

Comparaison des résultats

Ce chapitre présente un comparatif des deux approches au travers des résultats donnés par le démonstrateur. Les différents modèles phénoménologiques et analytique ont été appliqués, par le biais de la méthode du Couple-Arête-Matière, à quatre configurations testées en tournage 3-D (chariotage). Les paramètres de coupe employés pour les différents essais sont rappelés dans le tableau 7.1. Un porte-plaquette SVJBL 2020K16 équipé de plaquettes de type VCGT 160408 FN-ALU, évoqué au paragraphe 4.1.1, a été utilisé.

Essai	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	F_p (N)	F_f (N)	F_c (N)	D_{usi} (mm)
1	140	0.1	0.1	9.2	2.3	26.3	62.7
2	140	0.2	0.1	12.5	2.8	39.8	63.3
3	140	0.2	0.2	24.7	7.2	76.4	62.5
4	140	0.1	0.2	13.3	4.9	42.2	62

Tab. 7.1 – Paramètres mesurés des essais 3-D en chariotage.

7.1 Modélisation géométrique des configurations testées

Afin de modéliser les efforts selon la méthode du Couple-Arête-Matière, il est nécessaire de segmenter la section coupée A_D . La section coupée non déformée A_D est obtenue par la section formée par l'outil sur un tour de pièce. L'outil est matérialisé par deux cercles de rayon r_c dans le plan P_r dont les centres sont distants du paramètre d'avance f ^a. La discrétisation de la section coupée est réalisée en fonction d'un paramètre angulaire θ_i compris entre deux valeurs θ_{min} et θ_{max} , comme le montre la figure 7.1^b. La valeur de θ_{min} est déterminée par l'intersection des deux cercles outil au niveau de la surface usinée. Quant à θ_{max} , il correspond à l'intersection avec la surface libre de la pièce. Le nombre d'éléments définit le pas de discrétisation. Ce nombre d'éléments est fixé initialement et demeure le même pour tous les essais, le pas n'est donc pas constant. La largeur b du segment est définie par la largeur mesurée entre deux angles θ_i et θ_{i+1} sur la seconde arête. L'angle d'obliquité λ_s est obtenu de manière analogue et la règle de Stabler s'applique sur chaque segment^c, soit $\eta_{c,i} = \lambda_{s,i}$.

a. L'algorithme de modélisation de l'outil est donné en annexe E.

b. L'algorithme de segmentation de l'outil est donné en annexe F.

c. Voir le paragraphe 2.1.2 page 16 pour plus d'informations sur la coupe oblique.

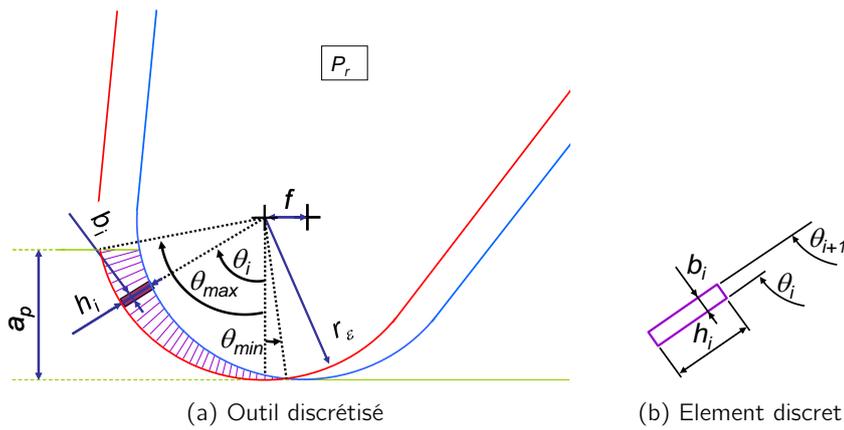


Fig. 7.1 – Paramétrage de l'outil discrétisé en arêtes élémentaires.

L'épaisseur h du segment est donnée par la moyenne des épaisseurs mesurées aux points θ_i et θ_{i+1} bornant le segment considéré. Il en est de même pour l'angle de coupe γ_n de l'outil modélisé à partir de mesures par microscope interférométrique^d. Ainsi, chaque segment est caractérisé dans l'espace par les paramètres nécessaires aux deux modèles d'efforts phénoménologique et au modèle analytique. La figure 7.2 montre l'évolution de l'épaisseur coupée le long de l'arête de l'outil pour les quatre groupes de conditions testées (tableau 7.1).

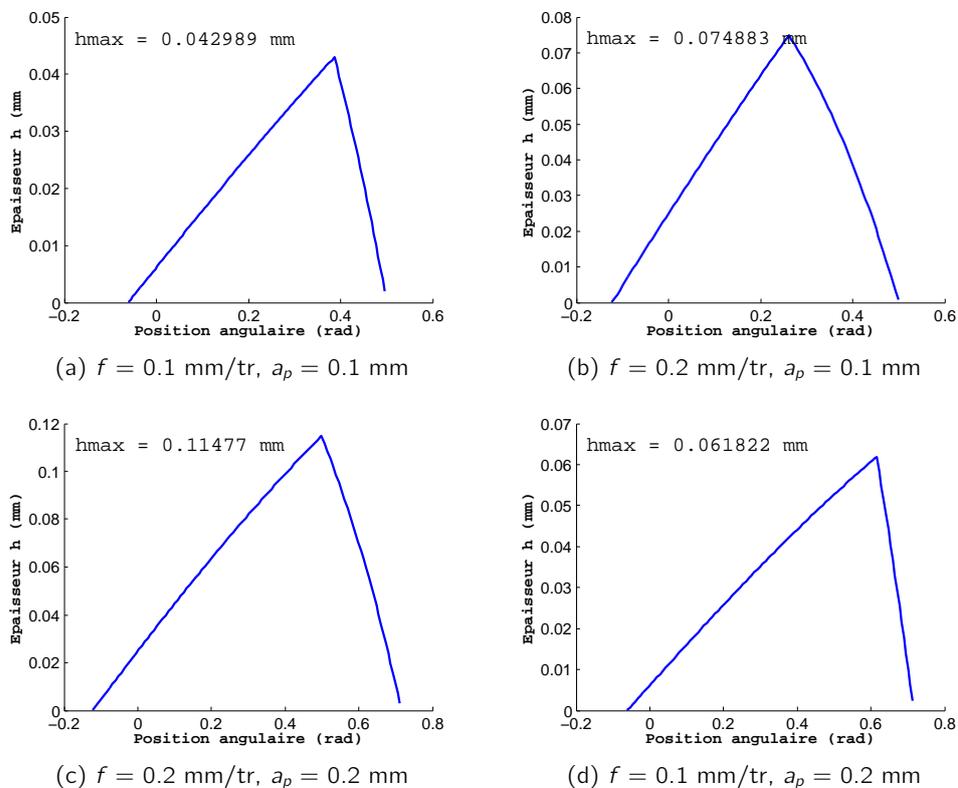


Fig. 7.2 – Evolution de l'épaisseur coupée h en fonction de la position du segment d'arête.

d. Voir le paragraphe 4.1.2.

