

CHAPITRE III B : Modélisation des efforts de coupe

# 1 État de l’art : la modélisation des efforts de coupe

## Sommaire

---

- 1.1 Classification des modèles d’efforts de coupe ..... 8
- 1.2 Modélisation des efforts de coupe à l’échelle mésoscopique ..... 13
  - 1.2.1 Mécanismes de la coupe..... 13
  - 1.2.2 Modélisation de « l’effet cut »..... 15
  - 1.2.3 Modélisation de « l’effet edge »..... 19
- 1.3 Usure de l’outil dans la modélisation des efforts de coupe ..... 24
  - 1.3.1 Interaction entre l’usure de l’outil et les efforts de coupe ..... 24
  - 1.3.2 Modèles d’usure de l’outil ou de durée de vie en fonction des efforts de coupe..... 27
  - 1.3.3 Modèles d’efforts de coupe tenant compte de l’usure de l’outil..... 29
- 1.4 Méthodologies employées pour modéliser des efforts de coupe..... 31
  - 1.4.1 Concepts de discrétisation d’arête et du couple arête-matière..... 31
  - 1.4.2 Principes d’identifications directe et inverse ..... 32
  - 1.4.3 Couple outil-matière ..... 34
- 1.5 Conclusion..... 34

---

Les enjeux de ce premier chapitre s’articulent autour de la modélisation des efforts de coupe. Depuis plusieurs décennies, les travaux consacrés à ce domaine de recherche par la communauté scientifique sont nombreux. Ainsi, il serait trop ambitieux de vouloir réaliser une synthèse exhaustive de toutes les contributions proposées sur le sujet.

Le paragraphe 1.1 propose une classification des différents types de modélisation des efforts de coupe proposés à ce jour et positionne l’angle d’attaque, ainsi que le vocabulaire, retenus dans cette étude. Le paragraphe 1.2 se penche sur le cas particulier de la modélisation des efforts de coupe à l’échelle mésoscopique. Les principes autour desquels ce type de modélisation s’articule sont également présentés, ainsi que les verrous observés. Le paragraphe 1.3 s’intéresse à l’intégration de l’usure de l’outil dans les modélisations d’efforts de coupe existantes à ce jour. Le paragraphe 1.4 quant à lui, présente les méthodologies employées dans ces travaux de thèse pour modéliser des efforts de coupe. Enfin, le paragraphe 1.5 propose une conclusion concernant les

recherches bibliographiques effectuées dans l'optique de justifier les axes de recherche développés au cours de ces travaux.

## 1.1 Classification des modèles d'efforts de coupe

La modélisation de la coupe propose pléthore de contributions depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle jusqu'à aujourd'hui [van Luttern et al. 98, Arrazola et al. 13]. Derrière ces nombreuses contributions se cache un vocabulaire riche couvrant plusieurs notions mais sans être réellement normalisé. L'objectif de ce paragraphe est de clarifier l'ensemble des termes utilisés dans ce document en s'appuyant sur les classifications des différentes modélisations de la coupe proposées à ce jour. Puis dans un second temps, à partir de ces observations, une ligne directrice sera retenue en vue de réaliser la modélisation des efforts de coupe dans ces travaux de recherche.

Beaucoup d'échanges scientifiques autour de la modélisation de la coupe possèdent des appellations diverses et variées : les auteurs parlent de « modélisation mécaniste » [Reddy et al. 00], de « modélisation analytique » [Junz Wang et al. 02, Germain et al. 13], de « modélisation thermomécanique » [Molinari et al. 05], ... Ces différentes dénominations regroupent en vérité plusieurs types d'informations qui participent à la définition d'une modélisation de la coupe, et en particulier d'une modélisation des efforts de coupe.

En effet, une modélisation des efforts de coupe ne peut se définir au moyen d'un seul critère, mais plutôt à partir d'un ensemble de critères. La proposition formulée par Chérif [Cherif 03] oriente la classification des modélisations d'efforts de coupe selon l'échelle de modélisation choisie. Bien que les frontières entre les différents types de modélisations de la coupe puissent être fines et mobiles, Chérif [Cherif 03] propose l'idée que l'approche de modélisation, le domaine temporel de modélisation et la nature des sorties découlent de l'échelle de modélisation. Cette idée est également soutenue et enrichie par Bissey [Bissey 05], qui dissocia les domaines temporels de modélisation de l'approche retenue. Enfin, Campocasso [Campocasso 13] complétera ces éléments en disjoignant l'approche de modélisation retenue des méthodes de résolution.

En définitive, une modélisation des efforts de coupe peut être définie selon cinq critères regroupant :

- l'échelle de modélisation ;
- l'approche ou la méthode de formulation des efforts de coupe ;
- le domaine temporel de modélisation ;
- la méthode de résolution ou de détermination des efforts de coupe ;
- la nature des sorties de la modélisation.

Toutefois, bien que les frontières soient parfois floues, chaque critère ne peut être associé indépendamment aux autres : il existe des implications. Premièrement, ce sont les sorties souhaitées de la modélisation qui vont piloter le choix de l'échelle et le domaine temporel de

modélisation. Deuxièmement, ces deux aspects vont chacun conduire à une approche de modélisation, respectivement mécanique et temporelle. Enfin, troisièmement, ces deux approches dicteront les entrées nécessaires au modèle, ainsi que les méthodes de résolution à employer. Ces liens d'implications sont synthétisés au sein de la [FIGURE 1.1](#) et les associations les plus courantes sont présentées, dans le cas de la modélisation des efforts de coupe, à la [FIGURE 1.2](#).

Dans le cas de la modélisation des efforts de coupe, il existe trois échelles de modélisation classiquement utilisées : l'échelle macroscopique, l'échelle mésoscopique et l'échelle microscopique. *L'échelle macroscopique* présente le point de vue le plus global puisqu'elle se situe à l'échelle de la machine-outil. L'objectif d'une modélisation à cette échelle est de proposer directement une modélisation des efforts de coupe globaux moyens (i.e. la résultante de l'effort de coupe, projetée dans le repère de la machine-outil). Cette modélisation prend souvent forme à l'aide de paramètres d'entrée très facilement identifiables tels que les paramètres opératoires, ou des grandeurs macroscopiques (e.g. une surface de réponse [Moreau 10]). *L'échelle microscopique* est à l'inverse de l'échelle macroscopique, puisqu'elle propose un point de vue très local qui se situe à l'échelle d'un grain du matériau usiné ou de l'outil coupant. Ce type de modélisation est donc dépendant des caractéristiques thermo-métallo-mécaniques du matériau usiné et du matériau usinant. Cette échelle est couramment utilisée lorsque l'intérêt est d'évaluer des phénomènes locaux étroitement liés à l'évolution d'un champ thermomécanique tels que les changements de phase, le mouvement des dislocations ou encore le comportement mécanique en surface généré par le passage de l'outil au sein d'un matériau usiné (e.g. les déformations plastiques [Outeiro et al. 15]). Enfin, *l'échelle mésoscopique* se situe à l'intermédiaire entre les échelles macroscopique et microscopique, c'est-à-dire au niveau de l'arête de l'outil coupant. Les données d'entrée dans ce type de modélisation peuvent être de plusieurs natures. En règle générale, ce sont soit des paramètres locaux descriptifs de la géométrie et/ou de la cinématique de l'opération d'usinage, soit une loi de comportement identifiée pour le matériau usiné et/ou usinant. Les sorties courantes d'une modélisation à l'échelle mésoscopique peuvent être des efforts de coupe locaux (i.e. la résultante d'effort appliquée sur une portion de l'arête de coupe, projetée dans le repère associé à l'arête de coupe [Armarego et al. 70]), mais aussi des champs de contraintes-déformations, ou des champs de températures appliqués sur l'arête de coupe – ou une portion de celle-ci [Germain 11, Wagner 11].

Couplés aux échelles de modélisation, il existe trois types de domaine temporel pour la modélisation des efforts de coupe, comme détaillé par [Bissey 05] : le domaine statique, le domaine quasi-statique et le domaine dynamique. Ces trois domaines positionnent la modélisation des efforts de coupe par rapport à la dimension du temps. Le domaine statique propose une modélisation des efforts de coupe complètement découplée du temps. Cet aspect s'avère pertinent dans le cas de la modélisation d'une opération simple en tournage où la section coupée et les conditions de contact entre l'outil et la pièce usinée sont constantes au cours du temps [Reddy et al. 00, Germain 11]. Le domaine quasi-statique, quant à lui, tient compte de la « section réelle du copeau » tout en s'affranchissant du comportement vibratoire du système

usinant. Les calculs d'efforts sont donc effectués sur des intervalles de temps correspondant à des positions identifiées comme différentes entre-elles vis-à-vis de l'interaction entre l'outil coupant et la pièce usinée qu'elles proposent. Ce type de modélisation est adapté dans le cadre des opérations de tournage avec une trajectoire complexe ou des opérations de fraisage [Bissey 05, Kaymakci et al. 12, Campocasso 13]. Enfin, le domaine dynamique permet la prise en compte du comportement dynamique du système usinant [Kilic et al. 16]. Les efforts de coupe sont donc déterminés en s'appuyant sur un modèle dynamique de la pièce usinée et/ou de l'outil et à partir d'un modèle d'effort de coupe régénératif en fonction des vibrations du système usinant. Ce type de modélisation reste réservé à des cas d'usinage où la pièce et/ou l'outil sont souples, mais aussi à des cas nécessitant un degré de précision justifiant une caractérisation fine du système usinant (usinage à grande vitesse avec une grande cadence de production, usinage de pièces de faibles épaisseurs, ...).

