



HAL
open science

Vers une instrumentation non-invasive pour l'analyse en temps réel de la puissance de fraisage : étude comparative avec une platine dynamométrique invasive

Jamy Vignaud, Jean-Yves K'Nevez, Gaëtan Albert, Stéphane Victor, Raynald Laheurte, Olivier Cahuc, Philippe Verlet

► To cite this version:

Jamy Vignaud, Jean-Yves K'Nevez, Gaëtan Albert, Stéphane Victor, Raynald Laheurte, et al.. Vers une instrumentation non-invasive pour l'analyse en temps réel de la puissance de fraisage : étude comparative avec une platine dynamométrique invasive. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784377

HAL Id: hal-04784377

<https://hal.science/hal-04784377v1>

Submitted on 15 Nov 2024

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

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



Vers une instrumentation non-invasive pour l'analyse en temps réel de la puissance de fraisage : étude comparative avec une platine dynamométrique invasive

Jamy VIGNAUD^(a,b,c), Jean-Yves K'NEVEZ^(a), Gaëtan ALBERT^(a),
Stéphane VICTOR^(b), Raynald LAHEURTE^(a), Olivier CAHUC^(a),
Philippe VERLET^(c)

(a) Univ. Bordeaux, I2M UMR 5295, CNRS, Talence

(b) Univ. Bordeaux, IMS UMR 5218, CNRS, Talence

(c) VLM Robotics, Le Barp

Mail : jamy.vignaud@u-bordeaux.fr

Résumé : L'objectif de la régulation de la puissance d'usinage vise à minimiser la puissance consommée et les contraintes issues des phénomènes thermo-mécanique lors de la coupe. Cet objectif permet de tendre vers un usinage dans des conditions optimales malgré les grandes variabilités des trajectoires, des matériaux et des outils. La régulation de la puissance d'usinage a également pour objectif de minimiser la consommation énergétique et de répondre ainsi aux impératifs environnementaux. Les travaux présentés, soutenus par VLM Robotics, se concentrent sur le fraisage à commande numérique.

Tout d'abord, un modèle simplifié permet de déterminer la puissance à partir du torseur cinématique et du torseur d'actions mécaniques au niveau de l'arête de coupe. Ces actions sont mesurées à l'aide d'une platine dynamométrique mesurant les forces et les moments générés lors de la coupe.

Dans un deuxième temps, afin d'utiliser une instrumentation plus industrialisable, le dynamomètre doit être supprimé. Une méthode d'identification en temps réel sera mise en œuvre pour estimer les forces et les moments. Cette méthode utilisera mesures internes telle que la puissance de la broche et / ou externe comme la température de l'interface pièce-outil.

Mots clés : Usinage, Puissance, Identification, Régulation, Forces, Moments.

1 Introduction

Le contexte actuel vise à garantir des conditions d'usinage optimales pendant toute la durée de la coupe et à préserver les ressources et donc à moins consommer. Le sujet de cet article porte sur la minimisation de la puissance consommée en temps réel pendant l'usinage. Une étude comparative sera menée ultérieurement sur des surfaces obtenues à conditions constantes puis évolutives. L'étude évaluera l'impact de l'usinage à puissance optimale notamment sur l'état de contraintes résiduelles.

La puissance électrique permet d'apporter la puissance d'entrée du système d'usinage à la broche et aux axes. Elle est ensuite transformée en partie en puissance mécanique consommée par la coupe de la matière et la formation du copeau. Enfin, la puissance thermique provient de la dissipation de la puissance mécanique en chaleur (principalement dans les zones de cisaillements primaire et secondaires et par frottements outil-matière et outil-copeau) (Cahuc *et al.*, 2001).

Les travaux visant à s'assurer du minimum de consommation de la puissance se divisent en deux parties. Dans un premier temps, une surveillance multi-capteurs du procédé d'usinage permettra d'étudier l'évolution des différents phénomènes physiques, permettant d'estimer la puissance instantanée et les sources à minimiser (Figure 1.a). À cette étape, l'utilisation de capteurs invasifs, tels que la platine dynamométrique à six composantes, sera nécessaire pour connaître complètement le torseur d'actions sur la pièce à usiner de manière fiable et afin de valider les mesures et modèles proposés.

Dans un second temps, l'objectif final est de mettre en place des capteurs uniquement industrialisables (accéléromètres, commande numérique, ...) sur le procédé. La partie estimant la puissance instantanée étant validée par la première étape, il deviendra donc possible de réguler et de maintenir cette puissance minimale en modifiant les vitesses de coupes et d'avance (Figure 1.b).

