

Titre: Remplacement de l'usinage chimique des tôles aéronautiques minces en aluminium par de l'usinage mécanique.
Title: minces en aluminium par de l'usinage mécanique.

Auteur: Abel Chouinard
Author:

Date: 2011

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Chouinard, A. (2011). Remplacement de l'usinage chimique des tôles aéronautiques minces en aluminium par de l'usinage mécanique. [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/562/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/562/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: J. R. René Mayer
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

REEMPLACEMENT DE L'USINAGE CHIMIQUE DES TÔLES AÉRONAUTIQUES
MINCES EN ALUMINIUM PAR DE L'USINAGE MÉCANIQUE

ABEL CHOUINARD
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
AVRIL 2011

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

REEMPLACEMENT DE L'USINAGE CHIMIQUE DES TÔLES AÉRONAUTIQUES
MINCES EN ALUMINIUM PAR DE L'USINAGE MÉCANIQUE

présenté par : CHOUINARD, Abel

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès Sciences Appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BALAZINSKI, Marek, Ph.D., président.

M. MAYER, René, Ph.D., membre et directeur de recherche.

M. BARON, Luc, Ph.D., membre.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont supporté dans mes études, en particulier, mon professeur René, les autres employés du laboratoire, François, Mélissa, Louida et Guy, les membres de ma famille Colette, Claude, Dominique et Benoit, ainsi que ma compagne de vie Alexandra. J'aimerais également remercier le Consortium de Recherche et Développement de l'Aluminium du Québec (CQRDA) pour sa participation financière au projet.

RÉSUMÉ

Le présent mémoire traite de l'amélioration des méthodes d'usinage des poches dans des panneaux minces en aluminium, principalement utilisés en aéronautique. Ces poches sont généralement obtenues par usinage chimique ce qui pose des problèmes environnementaux. Des solutions de remplacement ont déjà été proposées, celles-ci permettent maintenant d'usiner mécaniquement les panneaux en synchronisant deux machines-outils. Une première machine effectue l'usinage alors que la seconde sert d'appui pour contrer les forces d'usinage. Bien qu'innovateur, ce principe demande de synchroniser deux machines, ce qui a un coût important. La solution proposée dans ce mémoire remplace la seconde machine par un système de préhension magnétique. Des aimants sont positionnés de part et d'autre du panneau afin de le serrer et ainsi reprendre la force d'usinage axiale. L'élaboration des équations permet d'établir que le paramètre important dans le système est la force maximale d'attraction entre les aimants. Cette force, d'un module déterminé expérimentalement, doit être supérieure à la force axiale d'usinage. Les tests nécessaires à la validation ont été planifiés en utilisant un plan d'expérience, limitant ainsi le nombre d'essais et augmentant la qualité des résultats. Le modèle expérimental ainsi obtenu permet de prédire la qualité de l'usinage et le taux d'enlèvement de matière atteint. L'optimisation du modèle obtenu à partir des données des tests résulte en une variation de l'épaisseur de coupe de 0.017 mm ce qui est comparable à ce que les solutions de synchronisations de machines obtiennent.

ABSTRACT

This thesis explores an improved method for machining pockets in thin aluminum panels, mainly used in aeronautics. These pockets are usually produced by chemical milling which causes environmental problems. Replacement solutions have already been proposed. They allow to mechanically machine panels by synchronizing two machine tools. A first machine performs machining while the second provide a support to counter the machining forces. While innovative, this principle requires synchronization of two machines, which has a high cost. The solution proposed in this paper replaces the second machine by a magnetic gripping system. Magnets are positioned on either side to grasp the aluminum panel and counteract the axial machining force. Developed equations established that the most important parameter in the system is the maximum force of attraction between the magnets. This force, that has a module determined experimentally, must be greater than the axial force of machining. A design of experiment is applied to determine optimal cutting conditions. The models obtained can predict the machining quality and the material removal rate achieved. The optimized model results in a variation of the actual depth of cut of 0.017 mm for the machined surface. This performance is comparable to the synchronized machines method.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	x
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Remplacement de l’usinage chimique	3
2.1.1 Première solution d’usinage mécanique	3
2.1.2 Seconde solution	4
2.1.3 Troisième solution	4
CHAPITRE 3 Définition du problème	5
3.1 Problématique	5
3.2 Question de recherche	5
3.3 Hypothèse	6
3.4 Solution	6
CHAPITRE 4 Design de la solution	7
4.1 Cas général de fonctionnement du bridage magnétique	7
CHAPITRE 5 Expérimentation	11
5.1 Planification de l’expérimentation	11
5.1.1 Évaluation théorique des efforts de coupe	11
5.1.2 Analyse des principaux facteurs d’influence	15
5.1.3 Planification statistique de l’expérience	17

5.2	Design du prototype	21
5.3	Tests préliminaires	22
5.3.1	Test de Force d'attraction totale <i>F_{at}</i>	23
5.3.2	Tests de frottement	23
5.4	Résultats des tests	25
5.4.1	Présentation des résultats	25
5.4.2	Analyse des résultats	27
5.4.3	Vérification des résultats	30
CHAPITRE 6 CONCLUSION		32
6.1	Synthèse des travaux	32
6.2	Limitations de la solution proposée	32
6.3	Améliorations futures	33
RÉFÉRENCES		34

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1	Paramètres d'entrée au système théorique	13
Tableau 5.2	Paramètres de sortie du système théorique	15
Tableau 5.3	Tableau des tests sur machine-outil	19
Tableau 5.4	Paramètres d'entrée au système réel	21
Tableau 5.5	Paramètres de sortie au système réel	21
Tableau 5.6	Résultats des tests de frottement	25
Tableau 5.7	Tableau des résultats des tests sur machine-outill	27
Tableau 5.8	Coefficients du modèle de régression prédisant la variation	28
Tableau 5.9	Combinaison optimale de paramètres d'entrée et résultats de mesures .	31

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1	Schématisation du système de bridage magnétique permettant de maintenir une feuille d'aluminium non bridé en contact avec l'outil de coupe	8
Figure 4.2	DCL des modules et de la feuille montrant les différentes forces d'interaction entre les modules du prototype	9
Figure 5.1	Schéma du montage modélisé numériquement où l'on peut voir en détail le système de retenue des aimants dans le module maître	12
Figure 5.2	Les deux parties du prototype fabriqué en aluminium	14
Figure 5.3	Efforts de coupe	15
Figure 5.4	Le support maître	16
Figure 5.5	Le support esclave	18
Figure 5.6	Impact du nombre de dents sur la variations de la force F_z donné en Newton	18
Figure 5.7	Profils des valeurs prédictes où le couple maximum, la force en Z, la variation de la force en Z et totale sont donné en Newton. Le taux d'enlèvement de matière est donné en centimètres cube par minute . .	20
Figure 5.8	Descriptif des composantes	22
Figure 5.9	Variation de la force d'attraction en fonction de la distance entre les aimants	24
Figure 5.10	Montage expérimental d'acquisition des forces de frottements	24
Figure 5.11	Montage d'usinage	26
Figure 5.12	Démonstration du manque de rigidité du panneau	26
Figure 5.13	Distribution de Pareto montrant l'impact relatif de chacun des paramètres d'entrée sur la variation de l'épaisseur de coupe	28
Figure 5.14	Effets du nombre de dents et de la profondeur de coupe sur la Planéité	29
Figure 5.15	Profils des valeurs prédictes et fonction de désirabilité	30

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

a	Profondeur de Coupe
b	Angle de l'hélice
c	Avance par dent
d	Diamètre de l'outil
DCL	Diagramme du Corps Libéré
F	Force d'usinage générale
Fa	Force d'attraction
Fat	Force d'attraction totale
Fext	Force extérieur
Fn	Force normale
Ff	Force de frottement
Fr	Force reprise par le robot
Frz	Force Résultante en Z
Fz	Force en Z
k	Nombre de facteur total
Krc	Coefficient d'efforts de coupe radial
Kre	Coefficient d'efforts de coupe radial
Ktc	Coefficient d'efforts de coupe transversal
Kte	Coefficient d'efforts de coupe transversal
MaxTc	Couple maximal
MaxFz	Force maximale en Z
Maxdz	Variation maximale de la force en Z
MaxdF	Variation maximale de la force totale
MMR	Taux d'enlèvement de matière (<i>Material Removal Rate</i>)
n	Vitesse de rotation de l'outil
N	Nombre de lèvres
p	Nombre de facteur retirés de l'analyse

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Le poids des avions et leurs couts de fabrication sont depuis toujours au cœur des préoccupations des avionneurs. Aujourd’hui, des préoccupations supplémentaires pour l’environnement forcent les grands constructeurs d’avions à se pencher sur les impacts du transport aérien. Ces impacts sur l’environnement sont le résultat de la consommation de carburant et de l’ensemble du cycle de vie de l’avion, de sa fabrication à son démantèlement. La consommation de carburant est particulièrement pointée du doigt par les groupes écologistes.

Dans l’optique de réduction de l’impact environnemental des avions, les grands constructeurs mettent de l’avant, depuis quelques années, des projets de recherche d’envergure visant à rendre leurs produits plus écologiquement responsables. Plusieurs constructeurs ont donc lancé de nouveaux programmes dont les objectifs sont très élevés. Par exemple, on annonce des réductions de consommation substantielles de carburant de l’ordre de 20 % chez Bombardier (Scott et al., 2009). La consommation de carburant étant principalement associée au poids de l’appareil, la masse inutile en a été éliminée pour réduire les couts d’opération, et ce, bien avant de penser à l’impact écologique des procédés. Ainsi, des solutions de perte de poids écologiquement non responsables comme l’usinage chimique ont été mises de l’avant.

Le poids des panneaux de fuselage des avions, fabriqués depuis longtemps en aluminium, est réduit par un amincissement à des endroits stratégiques par une méthode d’usinage chimique. Les endroits moins sollicités sur le revêtement sont amincis par cette méthode, qui consiste à masquer les panneaux aux endroits sollicités afin d’empêcher l’acide mis en contact avec le panneau d’attaquer ces régions. Après plusieurs heures dans l’acide et plusieurs étapes de masquage et démasquage, le panneau a une épaisseur variable sur sa forme finale. Cette méthode présente des lacunes majeures à différents niveaux. Tout d’abord, le temps requis pour effectuer cette opération est important, de même que l’espace utilisé au plancher. De plus, les rejets de la méthode, qui contiennent notamment des solvants, sont produits en grande quantité. Le traitement de ces rejets étant de plus en plus complexe, plusieurs constructeurs ont décidé de remplacer cette méthode jugée polluante.

Des recherches ont déjà démontré qu’il est possible d’usiner des panneaux de fuselage d’avion par des moyens mécaniques en remplacement de la méthode chimique. Le projet *Green Advanced Panels* (Airbus, 2005), financé en partie par le gouvernement européen, a mis au point une première machine capable d’usiner les panneaux sans utiliser la méthode chimique pour un avion en production. La méthode en place nécessite deux machines fonctionnant

en symbiose pour réaliser l’usinage des panneaux. L’utilisation de deux machines limite la flexibilité du système et demande encore l’utilisation de beaucoup de ressources et d’espace au plancher. La présente recherche vise le remplacement de cet usinage miroir par un système plus polyvalent, utilisable sur un robot à six degrés de liberté. Ce mémoire présente donc en détail les développements entrepris pour éliminer l’usinage chimique. La solution améliorée sera ensuite décrite en profondeur. La fabrication d’un prototype et la réalisation de tests seront présentés dans le dernier chapitre.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Les technologies d’usinage par méthode mécanique, remplaçant la méthode chimique, ont été développées par les industriels de l’aéronautique européens. La documentation qui en découle est constituée essentiellement de brevets. Au cours des deux dernières décennies, trois évolutions principales des méthodes mécaniques d’usinage de panneaux minces ont été documentées. Conjointement à la recherche de documentation sur les méthodes d’usinage de panneaux minces, la documentation décrivant les méthodes de calcul des efforts de coupe, ainsi que celle traitant de la planification statistique d’expériences, ont été consultées.