Ces résultats indiquent qu'en dépit d'avances f et de profondeurs de passe a_p relativement importantes, l'épaisseur coupée h reste faible, la plus importante épaisseur coupée n'étant que de 0.11 mm. Cette plage d'épaisseurs coupées s'est révélée relativement bien modélisée par les deux modèles phénoménologiques présentés au paragraphe 5.2. Le modèle analytique tend à sous-estimer les efforts générés par les très faibles épaisseurs coupées et surestime les plus fortes.

7.2 Résultats des différentes modélisations

Le principe du Couple-Arête-Matière, évoqué en [introduction générale](#), consiste à appliquer le modèle d'efforts sur chaque élément discrétisé de l'arête. Ces efforts sont au nombre de deux, $F_{C,i}$ et $F_{t,i}$ liés au repère de l'élément considéré i comme le montre la figure 7.3. Les efforts totaux seront obtenus par sommation vectorielle de la totalité des efforts élémentaires appliqués sur chaque élément discret de l'arête dans le repère machine. Les composantes d'efforts dans l'espace sont au nombre de trois, l'effort de coupe F_C , l'effort d'avance F_f et l'effort de pénétration F_p . La figure 7.4 représente les évolutions des efforts $F_{C,i}$ et $F_{t,i}$ obtenues pour les quatre configurations testées avec les trois modèles développés.

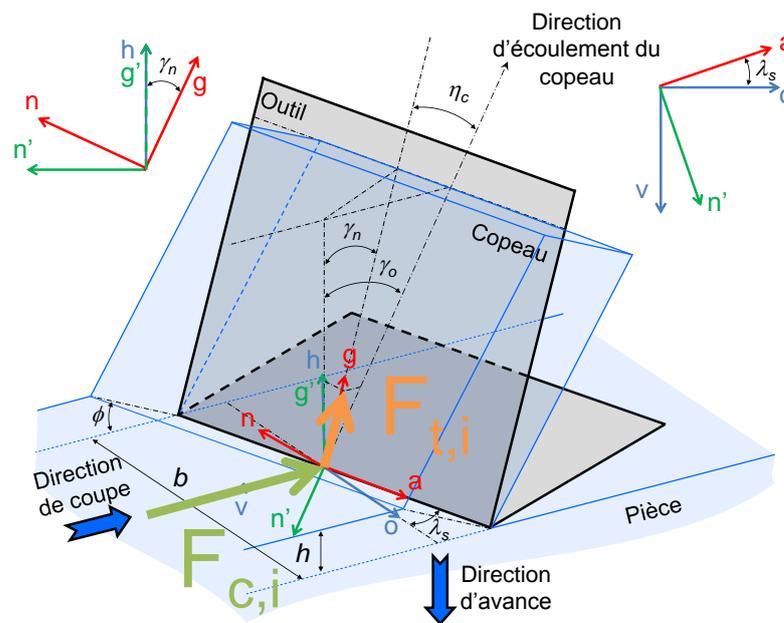
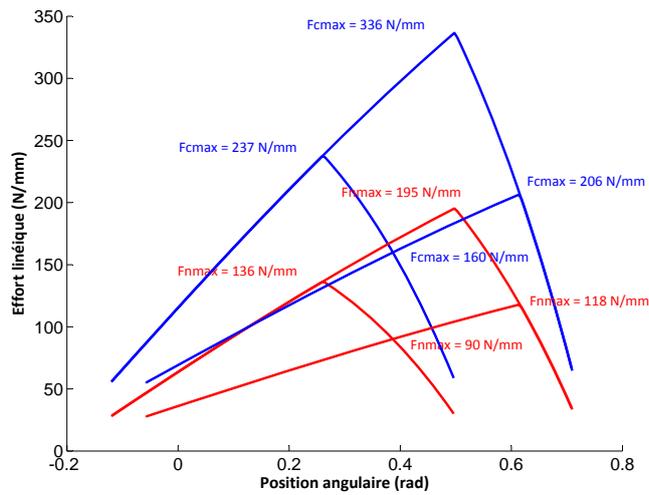
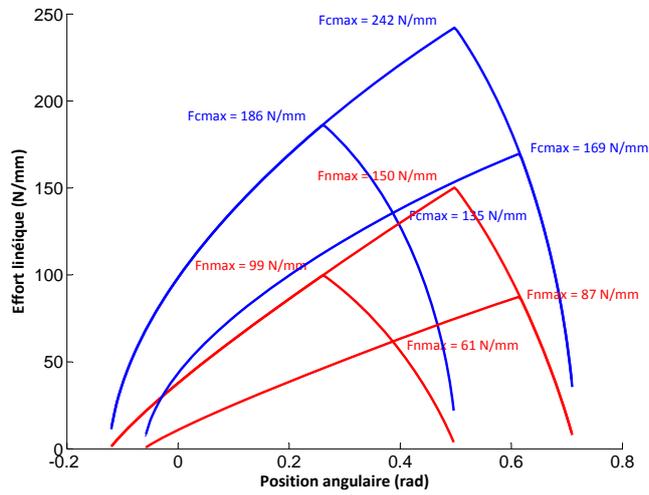


Fig. 7.3 – Paramétrage du segment d'arête i .

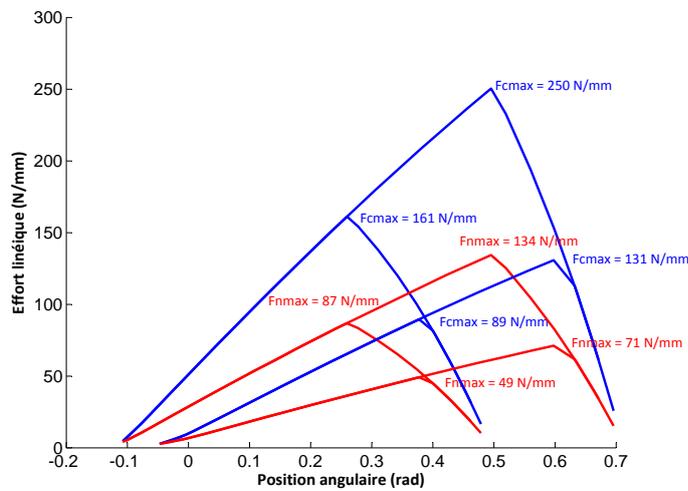
Les deux approches phénoménologiques (figures 7.4a et 7.4b) utilisent les coefficients déterminés en coupe orthogonale. L'approche analytique (figure 7.4c) est appliquée après réévaluation des coefficients de frottement tels que $\mu_R = 0.7$ et $\mu_C = 0.15$ en raison de la qualité des surfaces de l'outil. En effet, un outil de coupe orthogonale possédant un angle de coupe de 5° et présentant une qualité de surface différente des autres outils utilisés a montré un coefficient de frottement plus faible. Ce lien entre état de surface et coefficient de frottement est notamment abordé dans les travaux de [Menezes et Kailas \(2008\)](#). Les résultats du modèle phénoménologique logarithmique de la figure 7.4b montrent une augmentation rapide de l'effort de coupe F_C avec l'augmentation de l'épaisseur coupée h . Cette augmentation est plus progressive avec les deux autres modèles. Les valeurs maximales d'effort obtenues à h_{max} montrent la divergence entre les deux modèles phénoménologiques. Par exemple, pour