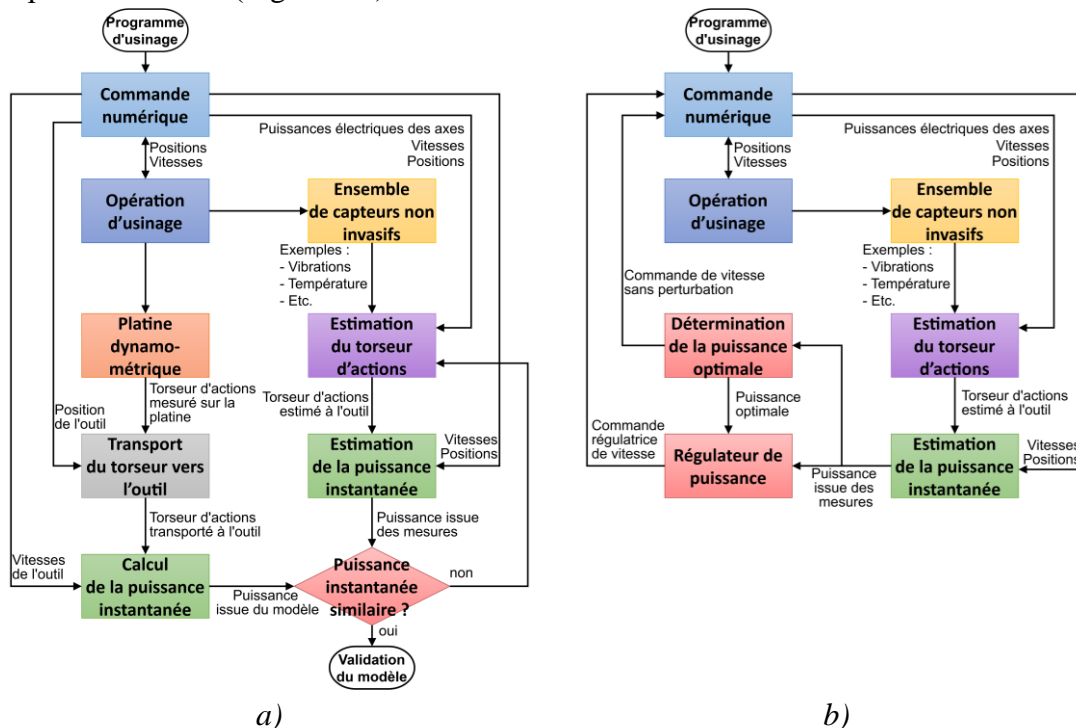


Figure 1 : Schémas fonctionnels du sujet : a) Phase d'apprentissage - Mesure, estimation et comparaison de la puissance instantanée ; b) Dispositif industriel - Régulation de la puissance sans capteurs invasifs

2 Modèle de coupe

Dans ce papier, nous nous limiterons à la modélisation phénoménologique de l'effort et du moment de coupe.

Le premier modèle « expérimental » utilisé (Martellotti, 1941) relie la force mécanique générée lors de la coupe à la section coupée A_d . Les forces de coupe F_c et d'avance F_f représentent respectivement la force tangentielle et la force radiale de la dent (Altintas *et al.*, 1998) :

$$F_c = K_c A_d \text{ et } F_f = K_f A_d. \quad (1)$$

Les coefficients K_c et K_f sont introduits et représentent respectivement les énergies spécifiques de coupe tangentielle et radiale de la dent sur la pièce. Ces coefficients sont dépendants du matériau usiné de la vitesse d'avance par dent f_z et du facteur de mise à l'échelle f_0 (Kienzle, 1952) :

$$K_c = K_{c1} (f_z/f_0)^{-m_c} \text{ et } K_f = K_{f1} (f_z/f_0)^{-m_f}. \quad (2)$$

Plus récemment, un modèle étendu à la modélisation des moments (Jeulin *et al.*, 2022, Albert, 2010) permet de trouver le lien entre le moment N_p autour de l'axe de rotation de l'outil au point P positionné sur l'arête de coupe (Figure 3.c) et la section coupée A_d :

$$N_p = K_m A_d. \quad (3)$$

De même que pour les forces, le coefficient K_m suit un modèle dépendant (Albert, 2010) du matériau usiné et de la vitesse d'avance par dent :

$$K_m = K_{m1} (f_z/f_0)^{-m_m}. \quad (4)$$

Etant dans le domaine du fraisage, la section coupée est variable et dépend de la profondeur de passe axiale a_p et de l'épaisseur instantanée de copeau non déformé $h(t)$:

$$A_d = a_p h(t). \quad (5)$$

Cette épaisseur suit une trajectoire trochoïdale (Martellotti, 1941). Cependant, afin de simplifier les équations, la trajectoire sera supposée circulaire et donc dépendante du rayon de l'outil R , de l'avance par dent f_z et de l'angle de la dent $\theta(t)$:

$$h(t) = R + f_z \sin \theta(t) - \sqrt{R^2 - f_z^2 \cos^2 \theta(t)}. \quad (6)$$