2.1 Remplacement de l’usinage chimique

De nouvelles technologies mécaniques sont apparues, permettant de remplacer l’usinage chimique jugé polluant. Les rejets issus de cette méthode contiennent notamment des solvants et du dioxyde de carbone. La consommation électrique de la méthode chimique est également plus élevée qu’avec la nouvelle méthode mécanique, selon Airbus (Airbus, 2005).

2.1.1 Première solution d’usinage mécanique

La première machine permettant d’effectuer l’usinage de panneaux de manière mécanique sans besoin de gabarit de support spécifique à chaque pièce est formée d’un tapis de vérins hydrauliques conçu par Martinez (Martinez, 1992) pour tenir le panneau. Chaque vérin est équipé d’un système de rétention par vacuum installé sur une rotule. Le système est complété par une machine de type portique, au-dessus du panneau, qui supporte la tête d’usinage. Le système permet de s’adapter à un grand nombre de formes de panneaux et la tête d’usinage multi axes permet d’effectuer l’usinage malgré la forme à double courbure des panneaux des aéronefs. Chacun des vérins est contrôlé individuellement, c’est à la fois ce qui donne la flexibilité au système, mais également ce qui le rend complexe à opérer. L’usinage s’effectuant à la verticale, les problèmes connus d’évacuation du copeau sont importants. Cette solution, bien qu’innovatrice, n’est pas utilisable pour fabriquer les panneaux de fuselage des avions, principalement à cause de son manque de précision. Il est possible de faire des opérations de détourage et de perçage correctement, mais un manque de rigidité entre les vérins ne permet pas l’usinage d’une poche avec une précision supérieure à 0.2 mm (Hamann, 2007).

2.1.2 Seconde solution

La seconde solution proposée par (Hamann, 2007), élimine le tapis de vérins pour adopter un positionnement isostatique du panneau d'aluminium. Il a été jugé que le positionnement dans un moule n'était pas réaliste en raison de la quantité de moules différents à entreposer et à gérer. L'évolution présentée dans cette solution concerne essentiellement la façon de maintenir le panneau en place. Il est au départ maintenu de manière isostatique et ensuite bridé localement d'un côté par une tête programmée numériquement pour fixer le panneau à sa position nominale et effectuer l'usinage sur le côté opposé. Ce système crée une fenêtre d'usinage où le panneau est suffisamment rigide pour effectuer l'usinage avec une tête d'usinage multi axes. Il s'agit concrètement du premier système inventé pour l'application d'amincissement des panneaux de fuselage des aéronefs. Selon ce brevet, la mise en forme à double courbure du panneau est très problématique car il en résulte une distribution de l'épaisseur qui n'est pas constante et qui est difficilement prévisible, et qui induit une épaisseur de coupe variable. Cette condition est contrée par le module de bridage qui place la surface extérieure du panneau à la position nominale du panneau. Cette mise en force modifie localement l'épaisseur à enlever, pour obtenir une épaisseur finale constante. Ainsi, la profondeur de coupe varie en fonction du déplacement de l'outil.

2.1.3 Troisième solution

La dernière solution développée particulièrement pour l'application industrielle d'amincissement des panneaux des aéronefs intègre beaucoup de nouvelles techniques dans les brevets déposés par Hamann d'Airbus (Hamann, 2009) et Panczuk et Foissac du consortium Dufieux Airbus (Panczuk et Foissac, 2010). La technique ne demande plus de déplacer un appareil de bridage de fenêtre en fenêtre d'usinage. Une tête de bridage fonctionne en miroir avec la tête d'usinage ; le bridage est maintenu dynamiquement. Le montage isostatique est abandonné au profit d'un système hyperstatique formant un cadre autour de la pièce à usiner. Finalement, afin de s'assurer que l'usinage s'effectue le plus fluidement possible, le panneau est numérisé, une fois installé dans la machine, à l'aide d'un capteur optique monté dans la tête d'usinage. Cette numérisation rend le processus très versatile, une qualité de plus en plus recherchée. La numérisation du panneau avant d'effectuer l'usinage permet de travailler avec un grand nombre de formes et surtout d'accepter des pièces dont la forme réelle ne concorde pas exactement avec la forme nominale.

CHAPITRE 3

Définition du problème

La pression est forte sur les industriels de l'aéronautique pour que ceux-ci rendent les aéronefs écologiquement plus responsables. L'amincissement des panneaux de fuselage permet de réduire la masse des avions, d'augmenter leur capacité de chargement et de réduire la consommation de carburant. Pour arriver à ces fins, les constructeurs d'aéronefs ont utilisé la méthode d'usinage chimique, qui implique plusieurs opérations et utilise beaucoup de ressources, en plus de produire des rebus chimiques (Airbus, 2005). Étant donné les inconvénients marqués de cette méthode, il devient désirable de la remplacer par une méthode ayant une empreinte écologique substantiellement moins importante.

3.1 Problématique

La création de poches dans les panneaux de l'avion réduit le poids de l'appareil et donc la consommation de carburant. Ces poches sont présentement créées par la méthode d'usinage chimique, laquelle a une empreinte écologique importante. La méthode chimique de mise en forme doit être remplacée par une méthode moins polluante. Toutefois, afin de maintenir un niveau de compétitivité élevé, les constructeurs désirent que la nouvelle méthode en plus d'être écoresponsable, soit rentable, rapide et versatile. Les avions étant faits de surfaces à double courbure, il est présentement impossible d'usiner les panneaux à plat sans rencontrer des difficultés lors de l'estampage de leur forme finale.

Airbus a développé une méthode utilisant deux machines-outils synchronisées pour rigidifier les panneaux lors de l'usinage post-formage. Cependant, les couts d'installation liés à une telle machine sont très élevés. Il faut donc tenter de développer une autre méthode qui permettrait l'usinage mécanique du panneau après sa mise en forme à double courbure.

3.2 Question de recherche

Les éléments énumérés à la section précédente mènent à la question suivante : *Est-il possible d'effectuer l'usinage d'un panneau mince fait de matériel non magnétique tel que l'aluminium ayant une double courbure, et ce, sans l'utilisation de la méthode chimique ou de la méthode de la synchronisation de deux machines-outils ?*

3.3 Hypothèse

L'utilisation d'un module de préhension magnétique monté sur un robot industriel permet l'usinage d'un panneau mince à double courbure.

3.4 Solution

L'utilisation d'une seule machine-outil pour l'usinage implique le développement d'une technique novatrice permettant de rendre le panneau rigide à l'endroit de l'enlèvement de matière. L'intervalle de tolérance à atteindre est inférieur à 0.2 mm, selon Hamann. La technique proposée consiste en un module magnétique construit autour d'aimants permanents des deux côtés du panneau d'aluminium. Le module magnétique, vu à la figure 5.1, est munie de patins permettant son déplacement durant l'usinage, rendant le panneau rigide entre ces patins. Les aimants sont placés le plus près possible de part et d'autre de la surface. La force d'attraction ainsi créée remplace le bridage classique. Comme il sera présenté à la section 4.1, l'effort de coupe axial devra être repris en entier par les aimants du module magnétique.

Dans cette recherche, les efforts seront déployés à démontrer que la technique utilisant un système de bridage dynamique magnétique permet de réaliser l'usinage d'un panneau mince fait de matériau non magnétique.

CHAPITRE 4

Design de la solution

La solution proposée consiste en un module de bridage magnétique. Les aimants, placés de part et d'autre de la plaque mince à usiner, assurent la rigidité et permettent ainsi l'usinage de la plaque. Les équations régissant cette solution novatrice seront mises de l'avant dans ce chapitre et permettront de concevoir un premier prototype. Le schéma du prototype est présenté à la figure 4.1. Trois composantes sont présentes dans ce prototype, le module maître, le module esclave et la feuille d'aluminium, le tout installé sur un robot ou une machine-outil. Les modules maître et esclave contiennent des aimants, de pôles opposés, qui créent une pression maintenant la feuille d'aluminium en contact avec le module maître et par conséquent l'outil de coupe.

Afin de s'assurer que l'usinage soit possible, il est nécessaire d'établir les équations qui guident le fonctionnement du module magnétique. En régime statique, la somme des forces doit être égale à zéro sur chacun des composants. La position du robot sur le panneau n'étant pas précise, il est nécessaire d'établir des critères de fonctionnement en tenant compte aussi d'une force provenant d'une erreur de positionnement de l'outil par rapport au panneau dans la direction normale au panneau.

4.1 Cas général de fonctionnement du bridage magnétique

La figure 4.2 montre les différentes forces sur les trois modules du système de bridage magnétique. Ce système remplace un bridage classique par des paires d'aimants qui effectuent, par leur attraction, le bridage de la pièce à usiner. Le bridage est donc localisé à l'unique endroit de l'enlèvement de matière. Les équations de fonctionnement sont établies pour les trois modules soit le module esclave, la feuille d'aluminium et ensuite le module maître. En régime statique, la somme des forces sur chacun des modules doit être égale à zéro étant donné qu'aucune accélération n'est présente dans le système. La force F_{at} représente la force d'attraction entre les modules maître et esclave qui est contrée par la force F_{n1} et F_{n2} . La force F_{at} doit contrer les forces d'usinage F_z et extérieur F_{ext} .

Pour le module esclave, la somme des forces est donnée par l'équation (4.1).

$$F_{n2} = F_{at} \quad (4.1)$$

Pour la feuille, la somme des forces est donnée par l'équation (4.2).