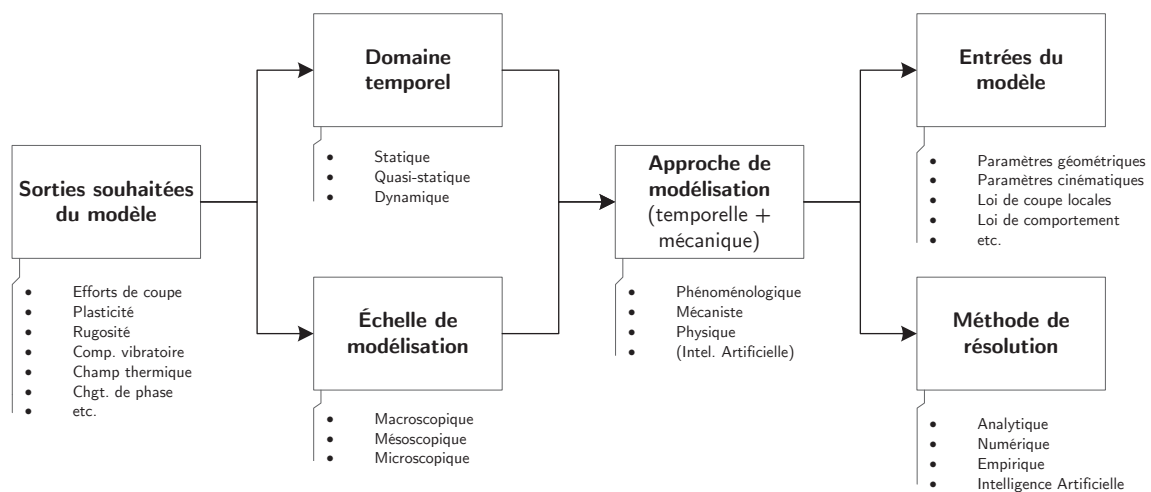


FIGURE 1.1 Synthèse des liens d'implication lors de la définition d'une modélisation de la coupe

Induites par les choix de l'échelle de modélisation et du domaine temporel, plusieurs approches de modélisation ou méthodes de formulation des efforts de coupe existent : l'approche phénoménologique, l'approche mécaniste et l'approche physique. Les différents types d'approche de modélisation sont partagés en fonction du degré de finesse physique associé à la formulation des efforts de coupe. En effet, *l'approche phénoménologique* repose principalement sur l'observation de résultats expérimentaux dans le cadre d'essais proches ou correspondant aux conditions réelles d'usinage. Parmi cette approche, deux sous-groupes légèrement distincts peuvent être inclus. Premièrement, les approches qui reposent sur l'apprentissage par l'expérience, parfois dénuées d'interprétation physique [Reddy et al. 01, Parakkal et al. 02, Günay et al. 04, Lalwani et al. 08]. Les formulations proposées sont régulièrement le fruit d'une analyse de données au sein d'un plan d'essai riche et étendu qui conduit à identifier les paramètres influents. Certes, le coût des expérimentations est important, mais les résultats obtenus par cette approche proposent souvent des erreurs de modélisation faibles dans les cas d'usinage les plus simples (efforts moyens pour les opérations en ébauche et semi-finition). Deuxièmement, *l'approche phénoménologique* regroupe également les approches qui s'articulent sur l'étude de l'évolution des

phénomènes pour établir un modèle descriptif des efforts de coupe représentatif de ces évolutions [Huang et al. 03, Ng et al. 06, Paris et al. 07]. Ces observations sont régulièrement développées autour d'essais de coupe élémentaire instrumentés (coupe orthogonale, coupe oblique, ...), représentatifs des conditions réelles d'usinage, afin d'apporter un minimum de justification physique aux formulations proposées. Ce type d'approche propose un bon compromis entre la qualité des résultats proposés et l'étendue de son domaine d'application (des modélisations sont valables pour plusieurs techniques et pour des opérations allant de l'ébauche à la finition). *L'approche mécaniste* quant à elle, s'articule davantage autour de la compréhension des mécanismes de la coupe au sens du causalisme [Merchant 45a, Smithey et al. 00, Molinari et al. 05, Waldorf 06, Kaymakci et al. 12]. Contrairement à l'approche précédente, les efforts de coupe ne sont pas modélisés à partir de paramètres géométriques ou cinématiques souvent pauvres dans leur interprétation physique, mais comme une conséquence d'une description fine de la mécanique des phénomènes physiques qui régissent la coupe (i.e. cisaillement de la matière, refoulement de la matière, etc.). Ce type d'approche possède l'avantage d'être cohérente vis-à-vis de la physique mise en jeu dans la coupe d'un matériau, toutefois la finesse de ce type de modélisation rend difficile l'obtention de résultats satisfaisants dans un domaine de validité large. Enfin, *l'approche physique* s'appuie sur les principes de la mécanique des milieux continus, qui se distingue de l'approche mécaniste où l'on peut observer des discontinuités (e.g. discontinuité entre la vitesse de coupe et la vitesse d'écoulement du copeau suite au cisaillement primaire de la matière). Cette approche s'appuie sur l'utilisation de lois de comportement parfois enrichies (critère d'endommagement, dynamique de recristallisation, plasticité, corrosion [Fontaine et al. 07, Muhammad et al. 13, Outeiro et al. 13]) et propose un éventail très large de sorties possibles, notamment la modélisation des efforts de coupe à partir d'un champ de contraintes. D'un point de vue physique, c'est l'approche proposant le degré de finesse le plus élevé, toutefois les temps de calcul associés à la résolution des systèmes d'équations empêchent, à l'heure actuelle, le développement de cette approche au-delà des cas d'usinage basiques (rabotage, trajectoires simples, etc.).

Enfin, associées aux approches de modélisation détaillées précédemment, plusieurs méthodes de résolution existent, leurs désignations sont suffisamment explicites pour ne pas nécessiter une description plus approfondie dans ces travaux.

En s'appuyant sur ces recherches bibliographiques et au regard des besoins définis par le partenaire industriel, le type de modélisation des efforts de coupe retenu dans cette étude s'effectue à l'échelle mésoscopique, selon une approche phénoménologique et mécaniste, au moyen d'une résolution analytique. La modélisation des efforts de coupe sera développée au sein d'un domaine temporel statique en tournage et quasi-statique en fraisage (i.e. dans les deux cas, le choix se justifie par le fait que le comportement dynamique du système usinant n'est pas considéré. De plus, en tournage les essais sont réalisés sur des temps très courts et avec des trajectoires très simples). Ces choix sont principalement justifiés par leur capacité à pouvoir être transposés « facilement » vers un contexte industriel, notamment grâce à un degré de finesse

physique relativement simple et un nombre d'essais réduit pour être étalonné. Par ailleurs, le choix de ne retenir que l'approche phénoménologique se justifie par l'étude de plusieurs paramètres nouveaux au cours de ces travaux. En effet, dans un premier temps, il est nécessaire d'identifier correctement leurs influences sur les efforts de coupe puis de modéliser celles-ci de façon simple. Dans un second temps, dans la poursuite de ces travaux, il est bien entendu pertinent d'envisager un couplage de deux approches afin de développer une modélisation des efforts de coupe qui puisse jongler entre une interprétation physique cohérente, grâce à l'approche mécaniste, pour la modélisation de phénomènes bien connus et une bonne qualité de prédiction dans un domaine de validité étendu, grâce à l'approche phénoménologique, pour modéliser des phénomènes plus nouveaux.

Dès lors, les recherches bibliographiques proposées dans la suite de ce document vont se focaliser sur la modélisation des efforts de coupe selon le type de modélisation retenu dans cette étude.

