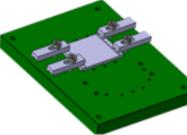
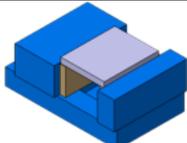
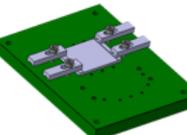
Eprouvette P5					Eprouvette P6				
	Profondeur de l'opération	3 mm	3 mm	Profondeur de l'opération		3 mm	3 mm		
Plan ( $\mu\text{m}$ )	47.2	217		50.9	219				
Fond rainure ( $\mu\text{m}$ )		179			186				
Face rainure	34.2			13.4					

Figure 8 : Défaut de planéité après chaque phase pour les éprouvettes P5 et P6

La phase n°3 contribue le plus aux défauts géométriques de l'éprouvette P4 puisque le défaut de planéité, une fois pièce débridée, augmente de 245 % pour le fond de la rainure et de 218 % pour le plan surfacé. La dernière phase contribue très peu au défaut de planéité constaté à l'issue de l'usinage puisque l'augmentation, pour le défaut de planéité de la face surfacée et du fond de la rainure, est de seulement 10 % par rapport à la phase n°3. Finalement, l'éprouvette P4 présente des défauts de planéité supérieurs allant jusqu'à respectivement 50  $\mu\text{m}$  pour le plan et 56  $\mu\text{m}$  pour la rainure.

La répétabilité des essais a été testée dans le cas d'un usinage en deux phases. La Figure 8 montre que les défauts obtenus sur les éprouvettes P5 et P6 sont du même ordre de grandeur avec respectivement 2 et 70  $\mu\text{m}$  d'écart. De plus, la Figure 9 indique que la forme de ce défaut est identique puisque les courbes présentent sont semblables dans différentes sections. L'écart relatif maximum entre deux points étant de 20  $\mu\text{m}$ .

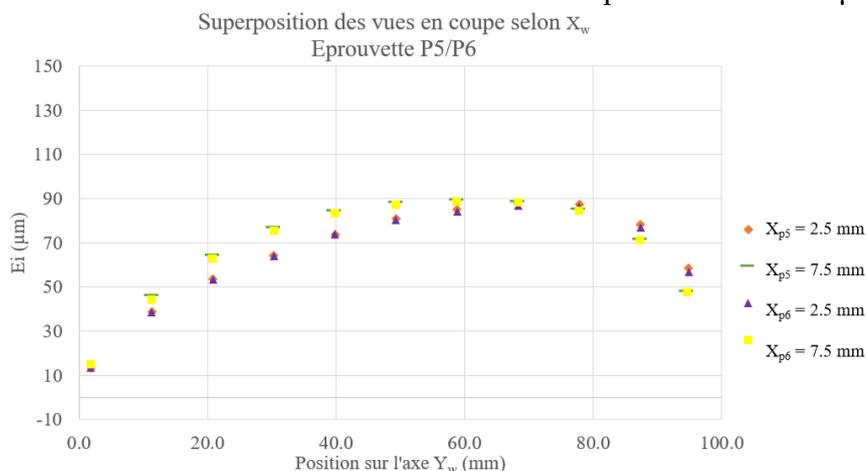


Figure 9 : Forme du défaut de planéité sur le plan surfacé ramené dans le plan XZ

### 3.3 Comparaison entre un usinage avec un retournement en 4 axes sans débridage

La géométrie de l'éprouvette est visible sur la Figure 1. La rainure\_1 est celle réalisée en premier tandis que la rainure\_2 est celle réalisée lors de la seconde phase. La Figure 10 présente le défaut de planéité obtenu selon la méthode de retournement (i.e. par recours aux axes machines autrement-dit par rotation du plateau, ou manuellement). Les défauts de planéité indiqués sont ceux à l'issue des deux phases d'usinage. Le défaut de planéité augmente de 111 % pour l'éprouvette P8 qui a été usinée sur le montage 2<sup>1/2</sup> axes avec retournement manuel (pièce débridée, retournée, rebridée). Le retournement manuel sur l'essai 4 axes augmente le défaut de planéité de près de 30% vis-à-vis d'un essai avec retournement via les axes machines. Enfin, l'essai avec le raidisseur met en évidence un impact non négligeable puisque lorsque ce dernier est présent le défaut de planéité pour la rainure\_2 est diminué de 73 % soit 31  $\mu\text{m}$ .