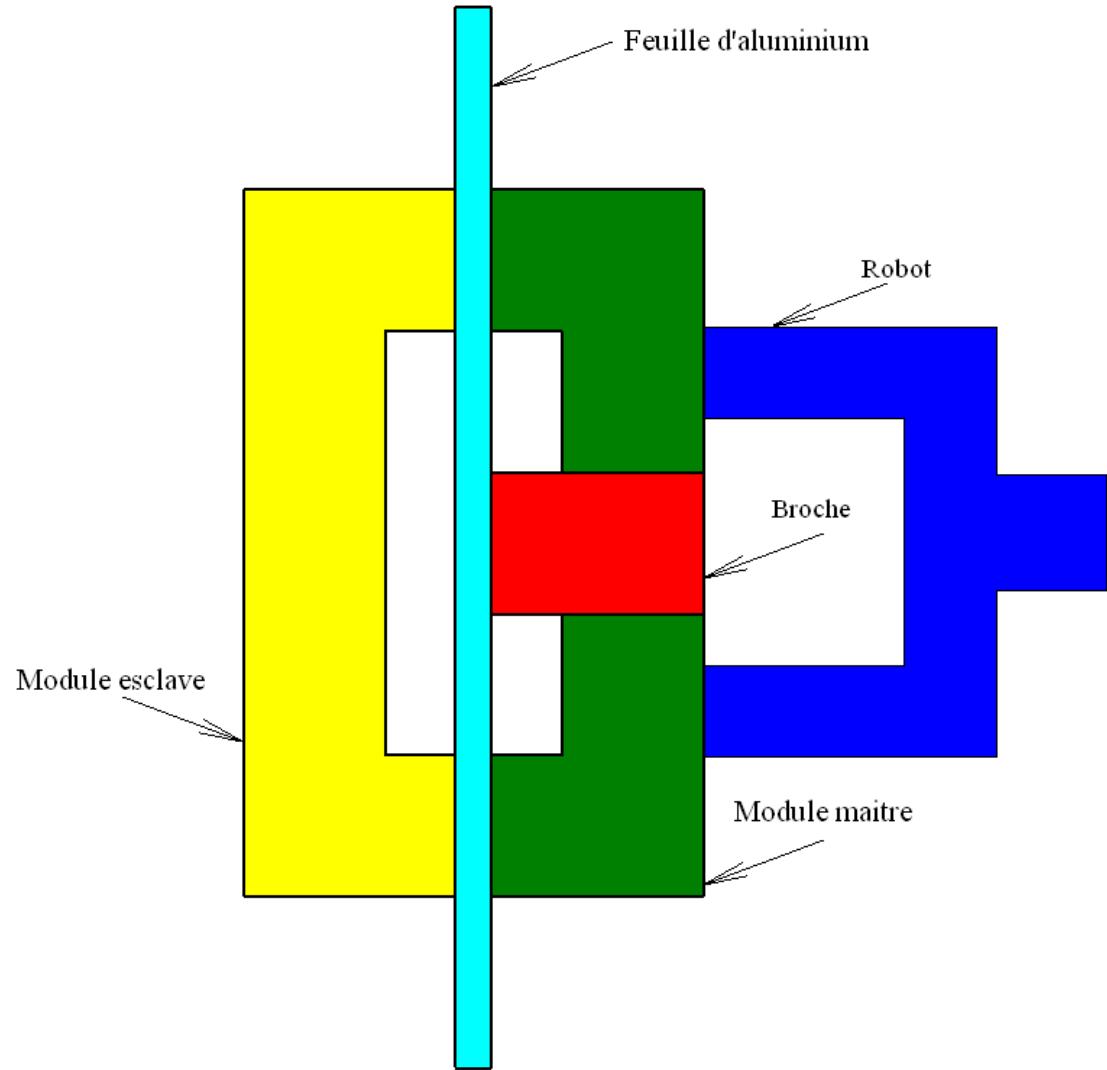


Figure 4.1 Schématisation du système de bridage magnétique permettant de maintenir une feuille d'aluminium non bridé en contact avec l'outil de coupe

$$F_{n2} = F_z + F_{n1} + F_{ext} \quad (4.2)$$

Pour la module maître, la somme des forces est donnée par l'équation (4.3).

$$Fr + F_{n1} + F_z = Fat \quad (4.3)$$

Ensuite à partir de l'équation (4.1) et de l'équation (4.2), on obtient l'équation (4.4).

$$Fat = F_z + F_{n1} + F_{ext} \quad (4.4)$$

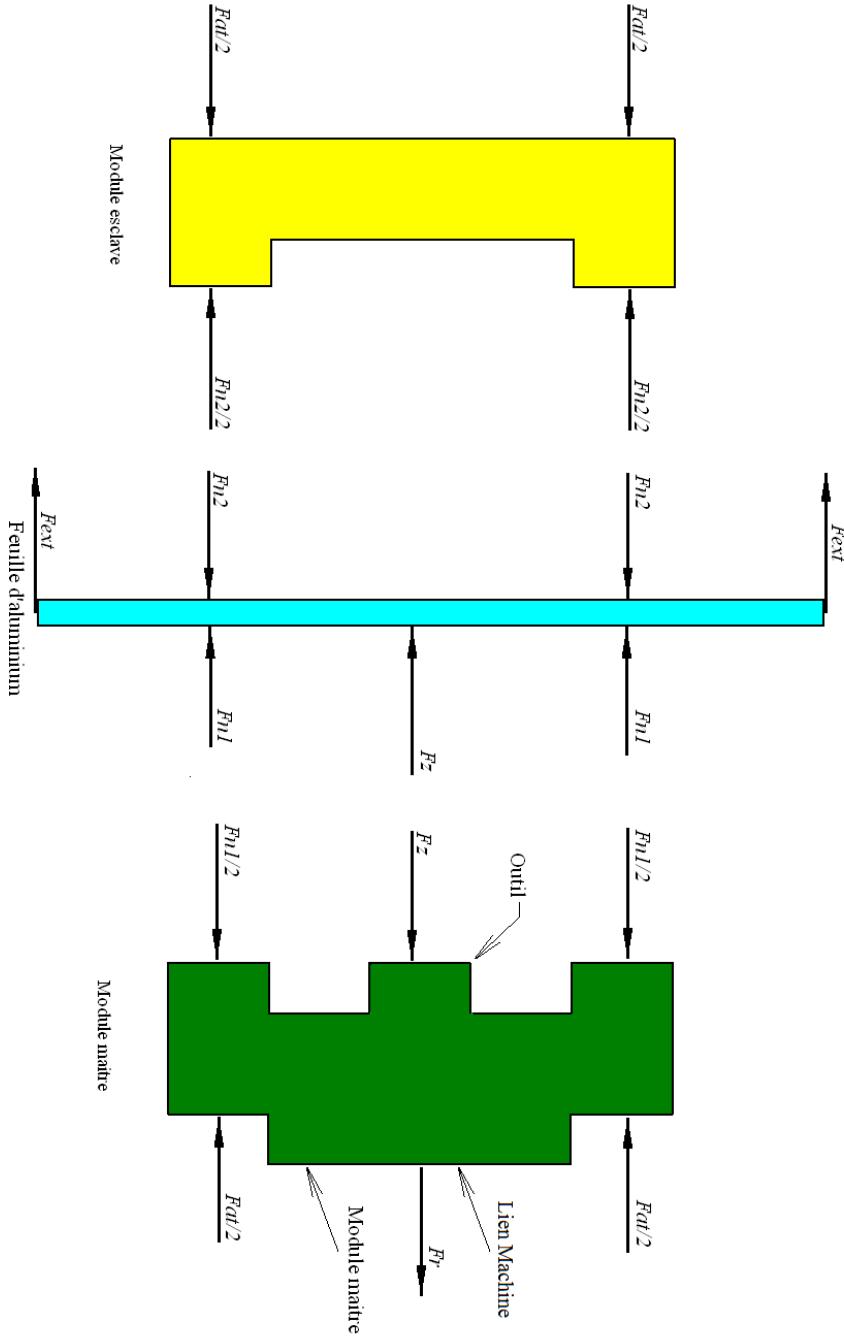


Figure 4.2 DCL des modules et de la feuille montrant les différentes forces d’interaction entre les modules du prototype

La réorganisation de cette équation permet d’isoler le terme $Fext$ et d’obtenir l’équation (4.5).

$$Fat - Fz - Fn1 = Fext \quad (4.5)$$

À partir de l'équation (4.3) on peut également isoler le terme Fr et obtenir l'équation (4.6).

$$Fat - Fz - Fn1 = Fr \quad (4.6)$$

En combinant les équations (4.5) et (4.6) on obtient le terme de la force qui doit être reprise par le robot Fr exprimé par l'équation (4.7).

$$Fext = Fr \quad (4.7)$$

Ce terme montre que le robot ne reprend pas les forces d'usinage mais seulement les erreurs de positionnement du robot par rapport à la feuille d'aluminium à usiner. Cette force doit dans la mesure du possible être mitigée étant donné les limites d'exactitude du positionnement des robots manipulateurs sous l'effet des forces extérieures.

La condition de fonctionnement, pour que les deux modules restent en contact et que l'usinage puisse avoir lieu, est posée sur la force de contact entre le module maître et la feuille. Comme l'exprime l'équation (4.8), lorsque la force entre le module maître et la feuille devient nulle, le décollement aura lieu. Nous verrons à la section suivante que la force d'attraction chute rapidement après le décollement.

$$Fn1 \geq 0 \quad (4.8)$$

L'équation (4.8) montre que la force maximale pouvant être reprise par le système de bridage est la somme des forces d'usinage et de la force extérieure liée au mauvais positionnement du robot par rapport au panneau. L'équation (4.9) permet de calculer la valeur de la force que doit avoir l'attraction des aimants placés dans chacun module du système.

$$Fat \geq Fz + Fext \quad (4.9)$$

Les équations énoncées permettent de constater que le robot ne reprendra pas les forces d'usinage tel qu'une machine outil classique lors de l'usinage d'une pièce. C'est plutôt le système magnétique développé qui reprend ces forces.

CHAPITRE 5

Expérimentation

L'expérimentation a été planifiée à l'aide d'une méthode statistique basée sur une analyse théorique du procédé d'usinage par enlèvement de matière. Cette planification permet à la fois de réduire le nombre d'essais et d'augmenter la qualité des données pour ainsi mieux comprendre le processus d'usinage.

Les tests ont été effectués avec un prototype construit selon le schéma et les équations présentées au chapitre précédent. Ce prototype, tel qu'on le voit à la figure ?? a été modélisé numériquement pour ensuite être construit en aluminium tel qu'on le voit à la figure 5.2. Le choix de l'aluminium est basé principalement sur le poids et sur l'absence d'interactions avec les champs magnétiques des aimants, ce qui facilite la manipulation. Les modules maître et esclave sont présentés respectivement aux figures 5.4 et 5.5, les aimants sont retenus mécaniquement dans ces deux modules.

5.1 Planification de l'expérimentation

Avant de procéder aux essais de coupe sur machine-outil, les efforts de coupe sont simulés afin de déterminer les paramètres influents. Le choix du matériau des patins formant l'appui rigide sur le panneau a une importance cruciale dans le procédé. Ceux-ci doivent opposer le moins de frottement possible au déplacement du module esclave. La réalisation de tests à vide permet de déterminer le matériau idéal. De plus, un des paramètres les plus importants du fonctionnement du module magnétique est la force d'attraction des aimants, qui a un module prédéterminé. Un test est effectué avec le prototype pour déterminer le module de cette force.

5.1.1 Évaluation théorique des efforts de coupe

L'évaluation des efforts de coupe dans l'aluminium s'est fait grâce à une méthode de discréttisation (Budak et al., 1996). Cette méthode permet de connaître les efforts encourus par les axes de la machine en fonction de la position angulaire du couteau. Le procédé de fraisage étant intermittent, il est nécessaire de considérer la variation de la force d'usinage à chaque passage d'outil.

La planification des tests sur machine est basée sur l'évaluation théorique des efforts de coupe lors de l'usinage. Les paramètres à tester sont déterminés par cette évaluation. Les

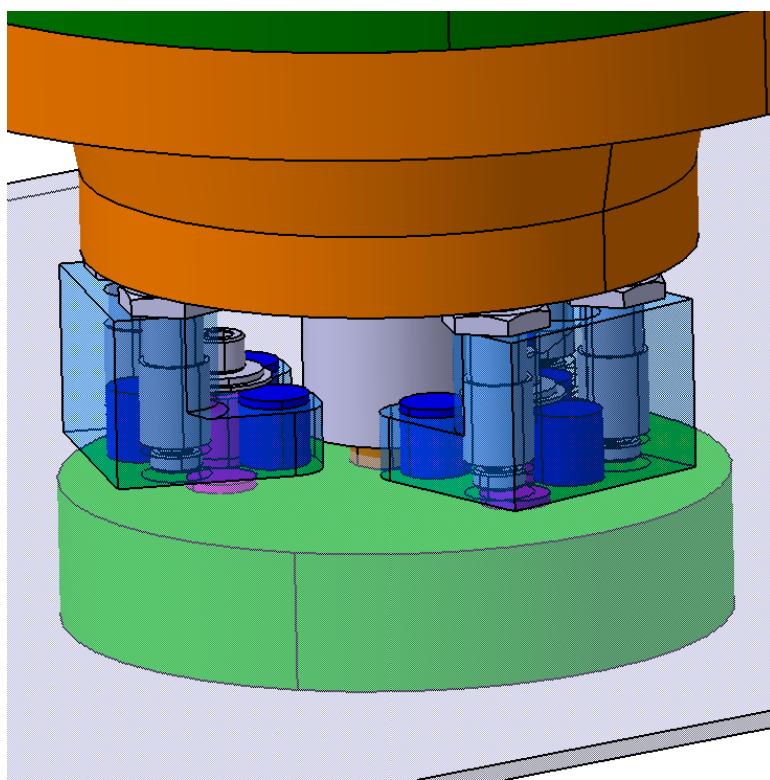


Figure 5.1 Schéma du montage modélisé numériquement où l'on peut voir en détail le système de retenue des aimants dans le module maître

paramètres d'entrée nécessaires au calcul des efforts de coupe sont associés à l'outil et au matériau à usiner. Le matériau pour effectuer les tests est l'aluminium 6061-T6 commercialement disponible et la liste des paramètres à tester est présentée dans le tableau 5.1. Tous ces paramètres entrent dans le calcul des forces d'usinage utilisé. Par contre, tous ne seront pas testés pour leur effet sur les résultats de l'usinage. Les facteurs liés au matériau seront fixés aux valeurs correspondant à l'aluminium 6061-T6 dont le tableau 5.1 indique les valeurs.