Or, si l'avance par dent est négligeable par rapport au rayon de l'outil, alors l'expression de l'épaisseur instantanée est d'autant plus simplifiée (Albert, 2010) :

$$h(t) \approx f_z \sin \theta(t). \quad (7)$$

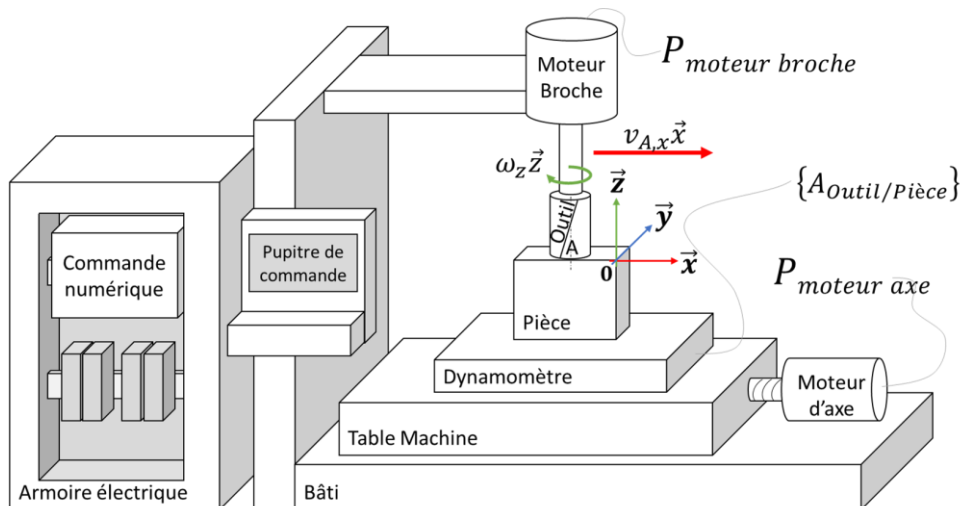


Figure 2 : Schématisation simplifiée des essais expérimentaux en fraisage

3 Calcul de la puissance mécanique

La Figure 2 présente la schématisation de la configuration du centre d'usinage DMG MORI vertical 3 axes. Celle-ci permet de réaliser un surfaçage d'un bloc d'alliage d'aluminium bridée sur une platine dynamométrique à 6 composantes solidaire de la table.

3.1 Puissance mécanique exprimée au centre de la fraise

Le calcul de la puissance mécanique se fait par le biais du comoment du torseur cinématique de l'outil et du torseur d'actions mécaniques de coupe transmis à la pièce. La puissance mécanique consommée par l'usinage est calculée à partir de ces torseurs exprimés dans le même repère et au centre de la fraise dans notre cas. En considérant l'axe \vec{x} (Figure 2), l'axe d'avance de l'outil, le torseur cinématique dépend de la vitesse linéaire $v_{A,x}$ suivant l'axe \vec{x} au point du centre outil A en contact avec la pièce ainsi que de la fréquence de rotation de l'outil ω_z autour de l'axe \vec{z} :

$$\{V_{Pièce/Outil}\}_A = \begin{Bmatrix} 0 & -v_{A,x} \\ 0 & 0 \\ \omega_z & 0 \end{Bmatrix}_{(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}. \quad (8)$$

Le torseur d'action est, quant à lui, complet et dépend des trois composantes du vecteur force (X, Y, Z) et des trois composantes du vecteur moment en A (L_A, M_A, N_A) :

$$\{A_{Outil \rightarrow Pièce}\}_A = \begin{Bmatrix} X & L_A \\ Y & M_A \\ Z & N_A \end{Bmatrix}_{(\vec{x},\vec{y},\vec{z})}. \quad (9)$$

Dans la situation étudiée, le calcul du comoment donne ainsi une puissance mécanique :

$$P_{méca} = -v_{A,x}X + \omega_z N_A. \quad (10)$$

3.2 Puissance mécanique exprimée au niveau de l'arête de coupe

La Figure 3 représente le paramétrage des transports des torseurs d'actions mesurés par la platine dynamométrique vers le centre outil A puis vers le point d'application P appartenant à l'arête de coupe et mi-hauteur de la zone correspondante à la profondeur de passe a_p (Jeulin *et al.*, 2022) dans le cas particulier où l'angle d'inclinaison d'arête λ_s et l'angle de coupe γ sont nuls. Le repère de mesure de la platine est changé afin de correspondre au repère de la pièce (Figure 2).