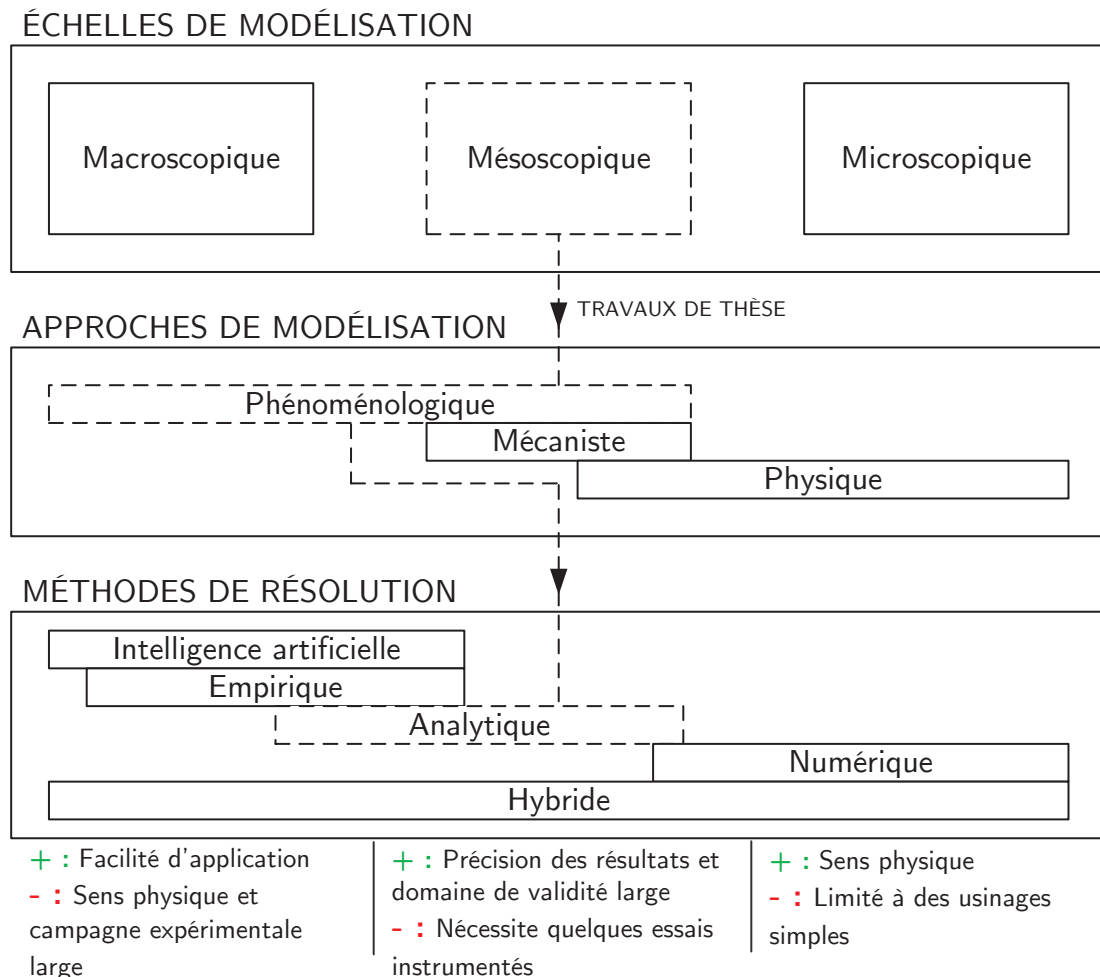


FIGURE 1.2 Types de modélisations d'efforts de coupe classiquement utilisées par la communauté scientifique et positionnement de l'étude, d'après [Cherif 03, Campocasso 13]

## 1.2 Modélisation des efforts de coupe à l'échelle mésoscopique

### 1.2.1 Mécanismes de la coupe

La coupe d'un matériau métallique est un sujet étudié de nombreuses fois par la communauté scientifique ces dernières décennies. Le principe majeur, mis en lumière par Merchant [Merchant 45a, Merchant 45b], dans le cas d'un copeau continu, consiste en la formation d'un copeau suite au cisaillement du matériau induit par le mouvement de l'outil coupant. Ces observations sont confirmées par [Astakhov 98] dans les cas de matériaux ductiles et fragiles, puis étendues dans le cas de l'usinage de l'alliage de titane Ti6Al4V par [Sun et al. 09, Sutter et al. 13]. Ce cisaillement de la matière s'effectue de la pointe de l'outil coupant jusqu'à la surface libre du matériau usiné, selon une orientation définie par un angle de cisaillement noté  $\phi$  et déterminée par un bilan des actions mécaniques. Cette zone, appelée zone de cisaillement primaire ou ZCP, possède une épaisseur plus ou moins grande selon la vision de la réalité retenue. Deux zones complémentaires au cisaillement primaire de la matière sont également identifiées : la zone de cisaillement secondaire ou ZCS et la zone de cisaillement tertiaire ou ZCT. La zone de cisaillement secondaire est représentative des interactions entre le copeau et la face de coupe de l'outil coupant. Tandis que la zone de cisaillement tertiaire est représentative des interactions entre la surface usinée et la face de dépouille de l'outil coupant. L'ensemble des zones de cisaillement sont représentées à la [FIGURE 1.3](#) vues dans le plan  $P_n$ , plan normal à l'arête de coupe selon la définition proposée par la norme [ISO 93a].

Du point de vue de la génération des efforts de coupe, Albrecht [Albrecht 60] identifie que, dans la majeure partie des cas, les zones de cisaillement primaire et secondaire de la matière sont prépondérantes dans leurs contributions aux efforts de coupe. C'est la raison pour laquelle, une grande partie des développements scientifiques dans la modélisation des efforts de coupe s'est limitée à cet aspect. Ces deux contributions réunies sont désignées sous le terme d'*effet cut* ou d'*effet lié à la coupe/la formation du copeau* [Armarego et al. 70, Kaymakci et al. 12]. Plusieurs façons de modéliser cet effet à l'échelle mésoscopique sont détaillées au paragraphe 1.2.2.

Toutefois, Albrecht souligne également que les modélisations d'efforts de coupe, qui ne tiennent compte que des contributions liées aux cisaillements primaire et secondaire de la matière, ne sont plus valides dans le cas des opérations de finition. Huang et Liang [Huang et al. 03] réalisent la même observation lors du tournage d'un acier dur en comparant, pour les mêmes conditions opératoires, les efforts de coupe mesurés au cours d'opérations de finition et les efforts de coupe modélisés en ne tenant compte que des forces générées par la formation du copeau ([FIGURE 1.4](#)). En moyenne sur les trois composantes d'effort de coupe, mesurées dans le repère machine, des erreurs de modélisation supérieures à 50 % pour chaque composante sont observées. Ces erreurs sont d'autant plus importantes pour de faibles niveaux d'efforts de coupe (i.e. les petites valeurs d'avance par tour). Selon [Ng et al. 06, Wyen et al. 10], cette différence observée

entre les efforts de coupe modélisés et les efforts de coupe mesurés est liée à la non-linéarité des efforts de coupe avec l'épaisseur coupée, ou *effet d'échelle*.

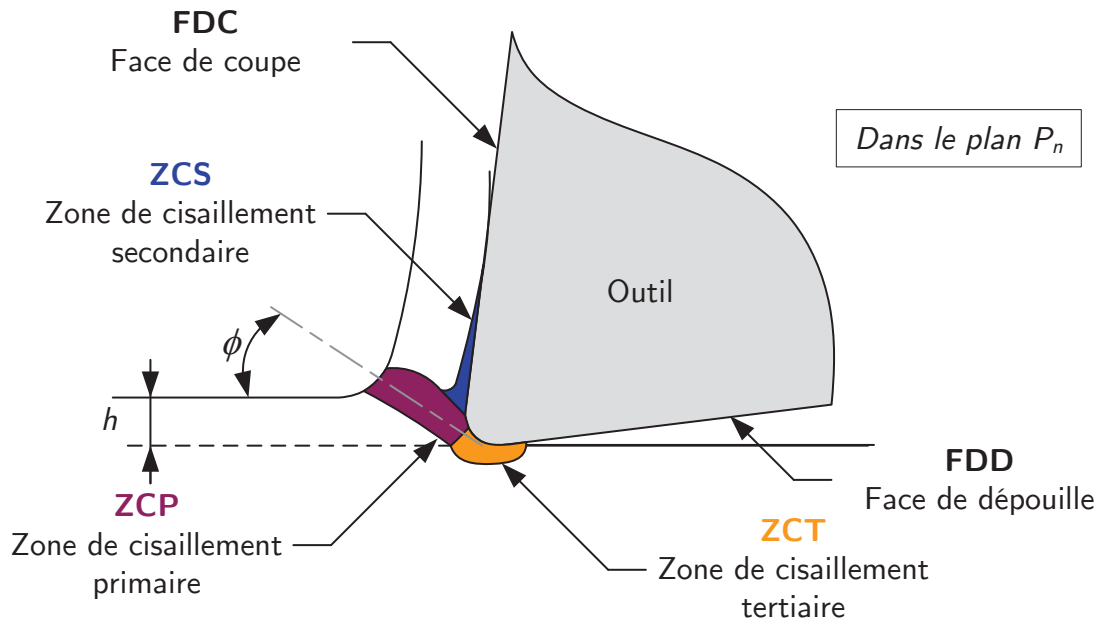


FIGURE 1.3 Zones caractéristiques de la coupe d'un matériau métallique

Pour expliquer cet effet d'échelle, Zorev [Zorev 66] suggère que dans le cas d'un usinage sans arête rapportée, l'outil coupant n'est pas uniquement en contact avec le matériau usiné sur la face de coupe, mais également sur sa face de dépouille. Dans cette optique, Albrecht propose la notion de « forces parasites » qui sont représentatives du contact entre la face de dépouille de l'outil coupant et la surface usinée, induit par le retour élastique de la matière usinée après le passage de l'outil. Cette contribution aux efforts de coupe est également désignée comme le « *ploughing effect* » (i.e. l'effet lié au contact de l'arête avec la surface générée) ou plus communément nommé *l'effet edge* [Kaymakci et al. 12]. Ces efforts sont généralement connus comme étant petits en comparaison avec les efforts appliqués sur la face de coupe ; toutefois ils peuvent parfois dépasser les efforts liés à *l'effet cut*, particulièrement lors des opérations de finition. Plusieurs modélisations de cet effet sont détaillées au paragraphe 1.2.3.