Tableau 5.1 Paramètres d'entrée au système théorique

Paramètres	Unités	Plages approximatives	Types
Profondeur de coupe (a)	mm	0.5 à 1.5 %	Outil
Avance par dent (c)	mm	0.1 à 0.3	Outil
Diamètre de l'outil (d)	mm	3 mm à 7 mm	Outil
Vitesse de rotation de l'outil (n)	Tours par minute	2000 à 4000	Outil
Nombre de lèvres (N)	Nombre	2 à 4	Outil
Angle de l'hélice (b)	Degré	0 à 45	Outil
Constante de coupe (ktc)	N/mm	796.077	Matériau
Constante de coupe (krc)	N/mm	168.829	Matériau
Constante de coupe (kte)	N/mm	27.711	Matériau
Constante de coupe (kre)	N/mm	30.801	Matériau

Les forces d'usinage peuvent être prédites en fonction des paramètres de coupe utilisés. La méthode de calcul est basée sur les constantes de coupe du matériau concerné. Les forces sont calculées pour chaque position de l'outil et intégrées sur la profondeur de coupe de l'outil. La méthode a été appliquée dans un code de simulation. Les forces d'usinage sont calculées en fonction de l'angle de rotation de l'outil pour un tour complet. Cette discréétisation permet de bien saisir le comportement de l'usinage lors des tests du prototype. Ce calcul est la somme des forces appliquées sur des petits éléments discréétisés considérés comme linéaires. La méthode permet de connaître les efforts de coupe selon les directions X, Y et Z desquels une liste de caractéristiques de sorties est extraite. La figure 5.3 montre le résultat de la simulation avec tous les paramètres au centre de leur plage de variation et les informations qui en sont extraites.

À partir de chacune des simulations, les informations critiques au processus sont extraites. Ces informations deviendront les paramètres de sortie du système théorique qui doivent être optimisés. On obtient, en fonction de l'angle de l'outil de coupe, les forces de coupe selon les axes X, Y et Z. La figure 5.7 présente l'effet de chacun des paramètres d'entrée sur chacun des paramètres de sortie.

Le système magnétique doit contrer la force axiale d'usinage en Z comme on l'a vu à la section précédente. De ce fait, la valeur maximale de la force axiale en Z (MaxFz) est

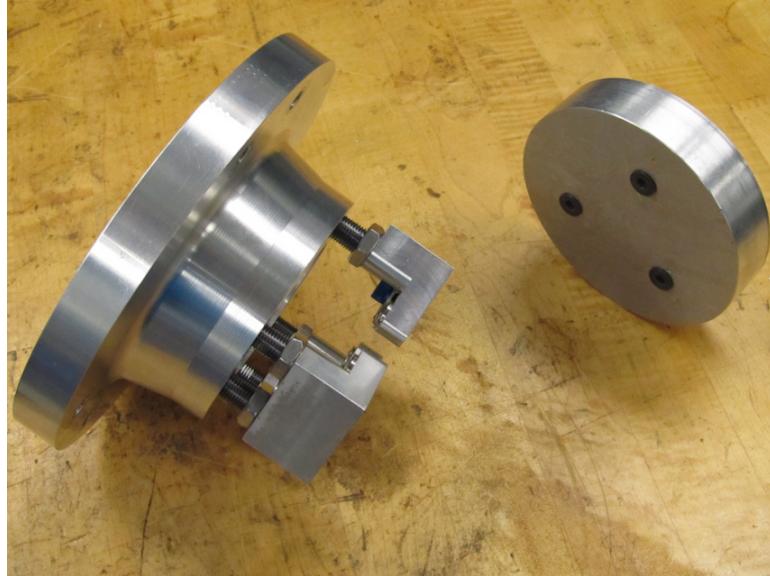


Figure 5.2 Les deux parties du prototype fabriqué en aluminium

extraite de chacune des simulations. La simulation théorique permettra de déterminer lequel des paramètres d'entrée a un effet sur la force axiale de coupe pour ainsi ajuster ces paramètres de façon à maximiser l'enlèvement de matière tout en gardant la force axiale de coupe à un niveau pouvant être repris par le bridage magnétique.

Les machines-outils sont conçues afin d'être le plus rigide possible, afin de minimiser l'amplitude des mouvements liés aux vibrations. Un bridage classique fixe la pièce solidement et offre une grande rigidité. Le système développé ici ne peut être considéré aussi rigide que les systèmes de bridage conventionnels. Afin de minimiser l'ampleur des mouvements liés aux vibrations, l'amplitude de la force d'excitation est minimisée. Pour ce faire, deux paramètres sont étudiés, soit la variation de la force d'usinage axiale en Z (MaxDz) et la variation du module total de la force, obtenue par la somme quadratique des forces en X, Y et Z (MaxDf). On définit par amplitude l'écart entre le module maximal et minimal force axiale ou totale, selon le cas.

La méthode permet également de déterminer le couple nécessaire à l'usinage selon les paramètres d'entrée. Ce paramètre est conservé à ce stade dans l'analyse. Les tests, comme présentés dans les prochaines pages, ont été réalisés sur une machine-outil dont le moteur de broche a une puissance de loin supérieur à ce qui est nécessaire. Lors de l'application finale sur manipulateur à six degrés de liberté, il sera nécessaire de limiter le couple exigé par l'usinage afin de limiter le poids de la tête d'usinage. Un moteur non sollicité à son maximum ajoutera du poids inutile à l'extrémité du robot, ce qui réduirait les performances du système.

La simulation permet également de déterminer le taux d'enlèvement de matière. La mé-

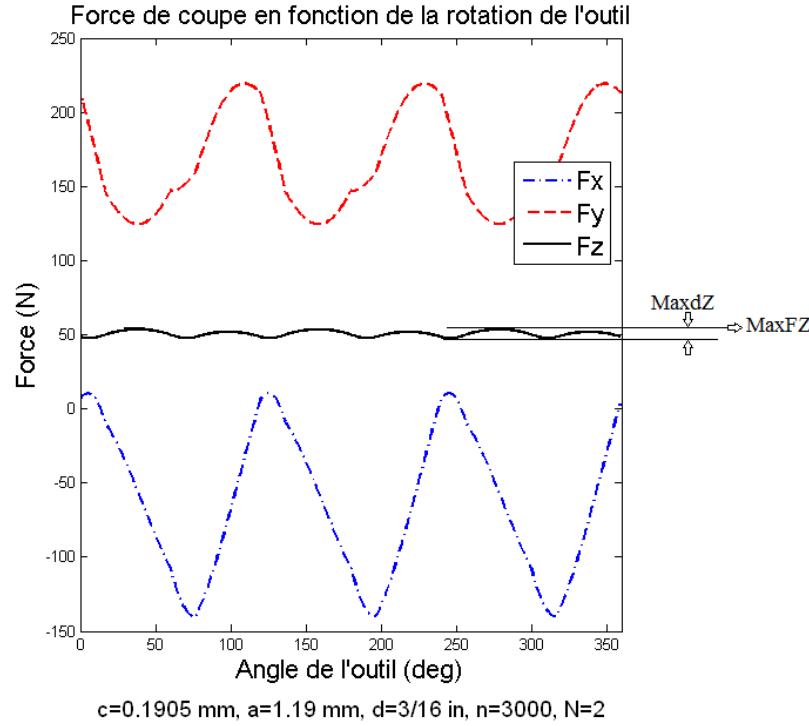


Figure 5.3 Efforts de coupe

thode doit être en mesure de retirer la plus grande quantité de matière dans le moins de temps possible.

Tableau 5.2 Paramètres de sortie du système théorique

Paramètres	Unités	Max ou Min
Couple maximal (MaxTc)	N.m	Minimiser
Force maximale en Z (MaxFz)	N	Minimiser
Variation maximale de la force en Z (Maxdz)	N	Minimiser
Variation maximale de la force totale (MaxdF)	N	Minimiser
Taux d'enlèvement de matière (<i>Material Removal Rate</i>) (MMR)	cm^3/min	Maximiser

5.1.2 Analyse des principaux facteurs d'influence

L'objectif principal de la simulation est de déterminer les facteurs qui sont suffisamment influents sur le processus d'usinage pour justifier de les inclure dans la campagne d'essais. La figure 5.7 montre que tous les éléments d'entrée n'ont pas le même impact sur le phénomène de coupe. Les graphiques présentent en abscisse les différents paramètres d'entrée alors qu'en ordonnée se retrouve les paramètres de sortie. Chacun des graphiques montre l'impact d'un



Figure 5.4 Le support maître

paramètre d'entrée sur un paramètre de sortie à la fois. Cette façon de procéder permet de bien dissocier chacun des effets et surtout d'établir lesquels devront être testés avec le prototype.

On remarque dans les différents graphiques de l'image, dans la colonne correspondant à l'angle de l'hélice, que l'impact de ce paramètre est négligeable. La faible profondeur de coupe fait en sorte que l'angle de l'hélice n'est pas significatif dans le processus. Ce paramètre ne sera pas considéré dans la suite de l'expérimentation. L'angle de l'hélice permet d'évacuer le copeaux plus facilement mais augmente la force axiale en Z, cette augmentation n'est pas significative dans l'application présente car la profondeur de coupe est faible.

La vitesse de rotation de la broche n'a pas d'effet théorique sur les forces que le système devra contrer. En effet, considérant que l'avance est donnée en distance par passage de dent, l'augmentation de la vitesse ne modifie pas le travail à réaliser par la machine. La puissance nécessaire de la broche est affectée par contre par la vitesse de rotation de la broche, il faudra en tenir compte lors de l'intégration de la technologie sur un manipulateur à six degrés de liberté. L'augmentation de la vitesse de rotation de la broche provoque une augmentation du taux d'enlèvement de matière, un facteur à maximiser. La vitesse de rotation de la broche sera donc testée avec le prototype.

La profondeur de coupe, l'avance par dent et le diamètre de l'outil ont un effet positif sur le taux d'enlèvement de matière. Lorsqu'on pousse ces paramètres, les forces d'usinage augmentent et varient de plus en plus à chaque rotation. Il faudra trouver le juste compromis entre le taux d'enlèvement de matière et les forces d'usinage. Ultimement, il faudra considérer la précision de la méthode, un paramètre qui n'a pu être simulé mais qui sera testé avec le prototype.

Le nombre de lèvres a un effet moins linéaire sur le système que les autres paramètres. Néanmoins, il est un facteur très influent et devra par conséquent être testé. Son effet sur la variation de la force axiale en Z est d'une amplitude très importante, que l'on peut voir en détail sur la figure 5.6. Il s'agit du paramètre le plus influent sur la stabilité de l'usinage tel que déterminé sur la figure 5.7.