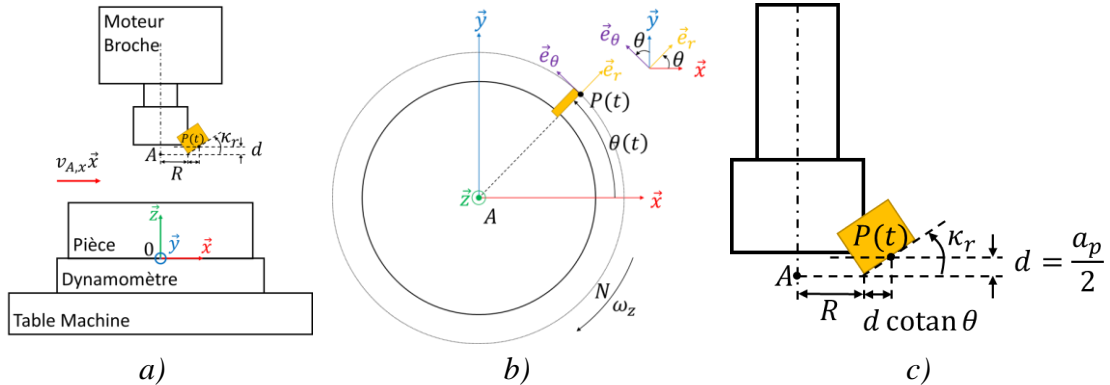


Figure 3 : Paramétrage des transports des torseurs : a) vue de côté, b) vue de dessus de la dent et c) zoom sur le point d'application P

Une autre façon d'exprimer la puissance est de l'obtenir à partir des actions au point P appartenant à l'arête de coupe de l'outil P (Figure 3).

Pour cela, les torseurs d'actions (Eq.11) et cinématique (Eq.12) sont exprimés au point P dans le repère tournant $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{z})$:

$$\{A_{Outil \rightarrow Pi\grave{e}ce}\}_P = \begin{Bmatrix} X \cos \theta + Y \sin \theta & L_P \cos \theta + M_P \sin \theta \\ Y \cos \theta - X \sin \theta & M_P \cos \theta - L_P \sin \theta \\ Z & N_P \end{Bmatrix}_{(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{z})} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \{V_{Pi\grave{e}ce/Outil}\}_P &= \begin{Bmatrix} 0 & -v_{A,x} - \omega_z \sin \theta (R + d \cotan \kappa_r) \\ 0 & \omega_z \cos \theta (R + d \cotan \kappa_r) \\ \omega_z & 0 \end{Bmatrix}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} \\ &= \begin{Bmatrix} 0 & -v_{A,x} \cos \theta \\ 0 & \omega_z (R + d \cotan \kappa_r) + v_{A,x} \sin \theta \\ \omega_z & 0 \end{Bmatrix}_{(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{z})} \end{aligned} \quad (12)$$

Il est alors nécessaire de connaître la position angulaire de la dent $\theta(t)$ en contact avec la matière ainsi que l'angle de direction d'arête κ_r de la plaquette et le rayon R de l'outil.

Dans le cas d'étude, la nouvelle expression de la puissance mécanique dépend maintenant :

- des paramètres de l'outil (rayon d'outil R et l'angle de direction d'arête κ_r),
- des vitesses d'avance $v_{A,x}$ et de rotation de la broche ω_z ,
- des forces suivant l'avance \vec{x} et la transversale \vec{y} de l'outil et du moment N_p
- et de la distance d suivant \vec{z} entre le point d'application P et le point du centre outil A . Dans cet article, d sera posé à $a_p/2$.

$$P_{méca} = -v_{A,x}X + \omega_z(R + d \cotan \kappa_r)(Y \cos \theta - X \sin \theta) + N_p \omega_z. \quad (13)$$

4 Instrumentations et modèle dynamique

Une fraiseuse DMG MORI CMX 600V a été utilisée pour réaliser les essais. La pièce à usiner a été fixée sur le platine dynamométrique à 6 composantes elle-même bridée sur la table de la machine. Les données de la commande numérique de la machine-outil (positions et vitesses axes et broche) sont acquises en parallèle des données mesurées par la platine.

4.1 Mesure des actions mécaniques

4.1.1 Platine dynamométrique à six composantes

La procédure d'essais de mesures des six composantes du torseur d'action utilise une platine dynamométrique Kistler 9129AA (Kistler, 2018). Branchée sur l'équipement d'acquisition SIRIUSi STG-M+ de DEWESoft (DEWESoft, 2023), les données peuvent être acquises à une haute fréquence d'échantillonnage. Ces essais sont mesurés à 20kHz, en prenant compte de la vitesse de rotation de l'outil de 1000 tr/min, cela permet d'observer les variations des sollicitations lorsque l'outil a parcouru $0,3^\circ$.