En définitive, dans le but de prédire des efforts de coupe pour un domaine de validité large (i.e. allant de l'ébauche à la finition), il est nécessaire de prendre en compte les effets *cut*, liés à la coupe, et *edge*, liés au contact entre l'arête de coupe et la surface générée, dans la modélisation comme indiqué à l'Eq. 1.1. Plusieurs propositions de modélisations à l'échelle mésoscopique de ces deux effets sont proposées aux paragraphes 1.2.2 et 1.2.3.

$$F_i = F_{i,cut} + F_{i,edge} \text{ avec } i \in \{v, h, o\} \quad (1.1)$$



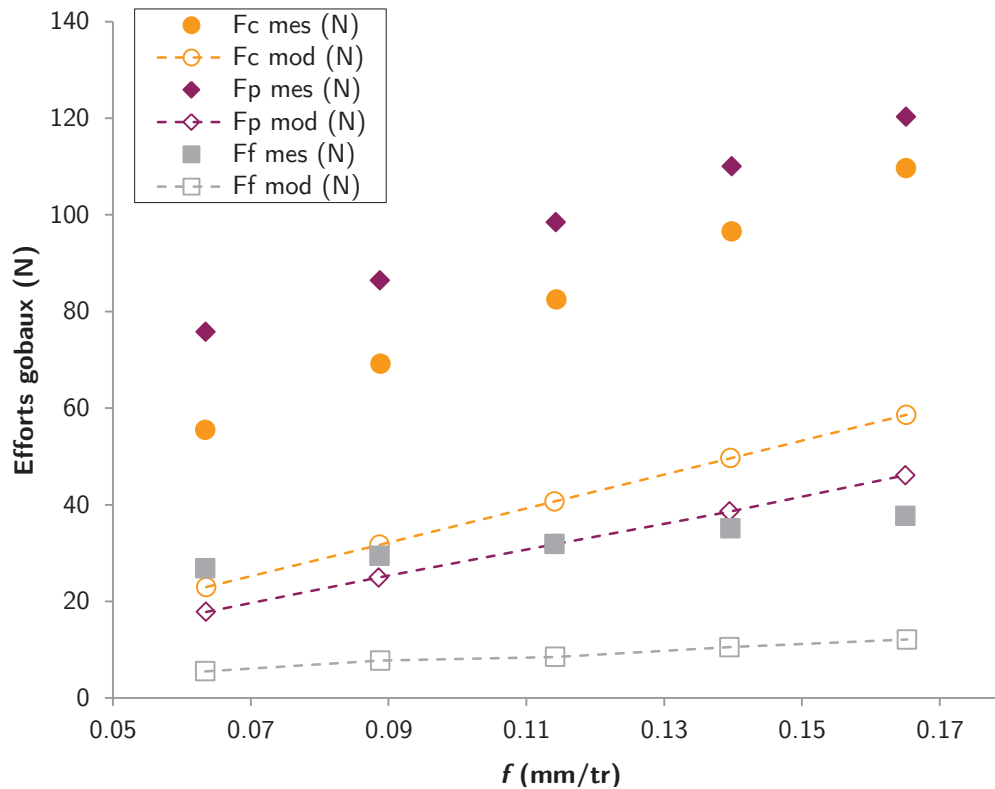


FIGURE 1.4 Comparaison entre des efforts mesurés et des efforts simulés, avec prise en compte de l'effet cut uniquement, en tournage ( $V_c = 138$  m/min ;  $a_p = 0.127$  mm), d'après [Huang et al. 03]

## 1.2.2 Modélisation de « l'effet cut »

Comme présenté au paragraphe 1.2.1, l'*effet cut* est représentatif des contributions aux efforts de coupe des zones de cisaillement primaire et secondaire. De plus, cette contribution est primordiale dans la majeure partie des cas d'usinage. Sa modélisation, en vue de prédire des efforts de coupe, est incontournable.

Les premières modélisations de l'*effet cut* en tournage se sont notamment appuyées sur les propositions de Kienzle [Kienzle 52] qui exprime la composante principale de l'effort de coupe comme le produit d'une section coupée (approximée comme étant le produit de la profondeur de passe  $a_p$  et de l'avance par tour  $f$ ) et d'un coefficient d'énergie spécifique de coupe, comme détaillé à l'EQ.1.2.

$$F_c = K_c \times f \times a_p \quad (1.2)$$

Toutefois ce type de modélisation, bien que proposant une bonne approximation des efforts de coupe moyens, s'avère être une approximation parfois trop grossière pour prédire des

---

$K_c$  : coefficient d'énergie spécifique de coupe

efforts de coupe de manière fine. Dès lors, le besoin d'une description plus fine de la section coupée est apparu. Pour ce faire, la notion d'épaisseur coupée, notée  $h$  à la FIGURE 1.3, est également introduite par Kienzle [Kienzle 52] d'après une analyse géométrique afin d'affiner la description d'une section coupée. Pour justifier cette formulation, Brown [Brown et al. 64] étudie l'influence de l'épaisseur coupée sur les efforts de coupe lors d'essais de tournage en coupe oblique. Il observe une augmentation significative des efforts de coupe lorsque le niveau d'épaisseur coupée augmente. Cette notion découverte et son influence démontrée, à partir de ces observations Brown [Brown et al. 64] confirme les propositions de Kienzle [Kienzle 52], en modélisant les trois composantes d'efforts de coupe générées par l'*effet cut* selon un produit d'une section coupée, désormais définie comme une relation linéaire avec l'épaisseur coupée et une largeur de coupe, et d'un coefficient d'énergie spécifique de coupe. Cette modélisation est également étendue et appliquée au cas du fraisage par Armarego [Armarego et al. 70], où l'épaisseur coupée évolue en fonction de la position angulaire de la dent lorsqu'elle est en prise (contrairement aux opérations élémentaires en tournage, sans changement de trajectoire, où l'épaisseur coupée est constante une fois l'outil engagé). Bien que possédant un sens physique limité, la modélisation de l'*effet cut* comme fonction linéaire de l'épaisseur coupée (EQ. 1.3) et d'un coefficient d'énergie spécifique de coupe est aujourd'hui considérée comme la méthodologie de référence pour modéliser des efforts de coupe à l'échelle mésoscopique selon une approche phénoménologique.

$$F_{i,cut} = K_{c,i} \times h \times b \text{ avec } i \in \{v, h, o\} \quad (1.3)$$

Dans l'optique d'apporter davantage d'interprétation physique à la modélisation de l'*effet cut* selon une approche phénoménologique, la communauté scientifique se penche également sur la modélisation des efforts de coupe selon une approche mécaniste. L'objectif de cette approche est notamment de proposer une formulation plus explicite du coefficient d'énergie spécifique de coupe utilisé dans l'approche phénoménologique. Plusieurs développements dans cette ligne sont le fruit de travaux initiés au *Manufacturing Automation Laboratory at the University of British Columbia* [Altintas 00, Kaymakci 09, Kaymakci et al. 12]. L'approche mécaniste s'appuie principalement sur les observations proposées par Merchant [Merchant 45a, Merchant 45b] lors du bilan des actions mécaniques appliquées sur le copeau dans le cadre d'une opération de coupe élémentaire, présenté à la FIGURE 1.5 sous forme de diagramme des efforts de coupe. L'effort généré par le cisaillement de la matière dans la ZCP noté  $F_s$ , peut être déterminé géométriquement à partir de la résultante de l'effort de coupe noté  $F$ , l'angle de cisaillement  $\phi_c$ , l'angle de coupe  $\alpha_r$  et l'angle de friction  $\beta_a$ , comme détaillé à l'EQ. 1.4.

$$F_s = F \times \cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r) \quad (1.4)$$

$$F = \sqrt{F_t^2 + F_f^2} \quad (1.5)$$

---

$\alpha_r$  : angle de coupe ;  $\beta_a$  : angle de friction ;  $\phi_c$  : angle de cisaillement ;  $F_s$  : effort généré dans la ZCP

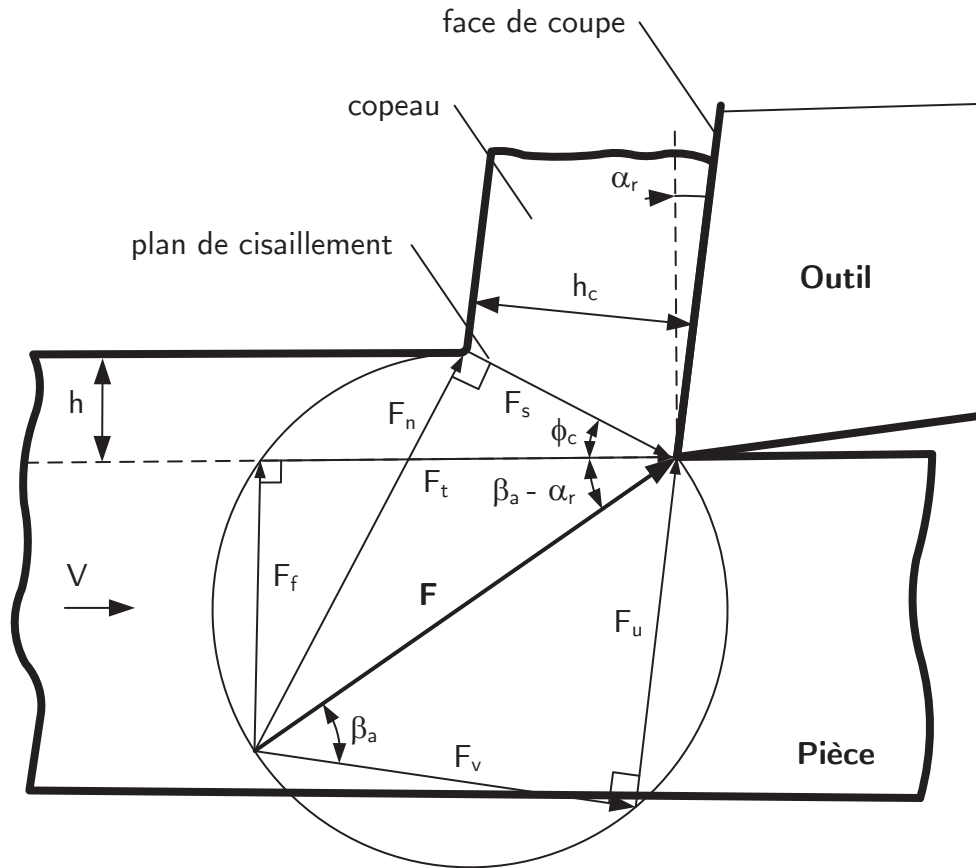


FIGURE 1.5 Diagramme des efforts de coupe dans le cas d'un essai de coupe élémentaire avec un copeau continu, d'après [Merchant 45a, Altintas 00]