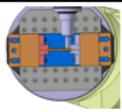
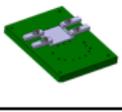
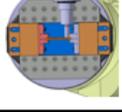
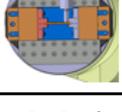
Retournement	Montage	Eprouvette	Planéité finale rainure_1	Planéité finale rainure_2
4 ème axe		P7	51.8	57.8
Manuel		P8	55	158
Manuel		P9	42.6	74.6
4 ème axe et mise en place d'un raidisseur		P10	52.1	43.1

Figure 10 : Défaut de planéité obtenu à l'issue des opérations d'usinage avec différentes méthodes de retournement

La Figure 11 présente la forme du défaut de planéité qui est obtenue par les différentes méthodes de retournement dans le cas de l'usinage en 4 axes et 2<sup>1/2</sup> axes. Si les ordres de grandeurs des défauts de planéité mesurés sont similaires, comme vu précédemment, les allures des défauts ne sont pas identiques. L'éprouvette P7 présente un profil homogène dans chaque section hormis sur la seconde rainure où la section se situant au milieu de l'éprouvette concentre la majorité du défaut. L'éprouvette P8 présente un profil bombé déjà constaté dans d'autres essais en 2<sup>1/2</sup> axes. En revanche, ce n'est pas le cas pour l'éprouvette P7 où le profil est plutôt invariant suivant la direction Z<sub>w</sub> à X<sub>w</sub> fixé pour la première rainure. Le défaut de planéité constaté sur la seconde rainure provient majoritairement du milieu de l'éprouvette comme indiqué par la Figure 11.

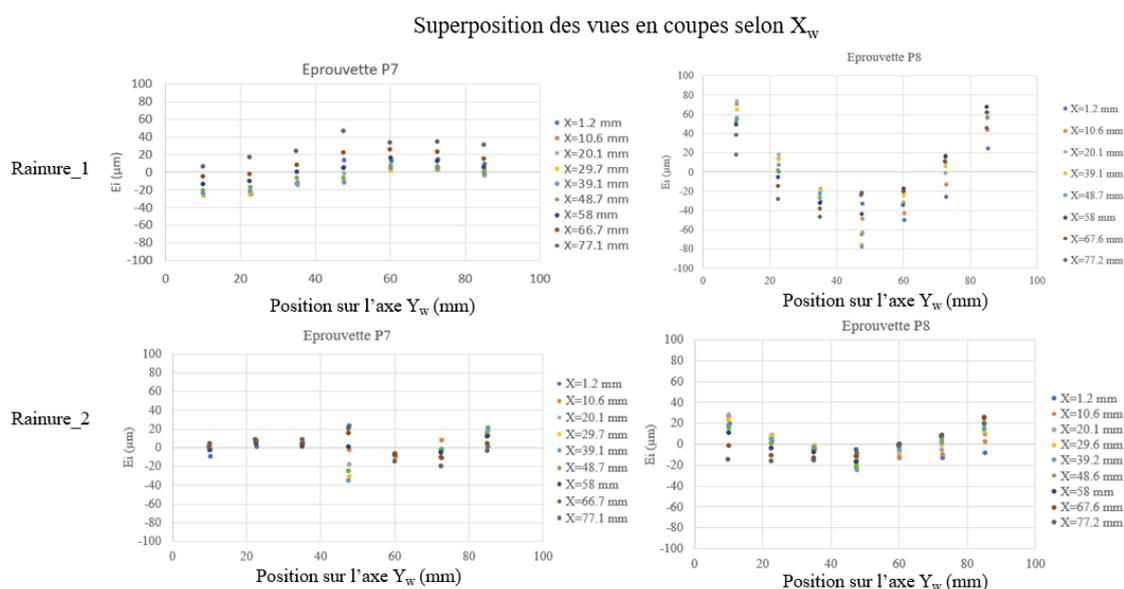


Figure 11 : Allure du défaut de forme des éprouvettes P7 et P8 ramené dans le plan (X<sub>w</sub>, Z<sub>w</sub>)

## 4 Discussions

L'influence de l'ordonnement des phases d'usinage semble, à première vue, avoir un effet assez faible lors de la série d'essai  $2^{1/2}$  axes ou 4 axes. Cependant, lorsque le surfaçage est réalisé en seconde phase, le défaut de planéité obtenu est plus important. Cela est dû à l'amincissement de la pièce en son centre. Cette partie n'étant soutenue par aucun appui hormis sur les extrémités, la pièce se retrouve être beaucoup plus sensible aux efforts d'usinage et donc à la déflexion sous charge.

Le nombre de phases (i.e. de retournements) pour réaliser la pièce joue un rôle prépondérant. Ainsi, leur multiplication ne permet pas de réduire le défaut généré aux phases précédentes mais au contraire va augmenter ce défaut. Il est probable que le rééquilibrage des contraintes résiduelles internes à chaque phase génère des distorsions importantes. Cependant, il est à noter qu'un effet de seuil semble arriver après la 3<sup>ème</sup> phase puisque le défaut généré n'augmente que relativement peu (10 % contre 340 % pour la phase 3). Il est alors possible que la majorité des contraintes résiduelles aient été rééquilibrées. Le rééquilibrage est alors moins important.

La comparaison entre les essais en 4 axes et en  $2^{1/2}$  axes montre que la conception du bridage permet de limiter les défauts générés. En effet, les éprouvettes P9 et P8 sont toutes les deux retournées manuellement mais l'une présente un défaut de planéité deux fois plus important que l'autre au fond de la dernière rainure usinée. La mise en position et le maintien en position pour ces deux éprouvettes étant différents. Il est possible que le bridage soit à l'origine de cette différence de planéité. Enfin pour l'éprouvette P8, un rattrapage du défaut a sans doute eu lieu sur la première rainure usinée puisqu'un défaut de planéité de  $79\ \mu\text{m}$  (non présenté en Figure 10) a été constaté après la première opération et de seulement  $55\ \mu\text{m}$  après la seconde.