Cette acquisition permet de connaître le torseur d'actions au centre 0 de la platine dynamométrique (Figure 2) pendant l'usinage. Après récupération de la position relative du centre de la fraise A par rapport au centre de la platine (x_A, y_A, z_A) , il est possible d'effectuer le transport du torseur d'actions au centre de la fraise (Eq. 14).

$$\{A_{Pièce \rightarrow Dynamomètre}\} = \begin{Bmatrix} X_{P/D} & L_{0,P/D} + z_A Y_{P/D} - y_A Z_{P/D} \\ Y_{P/D} & M_{0,P/D} + x_A Z_{P/D} - z_A X_{P/D} \\ Z_{P/D} & N_{0,P/D} + y_A X_{P/D} - x_A Y_{P/D} \end{Bmatrix}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} \quad (14)$$

Le torseur cinématique réel en A est calculé à partir des informations de la commande numérique (Eq.12) et la puissance consommée par l'opération d'usinage est estimée selon :

$$P_{méca\ estimée} = -v_{A,x} X_{P/D} + \omega_z (N_{0,P/D} + y_A X_{P/D} - x_A Y_{P/D}). \quad (15)$$

En cherchant à exprimer le torseur d'actions au point de l'arête de coupe P par les mesures de la platine, il est donc nécessaire de réaliser le transport suivant :

$$\{A_{Pièce \rightarrow Dynamomètre}\} = \begin{Bmatrix} X_{P/D} & L_{0,P/D} + (z_A + d)Y_{P/D} - y_P Z_{P/D} \\ Y_{P/D} & M_{0,P/D} + x_P Z_{P/D} - (z_A + d)X_{P/D} \\ Z_{P/D} & N_{0,P/D} + y_P X_{P/D} - x_P Y_{P/D} \end{Bmatrix}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} \quad (16)$$

avec $x_P = x_A + (R + d \cotan \kappa_r) \cos \theta$ et $y_P = y_A + (R + d \cotan \kappa_r) \sin \theta$.

Pour obtenir la puissance grâce au comoment avec le torseur cinématique (Eq.12), le torseur d'action doit être exprimé dans le repère tournant :

$$\{A_{Pièce \rightarrow Dynamomètre}\} = \begin{Bmatrix} F_{e_r,P/D} = X_{P/D} \cos \theta + Y_{P/D} \sin \theta & L_{P,P/D,r} \\ F_{e_\theta,P/D} = Y_{P/D} \cos \theta - X_{P/D} \sin \theta & M_{P,P/D,\theta} \\ Z_{P/D} & N_{P,P/D} \end{Bmatrix}_{(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{z})} \quad (17)$$

où $N_{P,P/D} = N_{0,P/D} + y_P X_{P/D} - x_P Y_{P/D}$. Cela permet de retrouver la puissance (Eq.15).

4.1.2 Expérimentation

Le Tableau 1 présente les différentes configurations qui ont été réalisées lors des acquisitions des forces et moments avec la platine dynamométrique. Trois jeux d'outils et plaquettes ont été utilisés :

- $\kappa_r = 45^\circ$: R245-050Q22-12M / R245-12 T3 M-PM 4230
- $\kappa_r = 90^\circ$: 490-050Q22-14M / 490R-140408M-PM 4230
- $\kappa_r = 10^\circ$: R210-052C5-09M / R210-09 04 12M-MM 2040

Tableau 1 : Paramètres de coupe des différentes configurations des essais

Configuration	κ_r ($^\circ$)	D (mm)	f_z (mm/tour/dent)	V_c (m/min)	a_p (mm)	a_e (%)
1	45	50	0,2	157	1	95
2					2	
3	90	50	0,2	157	1	95
4					2	
5	10	37,9	0,4	119	0,5	100

Les essais ont été réalisés en usinage rectiligne à pleine fraise d'une pièce en alliage d'aluminium 2024. La platine dynamométrique est fixée dans un étau qui ne maintient que les parties fixes, laissant libre le corps d'épreuve. Fixée par 4 vis sur le capteur, la largeur de la pièce usinée est choisie plus petite que le diamètre de la fraise pour les configurations 1 à 4 (Figure 4). La configuration 4 du Tableau 1 sera étudiée tout au long de cet article. La fraise étudiée d'un diamètre de 50 mm ne comporte qu'une seule

plaquette avec un angle de direction d'arête κ_r de 90° . Les mesures de la platine dynamométrique seront exprimées dans le repère de la pièce (Figure 2).