Pour modéliser l'*effet cut*, dans un premier temps, Altintas [Altintas 00] exprime l'effort de cisaillement généré dans la zone de cisaillement primaire  $F_s$  comme une fonction de la contrainte de cisaillement  $\tau_s$ , de l'angle de cisaillement  $\phi_c$  (EQ. 1.6). Dans un second temps, la résultante de l'effort de coupe  $F$ , est exprimée en fonction de l'effort de cisaillement généré dans la zone de cisaillement primaire. Enfin, dans un dernier temps, à l'aide de projections géométriques, les composantes d'effort de coupe  $F_f$  et  $F_t$  sont exprimées à partir de la résultante d'effort de coupe  $F$  (EQ. 1.7). Dès lors, par substitution il est alors possible d'exprimer les composantes d'effort de coupe  $F_f$  et  $F_t$  en fonction de la contrainte de cisaillement  $\tau_s$  (EQ. 1.8).

$$F = \frac{F_s}{\cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r)} = \frac{\tau_s b h}{\sin(\phi_c) \cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r)} \quad (1.6)$$

$$\begin{cases} F_t = F \cos(\beta_a - \alpha_r) \\ F_f = F \sin(\beta_a - \alpha_r) \end{cases} \quad (1.7)$$

$\tau_s$  : contrainte de cisaillement ;  $F$  : effort de coupe résultant

$F_t$  : effort tangentiel (équivalent à  $f_t$  dans cette étude) ;  $F_f$  : effort normal (équivalent à  $f_n$  dans cette étude)

$\eta$  : angle d'écoulement du copeau

$$\begin{cases} F_t = bh \left[ \tau_s \frac{\cos(\beta_a - \alpha_r)}{\sin\phi_c \cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r)} \right] \\ F_f = bh \left[ \tau_s \frac{\sin(\beta_a - \alpha_r)}{\sin\phi_c \cos(\phi_c + \beta_a - \alpha_r)} \right] \end{cases} \quad (1.8)$$

Ces formulations ont été également généralisées par Kaymakci [Kaymakci et al. 12] dans le cas de géométries d'outils plus complexes, en prenant en compte l'inclinaison d'arête  $\lambda_s$ , la projection de l'angle de friction  $\beta_a$  dans le plan  $P_n$  noté  $\beta_n$ , l'angle d'écoulement du copeau  $\eta$ . Ces équations sont détaillées dans les EQS. 1.9 et 1.10.

$$\beta_n = \tan^{-1}(\tan\beta_a \times \cos\eta) \quad (1.9)$$

$$\begin{cases} F_{u,cut} = bh \left[ \tau_s \frac{\sqrt{1 - \tan^2\eta \sin^2\beta_n}}{\cos\lambda_s \sin\phi_n \sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \gamma_n) + \tan^2\eta \sin^2\beta_n}} \sin\beta_n \right] \\ F_{v,cut} = bh \left[ \tau_s \frac{\sqrt{1 - \tan^2\eta \sin^2\beta_n}}{\cos\lambda_s \sin\phi_n \sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \gamma_n) + \tan^2\eta \sin^2\beta_n}} \cos\beta_n \right] \end{cases} \quad (1.10)$$

En définitive, la modélisation de l'*effet cut* comme le produit d'une épaisseur coupée, d'une largeur de coupe et de la contrainte de cisaillement induite par le cisaillement primaire de la matière projetée dans le repère d'expression des efforts de coupe est la méthodologie de référence pour modéliser les efforts de coupe générés par l'*effet cut* selon une approche mécaniste. Cette approche propose l'avantage d'utiliser le terme de contrainte de cisaillement de la matière, qui possède un sens physique davantage explicite que le coefficient d'énergie spécifique de coupe.

En dehors de ces modélisations, considérées comme des « références » dans cette étude, de nombreuses propositions sont formulées par la communauté scientifique. À l'échelle mésoscopique, selon des approches phénoménologique et mécaniste, des modélisations du cisaillement primaire, par exemple sur le principe des lignes de glissement [Oxley 98], et du contact entre le copeau et la face de coupe sont très répandues. Elles sont détaillées ou citées dans de nombreux travaux de thèse [Waldorf 96, Fontaine 04, Bissey 05, Kaymakci 09, Germain 11, Wagner 11]. Il existe également des analyses et modélisations plus précises de la contribution de la zone de cisaillement secondaire aux efforts de coupe, selon le principe du second gradient [Laheurte 04, Cahuc et al. 07]. Afin de ne pas faire doublon avec le travail présenté dans ces documents, le choix est fait de ne pas détailler de nouveau, dans l'état de l'art dans cette étude, ces contributions, ni celles concernant le contact entre la pièce usinée et la face de dépouille abordées dans le paragraphe suivant.

---

$\beta_n$  : angle de friction  $\beta_a$  projeté dans  $P_n$

### 1.2.3 Modélisation de « l'effet edge »

Comme le souligne Albrecht [Albrecht 60], dans certains cas d'usinage, principalement lors des opérations de finition, les efforts de coupe générés par l'*effet edge* ne sont plus négligeables par rapport aux efforts de coupe générés par l'*effet cut*. De ce fait, modéliser l'*effet edge* pour affiner la prédiction des efforts de coupe devient une nécessité.

Pour ce faire, la communauté scientifique s'intéresse à la détermination de ces forces induites par le contact de la face de dépouille de l'outil coupant et la surface usinée. Selon une approche phénoménologique à l'aide d'essais en coupe orthogonale, Albrecht [Albrecht 60] observe que l'évolution des efforts de coupe en fonction de l'épaisseur coupée peut être décrite en deux temps : une partie linéaire au-delà d'un certain ratio  $r_\beta/h$ , une partie courbée en deçà de cette même valeur. En s'appuyant sur ces observations, il propose d'évaluer ces forces générées par le contact entre l'outil coupant et la pièce usinée comme étant les efforts de coupe extrapolés à une épaisseur coupée nulle ou une profondeur de passe nulle. En d'autres termes, cela revient à définir l'*effet edge* comme un terme, indépendant de l'épaisseur coupée et la profondeur de passe, équivalent à la valeur de l'ordonnée à l'origine lorsque les efforts de coupe sont tracés en fonction de l'évolution de l'épaisseur coupée ou de la profondeur de passe. Cette approche est reprise et complétée par Zorev [Zorev 66] dans le cas de la coupe oblique avec différents niveaux d'usure, démontrant ainsi une corrélation entre l'augmentation des efforts de coupe liés uniquement à l'*effet edge* et l'accroissement de la largeur de l'usure en dépouille. Toutefois, plusieurs remarques à l'encontre de cette méthode sont formulées. En effet, beaucoup s'interrogent sur le sens physique d'une telle méthode, en d'autres termes, existe-t-il toujours des forces si l'épaisseur coupée ou la profondeur de passe est nulle et donc qu'il n'y a pas de coupe ?

Pour tenter de répondre à cela, Zorev [Zorev 66] réalise un essai de coupe élémentaire à profondeur de passe décroissante tout en utilisant une jauge de contrainte à forte sensibilité. Il remarque que l'effort, appliqué sur l'outil coupant et mesuré, n'est pas nul lorsque l'outil est désengagé de la matière (i.e. quand l'outil ne coupe plus). Néanmoins, les forces mesurées dans ces conditions présentent un écart de 10 à 30% avec les forces obtenues selon la méthode d'extrapolation à épaisseur coupée ou à profondeur de passe nulle. D'après des observations menées lors d'essais de tournage, Guo [Guo et al. 04] nuance également l'utilisation de cette méthode en limitant son application aux cas d'usinage ne présentant pas de forces cycliques trop importantes (i.e. la partie transitoire d'un effort en régime permanent). Par ailleurs, des avis bien plus tranchés s'opposent à l'utilisation de la méthode d'extrapolation à épaisseur coupée nulle pour déterminer l'intensité des efforts de coupe générés par le contact entre la face de dépouille de l'outil coupant et la surface usinée. C'est notamment la position prise par Stevenson et Stephenson [Stevenson et al. 95, Stephenson 98]. Dans le cas de l'usinage du Zinc, Stevenson et Stephenson [Stevenson et al. 95] comparent l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de déformation en cisaillement selon deux méthodes expérimentales : des essais de compression et des essais d'usinage en coupe orthogonale sur tube. À partir des essais d'usinage, la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de déformation en cisaillement est

déterminée selon deux formulations : une première respectant à la lettre le modèle défini par Merchant [Merchant 45b, Merchant 45a], une seconde appuyée sur le modèle dit de « Merchant corrigé » où les efforts, pris en compte comme données d'entrée dans le modèle défini par Merchant, correspondent aux efforts mesurés auxquels les efforts extrapolés à épaisseur coupée nulle sont soustraits. Bien que les essais de compression et d'usinage proposent des vitesses de déformations différentes, les tendances dégagées lors des essais de compression semblent davantage en adéquation avec les résultats proposés par les essais d'usinage interprétés selon le modèle de Merchant. Les essais d'usinage interprétés selon le modèle de « Merchant corrigé », quant à eux, proposent un écart significatif par rapport aux deux observations précédentes.