5.1.3 Planification statistique de l'expérience

L'analyse, précédente, a permis de prédire les facteurs influents sur le processus d'usinage. Les paramètres de sortie ne seront pas les mêmes pour les tests réels que pour les simulations. La précision et l'efficacité du système ne pouvant être simulées, ces paramètres seront ajoutés aux paramètres de sortie. Les tableaux 5.4 et 5.5 présentent les paramètres d'entrée contrôlés et les paramètres de sortie mesurés lors des tests d'usinage. Les paramètres de sorties ne sont pas les mêmes pour le système réel, le seul paramètre pertinent est la variation de l'épaisseur



Figure 5.5 Le support esclave

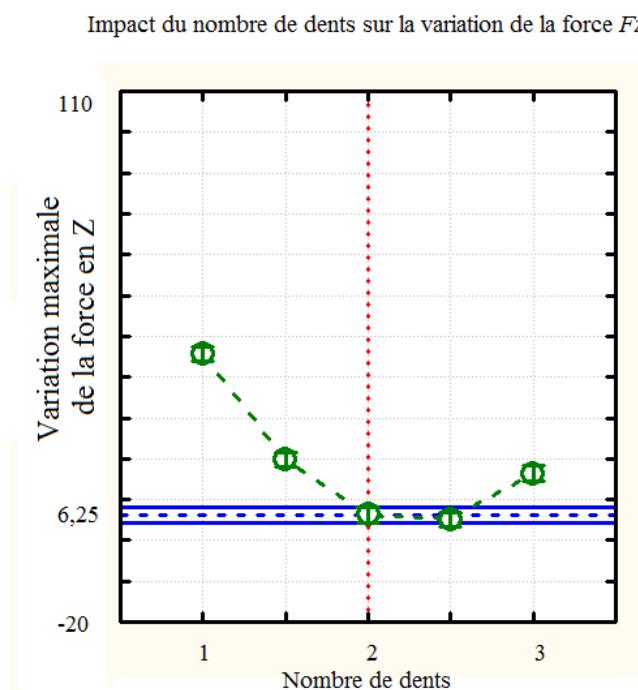


Figure 5.6 Impact du nombre de dents sur les variations de la force F_z donné en Newton

de coupe pour une commande donnée. Le taux d'enlèvement de matière est un paramètre important qu'il faut maximiser.

Les simulations ont permis d'étudier toutes les combinaisons de paramètres d'entrée en trois modalités. En tout, 3^6 (729) essais simulés ont été réalisés pour obtenir la figure 5.7. Les tests pratiques sur machine-outil ne peuvent pas, pour des raisons logistiques et économiques, être aussi nombreux.

Afin d'assurer une qualité statistique des résultats obtenus, une méthode statistique de planification et d'analyse d'expériences a été utilisée. Le design expérimental en facteur 2^{k-p} où k est le nombre de facteurs permet de réduire le nombre d'essais nécessaires à la compréhension du phénomène. Le design 2^{k-p} , s'il est bien utilisé, permet d'explorer toute la plage des paramètres d'entrée alors que l'addition d'un point central permet de déceler une courbure dans le phénomène (Montgomery, 2005). Les méthodes statistiques d'analyse permettent de mettre en valeur les facteurs explicatifs du phénomène.

Le type de plan expérimental utilisé est le plan 2^{k-p} avec point au centre. Le nombre d'essais réalisés sera 2^{5-2} , donc huit en plus du point au centre pour un total de neuf. Le choix des plages des paramètres d'entrée est fait en fonction d'utiliser une plage la plus grande possible de la machine-outil disponible pour les tests tel qu'on le voit au tableau 5.4. Le tableau 5.3 montre les essais, dans l'ordre aléatoire de leur réalisation. Les tests doivent être effectués dans un ordre aléatoire pour éviter un apprentissage de la part du système. Avec un ordre d'exécution aléatoire, on s'assure que le résultat du test présent n'influencera pas le résultat du test suivant (Montgomery, 2005).

Tableau 5.3 Tableau des tests sur machine-outil

No. de l'essai	c (mm)	a (mm)	d (mm)	n (TPM)	N (dents)
1	0.254	1.588	3.175	4000	2
2	0.127	1.588	3.175	2000	4
3	0.254	0.794	6.350	2000	4
4	0.191	1.191	4.763	3000	3
5	0.127	1.588	6.350	2000	2
6	0.254	0.794	3.175	2000	2
7	0.254	1.588	6.350	4000	4
8	0.127	0.794	6.350	4000	2
9	0.127	0.794	3.175	4000	4

La mesure des forces d'usinage n'a pas été possible avec l'équipement disponible. En effet, le lien non rigide entre la table dynamométrique et le lieu de l'usinage n'a pas permis d'obtenir des données pertinentes. La force F_z est reprise localement par le bridage magnétique lors de l'usinage, aucun transfert de force n'est fait au delà de la zone d'usinage, ce qui rend les forces

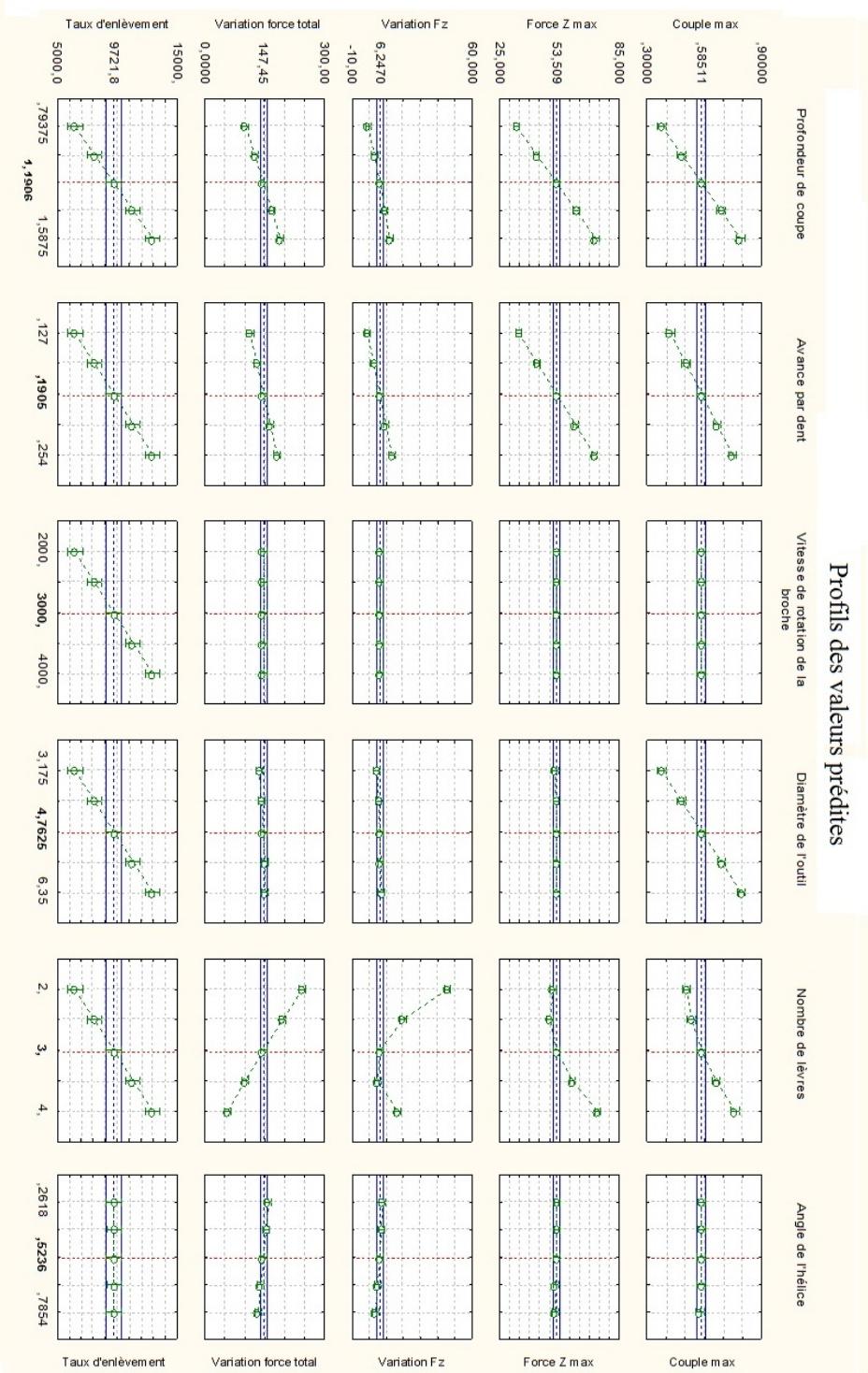


Figure 5.7 Profils des valeurs prédictes où le couple maximum, la force en Z, la variation de la force en Z et totale sont donné en Newton. Le taux d'enlèvement de matière est donné en centimètres cube par minute

d'usinage invisible à un table dynamométrique. La variation de l'épaisseur de coupe obtenue est le seul paramètre mesuré lors des tests réels. La mesure de la variation est nécessaire car l'ajustement de l'épaisseur de coupe n'est pas réalisable avec le prototype actuel. L'ajustement de la hauteur du couteau permet de s'approcher de la valeur nominale de profondeur de coupe. Le taux d'enlèvement de matière est obtenu par calcul théorique, par la multiplication de tous les paramètres d'entrée.

Tableau 5.4 Paramètres d'entrée au système réel

Paramètres	Unités	Plages approximatives
Profondeur de coupe	mm	0.75 à 1.5 %
Avance par dent	mm	0.1 à 0.3
Diamètre de l'outil	mm	3 à 7
Vitesse de rotation de l'outil	Tours par minute	1000 à 4000
Nombre de lèvres	Nombre	2 à 4

Tableau 5.5 Paramètres de sortie au système réel

Paramètres	Unités	Min ou Max
Variation de l'épaisseur de coupe	mm	Minimiser
Taux d'enlèvement de matière	cm ³ /min	Maximiser

5.2 Design du prototype

Le prototype, montré aux figures 5.1 et 5.2, permet de démontrer l'efficacité de la méthode avant de mettre de l'avant la mise en place d'une machine grand format. Il est entendu, dès le départ, que ce premier prototype fonctionne sur une machine-outil à commande numérique plutôt qu'un manipulateur à six degrés de liberté. Ce choix est nécessaire afin de s'assurer que le principe soit fonctionnel sur une machine rigide et ainsi valider l'hypothèse.

Afin de maximiser la performance du prototype, un design compact permettant de rigidifier le panneau d'aluminium le plus possible près de la zone d'usinage a été réalisé. Les différents composants du prototype sont présentés à la figure 5.8. Le support esclave présenté à la figure 5.5, voit ses aimants attirés par les aimants opposés contenus dans le support maître dont un des trois sous-mondules est montré à la figure 5.4. Il y a trois patins de chaque côté faits en polyoxyméthylène, un plastique judicieusement choisi pour sa faible résistance au frottement sur l'aluminium, comme nous le verrons à la section 5.3.2. Ces points de contact sont opposés de part et d'autre du panneau et sont chacun entourés par trois

couples d'aimants. Ces neuf paires d'aimants, ayant des pôles opposés, créent la force nécessaire à l'usinage du panneau en maintenant celui-ci en contact avec l'outil de coupe. Cette force sera déterminée à la section 5.3.1. Le contrôle de l'épaisseur de coupe est assuré par la vis d'ajustement alors que l'écrou de serrage fixe le système en place.