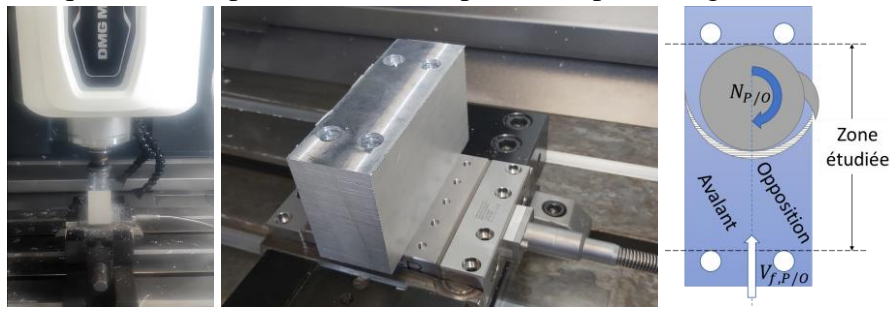


Figure 4 : Pièce usinée

Lors du passage de la fraise, les données sont donc impactées par les lamages présents sur la pièce et influencent donc les mesures du torseur d'actions. En revanche, la zone de coupe située entre ces trous permet une analyse pertinente. Un zoom sur cette zone permet de visualiser l'évolution des efforts et des moments en fonction de la position de l'outil en x (Figure 5.a) et en fonction de l'angle θ (Figure 5.b).

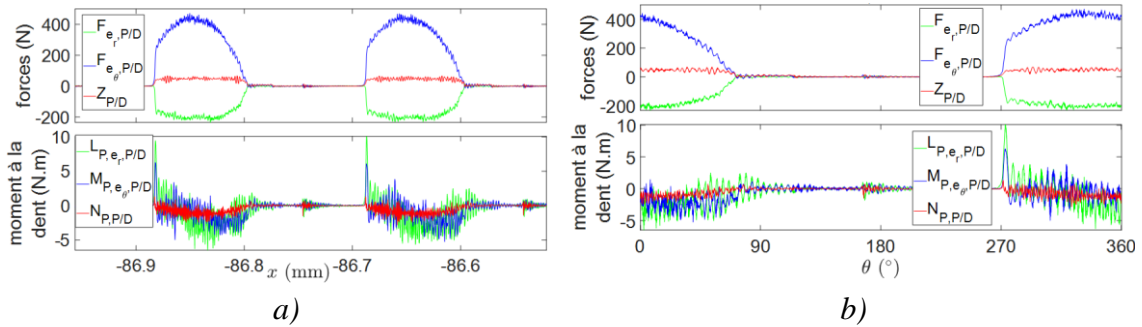


Figure 5 : Forces et moments de l'usinage des six composantes mesurées au point P de l'arête de coupe dans le repère tournant : a) en fonction de la position x de l'outil et b) en fonction de la position angulaire

Les actions montrent une périodicité indiquant la dépendance en fonction de l'angle de l'outil. Les courbes de la Figure 6 sont obtenues en se basant sur les équations (Eq.1) et (Eq.3) qui relient respectivement la force de coupe F_c ou d'avance F_f et le moment de coupe N_p au point d'application P à la section coupée.

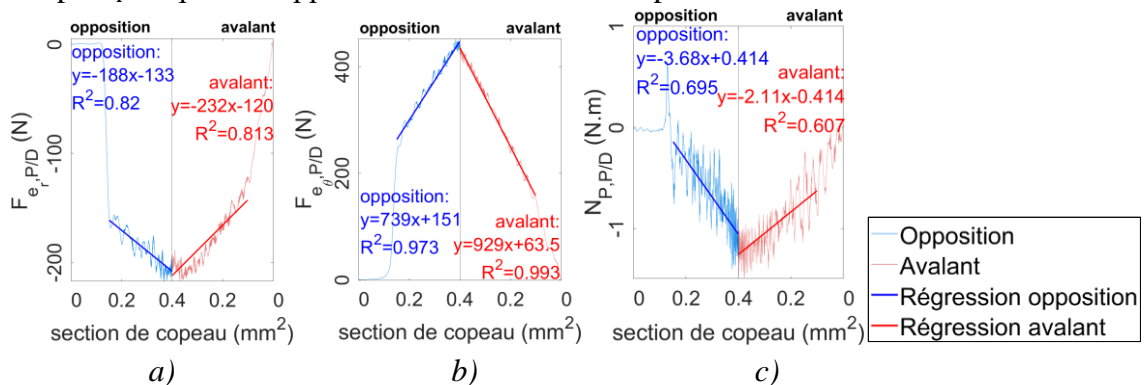


Figure 6 : Représentation des énergies spécifiques de coupe K_f , K_c et K_m en avalant et en opposition en fonction de la section coupée : a) force de coupe, b) force d'avance et c) moment de coupe au point d'application P autour de \vec{z}

L'analyse linéaire se limite ici pour une section coupée A_d supérieure à 0,15 mm² en opposition et supérieur à 0,1 mm² en avalant. En effet, l'acuité de l'arête de l'outil et la présence de phénomènes annexes (frottements, écrouissage, ...) modifient les efforts ou les moments lors de l'entrée et la sortie de la matière, créant donc des linéarités par morceaux lorsque la section coupée est faible.