Ces observations sont également confirmées par Stevenson [Stevenson 98], à nouveau dans le cadre de l'usinage du Zinc, en pointant du doigt l'incapacité de la méthode d'extrapolation à épaisseur coupée nulle de proposer une évaluation des efforts, induits par l'*effet edge*, valable pour plusieurs géométries d'arête. Cette affirmation est fondée sur la comparaison des efforts de coupe relevés lors d'essais de coupe orthogonale sur tube en tournage. Les efforts issus de l'*effet edge* sont déterminés selon la méthode d'extrapolation à épaisseur coupée nulle et comparés avec les efforts relevés expérimentalement au cours d'un essai, après que le mouvement d'avance ait été interrompu mais que la rotation de la pièce contre l'outil soit poursuivie. D'après les observations, les efforts déterminés selon la méthode d'extrapolation à épaisseur coupée nulle surévaluent les efforts mesurés dans le second cas, comme indiqué à la [FIGURE 1.6](#). De plus, l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de déformation en cisaillement, interprétée à partir de cette seconde méthode, est comparée aux résultats obtenus d'après les essais de compression réalisés par Stevenson et Stephenson [Stevenson et al. 95]. Les résultats proposés dans les deux cas semblent en adéquation et confortent Stevenson [Stevenson 98] dans son choix d'écarter la méthode d'extrapolation à épaisseur coupée nulle.

Pour s'affranchir des problèmes soulevés lors d'une extrapolation des efforts à épaisseur coupée nulle, Zorev [Zorev 66] propose quatre autres méthodologies pour déterminer les efforts de coupe générés entre l'outil coupant et la surface usinée.

La méthode dite de *la sélection de l'angle de coupe*, qui repose sur un choix judicieux de l'angle de coupe afin d'annuler la contribution de l'*effet cut* sur l'une des composantes globales de l'effort de coupe et d'en déterminer par la suite la contribution de l'*effet edge*. La méthode dite de *la comparaison des efforts de coupe à différents niveaux de largeur d'usure en dépouille*, qui s'appuie sur l'hypothèse que pour des paramètres opératoires figés, si l'usure en dépouille évolue, les variations d'efforts de coupe observées en conséquence sont uniquement le résultat d'une modification des efforts liés à l'*effet edge*. Dès lors, en comparant les efforts mesurés à deux niveaux d'usure différents (bien que Zorev conseille de réaliser ces mesures pour plus de deux niveaux), pour de mêmes paramètres opératoires, il est possible de déterminer les forces induites par l'*effet edge*. Les deux dernières méthodes, non-détaillées dans ce paragraphe, s'articulent sur

des mesures d'efforts avec un outil en coupe oblique et sur l'utilisation d'un outil divisé (i.e. un outil constitué de deux outils, représentatifs de la face de coupe et de dépouille, qui permettent par des mouvements relatifs entre les essais de dissocier les contributions des effets *cut* et *edge*).

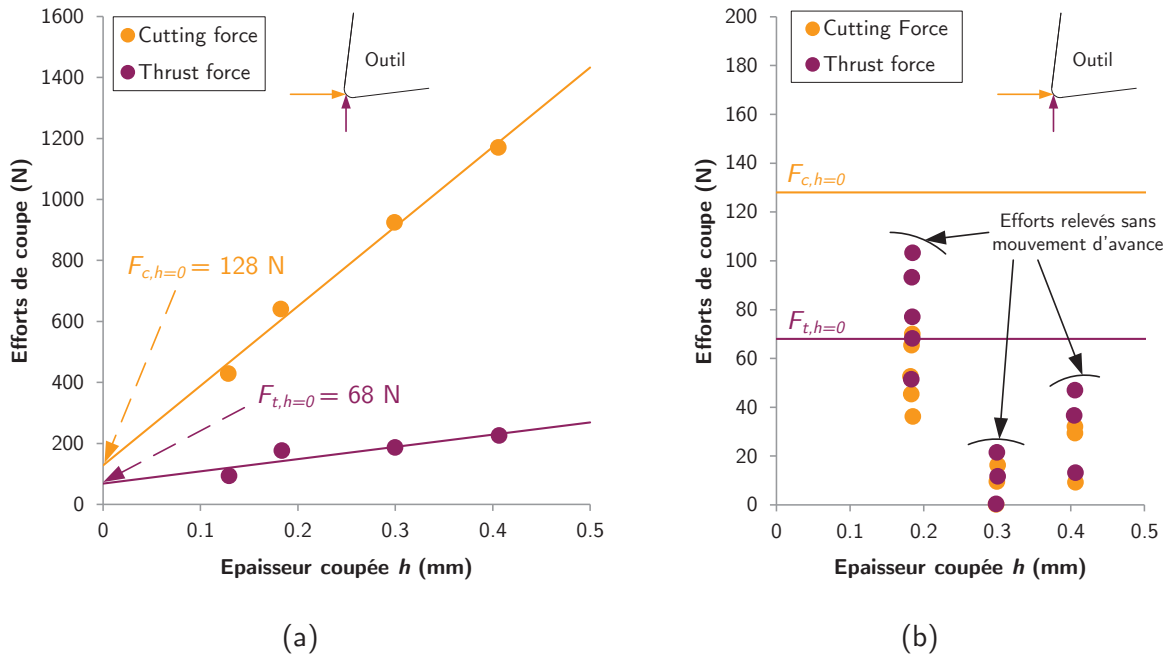


FIGURE 1.6 Comparaison des efforts en tournage liés à l'effet edge selon (a) méthode extrapolée à épaisseur coupée nulle ; (b) selon méthode mesure des efforts sans mouvement d'avance, d'après [Stevenson 98]

Pour statuer sur la pertinence de ces nouvelles méthodologies, Popov et Dugin [Popov et al. 13] se penchent notamment sur la comparaison entre la valeur des efforts induits par l'*effet edge* selon la méthode d'extrapolation à épaisseur coupée nulle et selon la méthode de comparaison des efforts de coupe à différentes largeurs d'usure en dépouille. Ils observent que la méthode visant à extrapoler les efforts à épaisseur coupée nulle a tendance à surévaluer les efforts induits par l'*effet edge* en comparaison avec ceux proposés par la méthode de comparaison des efforts à différentes largeurs d'usure en dépouille. Dans la même veine, Popov et Dugin [Popov et al. 14] confirment ces observations en comparant ces deux méthodes dans le cas du rabotage d'un alliage d'aluminium. De plus, ils développent une nouvelle méthode de détermination de ces forces en s'inspirant de la méthode de comparaison des efforts de coupe pour plusieurs niveaux d'usure, mais cette fois articulée autour de la longueur réelle de contact entre la face de dépouille de l'outil et la surface usinée. Cette nouvelle méthode, comme le soulignent Popov et Dugin [Popov et al. 14], propose une meilleure approximation de ces efforts induits par l'*effet edge*. En effet, l'effet de l'épaisseur coupée, non considéré dans le cas de la méthode d'extrapolation à épaisseur coupée nulle, est identifié et pris en compte dans cette nouvelle méthode. Cet argument incite Popov et Dugin [Popov et al. 14] à rejeter l'utilisation de la méthode d'extrapolation à épaisseur nulle.

Enfin, les travaux de Zorev [Zorev 66] soulignent la complexité de la compréhension des phénomènes liés aux efforts induits par l'*effet edge* en étudiant l'influence de nombreux

paramètres sur ces mêmes efforts (profondeur de passe, largeur de l'usure en dépouille, vitesse de coupe, coefficient de friction sur la face de dépouille, propriétés mécaniques de la matière usinée, etc.).

En complément de ces premiers travaux selon une approche phénoménologique, plusieurs contributeurs s'intéressent à la modélisation de l'*effet edge* selon une approche mécaniste. Germain [Germain 11] propose une synthèse assez large des différentes modélisations de ce type sur le sujet, l'objet de ce paragraphe n'est donc pas de répéter cet état des lieux mais de définir brièvement le principe général des modélisations en citant quelques contributions synthétiques. La plupart de ces modélisations s'appuient donc sur la définition d'un point de stagnation de la matière [Waldorf et al. 99, Waldorf 06] : point régissant la répartition entre la matière qui formera le copeau et la matière refoulée sous l'outil. Dès lors, en fonction de la position de ce point, différents niveaux de contraintes sont appliqués sur l'outil principalement en fonction du comportement mécanique du matériau usiné et des conditions de contact retenues à l'interface avec l'outil coupant [Woon et al. 08].

Ainsi, lors de la modélisation des efforts de coupe, l'*effet edge* peut prendre plusieurs formes, principalement selon une approche phénoménologique, étant donnée la complexité du phénomène à modéliser. L'une des manières les plus utilisées consiste en la modification de l'*effet cut* non plus comme une fonction linéaire de l'épaisseur coupée mais comme une fonction polynomiale [Kienzle 52, Denkena et al. 10], exponentielle [Hoon Ko et al. 05], fractionnaire [Paris et al. 07, Brissaud et al. 09] ou parfois bilinéaire [Campocasso 13], afin de représenter plus fidèlement la non-linéarité des efforts de coupe pour les faibles épaisseurs coupées (i.e. une représentation de l'*effet edge* sans le modéliser à proprement parler, souvent désigné sous le terme d'*effet d'échelle*). L'autre manière couramment utilisée consiste à associer un terme représentatif de l'*effet edge* au terme définissant l'*effet cut* comme détaillé à l'EQ. 1.1. Dans cette démarche, Armarego [Armarego et al. 70, Armarego et al. 85, Armarego 00] s'appuie sur les conclusions formulées par Albrecht [Albrecht 60] en définissant l'*effet edge* comme étant un terme constant équivalent à l'effort de coupe à épaisseur coupée nulle (EQ. 1.11). Liang et Huang [Huang et al. 03], ainsi que Kaymakci [Kaymakci et al. 12] proposèrent quant à eux, deux formulations polynomiales, l'une fonction de l'épaisseur coupée (EQ. 1.12) et l'autre fonction de la vitesse de coupe et de l'angle de coupe (EQ. 1.13), inspirées des observations formulées par Zorev [Zorev 66] concernant l'effet de ces paramètres.