(a) Modèle phénoménologique linéaire



(b) Modèle phénoménologique logarithmique



(c) Modèle analytique

Fig. 7.4 – Efforts linéiques modélisé F_c (bleu) et F_t (rouge) le long de l'arête en chariotage.

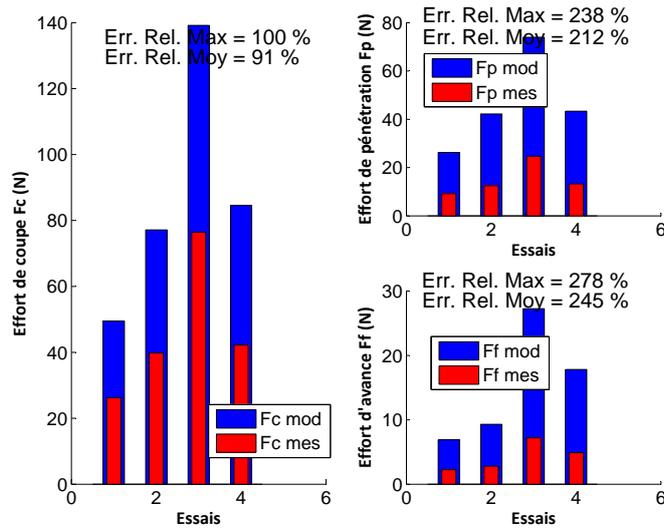
l'essai numéro 3, l'effort de coupe maximal $F_{c,max}$ obtenu avec le modèle linéaire atteint 336 N/mm contre 242 N/mm pour le modèle logarithmique. Cet effort est de 250 N/mm avec le modèle analytique.

L'analyse des erreurs de modélisation, figure 7.5 et tableau 7.2, montre que les meilleurs résultats sont obtenus sur la composante d'effort de coupe F_c et pour la modélisation de type analytique. Les écarts minimaux, maximaux et moyens sont donnés en valeur absolue. D'un point de vue général, l'effort de coupe demeure l'effort le mieux modélisé, ce qui était déjà le cas en 2-D. Les efforts de pénétration F_p et d'avance F_f , très faibles en raison de l'importance du rayon de bec r_e , sont globalement surévalués. Cette remarque avait déjà été faite dans le cas de l'identification inverse du modèle d'effort par la méthode du Couple-Arête-Matière (Germain, 2008). L'effort de coupe est aussi surévalué, excepté dans le cas de l'essai 1 modélisé analytiquement. Les épaisseurs coupées durant cet essai étant les plus faibles, elles se situent dans la plage où le modèle les sous-évalue. Les résultats des modélisations phénoménologiques sont les moins représentatifs de la réalité. Du fait des différences relevées entre les outils utilisés en coupe orthogonale et ceux employés en chariotage, les coefficients fixes de ces modèles perdent en représentativité. Le principal inconvénient de ces modèles, à savoir leur manque de flexibilité, se manifeste ici clairement. Les meilleurs résultats sont obtenus pour l'essai 3 dont les épaisseurs coupées sont les plus importantes. Une des raisons possibles pouvant expliquer ce comportement réside dans le fait que l'effet d'échelle présent pour les plus faibles épaisseurs h est assez mal appréhendé par ces modèles. Cependant, du fait de l'excellente acuité d'arête des outils employés, cette hypothèse est insuffisante.

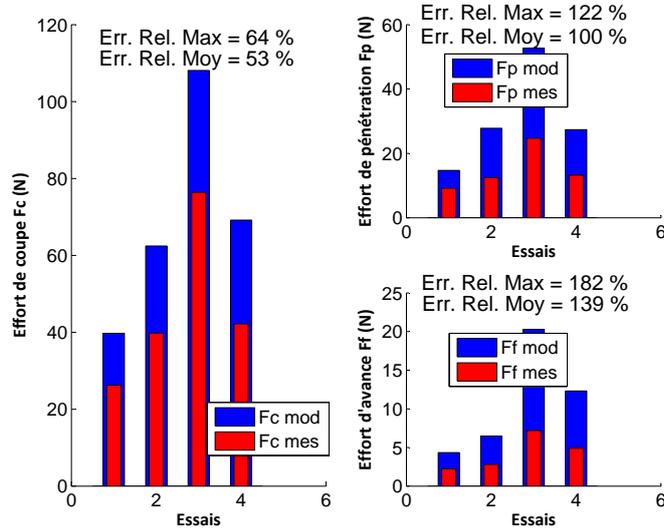
Modèle	Essai	Erreur relative (%)		
		F_c	F_p	F_f
Phénoménologique linéaire	1	88.4	185.4	206.0
	2	93.8	237.7	232.2
	3	82.2	199.4	278.5
	4	100.3	227.2	263.5
	Min.	82.2	185.4	206.0
	Moy.	91.2	212.4	245.0
	Max.	100.3	237.7	278.5
Phénoménologique logarithmique	1	51.4	59.9	92.8
	2	56.9	122.4	131.6
	3	41.5	113.2	181.8
	4	63.9	106.6	151.4
	Min.	41.5	59.9	92.8
	Moy.	53.4	100.5	139.4
	Max.	63.9	122.4	181.8
Analytique	1	21.1	22.4	44.7
	2	7.2	82.5	87.2
	3	16.8	82.2	141.5
	4	2.0	64.1	100.0
	Min.	2.0	22.4	44.7
	Moy.	11.8	62.8	93.3
	Max.	21.1	82.5	141.5

Tab. 7.2 – Erreurs relatives par essai et valeurs moyennes par modèle.

