

Simulation numérique de l'usinage

Essais de fraisage

1. Récapitulatif

Au cours de la recherche, nous avons été confrontés à de nombreux problèmes. La plupart de ceux-ci sont dus au fait que les conditions d'essai sont "hors-normes" - pièce souple, conditions de coupe non-optimales, ... - afin de tenter d'obtenir un défaut de forme mesurable. Tous les problèmes rencontrés et les constatations faites lors de la recherche sont cités ci-dessous.

Vibrations

Des vibrations ont perturbé de nombreux essais en produisant des surfaces "ondulées". Ces vibrations sont dues principalement de la très grande souplesse de la pièce. Cependant, on a aussi constaté qu'elle pouvaient être engendrées par la machine. Lors des essais à une dent, la place de la plaquette par rapport aux deux clavettes d'entraînement du porte fraise influence le comportement dynamique de l'ensemble pièce - outil - machine.

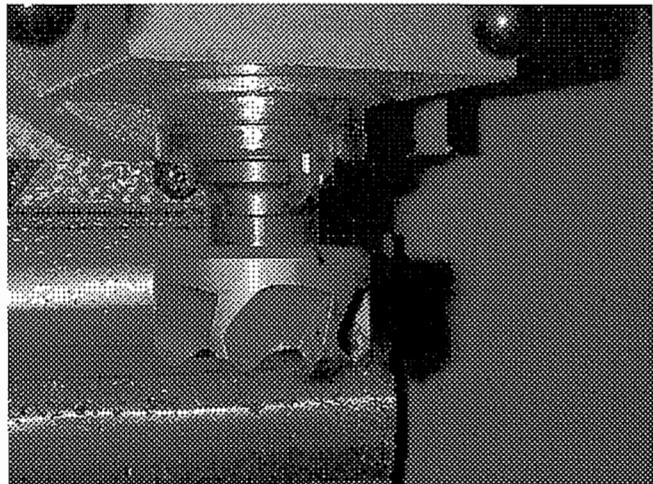


Figure 1 : position de la plaquette

Si la plaquette n'est pas au droit d'une des clavettes, des vibrations importantes apparaissent (figure 1). On peut expliquer cela par un jeu dans le porte-fraise qui est d'autant plus excité que les forces mises en jeu sont très faibles (Aluminium).

Réglage des dents

Pour les essais multi-dents (fraise à 6 dents ou à 5 dents), les profils mesurés présentent des ondulations qui ressemblent à des vibrations. En fait, elles sont dues au fait que les dents de la fraise ne sont pas toutes à la même hauteur. Il y a donc une dent qui "trace" ce qui fait que la rugosité dépend alors de l'avance par tour au lieu de l'avance par dent. Les mesures des pièces sont donc plus difficiles à interpréter. C'est en partie pour cette raison que l'on a opté finalement pour un essai avec une seule dent.

Variation de la raideur

Pour obtenir une grande souplesse, la pièce est rainurée sur la face inférieure. L'épaisseur de matière enlevée est importante (3.5 mm) afin d'avoir les forces de coupe les plus grandes possible. De ce fait, l'épaisseur de matière au niveau de la rainure passe de 6 à 2.5 mm. La raideur de la pièce diminue donc fortement entre le début et la fin de l'usinage. Contrairement aux hypothèses Sinus (calcul sur le maillage de la pièce finie), il faut alors utiliser plusieurs maillages intermédiaires de la pièce pour se rapprocher au mieux de la réalité physique.

Entrée et sortie des dents

L'entrée et la sortie des dents dans la matière se fait progressivement et de ce fait, les forces augmentent et diminuent de la même manière. Dans la modélisation Sinus par contre, les forces sont calculées avec la profondeur de passe nominale même sur les bords de la surface. Il faut donc déduire des profils ou des surfaces mesurées les zones correspondant à l'entrée et à la sortie des dents. Pour la fraise à 45° par exemple, et pour une profondeur de passe de 3.5 mm, la zone "transitoire" peut faire jusqu'à 3.5 mm de large.

Bridage déformant

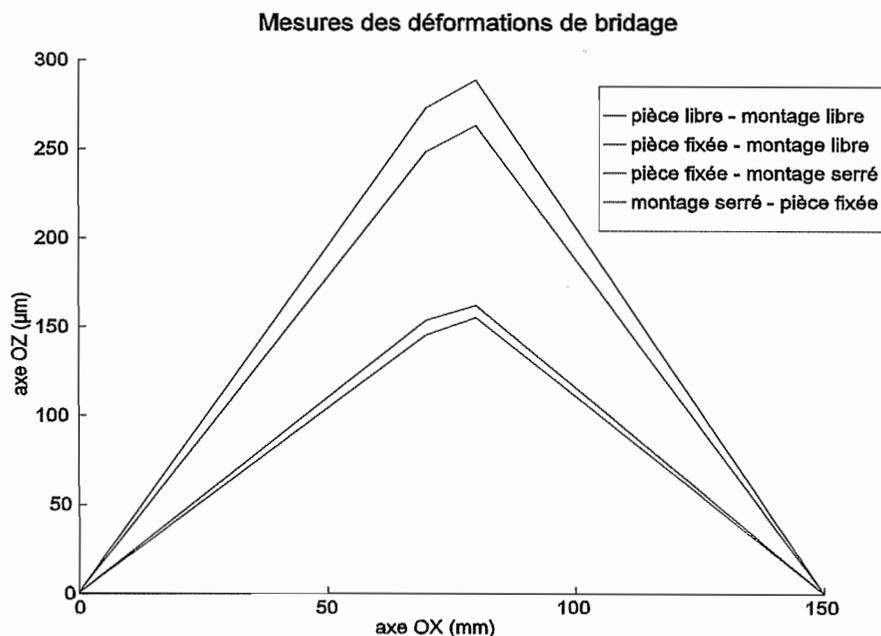


Figure 2 : déformation due au bridage

Initialement, le montage est serré dans un étau hydraulique. Il est constitué d'une plaque en acier d'environ 20 mm d'épaisseur. Après vérification, il apparaît qu'il se déforme de façon importante lorsqu'on serre l'étau. La figure 2 montre les profils mesurés sur la face inférieure d'une pièce dans les positions libre, fixée sur le montage non-serré et fixée sur le montage serré. De fait, il y

avait dans les mesures des pièces réalisées jusqu'à présent une part importante due au défaut de bridage.

Contraintes résiduelles

Le matériau utilisé - plaque d'aluminium laminée - contient des contraintes résiduelles non-négligeables. Lors de la réalisation du brute, la pièce se déforme sous l'effet des contraintes, surtout lorsqu'on rainure la face inférieure. Il faut alors rectifier celle-ci pour qu'elle repose sur les quatre butées. Après usinage, la pièce se déforme encore et la face inférieure n'est de nouveau plus plate. Pour mesurer, il faut alors fixer la pièce sur le dos du montage au moyen des 4 vis (voir figure 3). Il n'est pas non plus impossible que les contraintes résiduelles influencent le défaut obtenu. A mesure que la fraise avance, les contraintes dans la partie déjà coupée ne sont plus équilibrées et celle-ci tend à fléchir, entraînant le reste de la pièce. Les effets sur le défaut mesuré sont difficiles à prévoir.

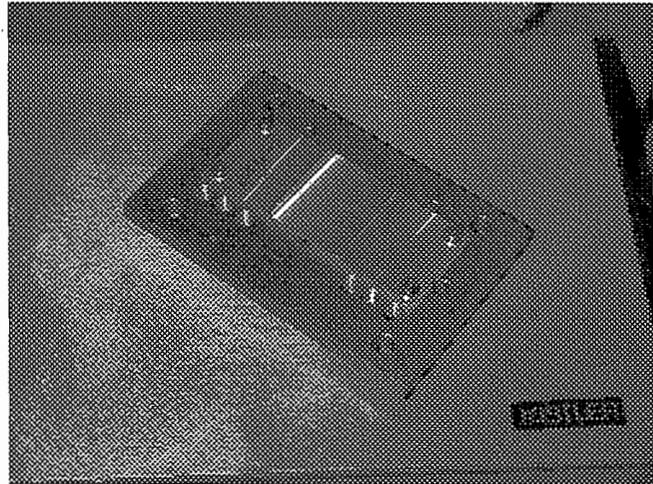


Figure 3 : position de mesure de la pièce

2. Choix de l'essai final

Afin d'éviter ou tout au moins d'atténuer les problèmes cités ci-dessus, l'essai final est défini comme suit :

- usinage avec une seule dent mise dans la position où il n'y a pas de vibrations,
- profondeur de passe plus petite (1.5 mm) mais sur une pièce plus souple au départ afin de diminuer l'effet de la variation de raideur,
- nouvelle gamme d'usinage pour la réalisation de la pièce brute afin d'éviter la rectification et de limiter l'effet des contraintes résiduelles (voir § 3),
- limitation de la zone de mesure pour éviter les zones d'entrée et de sortie des dents.

Géométrie de la pièce

La géométrie est quasiment identique à l'ancienne à part que l'épaisseur de matière au dessus de la rainure passe de 3.5 mm à 2 mm. Comme la raideur d'une plaque est proportionnelle au cube de l'épaisseur, on peut se faire une idée de la variation de raideur en prenant le rapport des épaisseurs avant et après au cube. Dans ce cas-ci, cette valeur est égale à 5.36 alors que précédemment (épaisseur passant de 6 mm à 2.5 mm), elle valait 13.82. L'usinage est donc certainement moins "lourd" qu'avant.

Bridage

La pièce est fixée sur le montage au moyen de 4 vis auxquelles on a adjoint des rondelles (figure 4). Le montage est maintenant vissé sur la platine Kistler comme pour les mesures d'efforts de coupe. Des mesures ont montré que, dans cette configuration, la pièce ne se déforme pas quand on la sert sur le montage.

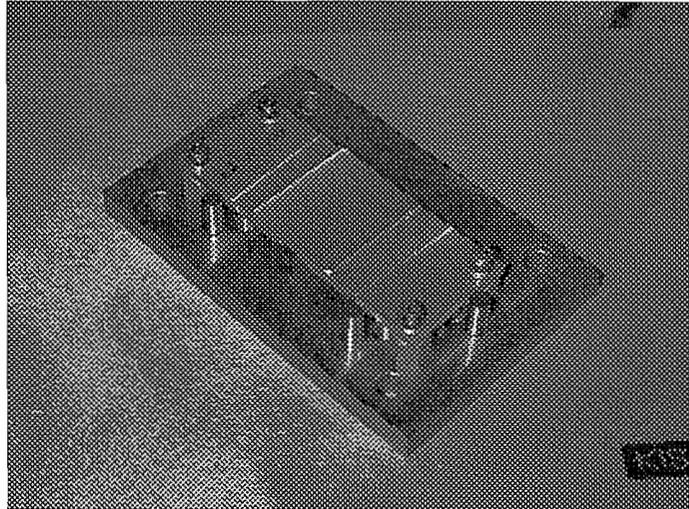


Figure 4 : montage et fixation de la pièce

Outil

On utilise la fraise à 45° avec une seule plaquette disposée au droit d'une des clavettes d'entraînement afin d'éviter les problèmes de vibration. On utilise une plaquette neuve car la plupart des plaquettes utilisées jusqu'à maintenant présentent des éclats qui sont sûrement dus aux conditions de coupe "exotiques" (vitesse de coupe très petite - 50.3 m/min) choisies pour cet essai.