$$F_{i,edge} = k_{e,i} \times b \text{ avec } i \in \{v, h, o\} \quad (1.11)$$

$$K_{i,edge} = a_0 - a_1 h_{max} - a_2 h_{max}^{a_3} \quad (1.12)$$

$$K_{i,edge} = a_0 + a_1 V_c + a_2 V_c^2 + a_3 \gamma_n \quad (1.13)$$



Toutefois, ces formulations, ainsi que les études présentées dans les recherches bibliographiques peuvent être discutées. En effet, l'*effet edge* est presque exclusivement étudié et modélisé vis-à-vis de ses interactions avec la géométrie de l'outil coupant (l'angle de coupe [Zorev 66, Kaymakci et al. 12], le rayon d'acuité d'arête [Stevenson 98] ou les paramètres opératoires en usinage [Huang et al. 03, Kaymakci et al. 12]). De plus, la majeure partie des essais (compression, indentation, usinage, etc.) pour déterminer la valeur de ces efforts induits par l'*effet edge* sont réalisés en rabotage ou en tournage à diamètre usiné quasi-constant. Cependant, Zorev [Zorev 66] ouvre la porte vers une étude plus fine des conditions de contact à l'interface entre la face de dépouille de l'outil coupant et la surface générée en soulignant l'influence du rayon de courbure de la zone usée en dépouille sur les efforts induits par l'*effet edge*. Germain [Germain 11] et Campocasso [Campocasso 13] soulignent également un effet du rayon de pièce usiné sur les efforts de coupe dans le cadre de la coupe orthogonale sur disque et du chariotage du cuivre pur Cu-c2. En conséquence, premièrement, Germain propose un coefficient de correction à affecter aux efforts de coupe modélisés pour tenir compte de l'effet observé du rayon usiné sur les efforts de coupe (EQ. 1.14). Deuxièmement, il introduit la notion de rayon de contact en dépouille afin de caractériser plus finement les conditions de contact à l'interface entre la face de dépouille et la surface usinée. De manière analogue, des observations sont également effectuées dans le cas du fraisage d'un acier durci par Bouzakis [Bouzakis et al. 13]. Il met en évidence la propagation plus rapide de l'usure lors de l'usinage d'un profil concave entre l'outil coupant et la pièce usinée, par comparaison avec un profil de nature convexe, laissant entendre un comportement différent entre ces deux configurations d'usinage.

$$C_{Dia,i} = \frac{\cos\left(\gamma_n - \arctan\left(\frac{h}{2\pi R_{usi}}\right)\right)(1 - \exp(-a_i R_{usi}^2))}{\cos\gamma_n} \text{ avec } i \in \{c,t\} \quad (1.14)$$

Au vu de ces observations, il semble que la modélisation de l'*effet edge* gagnerait à être enrichie à l'aide d'un terme tenant compte de l'influence des conditions de contact à l'interface face de dépouille de l'outil coupant et surface usinée de manière plus précise.

---

$C_{Dia}$  : coefficient correcteur à appliquer aux efforts de coupe pour tenir compte de l'effet du rayon de pièce

## 1.3 Usure de l'outil dans la modélisation des efforts de coupe

En complément de la modélisation des efforts au sein d'un domaine statique ou quasi-statique comme définie au paragraphe 1.1 et développée partiellement au paragraphe 1.2, des phénomènes extérieurs peuvent modifier l'intensité des efforts de coupe au cours du temps. C'est notamment le cas des phénomènes vibratoires, qui se situent en dehors du périmètre de cette étude, mais également de l'usure de l'outil. De plus, malgré plusieurs méthodes pour améliorer leurs usinabilités [Germain 06], il est bien connu de la communauté scientifique que l'usinage des alliages de titane peut générer une usure de l'outil importante [Jawaid et al. 99, Jawaid et al. 00, A. Ghani et al. 13]. À ce titre, pour proposer une modélisation des efforts de coupe valable tout au long du cycle de vie d'un outil coupant dans le cadre de l'usinage des alliages à base de titane, il est nécessaire de prendre en considération les interactions entre l'usure de l'outil et les efforts de coupe.

### 1.3.1 Interaction entre l'usure de l'outil et les efforts de coupe

Comme le précise Cartier et Kapsa [Cartier et al. 01], du point de vue du mécanicien, l'usure correspond à tout évènement conduisant à une perte de fonction des composants ou des systèmes. Dès lors, l'usure peut notamment générer des évolutions dimensionnelles et/ou géométriques des pièces, et également des phénomènes de dégradation des surfaces (e.g. rayures, sillons, cavités, excroissances, etc.) dont l'influence peut-être dommageable à plusieurs égards (i.e. altération des propriétés mécaniques, détérioration de l'aspect, etc.). Ainsi, le suivi de l'usure de l'outil au cours des opérations d'usinage rencontre un nombre important de contributions puisque la maîtrise de l'usure de l'outil revêt un enjeu primordial dans l'industrialisation des pièces en conformité avec les attentes associées aux pièces finies. Dans un premier temps, l'usure de l'outil est mesurée de manière directe grâce à un examen précis de l'outil coupant selon les recommandations faites par les normes [ISO 93b, ISO 89b, ISO 89a]. Toutefois ces observations, bien que permettant une mesure directe de l'usure de l'outil, proposent l'inconvénient de nécessairement interrompre les opérations d'usinage pour être effectuées. C'est la raison pour laquelle la communauté scientifique s'intéresse à la caractérisation du niveau d'usure d'un outil coupant au moyen de mesures indirectes. Pour ce faire, les méthodes les plus courantes pour estimer l'usure de l'outil sont la mesure de la puissance de coupe et/ou des efforts de coupe [Choudhury et al. 00, Chinchankar et al. 14] et les méthodes de détection du bris d'outil par analyse vibratoire/acoustique du système usinant [Prasad et al. 14]. En effet, Oraby [Oraby et al. 91] met en évidence l'existence d'une corrélation entre les efforts de coupe et l'usure de l'outil. Ravindra [Ravindra et al. 93] précise ces observations en soulignant la corrélation entre l'usure de l'outil en dépouille et les composantes radiales et axiales de l'effort de coupe global lors du tournage d'une fonte à l'outil en carbure de tungstène revêtu. La composante de l'effort tangentielle, quant à elle, semble moins sensible, comme illustré à la [FIGURE 1.7](#). Enfin, Ezugwu

[Ezugwu et al. 01] complète les avancées proposées par Ravindra [Ravindra et al. 93] en suggérant que l'évolution au cours du temps de la norme des composantes axiales  $F_f$  et radiales  $F_r$ , divisées par la norme de l'effort de coupe global (EQ. 1.15), dans le cadre d'une opération de chariotage, est davantage représentative de la propagation de l'usure de l'outil que l'évolution des composantes étudiées indépendamment.

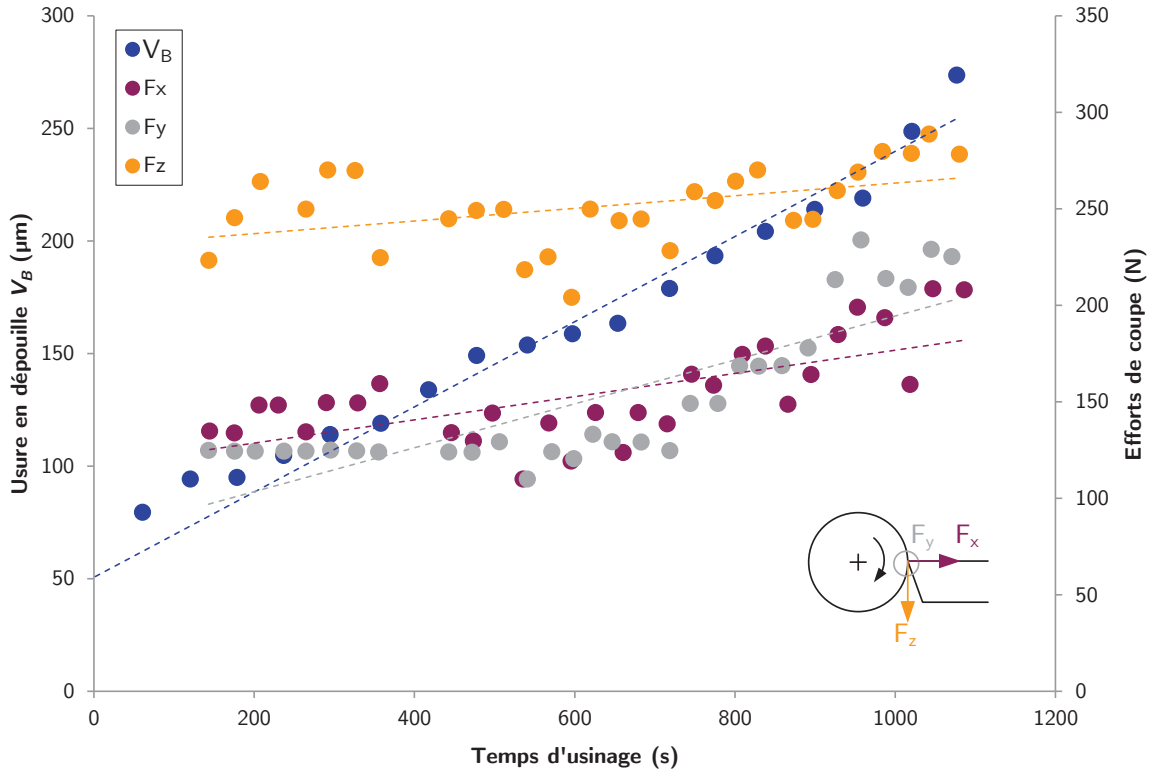


FIGURE 1.7 Évolution des efforts de coupe globaux et de l'usure de l'outil en dépouille au cours du temps, d'après [Ravindra et al. 93] ( $V_c = 300$  m/min ;  $f = 0.1$  mm/tr ;  $a_p = 1$  mm)

$$V_B \propto \frac{\sqrt{F_f^2 + F_r^2}}{\sqrt{F_f^2 + F_r^2 + F_t^2}} \quad (1.15)$$

En s'appuyant sur la corrélation entre l'évolution des efforts de coupe et l'usure de l'outil au cours du temps observée, Jawaid [Jawaid et al. 99] (FIGURE 1.8) se penche sur la nature de cette interaction dans le cadre du tournage de l'alliage de titane Ti-6242 à l'outil en carbure de tungstène non revêtu (un alliage de type phase alpha utilisé en aéronautique, notamment pour la fabrication de rouets étant donné sa bonne tenue mécanique et sa mise en œuvre relativement facile). Il met en lumière l'influence de l'intensité des efforts de coupe sur la propagation de l'usure en dépouille, en comparant le temps nécessaire pour atteindre un des critères limites de l'usure en dépouille d'un outil coupant pour différentes conditions de coupe conduisant à des niveaux efforts de coupe différents (i.e. une avance par tour plus grande conduit à une section

coupée plus importante et donc à des niveaux d'efforts de coupe accrus, ce qui d'après les observations faites, favorise la propagation de l'usure en dépouille de l'outil coupant).