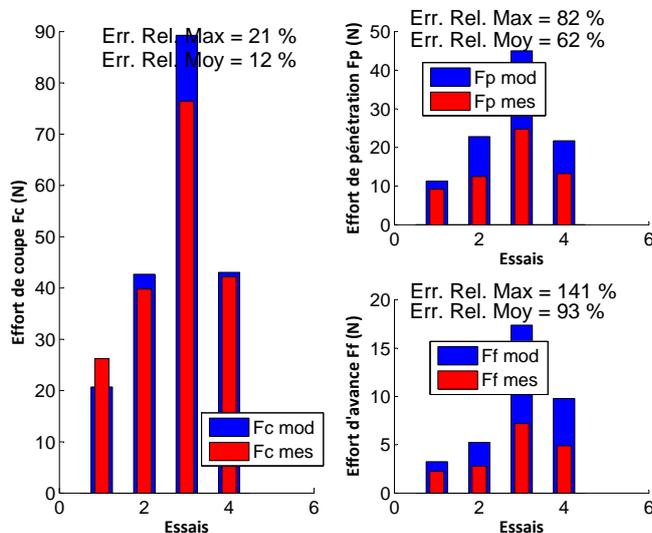
Les résultats du modèle analytique sont meilleurs. Certes, les efforts de pénétration F_p et d'avance F_f sont également largement surévalués, or les résultats obtenus sur l'effort de coupe F_c confirment les conclusions du paragraphe 6.6. Les efforts sous-évalués pour les plus



(a) Modèle phénoménologique linéaire



(b) Modèle phénoménologique puissance



(c) Modèle analytique

Fig. 7.5 – Evolution des erreurs de modélisation des efforts en chariotage pour les différentes modélisations.

Conclusions générales et perspectives

Le procédé d'usinage regroupe plusieurs disciplines, notamment la mécanique avec les lois de l'élasto-plasticité et du frottement, et la thermique. Comprendre la formation du copeau et les efforts qui en découlent est une activité qui mobilise de nombreux chercheurs depuis plus d'un siècle avec les travaux de Tresca et qui n'est pas encore arrivée à son but final, un unique modèle physique de la coupe. Ces travaux de thèse se sont attachés à modéliser les efforts de coupe dans l'optique de prédire les efforts de coupe par la méthodologie du Couple-Arête-Matière. Cette démarche vise à prédire les actions mécaniques s'appliquant à une géométrie d'outil donnée en la définissant à partir d'une succession d'arêtes élémentaires de la même famille, caractérisée par son matériau, son revêtement et sa préparation. Pour cela, le modèle d'efforts se doit d'être à l'image du comportement de la matière sous une géométrie connue et maîtrisée d'arête. Diverses approches de modélisation existent, abordant le problème selon différents points de vue. Parmi les contributions les plus remarquables à la modélisation des efforts de coupe, les travaux de Oxley constituent un apport considérable du point de vue de la modélisation analytique et ont inspiré ces travaux de thèse durant tout le développement du modèle analytique. Les travaux de Moufki, Molinari et Dudzinski constituent les principaux apports récents concernant la modélisation analytique.

Le volet expérimental de ces travaux a été un élément primordial. Le matériau Cu-c2 facilite la modélisation en raison de ses caractéristiques isotropes et de sa structure homogène monophasée. Cependant, son état métallurgique peut être affecté par un traitement thermique inapproprié, ce qui peut fortement nuire à la qualité des mesures d'efforts effectuées. L'échelle de la superfinish est une difficulté supplémentaire pour l'expérimentation. Les effets induits par la micro-géométrie de l'arête, tels que le rayon d'arête r_β , nécessitent une parfaite connaissance de la géométrie de l'outil. Plusieurs moyens ont été mis en œuvre afin de la caractériser au mieux et leurs résultats sont directement exploités par l'algorithme de modélisation, d'où l'importance accordée aux mesures dimensionnelles. L'instrumentation des axes de la machine-outil mesurant ses déplacements permet de maîtriser les paramètres de coupe. La mesure des efforts, parfois de faible intensité, est une tâche délicate. La gamme de sensibilité, la durée des essais ou l'état de la chaîne d'acquisition peuvent modifier sensiblement la précision de la mesure. L'analyse des signaux collectés doit être minutieusement effectuée afin d'isoler l'information utile des éventuels phénomènes parasites. En particulier en présence de bavures latérales sur l'éprouvette durant un essai prolongé, les signaux temporels d'effort montrent généralement une augmentation de l'effort qu'il est nécessaire d'interpréter. La visualisation de la zone de formation du copeau est sans doute l'une des tâches les plus délicates. En raison des faibles dimensions des phénomènes observés, le protocole expérimental se doit d'être d'une grande rigueur, le soin principal devant être porté sur la mise au point et la qualité des surfaces observées. La moindre vibration a pour effet d'introduire une

défocalisation de l'image, la rendant inexploitable. Ce procédé de mesure par caméra est un point demandant des améliorations mais a déjà montré un important potentiel. Une caméra permettant une vitesse de prise de vue plus rapide permettrait de réduire la sensibilité aux vibrations.

Les résultats expérimentaux ont permis d'identifier la frontière entre les phénomènes propres au micro-usinage et à l'usinage 3-D. Cette frontière se matérialise au voisinage du rapport entre épaisseur coupée et rayon d'arête $h/r_\beta \approx 5$. La coupe du matériau Cu-c2 est également fortement influencée par la géométrie de l'outil. Ainsi, les outils possédant les plus faibles angles de coupe accentuent les phénomènes de refus de coupe qui se traduisent par une brutale augmentation de l'effort de pénétration. Le Cu-c2 nécessite des géométries de coupe fortement positives. L'angle de dépouille α_n a une influence sur les efforts mais de faible intensité; son effet est également influencé par le diamètre usiné. Les paramètres les plus influents demeurent l'angle de coupe γ_n et l'épaisseur coupée h .

La modélisation phénoménologique ne fait appel à aucune notion physique. Basée sur une série de coefficients fonction de paramètres opératoires, cette modélisation a l'avantage de renseigner sur le poids de tel ou tel paramètre sur l'intensité des efforts. Cette approche ne trouve sa justification que dans le cas d'applications systématique ne couvrant pas un large panel de paramètres opératoires mais ne s'inscrit pas dans l'optique d'une modélisation généralisable. Si ces modèles tirent leur précision du nombre important de degrés de liberté qu'ils possèdent, ils dépendent également de la plage sur laquelle ils sont étalonnés. De plus, leur identification nécessite une quantité importante de résultats expérimentaux. Le manque de flexibilité est en effet le principal défaut de ce type de modélisation pour la méthodologie du Couple-Arête-Matière en identification directe. En d'autres termes, plus le nombre de paramètres pris en compte sera grand et plus la plage ciblée sera étroite, plus le modèle sera précis sur cette plage. Les deux modèles phénoménologiques développés durant cette thèse sont fonction de l'épaisseur coupée h , de l'angle de coupe γ_n , du couplage de ces derniers, de l'angle de dépouille α_n et du rayon d'arête au travers du rapport h/r_β . Deux formulations ont été proposées, un modèle linéaire et un modèle non linéaire de type puissance dont la formulation logarithmique facilite l'identification. La formulation linéaire n'est pas parfaitement représentative des phénomènes et n'est valable que pour de faibles variations des paramètres d'entrée. La formulation non linéaire est plus représentative des phénomènes observés mais tend à diverger pour les fortes épaisseurs coupées. Ces modèles sont à identifier, de préférence, par une méthode inverse si leur application finale s'inscrit dans une démarche du type Couple-Arête-Matière.