## 5 Conclusions

Cette étude présente plusieurs configurations d'usinage permettant de mettre en évidence l'influence de la gamme d'usinage sur les distorsions observées après débridage sur une géométrie en aluminium 7050-T7. Plusieurs campagnes d'essais ont été développées afin de montrer à la fois l'influence du séquençement de la gamme d'usinage mais aussi du nombre de phases.

L'étude a montré que l'ordre des opérations a une influence sur le défaut de planéité. Ce défaut est plus prononcé lorsque le surfaçage est effectué après la rainure. Cependant, l'influence des contraintes résiduelles reste encore difficile à montrer faute de contrôles de ces dernières via diverses méthodes telles que celles présentées par [Rossini et al, 2012]. De plus l'étude a permis de mieux comprendre à partir de quel moment dans une gamme d'usinage le défaut apparaît et dans quelle mesure la pièce va continuer à se déformer lorsque le nombre de séquences augmente.

La dernière campagne d'essai avait pour objectif d'établir une comparaison entre un usinage réalisé en  $2^{1/2}$  axes et un usinage en une seule phase (4 axes). Les distorsions sont beaucoup moins importantes dans le second cas de figure mais n'ont plus la même forme. Ainsi, la manière de réaliser la mise en position et le maintien en position influence le défaut de planéité de manière conséquente puisqu'on observe un défaut deux fois plus important entre ces deux configurations.

Finally, a large number of observations have been made in this study. The conclusions of the work allow us to envisage necessary perspectives for a complete understanding of the phenomena at play. In fact, these phenomena will influence the defect observed as a result of the sequence of machining. Firstly, the distribution of the removal of material vis-à-vis of the neutral fiber is also to be explored. In this study all the tests present a removal of material sensibly symmetric (notably those in 4 axes). More asymmetric tests would be interesting to observe the consequences on the balancing of residual stresses and therefore the distortions. Finally, a complete measurement of the specimen during and after machining would allow us to observe the variations of the thickness of the chip generated to differentiate the deflection under load of the balancing of constraint.

## 6 Bibliographie :

- [Cerutti 2016] [Thèse] Cerutti, X., *Numerical modelling and mechanical analysis of the machining of large aeronautical parts: Machining quality improvement*. Mines Paris, 2016
- [Cherif, 2019] [Thèse] Iheb Cherif. *Modélisation et validation expérimentale de la distorsion de plaques usinées*. ENSAM, 2019.
- [Denkena et al., 2008] B. Denkena, D. Boehnke, et L. de León, « Machining induced residual stress in structural aluminum parts », *Prod. Eng. Res. Devel.*, vol. 2, n 3, p. 247-253, sept. 2008, doi : 10.1007/s11740008-0097-1.
- [Garcia, 2010] [Thèse] Leon Garcia, L. R. *Residual stress and part distortion in milled aerospace aluminium*. Universität Hannover, 2010.
- [Hassini, 2015] [Thèse] Sami Hassini. *Qualification multi-critères des gammes d'usinage : application aux pièces de structure aéronautique en alliage Airware®*. Université Blaise Pascal -Clermont-Ferrand II, 2015
- [Ping et al., 2020] Z. Ping, Y. Xiujie, W. Penghao, et Y. Xiao, « Surface integrity and tool wear mechanism of 7050-T7451 aluminum alloy under dry cutting », *Vacuum*, (184), 2021, doi : 10.1016/j.vacuum.2020.109886.
- [Rossini et al, 2012] Rossini, N.S., Dassisti, M., Benyounis, K.Y., Olabi, A.G., 2012. *Methods of measuring residual stresses in components*. *Materials & Design* 35, 572–588. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022>
- [Siebenaler et al, 2006] Siebenaler, S.P., Melkote, S.N., 2006. *Prediction of workpiece deformation in a fixture system using the finite element method*. *Int J Mach Tool Manu* 46, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.04.007>
- [Tang et al, 2013] Tang, Z.T., Yu, T., Xu, L.Q., Liu, Z.Q., 2013. *Machining deformation prediction for frame components considering multifactor coupling effects*. *Int J. Adv. Manuf. Technol.* 68, 187–196. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4718-7>
- [Yang et al., 2014] Y. Yang, M. Li, et K. R. Li, « Comparison and analysis of main effect elements of machining distortion for aluminum alloy and titanium alloy aircraft monolithic component », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 70, n 9-12, p. 1803-1811, févr. 2014, doi : 10.1007/s00170-013-5431x
- [Wang et al, 2018] Wang, J., Zhang, D., Wu, B., Luo, M., 2018. *Prediction of distortion induced by machining residual stresses in thin-walled components*. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 95, 4153–4162. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1358-yABA>