Condition de coupe

Les conditions de coupe sont :

N = 200 tr/min
 $v_f = 20$ mm/min
 $a = 1.5$ mm

La trajectoire est centrée.

3. Nouvelle gamme d'usinage des pièces brutes

Jusqu'à présent, les éprouvettes avaient été usinées dans l'ordre suivant :

- ❶ amincissement des deux ailes,
- ❷ pointage des 4 trous de fixation,
- ❸ retournement de la pièce et rainurage, perçage des 4 trous de fixation.

L'expérience ayant montré que suite à l'opération 3, la surface inférieure de l'éprouvette était loin de la planéité, nous avons été amenés à ajouter l'opération suivante :

- ⑤ rectification de la face inférieure de l'éprouvette.

Cette dernière opération est en fait un pis-aller. En effet, d'une part, elle tend à corriger une mauvaise maîtrise des contraintes résiduelles et d'autre part, elle mène à des épaisseurs d'ailes variables et peu prévisibles.

Reprenant le problème à la base et tenant compte du fait qu'il fallait produire un brut plus mince, nous avons expérimenté une nouvelle gamme construite en vue minimiser les effets néfastes des contraintes résiduelles. Les opérations sont établies comme suit :

- ① rainurage,
- ② retournement de la pièce et dressage de la face supérieure,
- ③ nouveau retournement et dressage de la face inférieure,
- ④ 3ème retournement et dressage des ailes,
- ⑤ pointage des trous,
- ⑥ perçage des trous.

La question la plus intéressante était de connaître l'état de planéité de la face inférieure suite à l'opération 4. Des mesures ont été faites et ont donné une erreur de planéité d'environ 10 μm . Nous avons donc considéré que dans ces conditions, une rectification de ladite face cessait d'être nécessaire. Il nous semble que cette nouvelle gamme est fondamentalement plus saine que l'ancienne.

4. Mesures des pièces et filtrage

Les mesures ont été réalisées comme toujours à l'aide d'une machine à mesurer SURFASCAN et les résultats ont été enregistrés sous forme numérique. Ces résultats contiennent évidemment une composante de rugosité qu'il convient de filtrer. A cette fin, nous avons développé un programme fondé sur une procédure de convolution (régularisation canonique). Ce filtrage peut être modulé par un paramètre représentant le rayon d'action du processus. Le noyau de convolution a la forme générale suivante :

$$p_i = \exp\left(\frac{-1}{1 - \left(\frac{\|x_i\|}{R}\right)^2}\right)$$

La hauteur transformée Z_j d'un point j vaut alors

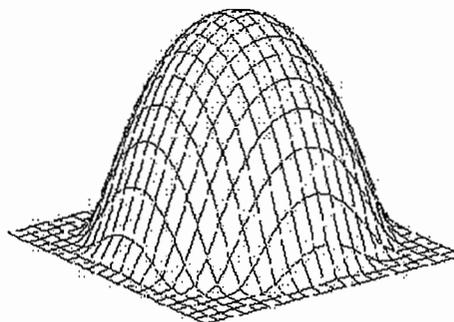


Figure 5 : masque de convolution

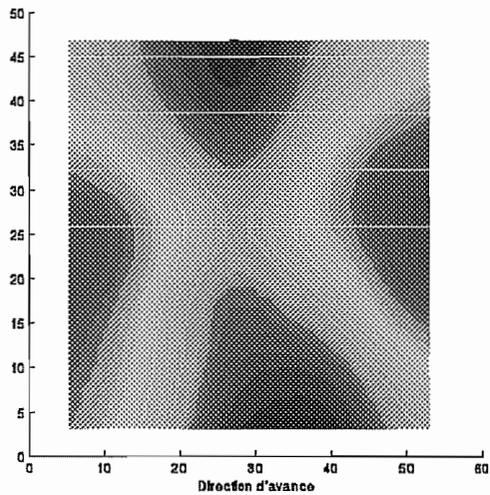


Figure 9 : défaut pièce n°3

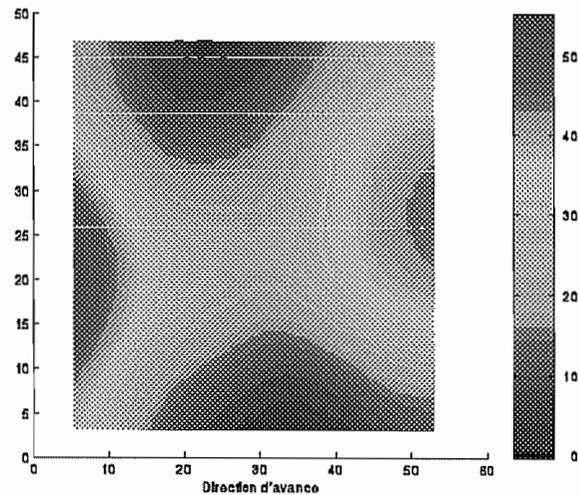


Figure 10 : défaut pièce n°4

Elles présentent toutes des allures à peu près similaires sauf la pièce n°2. On remarque :

- ❶ que la surface présente un creux dans la direction d'avance (figure 11). Ceci est dû au fait qu'au milieu, la pièce n'est soumise qu'à de la flexion sous l'effet des forces de coupe tandis que sur les bords s'ajoute de la torsion et donc un défaut plus important;
- ❷ que dans la direction perpendiculaire à l'avance, le défaut est plus important au milieu de la pièce (figure 11) car c'est là que la souplesse est la plus élevée et que les forces sont plus grandes (proportionnelles à $\cos \theta$, où θ est l'angle par rapport à la direction d'avance);

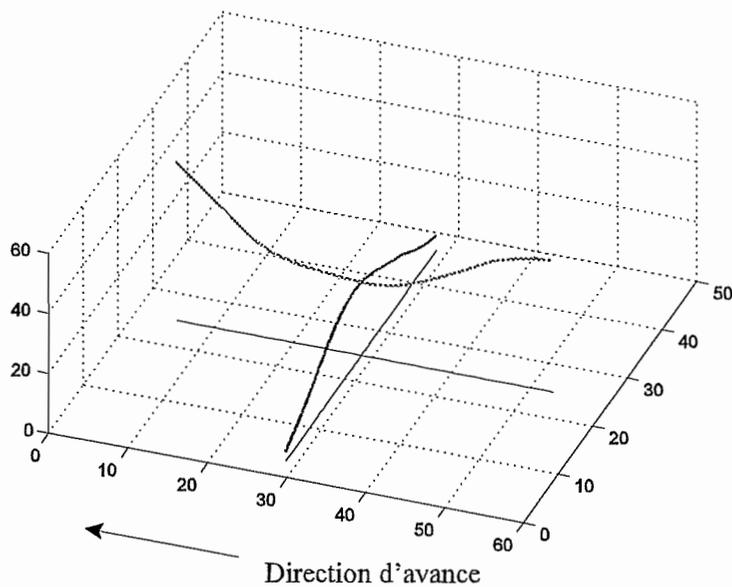


Figure 11 : Allure du défaut dans les directions d'avance et perpendiculaire

$$Z_j = \frac{\sum_V p_i Z_i}{\sum_V p_i}$$

où le voisinage V est l'intersection du cercle de rayon R centré au point j avec la surface mesurée. L'adoucissement de la surface est d'autant plus prononcé que le rayon R est grand.

5. Résultats expérimentaux

Quatre pièces ont été usinées. La surface mesurée est représentée à la figure 6. La direction d'avance de la fraise est de la droite vers la gauche. La mesure s'effectue toujours avec la pièce vissée sur le dos du montage car, malgré les précautions prises, la pièce se déforme quand même un peu sous l'effet des contraintes résiduelles. Pour comparer avec les résultats calculés, on enlève la zone d'entrée de la dent dans la matière. Chaque mesure a été filtrée avec un masque de rayon 10 mm puis dégauchie au moindres carrés.

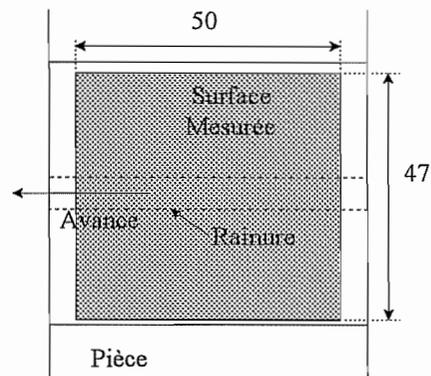


Figure 6 : surface mesurée

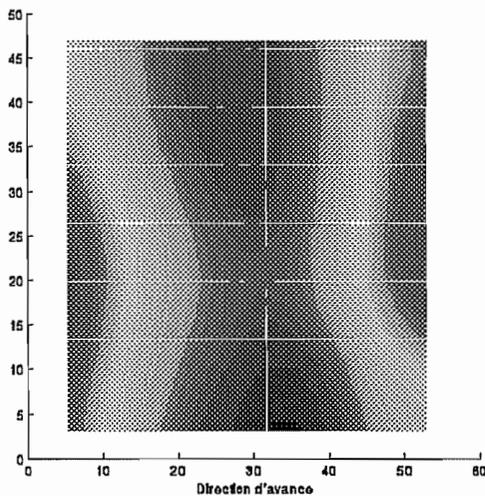


Figure 7 : défaut pièce n°1

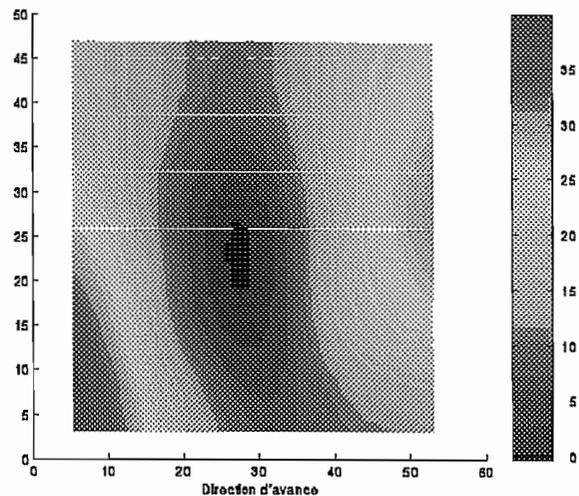


Figure 8 : défaut pièce n°2

6. Simulations numériques

Pressions spécifiques

Les pressions spécifiques et les taux d'accroissement ont été calculées à partir des mesures d'efforts de coupe avec une profondeur de passe de 3.5 mm. De nouvelles mesures avec 1.5 mm donnent des valeurs quasiment identiques des forces de coupe au rapport des profondeurs de passe près. On peut donc éviter de recalculer les caractéristiques du matériau et utiliser les valeurs suivantes :

$K_{c,11}$	m_c	$K_{f,11}$	m_f	$K_{p,11}$	m_p
590.3 MPa	0.184	193.4 MPa	0.275	106.9 MPa	0.348

Modèle EF initial

Le modèle EF est illustré à la figure 12. Il est composé de 13028 noeuds et 9216 éléments (à 8 noeuds - 1^{er} degré). Les conditions limites sont constituées au niveau des trous de fixations de 3 couronnes de noeuds bloqués (sur les 3 composantes) sur les faces inférieures et supérieures (figure 13). Il n'y a qu'une seule couche d'éléments au niveau de la rainure.