Les régressions linéaires appliquées aux efforts donnent des résultats convenables selon les coefficients de détermination R^2 qui sont supérieurs à 0,8. La régression linéaire du moment, malgré un R^2 plus faible, reste exploitable mais fortement oscillant autour de ce comportement modélisé ici comme linéaire.

Le coefficient directeur de ces régressions linéaires permettent d'obtenir ces énergies spécifiques K_f , K_c et K_m et donc valider les modèles linéaires des actions en fonction de la section (Eq.2 et Eq.4) (Jeulin et al., 2022). Le Tableau 2 récapitule tous les coefficients trouvés pour chaque essai. La dernière colonne représente les valeurs théoriques du modèle industriel du K_c obtenues par calcul (Sandvik Coromant, 2019).

Tableau 2 : Coefficients d'énergie spécifique pour chaque configuration

Configuration	Opposition			Avalant			Industriel
	K_f (MPa)	K_c (MPa)	K_m (MPa.m)	K_f (MPa)	K_c (MPa)	K_m (MPa.m)	K_c (MPa)
1	308	830	10,6	303	1060	5,8	1830
2	468	920	10,1	318	870	3,53	1830
3	189	772	9,73	246	1040	5,96	980
4	187	716	8,92	243	952	4,89	980
5	33,2	1060	2,68	39,4	1090	0,17	2110

Malgré des coefficients théoriques plus élevé, les mesures restent dans le même ordre de grandeur.

4.2 Commande numérique

La commande numérique (Figure 2) utilisée fait partie de la gamme Sinumerik 840d SL de Siemens. Celle-ci permet de récupérer divers signaux tels que la puissance électrique consommée ou les positions et vitesses des axes. Ces données, acquises en parallèle des forces et moments par la platine dynamométrique, permettent de valider la valeur de la puissance consommée par l'usinage et de déplacer les torseurs au point souhaité.

4.2.1 Positions et vitesses des axes

La commande numérique permet de connaître les vitesses de rotation de la broche ou de translation des axes mesurées dans le repère de la pièce. Ce dernier est préalablement palpé afin d'avoir des positions cartésiennes relative et angulaires précises de l'outil par rapport au centre de la platine dynamométrique. En utilisant le moyen de communication OPC-UA, il est possible de faire l'acquisition de ces valeurs en parallèle des données mesurées par la platine. Cela permet, a posteriori, de traiter les données et de comparer la puissance mesurée par la machine et la puissance estimée par les mesures de forces et de moments de la platine.

4.2.2 Puissance des différents axes

L'essai de la Figure 2 a permis d'obtenir deux jeux de puissances (Figure 7). Une puissance mesurée par la consommation électrique de l'axe de déplacement selon \vec{x} et de la broche. Une seconde calculée par les torseurs d'actions (Eq.17) et cinématique (Eq.12) exprimés au point P de l'arête de coupe dans le repère tournant.

La puissance mesurée est échantillonnée toutes les 250 ms par la commande numérique, tandis que celle calculée l'est à 50 μ s. Pour harmoniser, la puissance calculée est moyennée sur 250 ms. De plus, la puissance mesurée est corrigée d'une composante de « puissance électrique à vide » qui n'est pas mesurée par la platine.

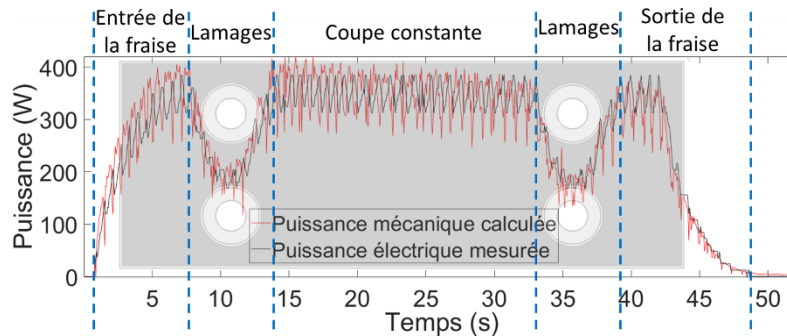


Figure 7 : Comparaison des puissances estimée par les mesures de la platine et mesurée par la commande numérique

Les courbes de puissances montrent quatre phases distinctes. La première est l'entrée de la fraise dans la pièce qui forme l'opposé d'une exponentielle inverse. La deuxième phase est due aux lamages de la pièce créant un décrochage de la puissance. Ensuite, la phase de coupe constante qui se traduit par une puissance qui oscille autour d'une constante. Enfin, la phase finale qui décroît en exponentielle inverse indique la sortie de la fraise de la pièce. Les oscillations des deux puissances sont en opposition de phase. Plusieurs effets peuvent être en causes : le moyennage, un problème de synchronisation des acquisitions ou encore des jeux et déformations de la machine-outil. Cet effet impact fortement l'erreur qui est de l'ordre de 50% par rapport à la puissance électrique. Cependant, la dynamique des deux puissances se suivent, ce qui permet d'utiliser le modèle de puissance (Eq.13) qui pourra ensuite être exprimée en fonction de la section coupée et des coefficients K_c , K_f et K_m .