L'approche analytique se caractérise par sa transparence vis-à-vis des grandeurs d'entrée et des grandeurs intermédiaires modélisées. En plus de modéliser les efforts, son objectif premier, elle offre un accès à une multitude de paramètres intermédiaires renseignant sur la phénoménologie de la coupe ainsi que sur le chargement de l'outil. Ces informations peuvent influencer le choix des outils, par exemple sur les critères de durée de vie. Contrairement à l'approche phénoménologique, l'identification du modèle analytique ne nécessite pas un nombre considérable de résultats expérimentaux. Le modèle développé durant cette thèse est fonction de l'épaisseur coupée h et de la géométrie de l'outil. Des modèles intermédiaires, dont les paramètres doivent être identifiés au préalable, permettent de modéliser la géométrie de la zone de formation du copeau au travers de l'angle de cisaillement ϕ . Le comportement du matériau usiné est modélisé par une loi de type Norton-Hoff, fonction de la déformation moyenne $\bar{\epsilon}$. Les longueurs de contact entre l'outil et la matière usinée sur les faces de coupe et de dépouille sont identifiées à partir d'images réalisées en coupe orthogonale. Les résultats de ce modèle ont montré des résultats intéressants au travers de l'approche Couple-Arête-

Matière en dépit de leur manque d'exactitude en 2-D. Ce modèle peut être amélioré afin de parfaire sa représentativité de la réalité expérimentale, en particulier pour les plus faibles épaisseurs coupées. Le modèle proposé est purement mécanique, les effets thermiques ne sont absolument pas pris en compte en raison de l'excellente conductivité thermique du Cu-c2. Cependant, l'introduction de l'effet des échauffements sur l'adoucissement thermique et la viscosité du matériau pourrait grandement améliorer les performances du modèle au regard des résultats des récents travaux de [Moufki, Dudzinski, Molinari et Rausch \(2000\)](#). Une autre piste d'amélioration du modèle réside dans la prise en compte d'un frottement variable plutôt que dans l'utilisation d'un coefficient de frottement moyen. Les travaux de [Bailey \(1975\)](#) ont montré un effet de l'angle de coupe sur le coefficient de frottement moyen pour certains matériaux — le cuivre n'y présente pas de variation du coefficient de frottement en fonction de γ_n — ainsi que de la vitesse de coupe V_c , dont la vitesse V_g d'écoulement de la matière sur l'outil est une fonction. Les simulations numériques réalisées par [Bonnet, Valiorgue, Rech, Claudin, Hamdi, Bergheau et Gilles \(2008\)](#) prennent en compte une vitesse variable d'écoulement de la matière le long de l'outil influençant le coefficient de frottement local. Cette considération est certainement une piste d'amélioration du modèle analytique. La modélisation des actions sur la face en dépouille reste cependant la difficulté principale de la modélisation analytique. Phénomène difficilement observable, l'action de l'indentation et le frottement qui s'y produisent peuvent difficilement être découplés des efforts mesurés. Leur identification ne peut se faire qu'au travers d'hypothèses et de modélisations successives chronophages.

De manière générale, la perspective d'appliquer ces modèles, et plus particulièrement le modèle analytique, à d'autres matériaux ne pourra se faire sans modifications. La loi de comportement employée ou plus simplement l'équation régissant la position du point de stagnation S ont été déterminées pour le Cu-c2 dont le comportement est extrêmement ductile. Les modèles pourront être testés sur d'autres procédés tels que le fraisage faisant intervenir une variation de l'épaisseur coupée h en fonction du temps, mais également sur des parcours d'outil plus complexes comme en contournage. Le démonstrateur développé durant cette thèse permet de calculer rapidement les efforts à partir d'une géométrie d'outil réelle pour diverses configurations d'usinage dans le cas du matériau Cu-c2.



Références bibliographiques

- Abdelmoneim, M.E., Scrutton, E.F., 1974. Tool edge roundness and stable build-up formation in finish machining. ASME Journal of Engineering for Industry 96 Ser B, 1258–1267.
Cité page 11
- Abdelmoneim, M.E., Scrutton, R.F., 1973. Post-machining plastic recovery and the law of abrasive wear. Wear 24, 1–13.
Cité page 11
- Ackroyd, B., Chandrasekar, S., Compton, W.D., 2003. A model for the contact conditions at the chip-tool interface in machining. Journal of Tribology 125, 649–660.
Cité 2 fois, pages 10 et 28
- AFNOR, 1993. Grandeurs de base pour la coupe et la rectification – ISO 3002-1.
Cité 3 fois, pages xii, A-1 et A-2
- AFNOR, 1994. Domaine de fonctionnement des outils coupants - couple outil-matière – NF 66-520.
Cité 3 fois, pages 2, 14 et 17
- AFNOR, 2005. Matériaux métalliques – Essai de dureté brinell – Partie 1 : Méthode d'essai – ISO 6506-1.
Cité page 44
- Albrecht, P., 1960. New developments in the theory of metal cutting process : Part i - the ploughing process in metal cutting. ASME Journal of Engineering for Industry 82, 348–358.
Cité 7 fois, pages ix, 11, 12, 30, 31, 33 et 34
- Armarego, E.J.A., Brown, R.H., 1969. The machining of metals. Prentice-Hall Englewood Cliffs, N.J.
Cité page 17
- Armarego, E.J.A., Samaranayake, P., 1999. Performance prediction models for turning with rounded corner plane faced lathe tools. i. theoretical development. Machining Science and Technology 3, 143–172.
Cité page 17
- Arsecularatne, J.A., Mathew, P., 2000. Oxley modeling approach, its applications and future directions. Machining Science and Technology 4, 363–397. *Cité 2 fois, pages 17 et 27*
- Artozoul, J., Lescalier, C., D'Acunto, A., Bomont-Arzur, A., 2010. Stress and heat flux distribution in rake face analytical and experimental approaches, in : Proceeding of the 8th Conference on High Speed Machining, Metz, France, p. 6. *Cité page 28*
- Ashby, M.F., 1970. The deformation of plastically non-homogeneous materials. Philosophical Magazine 21, 399.
Cité 2 fois, pages 24 et 25