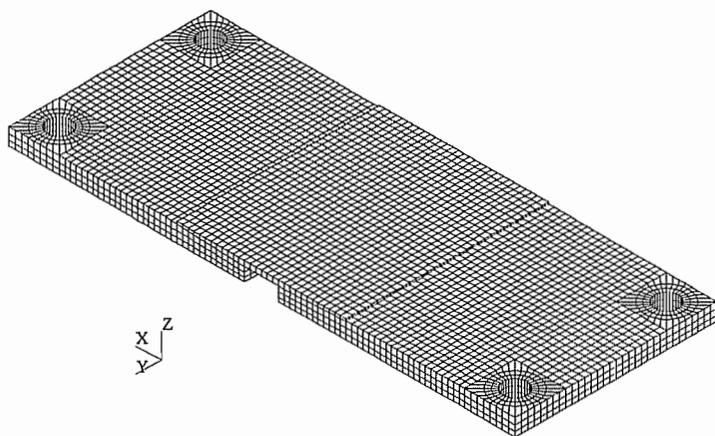


Figure 12 : maillage initial

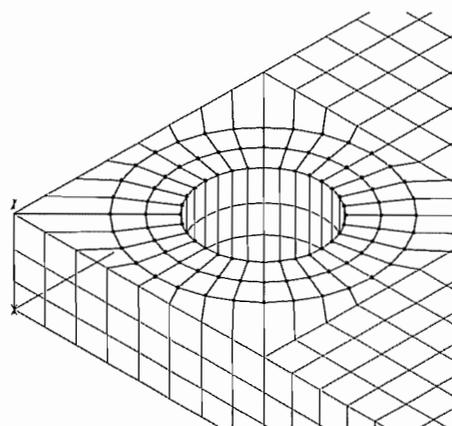


Figure 13 : fixations

Résultat

Le défaut calculé est présenté à la figure 14. La valeur en chaque point de la grille de mesure est calculé par interpolation des valeurs aux noeuds du maillage (au moyen des fonctions de forme). La surface est limitée à la même zone que pour les mesures et est dégauchie aux moindres carrés. La topologie est similaire à celles des mesures sauf que le creux central est moins prononcé. Par contre, l'amplitude du défaut est environ deux fois plus faible (25 μm au lieu de 50 μm pour les mesures).

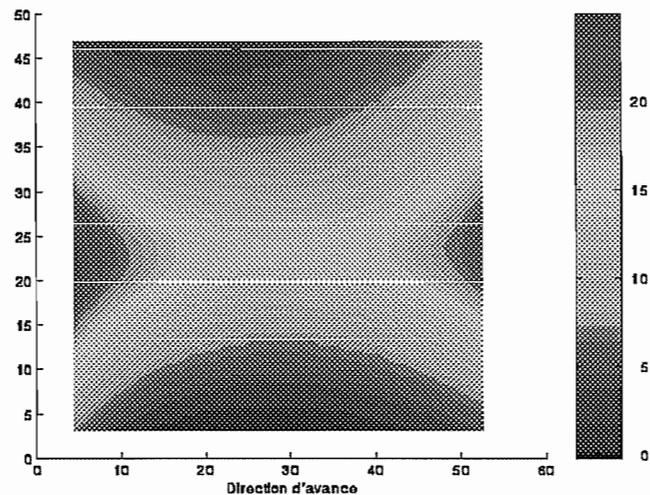


Figure 14 : résultat 1^{er} calcul

Variation de raideur

Afin de vérifier que la diminution de raideur au cours de l'usinage ne modifie pas la topologie obtenue, les calculs ont été réalisés sur 5 maillages intermédiaires de la pièce - pièce brute puis 4 positions de la fraise. Le résultat est alors obtenu en reconstituant un défaut par interpolation linéaire à partir des 5 défauts calculés. La topologie est plus proche des mesures mais l'amplitude est un peu plus faible : 23.5 μm (figure 15). Ce cas-test est donc plus en accord avec les hypothèses Sinus (usinage "léger") puisque la variation de raideur n'a que très peu d'influence sur le résultat.

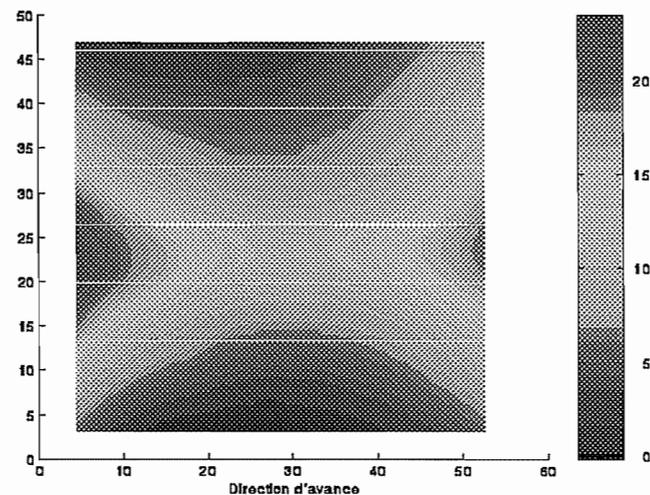


Figure 15 : résultat avec maillages intermédiaires

Finesse du maillage et conditions limites

La souplesse de la pièce provient principalement de la rainure. A cet endroit, le modèle EF ne comporte qu'une couche d'éléments et on peut donc se demander si cette modélisation est suffisante pour obtenir la flexion de la pièce.

D'autre part, la modélisation du bridage - fixation des 3 composantes sur les deux faces - est assez "brutale". Si, au contact butée-pièce, on peut penser que les déplacements sont effectivement

bloqués, par contre, sur la face supérieure de la pièce, il n'y a pas de raison de bloquer les déplacements.

Le problème est alors de trouver une modélisation adéquate pour le contact tête de vis - face supérieure de la pièce: fixer seulement certaines composantes, ajouter des éléments de raideur,... Afin de tester le moins de solutions possibles, on choisit de laisser libre les noeuds de la face supérieure ce qui correspond à la modélisation "minimale" du bridage.

Nouveau maillage

Un modèle EF plus fin (deux couches d'éléments au niveau de la rainure) avec des éléments paraboliques a été réalisé. Une seule couronne de noeuds sur la face inférieure est fixée au moyen d'éléments de ressort de raideur $0.5 \cdot 10^6$ N/mm en transversal et 10^6 N/mm en normal. Le défaut est plus grand que pour le calcul précédent mais la topologie ne change presque pas.

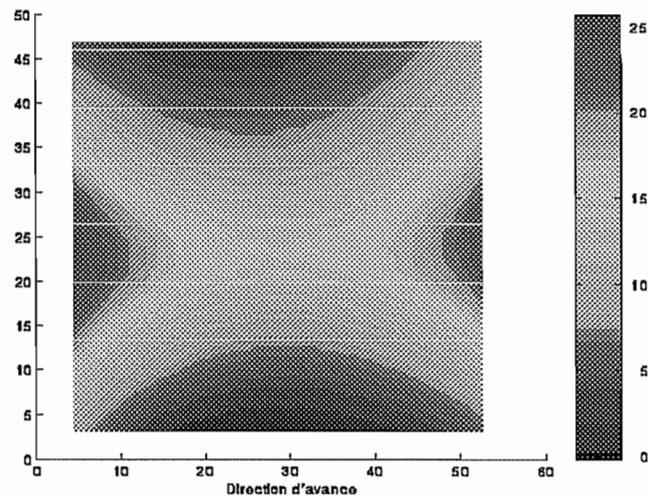


Figure 16 : résultat avec maillage raffiné et nouvelles CL

Nouveau calcul des pressions spécifiques

Comme ni le raffinement du maillage, ni la modification des CL n'améliorent le résultat calcul, on peut se poser la question de savoir si la détermination des pressions spécifiques n'est pas entachée d'erreur. La figure 17 montre les 3 forces mesurées sur un tour de fraise pour un essai à une dent. Sur cet exemple, on voit que le signal pour les forces F_y et F_z est plus ou moins bon mais pas pour F_x . Si on observe le signal sur plusieurs tours de fraise, des "accidents" de ce genre se reproduisent très souvent.

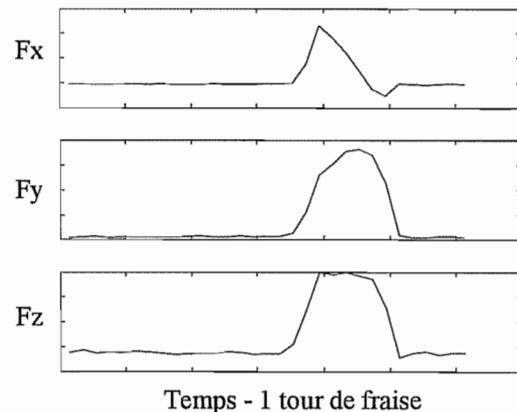


Figure 17 : Forces mesurées sur un tour

Pour déterminer les pressions spécifiques, on calculait la moyenne de chaque force sur plusieurs périodes puis on la comparait à la moyenne des forces théoriques (voir annexe). Or, la moyenne des forces mesurées plus petite que sa valeur "normale" à cause des perturbations du signal.