5 Conclusion

Les résultats comparant la puissance consommée électriquement par la machine-outil et la puissance calculée semblent satisfaisants. Cette puissance calculée est obtenue par le torseur d'action mesuré par la platine dynamométrique à six composantes, ainsi que le torseur cinématique issu des mesures de la commande numérique. Malgré des erreurs non négligeables, les dynamiques de ces deux puissances se suivent. Les potentielles sources d'erreur peuvent venir des mesures de la platine dynamométrique qui peuvent être biaisées par la position d'application des actions. Une étape d'étalonnage suivant cette position pourrait améliorer nettement les mesures.

Par ailleurs, ces résultats montrent qu'il est possible de s'affranchir de la platine qui est invasive dans le procédé et donc utiliser comme donnée d'entrée la puissance électrique qui pourrait estimer au moins un coefficient d'énergie spécifique du modèle.

6 Perspectives

L'aboutissement des travaux présenté dans cet article ainsi que les différentes étapes présentées dans cette partie amèneront à un contrôle de la puissance.

6.1 Intégration de nouvelles instrumentations

De nouvelles instrumentations sont prévues afin de remplacer la platine dynamométrique afin de rendre le système industrialisable. Il est prévu de mettre en place des accéléromètres sur la pièce ou son support. Cela doit permettre à terme de prendre en compte lors de la régulation des vitesses (et en particulier de V_c) des potentiels effets négatifs de la dynamique de la coupe se manifestant par des vibrations.

6.2 Loi de commande optimale

La recherche de la puissance optimale de l'usinage se fera en respectant des contraintes limites tels que les vitesses minimales et maximales de coupe et d'avance (Gonçalves *et al.*, 2020). La régulation robuste (Lanusse *et al.*, 2019) de cette puissance (Figure 8) utilise les données issues d'un estimateur (forces et moments) et génère une correction de vitesse de coupe (V_c) et d'avance (V_f).

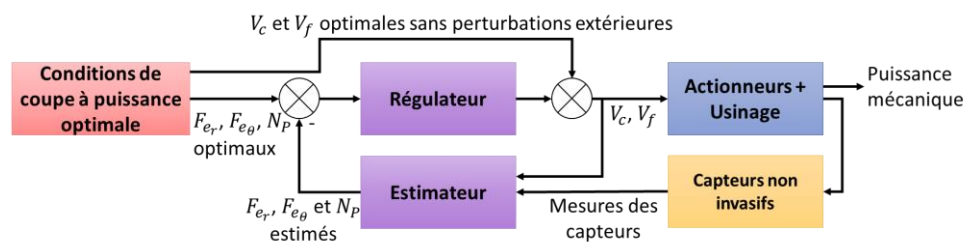


Figure 8 : Boucle de régulation de la puissance

Remerciements

Ce travail a pu se réaliser dans le cadre du RRI (Réseau Recherche Impulsion) BEST, au titre du Programme France 2030 à l'Université de Bordeaux.

Références

- G. Albert (2010) *Identification et modélisation du torseur des actions de coupe en fraisage*. Université Bordeaux1
- Y. Altintas, P. Lee (1998) *Mechanics and Dynamics of Ball End Milling*, *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol 120, pp.684-692
- O. Cahuc, P. Darnis, A. Gérard, J.-L. Battaglia (2001) *Experimental and Analytical Balance Sheet in Turning Applications*, *The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 18, pp.648-656.
- DEWEsoft (2023) *Technical reference manual. SIRIUS® V23-2*.
- M.L.N Gonçalves, T.C. Menezes (2020) *Gauss–Newton methods with approximate projections for solving constrained nonlinear least squares problems*, *Journal of Complexity*, vol 58
- M. Jeulin, O. Cahuc, Ph. Darnis, R. Laheurte (2022) *A 6-components mechanistic model of cutting forces and moments in milling*, *Forces in Mechanics*, vol 9
- Kistler (2018) *Multicomponent Dynamometer. 9129AA_000-709e-08.18*
- O. Kienzle (1952) *Die bestimmung von kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen*. VDI-Z, vol 94, pp.299-305
- P. Lanusse, M. Tari (2019) *Simplified Fractional-Order Design of A Mimo Robust Controller*, *Fractional Calculus and Applied Analysis*, vol 22, pp.1177-1202.
- M. E. Martellotti (1941) *An Analysis of the Milling Process*, *Journal of Fluids Engineering*, vol 63, pp.677-695
- Sandvik Coromant (2019) *Specific cutting force: What is it and how to use it*, Sandvik Coromant.