- ASTM, 2000. Standard test method for macroetching metals and alloys – E 340-00. *Cité page 55*
- Bagchi, A., Wright, P.K., 1987. Stress analysis in machining with the use of sapphire tools. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 409, 99–113. *Cité page 97*
- Bailey, J.A., 1975. Friction in metal machining—mechanical aspects. *Wear* 31, 243–275. *Cité page 117*
- Barbery, J., 1991. Traitements thermiques du cuivre et de ses alliages. Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques , M 1 295–1–20. *Cité 2 fois, pages x et 47*
- Barrow, G., Graham, W., Kurimoto, T., Leong, Y.F., 1982. Determination of rake face stress distribution in orthogonal machining. *International Journal of Machine Tool Design and Research* 22, 75–85. *Cité 4 fois, pages ix, 10, 28 et 29*
- Bissey, S., 2005. Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traités thermiquement. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. *Cité 3 fois, pages ix, 1 et 16*
- Bitans, K., Brown, R.H., 1965. An investigation of the deformation in orthogonal cutting. *International Journal of Machine Tool Design and Research* 5, 155–165. *Cité 2 fois, pages 22 et 26*
- Bonnet, C., Valiorgue, F., Rech, J., Claudin, C., Hamdi, H., Bergheau, J.M., Gilles, P., 2008. Identification of a friction model - application to the context of dry cutting of an aisi 316L austenitic stainless steel with a tin coated carbide tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48, 1211–1223. *Cité 2 fois, pages 30 et 117*
- Boothroyd, G., Bailey, J.A., 1966. Effects of strain rate and temperature in orthogonal metal cutting. *Journal Mechanical Engineering Science* 8, 264–269. *Cité page 23*
- Budak, E., Altintas, Y., Armarego, E.J.A., 1996. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 118, 216–224. *Cité page 20*
- Buryta, D., Sowerby, R., Yellowley, I., 1994. Stress distributions on the rake face during orthogonal machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 34, 721–739. *Cité 2 fois, pages 28 et 97*
- Cahuc, O., Darnis, P., Gérard, A., Battaglia, J.L., 2001. Experimental and analytical balance sheet in turning applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 18, 648–656. *Cité page 28*
- Campbell, J.S., 1961. Principles of manufacturing materials and processes. McGraw-Hill. *Cité page 45*
- Challen, J.M., Oxley, P.L.B., 1984. Slip-line fields for explaining the mechanics of polishing and related processes. *International Journal of Mechanical Sciences* 26, 403–418. *Cité page 34*
- Changeux, B., 2001. Loi de comportement pour l'usinage. Localisation de la déformation et aspects microstructuraux. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. *Cité page 105*

- Colombié, M., 1990. Pratique des matériaux industriels : propriété, choix, utilisation. volume 3. Dunod edition. *Cité page 43*
- Connolly, R., Rubenstein, C., 1968. The mechanics of continuous chip formation in orthogonal cutting. *International Journal of Machine Tool Design and Research* 8, 159–187. *Cité 2 fois, pages 11 et 33*
- Copper Development Association, 1992. Cost-effective manufacturing machining brass, copper and its alloys – Publication TN44. *Cité page 45*
- Crolet, A., 2008. Contribution à l'étude de l'influence du comportement vibratoire du système « pièce-outil-machine » sur la qualité de surface obtenue en tournage de super finition. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. *Cité 2 fois, pages x et 48*
- Das, N.S., Chawla, B.S., Biswas, C.K., 2005. An analysis of strain in chip breaking using slip-line field theory with adhesion friction at chip/tool interface. *Journal of Materials Processing Technology* 170, 509–515. *Cité page 89*
- Denkena, B., Tracht, K., Clausen, M., 2005. Predictability of milling forces based on specific cutting forces. *Proceedings of the 8th CIRP Workshop on Modeling of Machining Operations*, 259–266. *Cité page 14*
- Deutsches Kupferinstitut, 2005. Werkstoff datenblätter Cu-OFE–CW009A. *Cité page 43*
- Dewhurst, P., 1978. On the non-uniqueness of the machining process. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences* 360, 587–610. *Cité 2 fois, pages 24 et 27*
- Doyle, E.D., Horne, J.G., Tabor, D., 1979. Frictional interactions between chip and rake face in continuous chip formation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 366, 173–183. *Cité page 10*
- Dudzinski, D., Molinari, A., 1997. A modelling of cutting for viscoplastic materials. *International Journal of Mechanical Sciences* 39, 369–389. *Cité page 23*
- Enahoro, H.E., Oxley, P.L.B., 1966. Flow along tool-chip interface in orthogonal metal cutting. *Journal Mechanical Engineering Science* 8, 36–41. *Cité page 26*
- Endres, W.J., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., 1995a. Dual-mechanism approach to the prediction of machining forces, part 1 : Model development. *Journal of Engineering for Industry* 117, 526–533. *Cité 3 fois, pages 11, 15 et 33*
- Endres, W.J., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., 1995b. Dual-mechanism approach to the prediction of machining forces, part 2 : Calibration and validation. *Journal of Engineering for Industry* 117, 534–541. *Cité page 15*
- Fang, N., Jawahir, I.S., 2001. A new methodology for determining the stress state of the plastic region in machining with restricted contact tools. *International Journal of Mechanical Sciences* 43, 1747–1770. *Cité page 106*
- Germain, D., 2008. Développement de la Méthodologie Couple-Arête-Matière : Application au tournage de super finition du cuivre Cu-c2. Mémoire de Master. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. *Cité page 111*