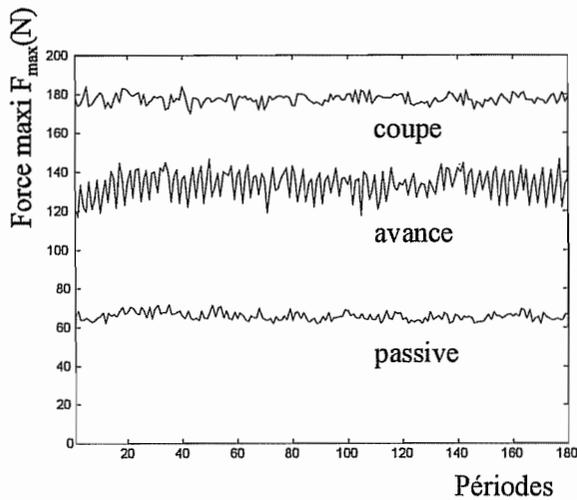


Figure 18 : Maximums des forces mesurées

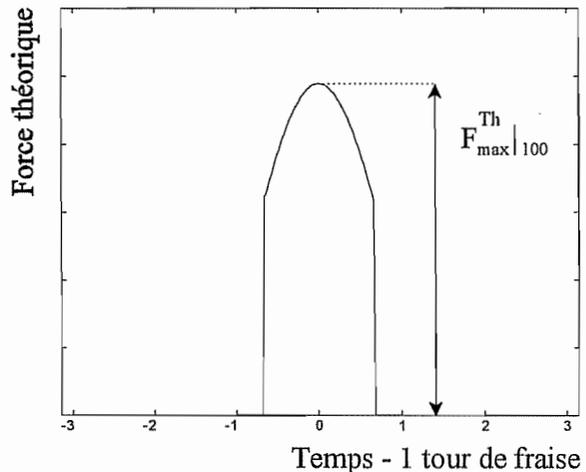


Figure 19 : Force théorique

Plutôt que de comparer les moyennes mesurées et calculées pour déterminer les pressions spécifiques, on peut comparer les maximums des forces. En effet, si on reporte sur un graphique les “pics” des forces mesurées sur plusieurs périodes, on constate que leurs valeurs sont presque constantes (figure 18). On calcule d’abord la force maximum théorique $F_{max}^{th} |_{100}$ pour une pression spécifique de 100 Mpa (figure 19) puis on détermine la pression spécifique par une simple règle de trois :

$$K = \frac{\bar{F}_{max}^{mes}}{F_{max}^{th} |_{100}} 100$$

Les taux d’accroissement restant inchangés, les nouvelles pressions spécifiques sont environ deux fois plus grandes avec la nouvelle méthode de calcul.

	coupe	avance	passive
Pression spécifique (MPa)	830	489	183

7. Simulations finales

Avec les nouvelles valeurs des pressions spécifiques et des CL de type “encastrement” (une couronne de noeuds fixés par trou), on obtient une amplitude du défaut légèrement plus petite que les valeurs mesurées. Or ces CL sont un peu trop rigides car la pièce peut vraisemblablement se soulever légèrement des butées. Pour vérifier cela, on définit de nouvelles CL où un seul noeud est bloqué par trou de fixation. Ces CL sont trop “souples” car elles correspondent en fait à un simple appui de la plaque en 4 points. Les amplitudes des défauts calculés respectivement avec les CL “encastremets” et “appuis” devraient encadrer les amplitudes des défauts mesurés.

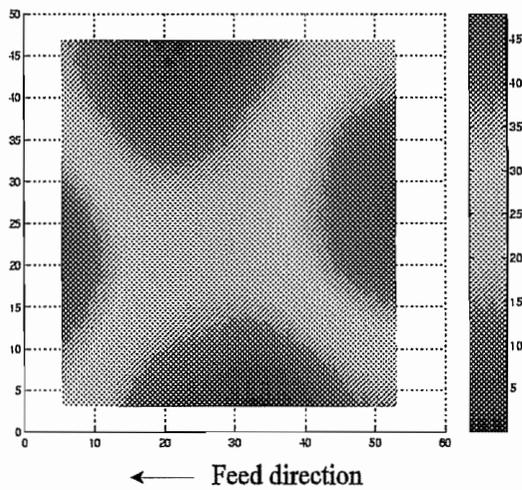


Figure 20 : pièce mesurée n° 4

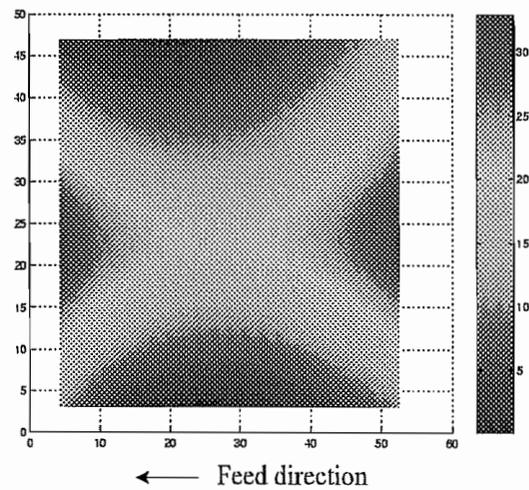


Figure 21 : simulation CL "encastrement"

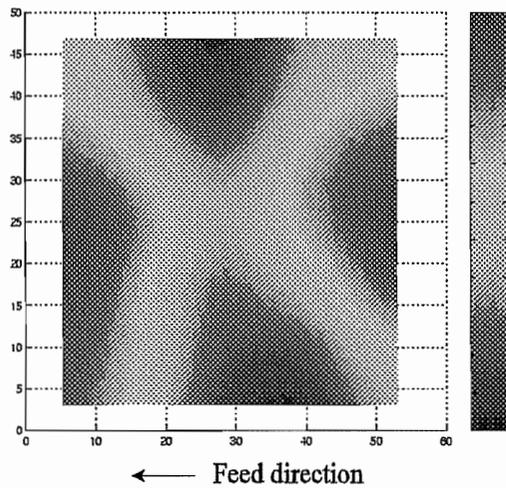


Figure 22 : pièce mesurée n°3

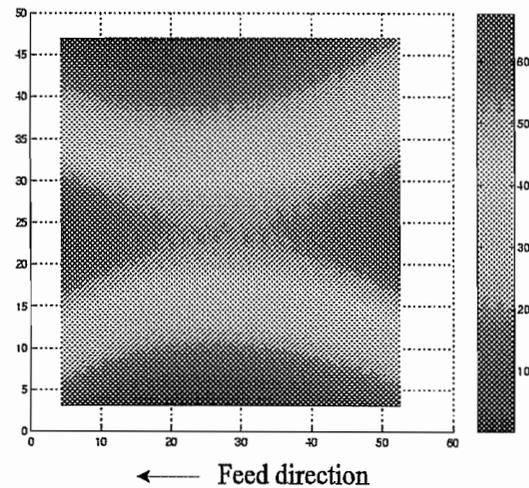


Figure 23 : simulation CL "appui"

Les figures 21 et 23 montrent les défauts calculés avec les deux types de CL. Les amplitudes encadrent bien les amplitudes des défauts mesurés (figures 20 et 22). La topologie est cependant plus proche avec les CL "encastrement".

8. Conclusion

Sur le cas simple de la plaque rainurée avec un usinage à une seule dent, on obtient par calcul un défaut dont la topologie est identique à celle des mesures. Avec les deux types de CL, "encastrement" et "appui", on obtient des amplitudes assez proches des mesures.

Annexe : Rapport intermédiaire (octobre 98)

Simulation numérique de l'usinage

Essais de fraisage

1. Plan de travail

La dernière partie du contrat comprend les étapes suivantes :

- ① ré-étalonnage de la platine Kistler sur des gammes plus proches des forces mesurées;
- ② fabrication des pièces brutes. La face inférieure est rectifiée afin de pouvoir mesurer les pièces vissées sur un support plat ce qui élimine la flexion due aux contraintes résiduelles;
- ③ réalisation du premier essai (une série de 3 pièces) avec les mêmes conditions que celles des essais préliminaires. La profondeur de passe peut être plus importante afin d'augmenter les forces de coupe et de réduire l'incertitude de mesure;
- ④ réalisation du second essai avec une fraise différente, si possible avec un angle principal différent du premier essai (75 ° par exemple), et un trajet d'outil décalé;
- ⑤ réalisation d'un usinage avec recoupe de la surface usinée par la fraise;
- ⑥ mesure des efforts de coupe avec les deux fraises afin de déterminer les pressions spécifiques et les taux d'accroissements (nécessite deux mesures avec des avances différentes pour chacune des fraises);
- ⑦ simulations numériques des deux essais et comparaisons avec les résultats mesurés.

2. Etalonnage de la platine Kistler

L'étalonnage est réalisé par la firme EMTEC de Bruxelles. La platine doit être étalonnée sur 3 gammes de mesures :

F_x F_y F_z [0 ... 300] N

F_x F_y F_z [0 ... 1000] N

F_x F_y F_z [0 ... 3000] N

Contrairement aux essais réalisés lors de la phase précédente, les gammes correspondent mieux aux forces mesurées ce qui devrait permettre de diminuer l'incertitude sur les mesures des efforts de coupe.

3. Réalisation des pièces brutes

12 pièces ont été réalisées. Toutes les pièces proviennent de la même plaque d'aluminium. Elles portent les labels A à L.

Le rainurage de la face inférieure de la pièce provoque un important fléchissement à cause des contraintes résiduelles. Après usinage, le fléchissement est encore amplifié ce qui empêche de mesurer le défaut réellement dû aux forces d'usinage. On rectifie la face inférieure des pièces afin de pouvoir les mesurer complètement fixées sur un support plat (vissées sur l'autre face du montage) ce qui empêche le fléchissement de la pièce.

La rectification de la face inférieure modifie sensiblement les épaisseurs des pièces. De plus, comme elles ne sont pas toutes fléchies avec la même amplitude, on doit reprendre une épaisseur de matière plus ou moins grande. Les 12 pièces ont donc été mesurées en différents points afin de voir l'influence de la rectification sur les dimensions.