L'épaisseur de coupe n'est pas contrôlée dynamiquement, le prototype vise à établir la capacité du processus d'usinage. Les performances en précision et capacité seront déterminées après les tests.

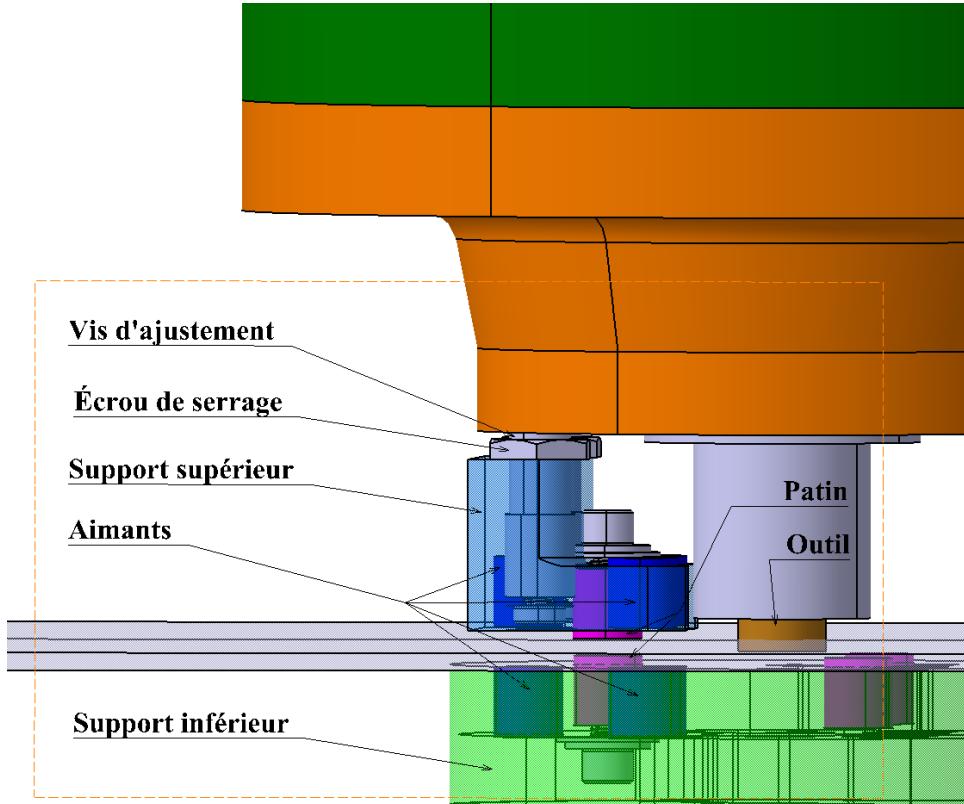


Figure 5.8 Descriptif des composantes

5.3 Tests préliminaires

En préambule aux test de coupes, certains paramètres, dont la force d'attraction totale et le matériau idéal des patins doivent être déterminés. Deux tests ont été réalisés, un test de force entre les supports maître et esclave du prototype et un test de frottement avec trois

différents matériaux pouvant être choisis pour former les patins.

5.3.1 Test de Force d'attraction totale *Fat*

Avant les essais d'usinage, il est nécessaire de s'assurer de la capacité du procédé afin de tester la plus grande plage possible. Comme établie précédemment, la composante la plus importante du système est la force *Fat* qui dicte les efforts de coupe que le système entier pourra reprendre. Pour déterminer la force *Fat* du prototype, le support inférieur est fixé solidement sur une table dynamométrique, le tout installé dans une machine-outil. Le support maître monté sur la machine a été approché jusqu'à un quasi-contact avec le support esclave. Le support maître a ensuite été éloigné jusqu'à une distance correspondant à l'épaisseur de la plaque (3 mm) qui sera utilisée lors des tests.

La figure 5.9 montre les résultats de ce test sur laquelle on constate une force de 95 N à une distance de 3 mm, qui correspond à la distance entre les aimants du prototype en présence de la plaque à usiner. Il s'agit de la valeur de *Fat* qui permet de déduire que la force maximale d'usinage dans la direction Z est de 95 N. L'essai numéro 7 (voir tableau 5.3) est le plus agressif et la force d'usinage en Z prévue est de 130 N. La capacité du prototype sera grandement mise à l'épreuve et le résultat du test permettra de mieux comprendre le processus d'usinage, au-delà de sa capacité théorique. On voit que la force chute rapidement lors de l'éloignement, ce qui correspond à la loi de Coulomb.

5.3.2 Tests de frottement

Lors d'un déplacement latéral, c'est-à-dire dans le plan XY, le support esclave utilise la force magnétique pour se déplacer et ainsi rester dans la zone d'usinage. Le frottement des patins avec le panneau s'oppose à ce déplacement et doit être minimiser. De plus, la dureté du matériau des patins doit être inférieure à celle de l'aluminium pour éviter de rayer ce dernier. L'équation (5.1) montre que le module du frottement est dépendant de la force normale *Fat* et du coefficient de frottement entre les deux matériaux. Cette relation simple permet de mettre en place un test de comparaison sur la machine-outil.

$$F_f = \mu F_n \quad (5.1)$$

Pour les essais de frottement, les supports maître et esclave sont montés sur la machine-outil avec une plaque d'aluminium de l'épaisseur qui sera testée lors de l'usinage. La machine est déplacée à une vitesse constante contrôlée numériquement et les forces sont enregistrées à l'aide d'une table dynamométrique. La figure 5.10 montre l'installation utilisée pour réaliser ces acquisitions de données.

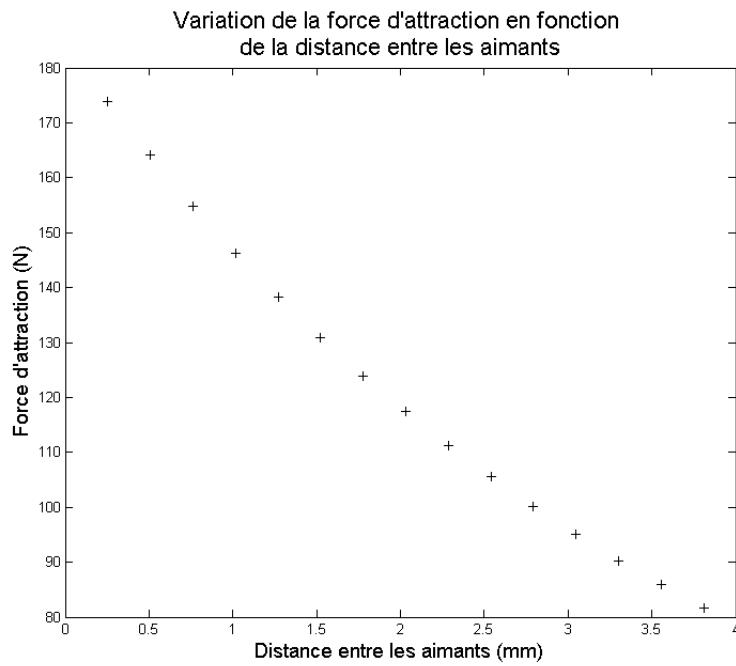


Figure 5.9 Variation de la force d'attraction en fonction de la distance entre les aimants

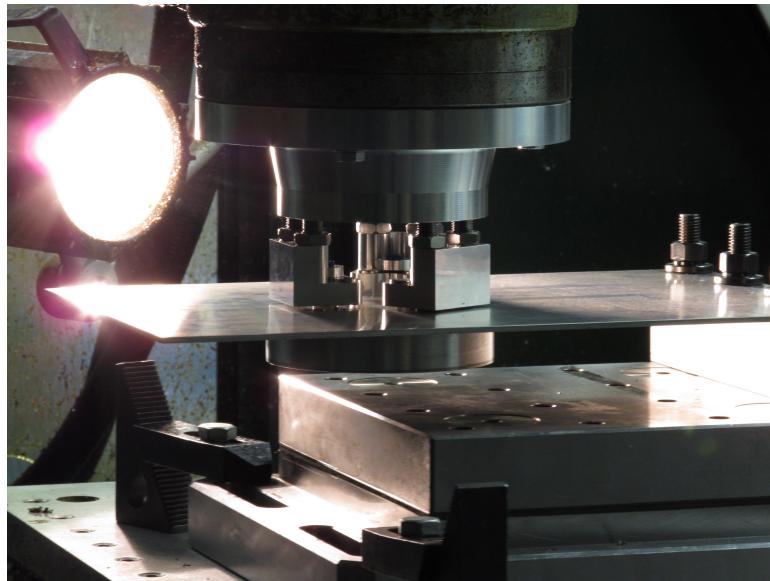


Figure 5.10 Montage expérimental d'acquisition des forces de frottements

Trois matériaux disponibles commercialement et annonçant une faible résistance au frottement ont été testés sur le module d'usinage. Ces trois matériaux sont le nylon 66, la résine fluoropolymère et le polyoxyméthylène. La force de frottement est mesurée directement pour chacun des matériaux testés, le coefficient de frottement est calculé en considérant F_{at} égale

Tableau 5.6 Résultats des tests de frottement

Matériau	Coefficient de frottement
Nylon 6-6	0.41
Résine fluoropolymère	0.32
Polyoxyméthylène	0.17

à 95 N comme déterminé précédemment. Le tableau 5.6 montre les résultats. Le polyoxyméthylène a été choisi pour la suite des tests, car il offre significativement moins de résistance au frottement que les autres plastiques testés.

5.4 Résultats des tests

Les résultats des tests sont présentés et analysés suivant les méthodes de Montgomerey. Les neuf essais réalisés sur la machine-outil doivent permettre de déterminer quelle est la meilleure combinaison de paramètre de coupe.

5.4.1 Présentation des résultats

Les seuls paramètres de sortie précédemment retenus pour les essais sont la variation de l'épaisseur de coupe de la surface usinée ainsi que le taux d'enlèvement de matière. Ces deux paramètres sont à optimiser. La variation de l'épaisseur de coupe représente l'intervalle de tolérance atteignable sur la surface à usiner alors que le taux d'enlèvement de matière est l'unité de mesure de la productivité de la méthode.

La figure 5.11 montre un test sur machine-outil. On y voit que le panneau d'aluminium est maintenu en contact avec le support maître avec l'aide du support esclave. Les tests ont été effectué sur une machine-outil à commandes numériques à trois axes. Le panneau, maintenu seulement à une extrémité, n'a pas la rigidité nécessaire pour être usiné sur toute sa longueur comme on le voit à figure 5.12. Sur cette figure, l'outil de coupe a été mis en contact avec la pièce au lieu d'attache puis déplacé pour démontrer que l'usinage n'aurait même pas lieu à cette distance. Le montage de la plaque est réalisé sur une table dynamométrique qui permet de mesurer les forces reprises au bridage durant l'essai..

Les résultats du tableau 5.7 sont obtenus suite aux tests sur machine-outil et une mesure sur une machine à mesurer tridimensionnelle. La surface a été palpée à plusieurs endroits et la différence de hauteur maximale entre la surface non usinée de la plaque et le fond de la rainure usinée est considérée comme la variation de profondeur de coupe de l'essai. La machine à mesurer utilisée, qui présente une erreur volumétrique admissible de $0.48+L/200 \mu\text{m}$ a permis de mesurer la profondeur de coupe en plusieurs endroits sur la pièce usinée.