- Goubot, N., Naulin, G., 1994. Caractérisation mécanique du cuivre cuc2 du domaine quasi-statique au domaine dynamique. *Journal de Physique III 4*, C8–189–C8–194. *Cité page 83*
- Gravier, J., 2009. Impact de l'usinage de superfinition sur la zone affectée par le procédé. Thèse de doctorat. Université de Bourgogne. *Cité 2 fois, pages ix et 12*
- Grunzweig, J., Longman, I.M., Petch, N.J., 1954. Calculations and measurements on wedge-indentation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids 2*, 81–88. *Cité page 34*
- Günay, M., Aslan, E., Korkut, I., Seker, U., 2004. Investigation of the effect of rake angle on main cutting force. *International Journal of Machine Tools and Manufacture 44*, 953–959. *Cité page 14*
- Guo, W.C., Rauchs, G., Zhang, W.H., Ponthot, J.P., 2009. Influence of friction in material characterization in microindentation measurement. *Journal of Computational and Applied Mathematics In Press, Corrected Proof*. *Cité page 37*
- Haglund, A.J., Kishawy, H.A., Rogers, R.J., 2008. An exploration of friction models for the chip–tool interface using an arbitrary lagrangian–eulerian finite element model. *Wear 265*, 452–460. *Cité page 29*
- Hill, R., 1954. On the limits set by plastic yielding to the intensity of singularities of stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids 2*, 278–285. *Cité 3 fois, pages 27, 34 et 97*
- Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H., Ohmori, G., 1991. An atomistic analysis of nanometric chip removal as affected by tool-work interaction in diamond turning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology 40*, 551–554. *Cité page 32*
- Jacobus, K., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., 2000. Machining-induced residual stress : experimentation and modeling. *Journal of manufacturing science and engineering 122*, 20–31. *Cité page 12*
- Jared, B.H., Dow, T.A., 2000. Investigation and prediction of chip geometry in diamond turning. *Precision Engineering 24*, 88–96. *Cité page 89*
- Joshi, S.S., Melkote, S.N., 2004. An explanation for the size-effect in machining using strain gradient plasticity. *Journal of Manufacturing Science and Engineering 126*, 679–684. *Cité page 24*
- Kapoor, S.G., Devor, R.E., Zhu, R., Gajjala, R., Parakkal, G., Smithey, D.W., 1998. Development of mechanistic models for the prediction of machining performance : Model-building methodology. *Journal of Machining Science and Technology 22*, 213–238. *Cité 2 fois, pages 14 et 17*
- Karpat, Y., Özel, T., 2008. Mechanics of high speed cutting with curvilinear edge tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture 48*, 195–208. *Cité page 11*
- Kienzle, O., Victor, H., 1952. Die bestimmung von kräften und leistungen an spanenden werkzeugmaschinen. *VDI-Z 94*, 299–305. *Cité page 14*
- Kline, W.A., DeVor, R.E., Lindberg, J.R., 1982. The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts. *International Journal of Machine Tool Design and Research 22*, 7–22. *Cité 3 fois, pages 14, 15 et 17*

- Knüfermann, M.W., 2003. Machining Surfaces of Optical Quality by Hard Turning. Thèse de doctorat. Cranfield University. *Cité page 32*
- Ko, J.H., Cho, D.W., 2005. 3d ball-end milling force model using instantaneous cutting force coefficients. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 127, 1–12. *Cité page 15*
- Kountanya, R.K., Endres, W.J., 2004. Flank wear of edge-radiused cutting tools under ideal straight-edged orthogonal conditions. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126, 496–505. *Cité page 106*
- Kragelskii, I., 1965. Friction and wear. Butterworths. *Cité page 32*
- Kudo, H., 1965. Some new slip-line solutions for two-dimensional steady-state machining. *International Journal of Mechanical Sciences* 7, 43–55. *Cité page 30*
- Laheurte, R., 2004. Application de la théorie du second gradient à la coupe des matériaux. Thèse de doctorat. Université Bordeaux 1. *Cité page 39*
- Lai, X., Li, H., Li, C., Lin, Z., Ni, J., 2008. Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48, 1–14. *Cité page 32*
- Lapujoulade, F., Coffignal, G., Pimont, J., 1998. Evaluation des forces de coupe en fraisage à grande vitesse. 2e Conférence Internationale IDMME'98 . *Cité page 1*
- Le Calvez, C., 1995. Etude des aspects thermiques et métallurgiques de la coupe orthogonale d'un acier au carbone. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. *Cité 2 fois, pages ix et 9*
- Lee, E.H., Shaffer, B.W., 1951. The theory of plasticity applied to a problem of machining. *Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics* 18, 405–413. *Cité page 26*
- Lee, H.U., Cho, D.W., Ehmann, K.F., 2008. A mechanistic model of cutting forces in micro-end-milling with cutting-condition-independent cutting force coefficients. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 130, 0311021–0311029. *Cité page 19*
- Li, K.M., Liang, S.Y., 2007. Modeling of cutting forces in near dry machining under tool wear effect. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, 1292–1301. *Cité page 30*
- List, G., 2004. Etude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-Co par la caractérisation de l'interface Outil-Copeau : application à l'usinage à sec de l'alliage d'aluminium aéronautique AA2024 T351. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. *Cité page 38*
- Liu, X., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., 2006. An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micromachining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 128, 474–481. *Cité 3 fois, pages ix, 32 et 33*
- Liu, X., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., Ehmann, K.F., 2004. The mechanics of machining at the microscale : Assessment of the current state of the science. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126, 666–678. *Cité page 10*
- L'Vov, N.P., 1969. Determining the minimum possible chip thickness. *Machines & Tooling (USSR)* 40, 45–46. *Cité page 32*

- Mallock, A., 1881. The action of cutting tools. Proceedings of the Royal Society of London 33, 127. *Cité 3 fois, pages ix, 7 et 9*
- Manjunathaiah, J., Endres, W.J., 2000. A new model and analysis of orthogonal machining with an edge-radiused tool. Journal of Manufacturing Science and Engineering 122, 384–390. *Cité 2 fois, pages 11 et 33*
- Marusich, T., Ortiz, M., 1995. Modelling and simulation of high speed machining. International Journal for Numerical Methods in Engineering 38, 3675–3694. *Cité 2 fois, pages 37 et 38*
- Menezes, P.L., Kailas, S.V., 2008. Influence of roughness parameters on coefficient of friction under lubricated conditions. Sadhana 33, 181–190. *Cité page 109*
- Merchant, M.E., 1944. Basic mechanics of the metal cutting process. Journal of Applied Mechanics, A168–A175. *Cité 5 fois, pages ix, 1, 21, 22 et 26*
- Molinari, A., Moufki, A., 2008. The Merchant's model of orthogonal cutting revisited : A new insight into the modeling of chip formation. International Journal of Mechanical Sciences 50, 124–131. *Cité page 26*
- Morehead, M., Huang, Y., Ted Hartwig, K., 2007. Machinability of ultrafine-grained copper using tungsten carbide and polycrystalline diamond tools. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47, 286–293. *Cité page 48*
- Moufki, A., Dudzinski, D., Molinari, A., Rausch, M., 2000. Thermoviscoplastic modelling of oblique cutting : forces and chip flow predictions. International Journal of Mechanical Sciences 42, 1205–1232. *Cité page 117*
- Moufki, A., Molinari, A., Dudzinski, D., 1998. Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 46, 2103–2138. *Cité 4 fois, pages 23, 26, 30 et 115*
- Outeiro, J.C., Astakhov, V.P., 2005. The role of the relative tool sharpness in modelling of the cutting process. Proc. 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, 517–523. *Cité 2 fois, pages ix et 19*
- Oxley, P.L.B., 1962. Shear angle solutions in orthogonal machining. International Journal of Machine Tool Design and Research 2, 219–229. *Cité page 27*
- Oxley, P.L.B., 1989. The Mechanics of Machining : An Analytical Approach to Assessing Machinability. Ellis Horwood Limited, Chichester. *Cité 3 fois, pages ix, 25 et 115*
- Oxley, P.L.B., 1998. Development and application of a predictive machining theory. Machining Science and Technology 2, 165–189. *Cité 4 fois, pages 23, 25, 28 et 29*
- Oxley, P.L.B., Hastings, W.F., 1977. Predicting the strain rate in the zone of intense shear in which the chip is formed in machining from the dynamic flow stress properties of the work material and the cutting conditions. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences 356, 395–410. *Cité page 25*
- Parakkal, G., Zhu, R., Kapoor, S.G., DeVor, R.E., 2002. Modeling of turning process cutting forces for grooved tools. International Journal of Machine Tools and Manufacture 42, 179–191. *Cité page 106*