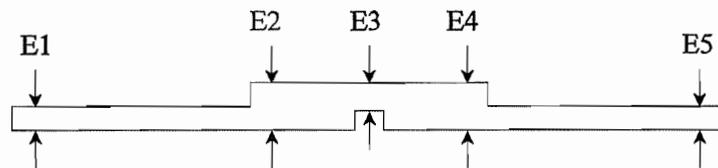


Figure 1 : épaisseurs mesurées

Les mesures ont été effectuées au moyen d'un pied-à-coulisse sur 5 points sur les deux bords de la pièce (E1 à E5 et E1' à E5'). Le tableau suivant donne les épaisseurs (en mm) mesurées sur les 12 pièces fabriquées.

pièce	E1	E1'	E2	E2'	E3	E3'	E4	E4'	E5	E5'
A	4.76	4.82	9.94	9.8	6.08	6.19	9.95	9.85	4.83	4.86
B	4.81	4.75	9.96	9.77	6.25	6.14	9.96	9.79	4.84	4.77
C	4.8	4.72	9.87	9.73	6.04	6.12	9.92	9.75	4.83	4.75
D	4.73	4.78	9.67	9.89	6.04	6.12	9.65	9.83	4.71	4.76
E	4.68	4.69	9.82	9.67	6.16	6.26	9.88	9.75	4.77	4.78
F	4.85	4.78	9.91	9.73	6.05	6.14	9.95	9.79	4.86	4.79
G	5.01	4.94	9.99	9.86	6.13	5.99	9.99	9.85	4.88	4.84
H	4.73	4.78	9.76	9.86	6.09	6.17	9.7	9.86	4.77	4.82
I	4.97	5.02	9.99	9.92	6.27	6.37	9.98	9.93	4.93	5.03
J	4.74	4.82	9.71	9.9	6.3	6.32	9.73	9.93	4.71	4.79
K	4.88	4.86	9.7	9.87	6.22	6.36	9.66	9.86	4.77	4.83
L	4.91	4.91	9.83	9.93	6.39	6.19	9.75	9.87	4.89	4.89

Il existe des différences parfois importantes entre les pièces. On sélectionne pour les deux séries de 3 pièces (une série par essai) les pièces les plus semblables soit :

pour l'essai n°1 : pièces A, E et H;
pour l'essai n°2 : pièces C, F et J.

Les autres pièces servent à faire des tests préliminaires, les mesures d'efforts de coupe et l'essai avec recoupe. Pour les simulations numériques, les modèles EF seront modifiés pour tenir compte des épaisseurs moyennes mesurées.

4. Conditions de coupe de l'essai n°1

Rappelons les caractéristiques de la fraise utilisée :

$Z = 6$ dents
 $D = 80$ mm
 $Kappa_r = 45^\circ$
 $Gamma_f = -5^\circ$
 $Gamma_p = +14^\circ$
Nuance GH1 K10

La fraise est centrée sur la surface usinée et elle s'arrête juste avant que l'arrière ne recoupe. Les conditions de coupe sont :

$a_a = 3.5$ mm
 $N = 200$ tr/min
 $v_f = 120$ mm/min

5. Conditions de coupe de l'essai n°2

C'est une fraise à 75° avec des plaquettes en carbure dont les caractéristiques sont :

$Z = 5$ dents
 $D = 80$ mm
 $Kappa_r = 75^\circ$

La trajectoire de la fraise est décalée de 7 mm vers la droite par rapport à la trajectoire de l'essai n°1. Avant la fin du trajet, l'arrière de la fraise recoupe la surface usinée. Rappelons que pour les deux essais, l'axe de la fraise n'est pas dépincé afin de ne pas obtenir un défaut de dépinçage qui masquerait le défaut dû aux efforts de coupe. Les conditions de coupe sont :

$a_a = 3.5$ mm
 $N = 200$ tr/min
 $v_f = 125$ mm/min

La vitesse d'avance choisie pour la pièce test était de 100 mm/min afin de garder la même avance par dent que pour l'essai n°1. Comme la mesure de la surface usinée montrait qu'une vibration relativement importante s'était produite durant l'essai, la vitesse d'avance a été augmentée pour la série afin de tenter de "calmer" les oscillations de la pièce.

6. Mesures de efforts de coupe

La chaîne de mesure des efforts de coupe est identique à celle utilisée précédemment. Les pièces utilisées pour les mesures sont plus simples que les pièces normales : pas de rainure et pas de rectification de la face inférieure. On a cependant mesuré les efforts sur une pièce normale afin de vérifier qu'il n'y a pas de différence.

Par rapport aux essais précédents, on veut déterminer non seulement les pressions spécifiques **mais aussi les taux d'accroissement** du matériau. Pour cela, on doit réaliser deux mesures d'efforts à des avances différentes pour chaque essai.

On a veillé également à ce que les filtres des amplis de charge (passe-bas et passe-haut) soient inopérants afin de ne pas "polluer" le signal mesuré. La fréquence d'acquisition est de 100 Hz. Les conditions de coupe sont identiques à celles des essais proprement dit sauf la vitesse d'avance. Pour l'essai n°2 aussi, la trajectoire est centrée afin de séparer les contributions des forces de coupe : coupe $\rightarrow F_y$; avance $\rightarrow F_x$; passive $\rightarrow F_z$.

	Nom de la mesure	Vitesse d'avance
Essai n°1	E1-120	120
	E2-150	150
Essai n°2	E2-125	125
	E2-125b	125
	E2-150	150

7. Filtrage des mesures d'efforts

Le traitement des signaux mesurés comprend trois phases :

- correction du cross-talk;
- introduction des erreurs dues aux amplis (erreurs relatives);
- filtrage des signaux (filtre elliptique) pour obtenir les moyennes;
- introduction des erreurs absolues dues aux capteurs.

Les explications sur ces différentes étapes se trouvent dans le rapport intermédiaire. Les valeurs des forces sont reprises au tableau ci-après.

	Fx		Fy		Fz	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
E1-120	1527	1799	3662	4254	1055	1357
E1-150	1793	2117	4402	5095	1239	1552
E2-125	2871	3417	450	5267	778	1078
E2-125b	2987	3535	4521	5373	88	1139
E2-150	3395	4041	5268	6189	964	1328

Les moyennes de forces et les niveaux d'incertitude sont indiqués au tableau ci-dessous.

	Fx		Fy		Fz	
	Moyenne	Incert. (%)	Moyenne	Incert. (%)	Moyenne	Incert. (%)
E1-120	1663	82	3958	75	1206	125
E1-150	1955	83	47485	73	1395	112
E2-125	3144	87	48835	79	928	162
E2-125b	3261	84	4947	86	10095	128
E2-150	3718	87	57285	80	1146	159

La mesure E2-125b a été réalisée sur une pièce normale. Par rapport à la pièce sans rainure et non-rectifiée (E2-125), les forces sont fort proches ce qui justifie le choix de pièces simplifiées pour les mesures d'efforts de coupe.

8. Calcul des caractéristiques du matériau

En partant des forces moyennes mesurées pour les deux vitesses d'avance qu'on notera A et B, on calcule les taux d'accroissement de la manière suivante.

Prenons comme exemple le cas de la force de coupe. La force exercée par une dent en fonction de l'angle θ vaut

$$F_c(\theta) = K_{c,11} \frac{a_a}{\sin K_r} (f_z \sin K_r \cos \theta)^{1-m_c}$$

Si la trajectoire est centrée, la moyenne de la force d'avance selon Y est nulle. La force moyenne pour Z dents dans la direction Y vaut donc

$$F_y = Z K_{c,11} a (\sin K_r)^{-m_c} (f_z)^{1-m_c} \int_{-\varphi_s/2}^{\varphi_s/2} (\cos \theta)^{2-m_c} d\theta$$

En posant $\psi = \int_{-\varphi_s/2}^{\varphi_s/2} (\cos \theta)^{2-m_c} d\theta$ et en considérant les deux avances A et B, on a

$$\begin{cases} F_y^A = \frac{Z K_{c,11} a}{\sin K_r^{m_c}} (f_z^A)^{1-m_c} \psi = (F_y^A)^{mes} \\ F_y^B = \frac{Z K_{c,11} a}{\sin K_r^{m_c}} (f_z^B)^{1-m_c} \psi = (F_y^B)^{mes} \end{cases} \quad (1)$$

En divisant membre à membre, on obtient

$$\left(\frac{f_z^A}{f_z^B} \right)^{1-m_c} = \frac{(F_y^A)^{mes}}{(F_y^B)^{mes}}$$

ce qui équivaut à

$$1 - m_c = \frac{\log \left(\frac{(F_y^A)^{mes}}{(F_y^B)^{mes}} \right)}{\log \left(\frac{f_z^A}{f_z^B} \right)}$$

Une fois le taux d'accroissement connu, il suffit de calculer l'intégrale ψ puis la pression spécifique $K_{c,11}$. Pour les forces d'avance et passive, on utilise la même démarche avec respectivement F_x et F_z . Cependant, pour cette dernière, l'intégrale est différente puisqu'il n'y a pas de projection et elle vaut

$$\psi = \int_{-\varphi_s/2}^{\varphi_s/2} (\cos \theta)^{1-m_p} d\theta$$

Les pressions spécifiques et les taux d'accroissement sont calculés avec les valeurs moyennes des forces. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous.

	$K_{c,11}$	m_c	$K_{f,11}$	m_f	$K_{p,11}$	m_p
Essai n°1	590.3 MPa	0.184	193.4 MPa	275	106.9 MPa	348
Essai n°2	676.9 MPa	0.16	416.6 MPa	18	144 MPa	75

Remarque : Pour l'essai n°2, comme on dispose de deux mesures pour la vitesse d'avance de 125 mm/min, on peut calculer deux couples de valeurs (K_i , m_i) pour la coupe, l'avance et la passive. On doit donc déterminer d'abord les taux d'accroissement par un ajustement aux moindres carrés puis calculer les pressions spécifiques par la formule (1).

9. Profils mesurés

Sur les pièces usinées, jusqu'à 5 profils ont été mesurés, notés L0 à L4. Le sens de la flèche sur le profil indique la direction de mesure.

Comme les pièces sont positionnées manuellement sur la machine à mesurer, il n'est pas possible d'obtenir rigoureusement la position exacte de mesure. Ainsi, le point de départ et distance du profil aux bords de la pièce sont approximatifs (± 1 mm environ).

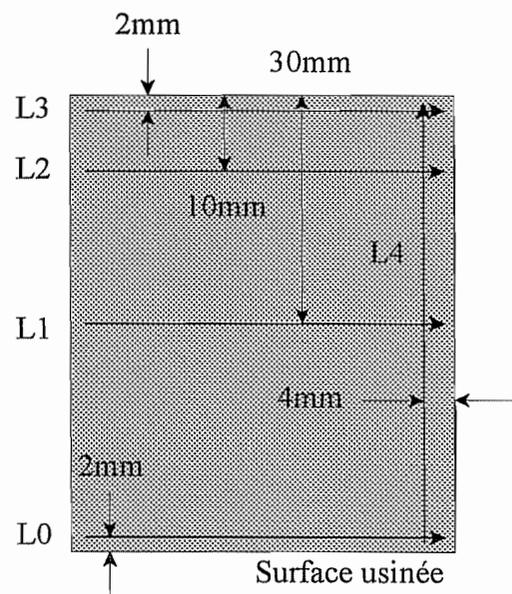


Figure 2 : Profils mesurés

10. Traitements des mesures

Chaque profil est enregistré à l'état brut (c'est-à-dire non-dégauchi et non-filtré) sur fichier puis traité par voie informatique. Il est d'abord dégauchi par la méthode des moindres carrés puis la rugosité est filtrée par une méthode de pondération : la hauteur d'un point est égale à la moyenne pondérée de ses voisins. En réglant l'étendue du voisinage, on arrive à bien filtrer la rugosité (voir figure 3).