Figure 5.11 Montage d'usinage

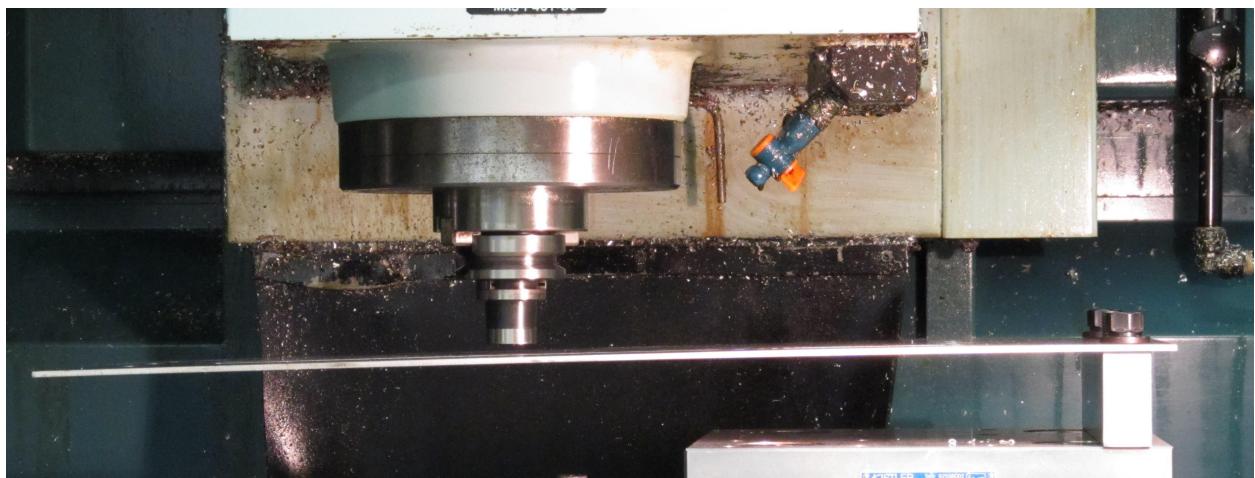


Figure 5.12 Démonstration du manque de rigidité du panneau

Tableau 5.7 Tableau des résultats des tests sur machine-outil

No. de test	Entrée				Sortie		
	c	a	d	n	N	Planéité	MMR
1	0.254	1.588	3.175	4000	2	0.0182	10 241
2	0.127	1.588	3.175	2000	4	0.0202	5 120
3	0.254	0.794	6.350	2000	4	0.0473	10 241
4	0.191	1.191	4.763	3000	3	0.0260	9 721
5	0.127	1.588	6.350	2000	2	0.0165	5 120
6	0.254	0.794	3.175	2000	2	0.0193	2 560
7	0.254	1.588	6.350	4000	4	0.0328	40 967
8	0.127	0.794	6.350	4000	2	0.0207	5 120
9	0.127	0.794	3.175	4000	4	0.0381	5 120

Pour chaque mesure, quatre points, répartis de chaque côté de la rainure, ont été palpés près du point de mesure sur la surface non usinée. La distance entre le point de mesure dans la zone usinée et le plan moyen passant par les quatre points palpés sur la surface non usinée est considéré comme étant la profondeur de coupe locale. En tout, cent points ont été palpés sur chacune des rainures usinés. La variation de l'épaisseur de coupe est donc la différence entre l'épaisseur de coupe maximale et minimale.

5.4.2 Analyse des résultats

Les résultats présentés au tableau 5.7 sont analysés avec des méthodes statistiques. On sait que le taux d'enlèvement de matière est obtenu par le produit de tous les paramètres d'entrée et ne nécessite pas d'analyse subséquente pour déterminer s'il varie ou non. Tous les paramètres d'entrée ont un effet proportionnel sur le taux d'enlèvement de matière. La distribution de Pareto montre que le nombre de lèvres a le plus grand effet suivi de la profondeur de coupe. La distribution de Pareto est un diagramme qui classe les paramètres d'entrée selon leur effet sur la valeur de sortie, on voit sur ce graphique que la variation de l'épaisseur de coupe est surtout influencée par le nombre de dents mais aussi par la profondeur de coupe. Les effets sur le graphique sont standardisés, on peut donc comparer les effets directement sans considérer leur étendue respective.

La figure 5.14 montre l'effet combiné des deux paramètres les plus influents sur la variation de l'épaisseur de coupe. On observe sur ce graphique que la valeur optimale du nombre de dents est de deux et que la profondeur de coupe doit être maximisée. On remarque une courbure dans cette figure, le nombre de dents de l'outil n'a pas un effet linéaire sur le processus d'usinage. L'analyse théorique avait déjà prédit un comportement non linéaire avec le nombre de dents de l'outil. On voit que pour un outil à deux lèvres, la profondeur de

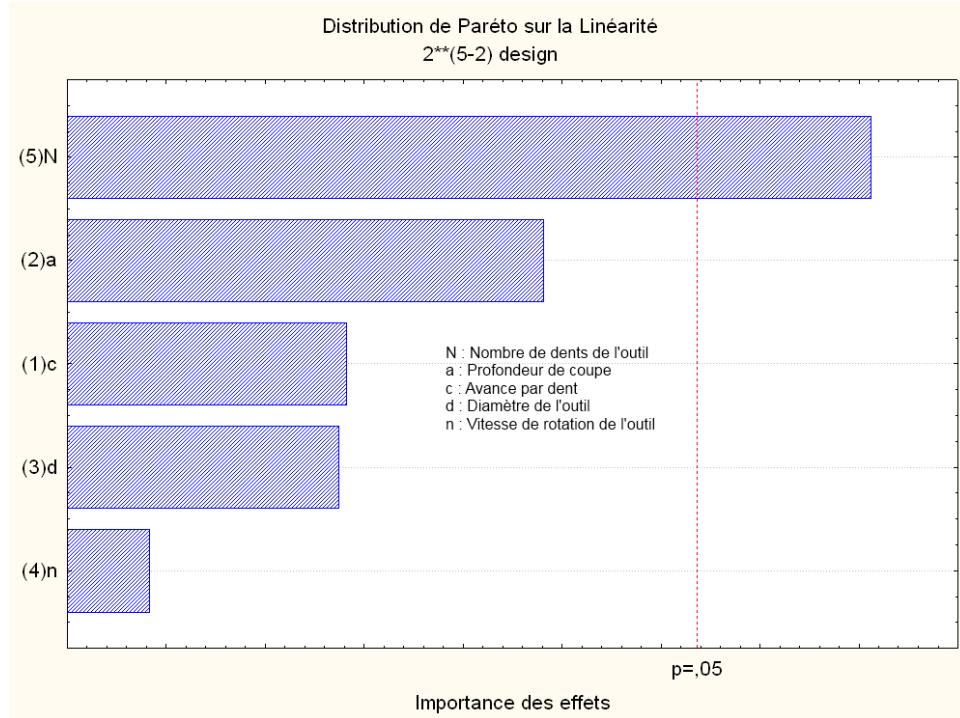


Figure 5.13 Distribution de Pareto montrant l'impact relatif de chacun des paramètres d'entrée sur la variation de l'épaisseur de coupe

coupe nominale n'a pas d'impact sur la variation de la profondeur de coupe réelle. De ce fait, la profondeur peut être augmentée avec un effet négligeable la stabilité du processus comme on le voit sur le graphique.

Les coefficients de régression linéaire, permettant de prédire la variation de l'épaisseur de coupe d'un essai, sont donnés au tableau 5.8. Le coefficient de régression R^2 est de 0.89, ce qui signifie que le modèle explique 89 % de la variabilité du processus d'usinage. Les coefficients présentés dans le tableau permettent de prédire la variation de la profondeur de coupe. Ceux-ci doivent être multipliés par les paramètres d'entrée, dans leur unité respective, et additionnés.

Tableau 5.8 Coefficients du modèle de régression prédisant la variation

Variable d'entrée	Coefficient	Valeur P
Intercept	-0.001971	0.8913
Avance par dent	0.043495	0.2536
Profondeur de coupe	-0.011870	0.0955
Diamètre de l'outil	0.001693	0.2639
Vitesse de rotation de l'outil	8.125×10^{-7}	0.7063
Nombre de lèvres	0.007963	0.0269

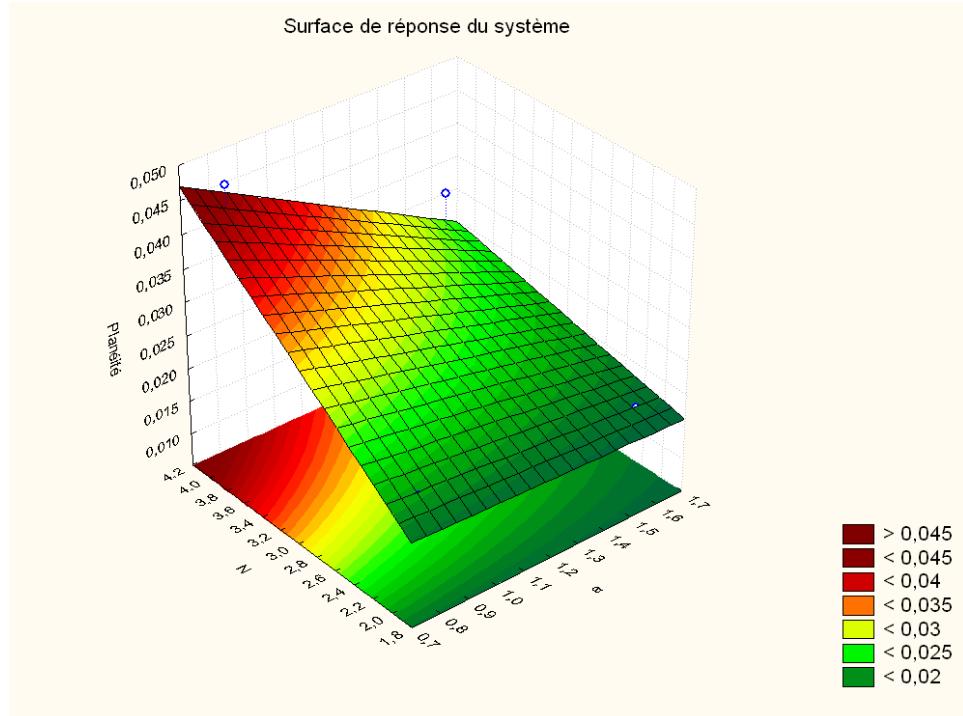


Figure 5.14 Effets du nombre de dents et de la profondeur de coupe sur la Planéité

La figure 5.15 montre l'influence de chacun des paramètres en plus de résumer, avec les graphiques de la dernière ligne, les valeurs qui optimisent les deux paramètres de sorties. On remarque que l'augmentation de tous les paramètres a un effet positif sur le taux d'enlèvement de matière. Comme le taux d'enlèvement de matière est obtenu par multiplication mathématique de tous les paramètres d'entrée, leur impact est identique pour tous les paramètres.

L'augmentation de l'avance de coupe définit en avance par passage de dent a pour effet de faire augmenter la variation de la profondeur de coupe. Le diamètre de l'outil et la vitesse de rotation de l'outil ont, dans une moindre mesure, l'effet de faire augmenter la variation de la profondeur de coupe.

La commande en profondeur de coupe, comme discuté précédemment, a un effet inverse sur la variation de la profondeur de coupe. En effet, en augmentant la commande en profondeur de coupe, la variation de la profondeur réellement retirée diminue. Comme l'augmentation de l'épaisseur de coupe a un effet positif tant sur le taux d'enlèvement de matière que sur la qualité de l'usinage, ce paramètre sera poussé à son maximum.