- Park, S., Kapoor, S.G., DeVor, R.E., 2004. Mechanistic cutting process calibration via microstructure-level finite element simulation model. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126, 706–709. *Cité page 15*
- Pei, Q.X., Lu, C., Fang, F.Z., Wu, H., 2006. Nanometric cutting of copper : A molecular dynamics study. *Computational Materials Science* 37, 434–441. *Cité page 45*
- Pujana, J., Arrazola, P.J., M'Saoubi, R., Chandrasekaran, H., 2007. Analysis of the inverse identification of constitutive equations applied in orthogonal cutting process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, 2153–2161. *Cité 2 fois, pages 24 et 38*
- Ranganath, S., Campbell, A.B., Gorkiewicz, D.W., 2007. A model to calibrate and predict forces in machining with honed cutting tools or inserts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, 820–840. *Cité 2 fois, pages 15 et 19*
- Reddy, R.G., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., 2001. A mechanistic force model for combined axial-radial contour turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41, 1551–1572. *Cité 3 fois, pages 15, 19 et 78*
- Reddy, R.G., Kapoor, S.G., DeVor, R.E., 2000. A mechanistic force model for contour turning. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 122, 398–405. *Cité page 14*
- Rubenstein, C., 1983. The mechanics of continuous chip formation in oblique cutting in the absence of chip distortion. part 1–theory. *International Journal of Machine Tool Design and Research* 23, 11–20. *Cité 3 fois, pages ix, 27 et 28*
- Rubenstein, C., 1990. The edge force components in oblique cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 30, 141–149. *Cité page 11*
- Saglam, H., Yaldiz, S., Unsacar, F., 2007. The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature. *Materials & Design* 28, 101–111. *Cité page 14*
- Sata, T., 1963. Recent developments concerning cutting mechanics. *Proceedings of the International Production Engineering Research Conference, Pittsburg, USA.* , 18–25. *Cité page 27*
- Shaw, M.C., 1982. A new approach to deformation zone analysis. *International Journal of Machine Tool Design and Research* 22, 215–226. *Cité page 34*
- Shaw, M.C., 1995. Precision finishing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 44, 343–348. *Cité page 12*
- Shaw, M.C., 2005. *Metal Cutting Principles.* Oxford university press edition. *Cité 5 fois, pages 22, 26, 27, 49 et 56*
- Shinozuka, J., Obikawa, T., Shirakashi, T., 1996. Chip breaking analysis from the viewpoint of the optimum cutting tool geometry design. *Journal of Materials Processing Technology* 62, 345–351. *Cité page 89*
- Son, S.M., Lim, H.S., Ahn, J.H., 2005. Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45, 529–535. *Cité 2 fois, pages 32 et 37*

- Stabler, G.V., 1951. The fundamental geometry of cutting tools. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering 165, 14–21. *Cité 3 fois, pages 17, 107 et 113*
- Stephenson, D.A., Bandyopadhyay, P., 1997. Process-independent force characterization for metal-cutting simulation. Journal of Engineering Materials and Technology 119, 86–94. *Cité 3 fois, pages ix, 17 et 18*
- Stevenson, M.G., Oxley, P.L.B., 1970. An experimental investigation of the influence of speed and scale on the strain-rate in a zone of intense plastic deformation. Proc. Inst. Mech. Eng. 184, 561–576. *Cité 3 fois, pages ix, 25 et 58*
- Suh, N.P., Sin, H.C., 1981. The genesis of friction. Wear 69, 91–114. *Cité page 37*
- Tay, A.O., Stevenson, M.G., de Vahl Davis, G., Oxley, P.L.B., 1976. A numerical method for calculating temperature distributions in machining, from force and shear angle measurements. International Journal of Machine Tool Design and Research 16, 335–349. *Cité page 37*
- Taylor, F.W., 1907. On the art of cutting metals. New York, The American Society of Mechanical Engineers 28, 31–350. *Cité page 7*
- Thomsen, E.G., Yang, C.T., Kobayashi, S., 1965. Mechanics of plastic deformation in metal processing. Macmillan, Collier-Macmillan (New York, Toronto). *Cité 4 fois, pages 8, 22, 25 et 26*
- Toropov, A., Ko, S.L., 2003. Prediction of tool-chip contact length using a new slip-line solution for orthogonal cutting. International Journal of Machine Tools and Manufacture 43, 1209–1215. *Cité page 29*
- Tounsi, N., Vincenti, J., Otho, A., Elbestawi, M.A., 2002. From the basic mechanics of orthogonal metal cutting toward the identification of the constitutive equation. International Journal of Machine Tools and Manufacture 42, 1373–1383. *Cité 3 fois, pages ix, 38 et 39*
- Trent, E.M., 1988a. Metal cutting and the tribology of seizure : I – seizure in metal cutting. Wear 128, 29–45. *Cité page 58*
- Trent, E.M., 1988b. Metal cutting and the tribology of seizure : III – temperatures in metal cutting. Wear 128, 65–81. *Cité page 33*
- Tresca, M.H., 1878. On further applications of the flow of solids. ARCHIVE : Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 1847-1982 (vols 1-196) 29, 301–345. *Cité 3 fois, pages ix, 7 et 115*
- Venkatachalam, S., Liang, S.Y., 2007. Effects of ploughing forces and friction coefficient in microscale machining. Journal of Manufacturing Science and Engineering 129, 274–280. *Cité 2 fois, pages 35 et 36*
- Vogler, M.P., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., 2003. Microstructure-level force prediction model for micro-milling of multi-phase materials. Journal of Manufacturing Science and Engineering 125, 202–209. *Cité page 32*
- Vogler, M.P., Kapoor, S.G., DeVor, R.E., 2004. On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, part II : Cutting force prediction. Journal of Manufacturing Science and Engineering 126, 695–705. *Cité page 19*