Lorsqu'on compare des profils mesurés et calculés, il faut prendre en compte uniquement la forme et l'amplitude des profils car le zéro de référence n'est pas disponible sur les profils mesurés.

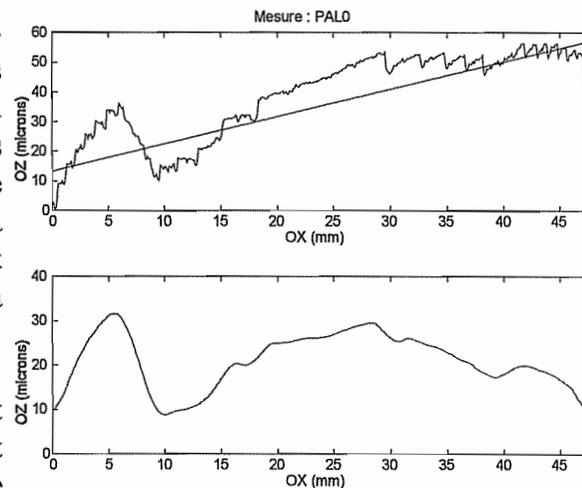


Figure 3 : Traitement des mesures

11. Simulations

Les calculs sont réalisés sur deux modèles EF de la pièce : la pièce finie (complètement usinée) et une géométrie intermédiaire correspondant à la pièce en cours d'usinage. Celle-ci est différente pour les deux essais car la trajectoire est décalée pour l'essai n°2. Les caractéristiques du matériau sont celles calculées au §8.

Les résultats sont illustrés sur des profils (lignes de noeuds) correspondants aux profils mesurés.

12. Comparaisons calculs/essais

Les figures de gauche représentent les profils mesurés et celles de droite les profils calculés.

Essai n°1

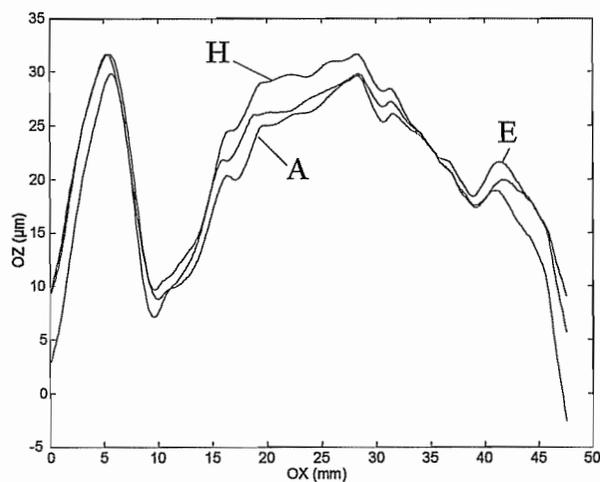


Figure 4 : Lignes L0

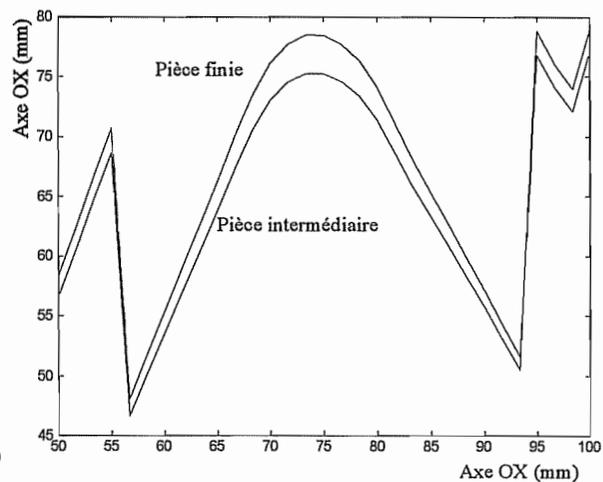


Figure 5 : Lignes L0

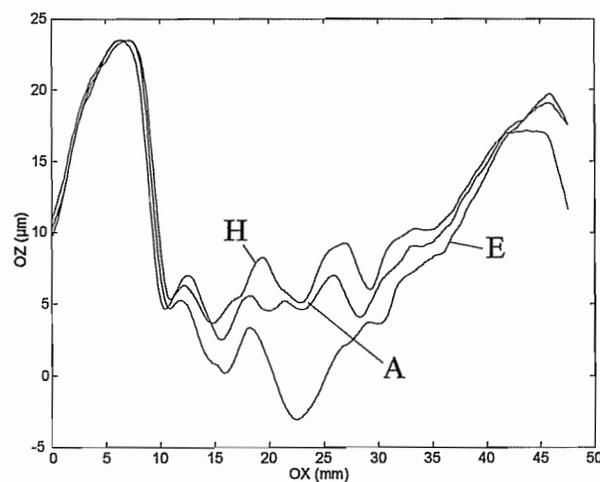


Figure 6 : Lignes L1

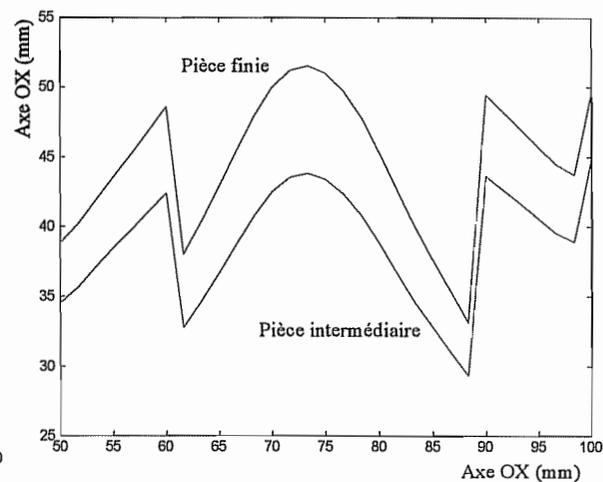


Figure 7 : Lignes L1

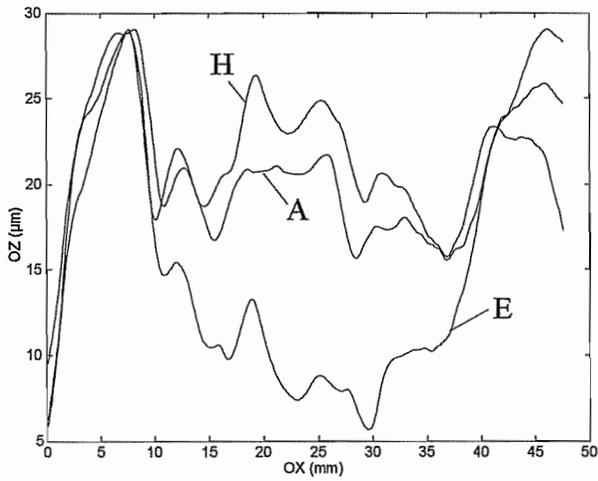


Figure 8 : Lignes L2

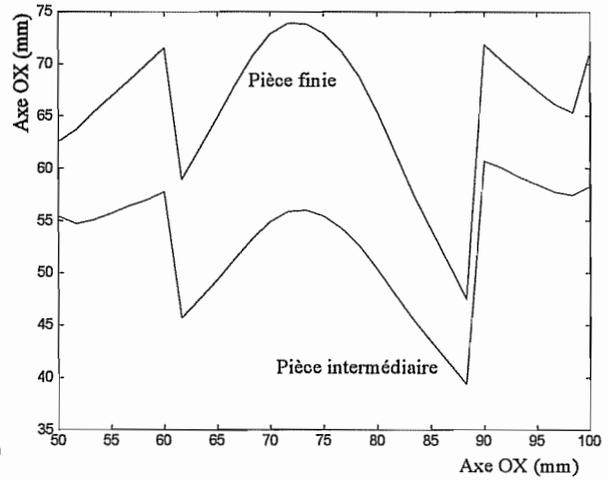


Figure 9 : Lignes L2

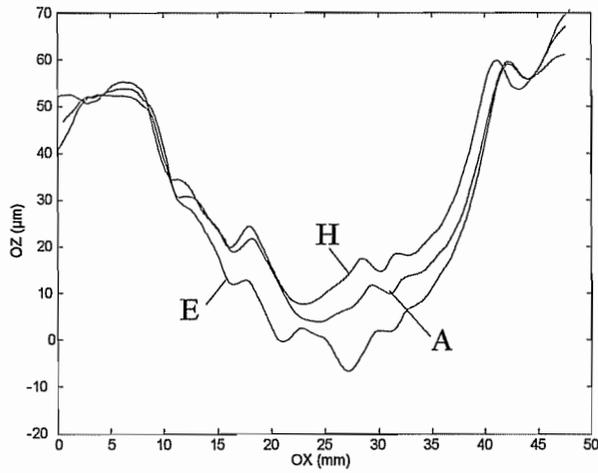


Figure 10 : Lignes L3

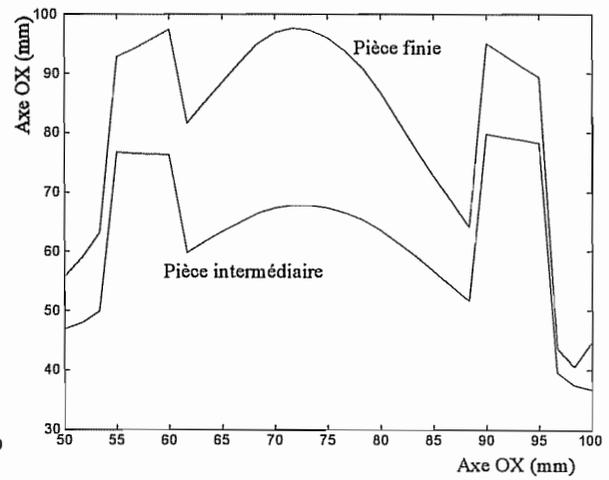


Figure 11 : Lignes L3

Essai n°2

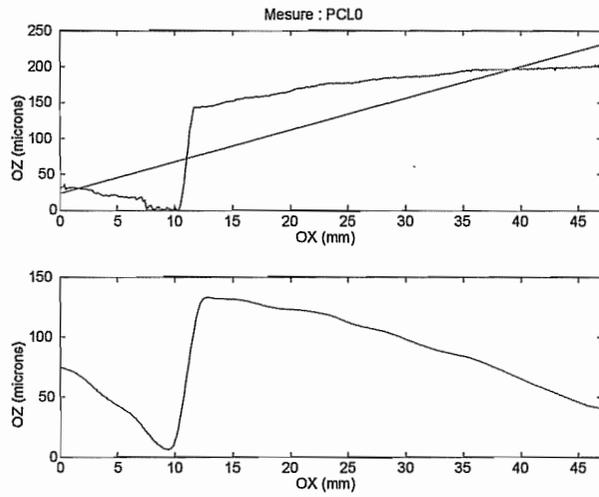


Figure 12 : Ligne L0 (pièce C)