Le paramètre qui a le plus d'impact sur la variation de la profondeur de coupe est le nombre de dents. Étant donné que la vitesse de rotation de l'outil n'a pas de conséquence sur l'usinage, il est possible de compenser, avec la vitesse de rotation de l'outil, un manque à

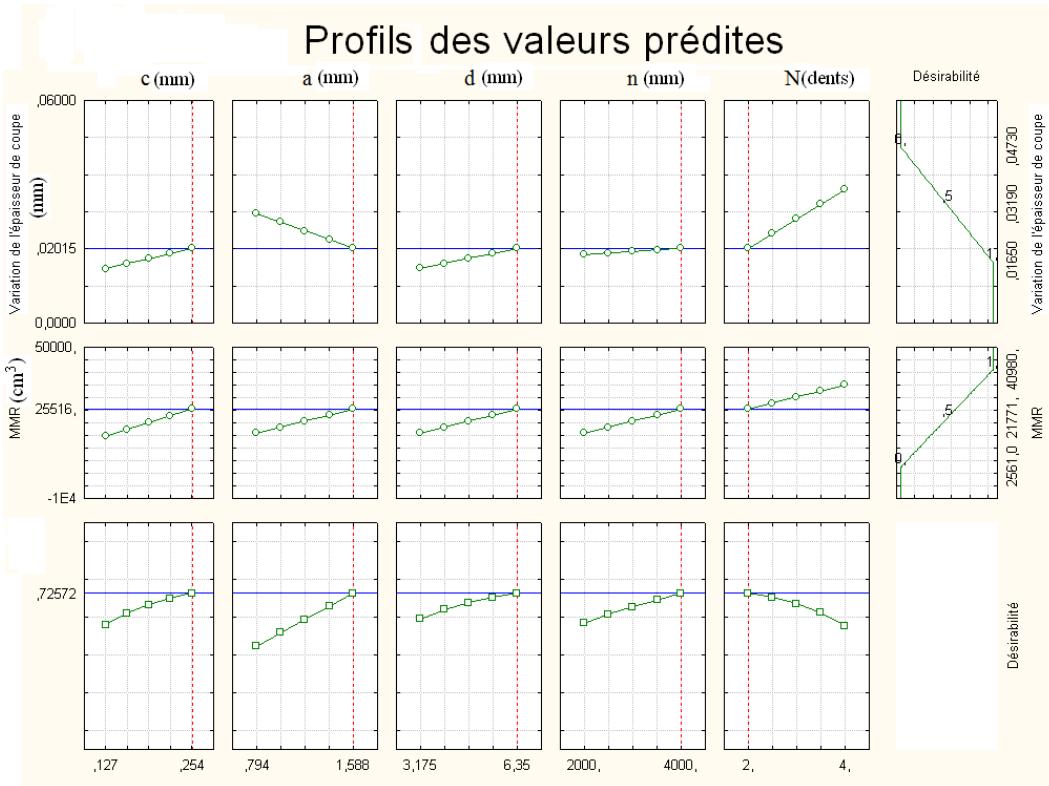


Figure 5.15 Profils des valeurs prédictes et fonction de désirabilité

gagner causé par le nombre de passage de l'outil. L'augmentation de la vitesse de rotation est équivalente à l'augmentation du nombre de dents sur le couple de la broche nécessaire lors de l'usinage dans la mesure où l'avance par dent reste la même. La compensation du nombre de dents par une vitesse de rotation plus élevée est donc possible mais devra être testée sur une machine dont la vitesse de rotation de la broche est supérieure à 4000 tours par minute.

5.4.3 Vérification des résultats

La combinaison donnant les meilleurs résultats par analyse des données des essais n'a pas été testée dans le protocole prévu. En effet, la planification de l'expérience est faite à l'avance et n'est pas modifiée durant les tests pour s'assurer que le résultat d'un essai n'influence pas le résultat de l'essai suivant. L'indépendance des essais est essentielle pour garantir que la modélisation du phénomène est exacte.

Afin de vérifier le modèle établi à la section précédente, il est nécessaire de faire un test supplémentaire. Ce test est effectué dans les mêmes conditions que les neuf tests effectués pour établir le modèle. À partir de ces résultats, il est possible de déterminer, dans les plages de valeurs qu'il a été possible de tester, qu'elle est la meilleure combinaison pour maximiser

le taux d'enlèvement de matière et minimiser la variation de l'épaisseur de coupe de la pièce. La combinaison ainsi déterminée est présentée au tableau 5.9.

La combinaison déterminée comme étant optimale à partir de l'analyse des données des tests doit maintenant être testée. Cette combinaison combine à la fois un taux d'enlèvement de matière de plus de $10\ 000\ \text{mm}^3/\text{min}$ et une prédition de la variation très faible de la profondeur de coupe de 0.014 mm. Le test supplémentaire est effectué afin de confirmer la prédition du système. Il permet également de conclure que la combinaison de paramètre de coupe est effectivement optimale. La variation de l'épaisseur de coupe mesurée est de 0.017 mm, bien que plus élevée que prévu, cette valeur est plus faible que la majorité des essais effectués. Une seule combinaison a une variation d'épaisseur de coupe plus faible à 0.0165 mm, mais le taux d'enlèvement de matière est inférieur de la moitié.

Tableau 5.9 Combinaison optimale de paramètres d'entrée et résultats de mesures

c	a	d	n	N	MMR	Variation prévue	Variation mesurée
0.127	1.588	6.35	4000	2	10 241	0.0140	0.0172

La machine-outil utilisée pour les tests avait une vitesse de rotation de la broche limitée à 4000 tours par minute, il n'a donc pas été possible de tester au-delà de cette limite même si l'usinage de l'aluminium est possible à des vitesses de rotation beaucoup plus élevées. Selon les résultats présentés ici, la vitesse de rotation pourrait être augmentée considérablement. L'effet de la vitesse de rotation est très faible sur la variation de l'épaisseur de coupe, mais considérable sur le taux d'enlèvement de matière.

Aucun test avec des outils de plus de 6.35 mm (0.25 po) n'a été effectué pour des raisons de sécurité. Le processus étant nouveau, aucune action pouvant mettre les personnes impliquées en danger n'a été prise. Le même raisonnement s'applique à la profondeur de coupe qui a été limitée à 1.588 mm (0.0125 po) afin de limiter le risque de bris d'outil. L'analyse des résultats d'essais démontre que le processus d'usinage reste stable même lorsque la profondeur de coupe et le diamètre de l'outil augmentent. Les données présentées à la figure 5.15 montrent que les paramètres d'entrés sont tous à leur valeur maximale de la plage testée. Il sera donc nécessaire de faire des essais hors de ces plages testés. Selon la tendance, le diamètre de l'outil et la profondeur de coupe peuvent être augmentés.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

Les travaux décrits dans ce mémoire montrent qu'il est possible d'innover en terme d'usinage de panneau pour réduire l'empreinte de l'aviation sur l'environnement. La méthode a beaucoup évolué dans les dernières années pour mener à une solution commerciale au début de 2010. Partant de cette solution les travaux présentés dans ce mémoire visent à améliorer les méthodes actuelles afin de les rendre plus responsables écologiquement. De plus, le Canada, en particulier le Québec, a développé plusieurs de ses régions avec le développement de l'industrie de l'aluminium et de l'aviation. Si les constructeurs remplacent l'aluminium pour des pièces en matériau composite, notre économie pourra souffrir de cette situation. La méthode présentée dans ce mémoire permet aux constructeurs d'avoir à leur disposition une nouvelle technologie qui présente beaucoup de potentiel, notamment écologique, face aux nouveaux matériaux composites.

6.1 Synthèse des travaux

L'hypothèse avancée au début de cet ouvrage annonce qu'il sera possible d'usiner mécaniquement un panneau d'aluminium mince sans synchroniser deux machines-outils pour brider la pièce. Le design proposé est constitué d'aimants de part et d'autre de la pièce usinée. La force d'attraction entre ces aimants est suffisante pour contrer la force axiale d'usinage. Les théories établies dans les premiers chapitres ont été validées avec un prototype. Ce prototype a non seulement permis de vérifier l'hypothèse de départ, mais il a également été utilisé pour déterminer directement la force d'attraction entre les aimants et aussi pour choisir le meilleur matériel pour les points de contact avec le panneau. L'utilisation d'une méthode statistique a permis de mieux comprendre le phénomène de coupe et de déterminer la meilleure combinaison de paramètres de coupe. Cette combinaison a été testée avec succès.

6.2 Limitations de la solution proposée

L'hypothèse vérifiée dans ce mémoire ne l'est que dans certaines conditions particulières. Les tests ont été effectués sur une machine-outil à commande numérique dotée d'une grande rigidité. Cette machine, contrairement à un manipulateur à six degrés de liberté, a des guides linéaires très rigides. Il est raisonnable de croire que l'usinage pourra avoir lieu sur un embout de robot, car il est anticipé que la compliance du panneau domine celle d'un robot industriel.

En effet, les forces d’usinage sont reprises localement. De plus, les parcours testés étaient linéaires, ce qui ne représente pas la finalité du processus. En effet, il n’est pas possible d’effectuer l’usinage d’une poche complète sur une machine-outil, car cette machine ne dispose pas d’un degré de liberté supplémentaire qui lui permettrait de positionner les patins correctement lors de l’usinage. Les efforts de coupe qui ont été atteints ne sont pas suffisamment grands pour être en mesure de produire le panneau à sa dimension finale en une seule passe. Dans l’état actuel d’avancement du procédé, les temps requis pour l’usinage seraient grands.

6.3 Améliorations futures

La prochaine étape pour rendre la technologie exposée dans ce mémoire plus mature est de monter le système actuel sur un manipulateur à 6 degrés de liberté et ainsi valider la capacité à usiner des poches simples. De plus, la force d’attraction entre les aimants chutant radicalement avec la distance, il serait approprié d’installer des aimants de plus grand diamètre pour être en mesure d’effectuer des passes permettant d’atteindre la dimension finale du panneau en une seule passe. Dans son état actuel, le prototype ne permet pas de modifier l’épaisseur en cours d’usinage. Les vis d’ajustement actuel devront être remplacées par des actuateurs linéaires permettant de modifier indépendamment la position des patins sur la surface. Avec une telle technologie, tout sera alors en place pour effectuer l’usinage d’un panneau d’avion réel.

En plus des améliorations mécaniques au procédé, le développement du contrôle est à faire. Un capteur devra être monté dans le système, ce dernier devra mesurer l’épaisseur restante sur le panneau en temps réel. La boucle de contrôle sera donc locale ce qui permettra d’atteindre une précision que le robot ne pourrait atteindre à lui seul. Cette boucle de contrôle n’aura pas d’effet sur les articulations du robot qui sera doté de son propre contrôleur. Il est avancé également qu’il sera nécessaire d’intégrer dans la méthode d’usinage un balayage préalable du panneau avec une méthode de mesure optique permettant de connaître la position réel du panneau une fois que ce dernier est monté près de la machine.

RÉFÉRENCES

- AIRBUS, DUFIEUX. (2005). Green Advance Panel. Paris : Airbus.
- BUDAK, E. , ALTINTAS, Y.,ARMAREGO, E. J. A.(1996). Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 118., p.216-224.
- HAMANN, J.-C. Airbus. (2009). Process and mechanical device for machining flexible panels, in particular with complexe shape. Brevet américain US 7,507,059 B2.
- HAMANN,J-C. Airbus. (2007). Process and device for machining by windowing of non-deformable thin panels. Brevet américain US 7,168,898 B2.
- MARTINEZ, M.T. (1992). Machine tool intallation for supporting and machining workpiece. Brevet américain US 5,163,793.
- MONTGOMERY, D.C. (2005). Design and analysis of experiments (6th ed.). Hoboken: Wiley.
- PANCZUK, R. ET FOISSAC, P-Y. Airbus, Dufieux. (2010). Process ans device for machining of panels. Brevet américain US 7,682,112 B2.
- SCOTT, G. BOEHM, B. DEWAR, R. ELLIOTT, C. (2009). Cseries program update. Paris : Bombardier.