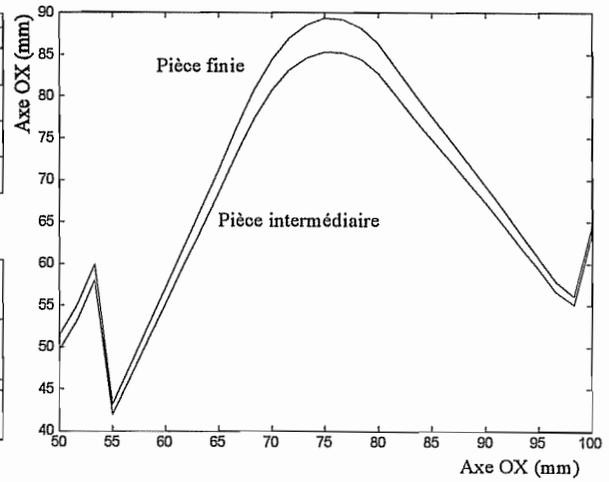


Figure 13 : Lignes L0

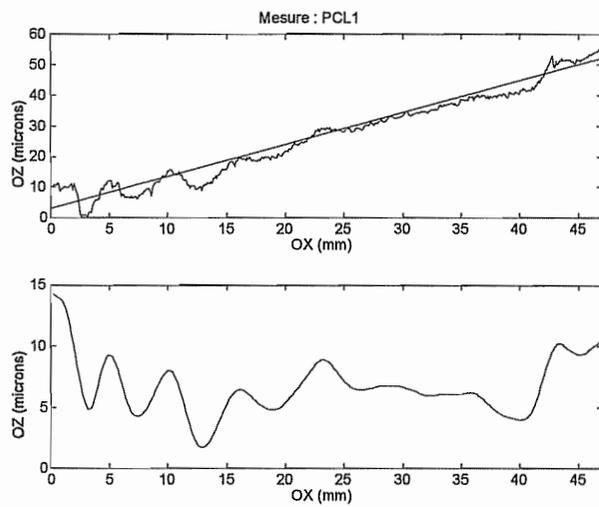


Figure 14 : Ligne L1 (pièce C)

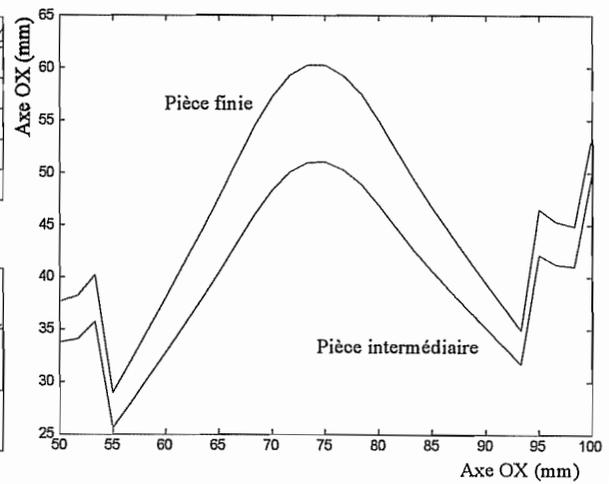


Figure 15 : Lignes L1

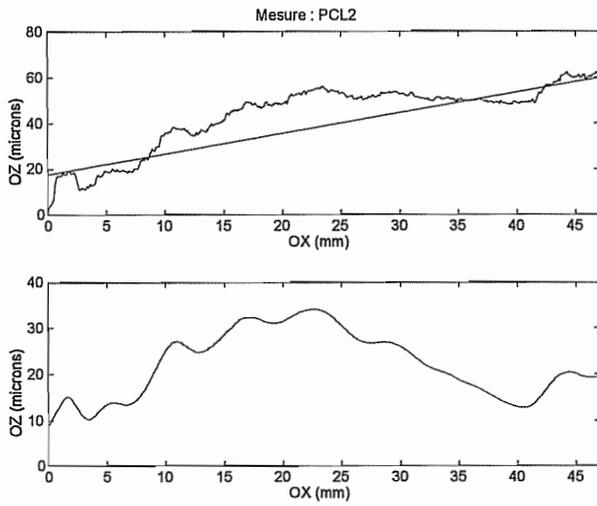


Figure 16 : Ligne L2 (pièce C)

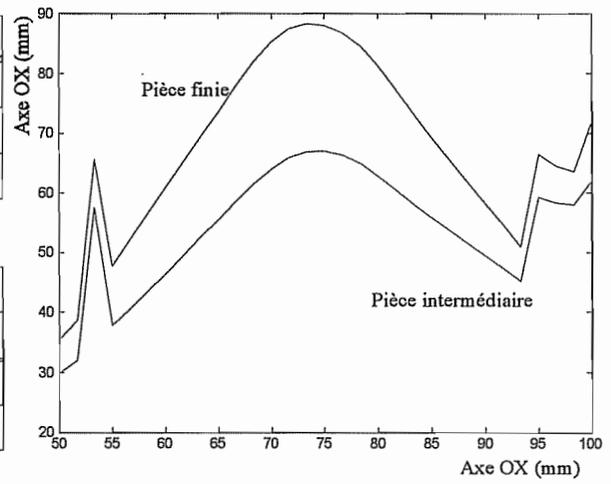


Figure 17 : Lignes L2

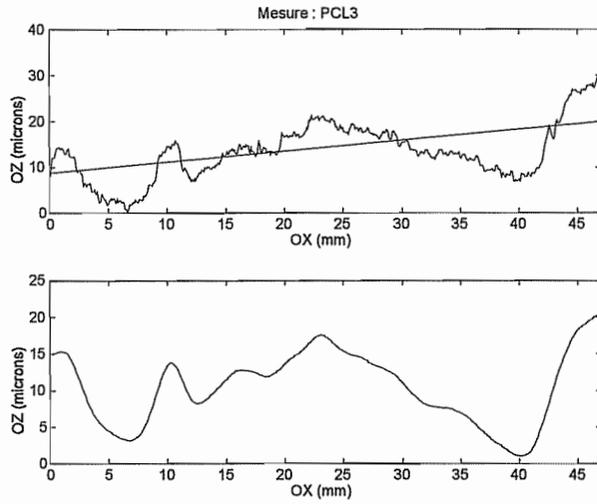


Figure 18 : Ligne L3 (pièce C)

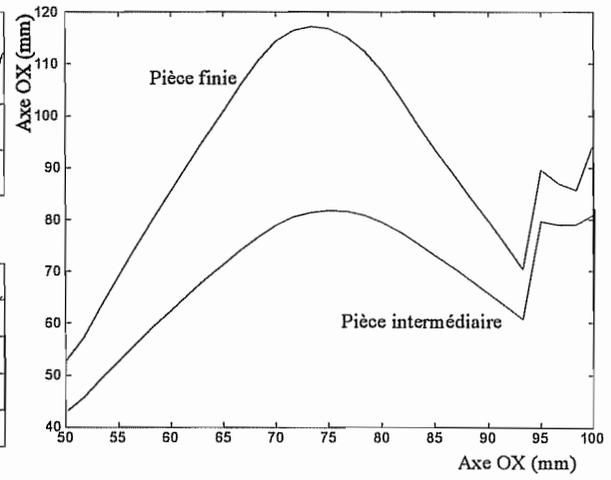


Figure 19 : Lignes L3

13. Essai avec recoupe

Sur la pièce D, on a réalisé un essai avec recoupe afin de voir ce que devient le défaut de forme lorsque l'arrière de la fraise (non-dépincée) passe sur la surface usinée. Pour cela, on reproduit l'essai n°1 mais sans arrêter la fraise avant qu'elle ne quitte la pièce.

Avant même de mesurer la pièce, on peut voir que **la partie arrière de la surface usinée n'est pas recoupée**. La fraise coupe donc une épaisseur de matière plus grande que la profondeur de passe à l'arrière. Autrement dit, l'arrière de la pièce remonte à la place de descendre.

La figure 20 montre le profil mesuré de la ligne L4. On voit que, jusqu'à 45 mm, le profil est quasiment plat, ce qui correspond à la recoupe, et qu'après, la pièce n'est pas recoupée.

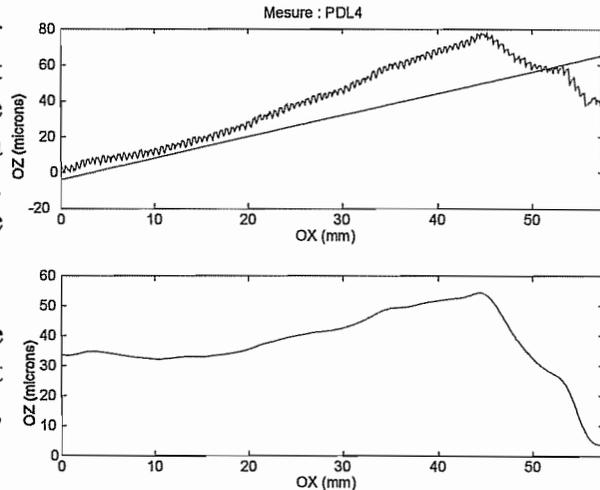


Figure 20 : Ligne L4 (pièce D)

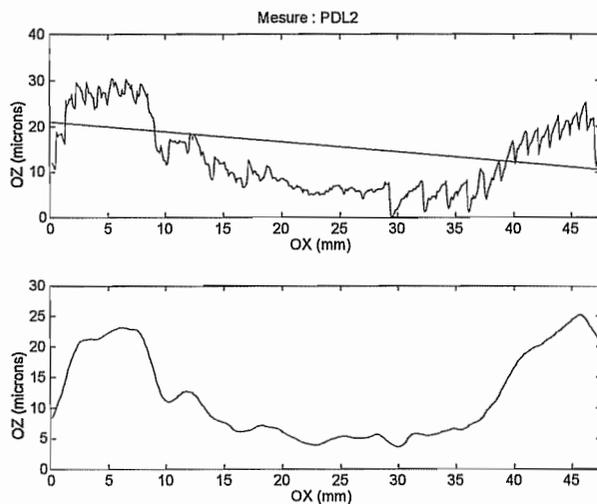


Figure 21 : Ligne L2 (pièce D)

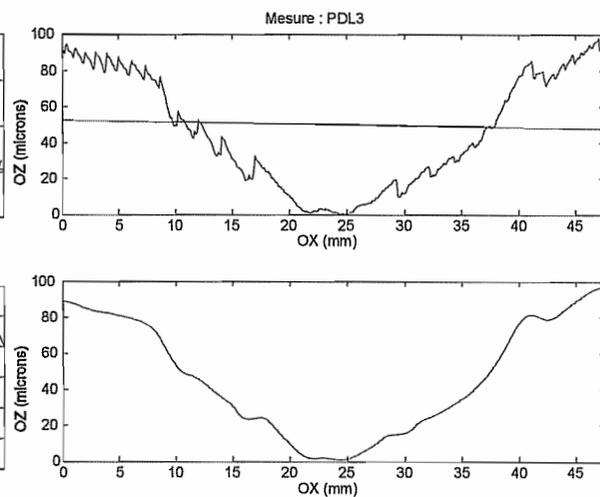


Figure 22 : Lignes L3 (pièce D)

On constate aussi que les profils L2 et L3 mesurés sur la pièce D sont semblables à ceux des pièces de l'essai 1. Par contre, les deux profils L0 et L1 ne sont pas plats comme on pourrait s'y attendre mais présentent une forme de V.

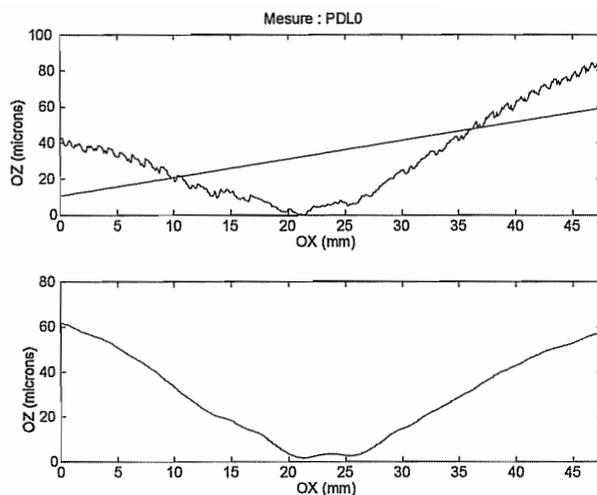


Figure 23 : Ligne L0 (pièce D)

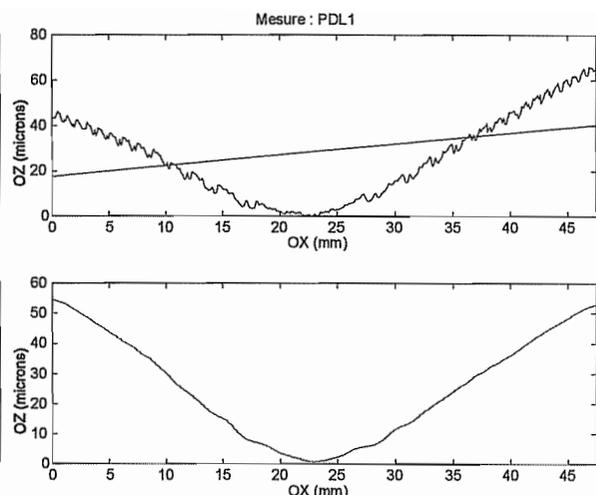


Figure 24 : Lignes L1 (pièce D)

On peut avancer deux explications à cela :

- ❶ soit la pièce est fléchie (en forme d'accent circonflexe) lorsque la fraise recoupe, ce qui donne cette forme des profils lorsqu'on la débride. Vu la forme des profils, les contraintes résiduelles sont vraisemblablement responsables du problème;
- ❷ soit la zone recoupée est plate juste après usinage et c'est alors le relâchement naturel des contraintes résiduelles qui fait que la pièce se déforme au fil des semaines. En effet, les pièces des essais 1 et 2 ainsi que de l'essai de recoupe ont été usinées au début du mois d'août et mesurées seulement vers la mi-septembre. Or, il est connu que le vieillissement naturel de l'aluminium est assez rapide ce qui est le cas lorsque des variations importantes de température se produisent. Pour vérifier cette hypothèse, on peut mesurer à nouveau la pièce test de l'essai 1 (pièce K) qui avait été mesurée juste après usinage afin de voir si les profils sont modifiés ou non.

Dans un cas comme dans l'autre, on peut donc craindre que les contraintes résiduelles ne perturbent de façon importante les mesures.

14. Analyse des résultats

Essai n°1

On constate tout d'abord que les profils se répètent très bien sur les 3 pièces mesurées, surtout pour les lignes L0 et L3 qui se trouvent à l'entrée et à la sortie de la pièce. Pour les lignes intermédiaires L1 et L2, la partie gauche de la ligne (zone I - figure 25), où se produit l'entrée des dents dans la matière, est similaire sur les 3 pièces puis, sur la partie centrale (zone II), les mesures divergent et présentent des oscillations importantes. Ceci montre que la souplesse importante de la pièce provoque des effets dynamiques indésirables principalement aux endroits où l'on passe

de deux à une dents ou l'inverse.

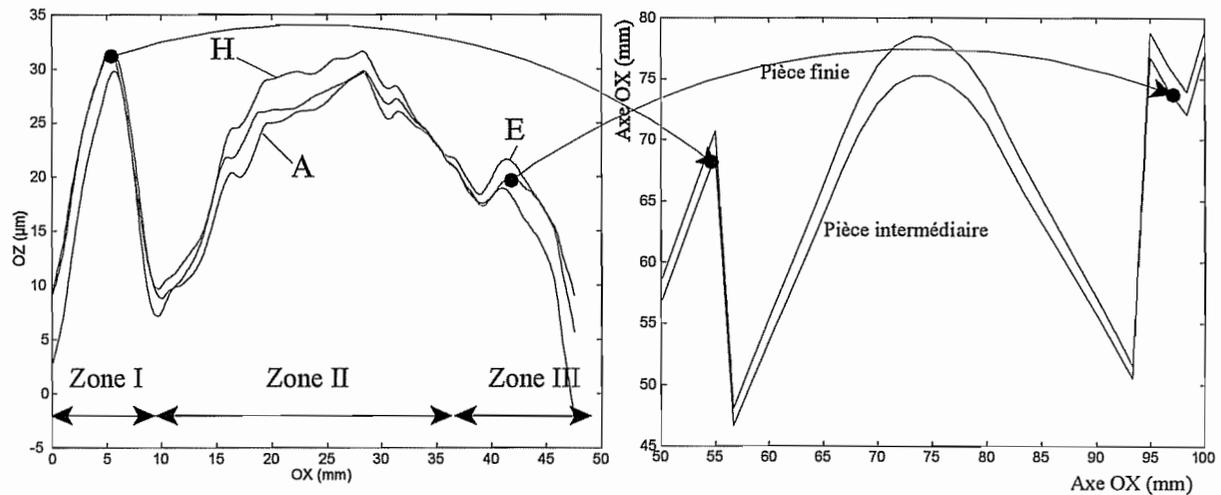


Figure 25 : Comparaisons profils calculés/mesurés

Si l'on compare les profils calculés aux mesures, on voit que l'allure de la partie gauche (zone I) est très semblable quelque soit la ligne envisagée. Par contre, la partie centrale (zone II) diffère toujours sauf pour la ligne L0. Enfin, sur la partie droite (zone III), on retrouve bien une bosse mais, sur les mesures, celle-ci est systématiquement plus petite que sur les profils calculés (lignes L0 et L3).

Il faut également noter que l'usinage de la pièce peut être qualifié de "lourd" puisqu'on enlève 3.5 mm - l'épaisseur de la pièce au niveau de la rainure passe de 6 mm à 2.5 mm. Sur les cartes de souplesses de différentes géométries intermédiaires (correspondant à des étapes successives de l'usinage), on peut voir que la raideur chute brutalement lorsque l'avant de la fraise atteint le bout de la surface usinée.

Cela influence beaucoup les lignes L2 et L3 qui se trouvent à la sortie de la pièce. La partie centrale du profil est coupée lorsque l'avant de la fraise n'a pas encore atteint la fin de la surface usinée, c'est-à-dire lorsque la raideur est encore *grande*. Par contre, les parties gauche et droite du profil sont coupées quand la fraise a déjà dépassé la fin de la surface usinée ce qui correspond à une raideur plus faible. Les *bon* profil calculé devrait donc correspondre au calcul "pièce finie" à gauche et à droite et au calcul "pièce intermédiaire" sur la partie centrale. Ceci explique en partie pourquoi on ne retrouve pas la bosse centrale sur les profils mesurés des lignes L2 et L3.

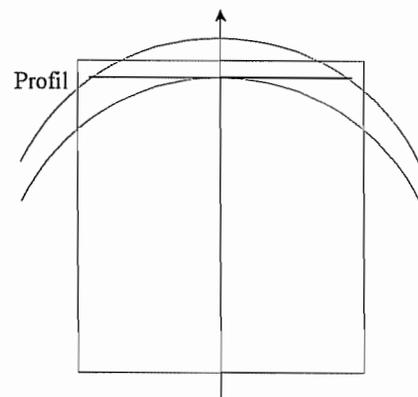


Figure 26 : Variation de raideur

Essai n°2

Comme la trajectoire est décalée, la fraise recoupe inévitablement le début de la surface usinée sur

la gauche (ligne L0 - figure 12). On voit bien sur le profil l'importance de la recoupe (environ 140 μm) ce qui montre que la pièce recule beaucoup lors de l'usinage.

Sur les autres lignes, on constate de fortes oscillations qui masquent beaucoup le défaut comme sur la ligne 1 par exemple. Cependant, on peut quand même trouver des similitudes entre mesures et calculs sur les lignes L2 et L3 (figure 16 à 19). Pour ces deux lignes, le problème de diminution brutale de la raideur intervient comme pour l'essai n°1 ce qui explique pourquoi la bosse centrale est moins marquée sur les mesures que sur les calculs.

15. Conclusions

Malgré les quelques similitudes (surtout qualitatives) qu'on peut trouver entre les mesures et les calculs, on doit admettre que ce cas-test est assez décevant :

- ❶ Pour obtenir un défaut mesurable, il a fallu créer une pièce très souple (rainure) et enlever une épaisseur de matière importante. On est donc confronté à des problèmes dynamiques importants (entrées et sorties des dents, passages de 2 à 1 dents, ...);
- ❷ L'enlèvement de matière est tel que le cas-test rentre dans la catégorie des *usinages lourds* ce qui est contraire aux hypothèses de départ de Sinus. On devrait dans ce cas-ci réaliser les calculs non plus sur le seul modèle EF de la pièce usinée, mais sur plusieurs modèles correspondant à des géométries intermédiaires ce qui représente un calcul beaucoup plus lourd;
- ❸ Les contraintes résiduelles perturbent considérablement la réalisation des essais (obligation de rectifier la face inférieure), les mesures des pièces et l'interprétation des résultats. L'effet des contraintes résiduelles est en plus amplifié par la très grande souplesse de la pièce.