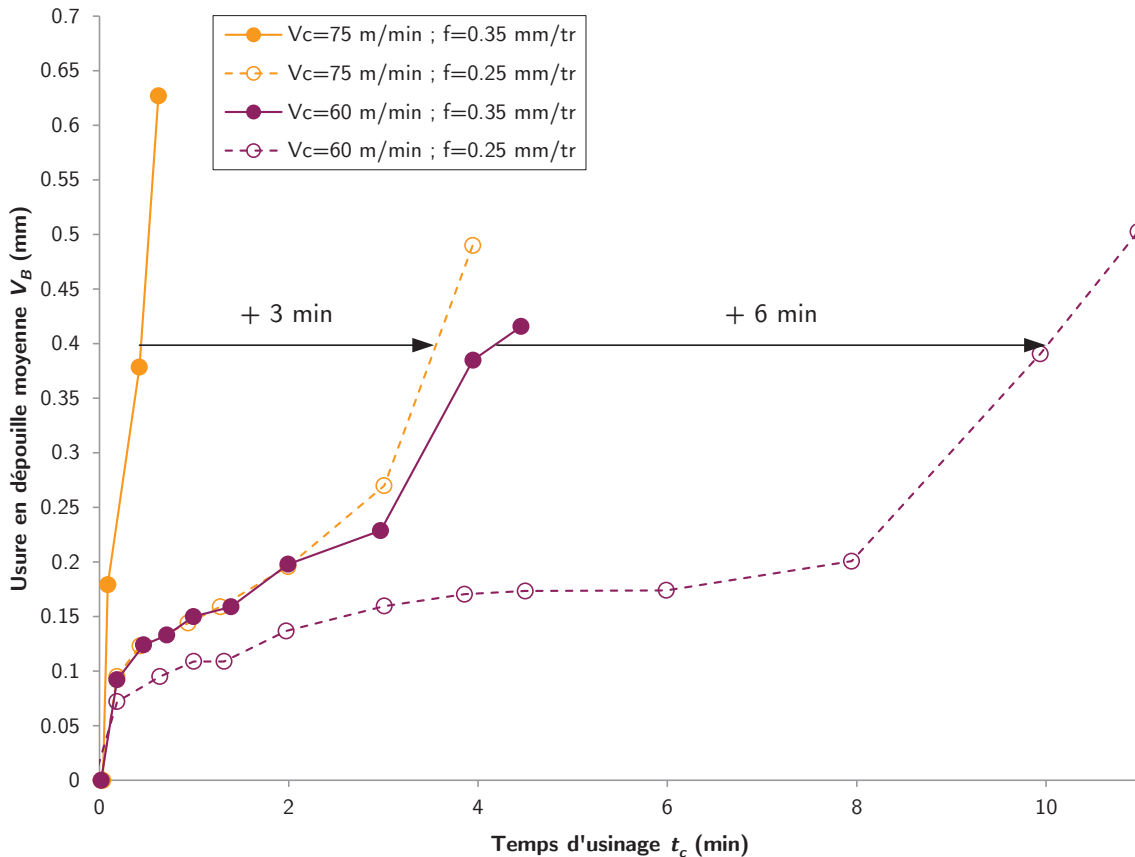


FIGURE 1.8 Évolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage en tournage pour plusieurs sections coupées traduisant des niveaux d'efforts de coupe différents, d'après [Jawaid et al. 99]

Toutefois, l'interaction entre l'évolution des efforts de coupe et l'évolution de l'usure de l'outil coupant semble relever d'un couplage fort. En effet, à contrario de l'approche développée par Jawaid, Smithey [Smithey et al. 00] étudie l'influence du niveau d'usure en dépouille sur les efforts de coupe dans le cas du tournage d'une fonte, comme indiqué à la FIGURE 1.9. Il compare les efforts de coupe globaux, mesurés dans les trois directions du repère machine, pour des conditions de coupe identiques mais avec un outil proposant différents niveaux d'usure en dépouille. Ces mêmes observations sont effectuées par Sun [S. Sun et al. 13] dans le cas de l'usinage de l'alliage de titane Ti6Al4V. En définitive, sans pouvoir déterminer qui pilote cette interaction, entre les efforts de coupe ou l'usure de l'outil, ces travaux mettent en lumière l'existence d'une réelle interaction forte entre l'usure de l'outil coupant et les efforts de coupe.

À partir de ces observations, plusieurs membres de la communauté scientifique se penchent sur le développement de modèles prédictifs. Le paragraphe 1.3.2 s'intéresse aux modèles d'usure de l'outil formulés de telle sorte que les efforts de coupe servent de données d'entrée. Inversement, le paragraphe 1.3.3 se concentre sur les modèles d'efforts de coupe tenant compte de l'influence de l'usure de l'outil.

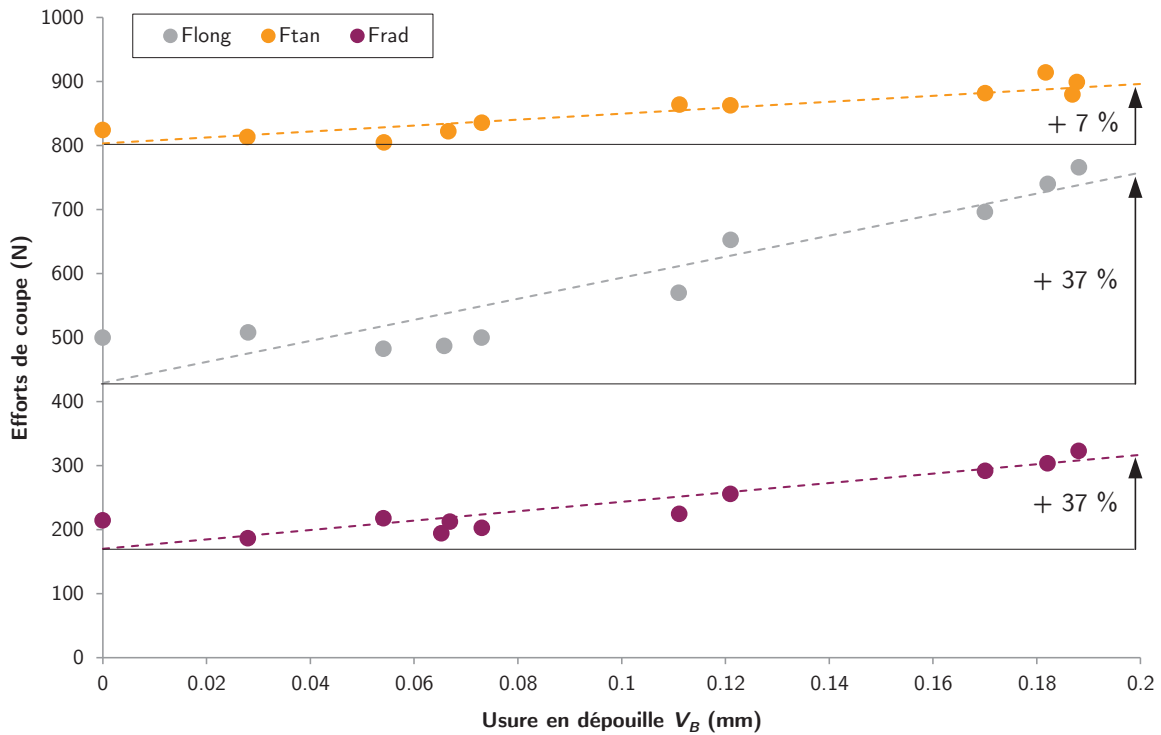


FIGURE 1.9 Évolution des efforts de coupe en tournage, en fonction de l'usure en dépouille, d'après [Smithey et al. 00]

### 1.3.2 Modèles d'usure de l'outil ou de durée de vie en fonction des efforts de coupe

Dans le but de modéliser l'évolution de l'usure des outils coupants, plusieurs chercheurs décident, au regard de l'interaction forte évoquée au paragraphe 1.3.1, d'utiliser les efforts de coupe comme une donnée d'entrée.

Dans cette optique, la première contribution majeure peut être attribuée à Taylor [Taylor 07] avec son modèle dit « généralisé ». Ce modèle définit la durée de vie d'un outil  $T$  (i.e. le temps nécessaire pour atteindre le critère de réforme) en fonction des paramètres opératoires en usinage ( $a_p$ ,  $f$ ,  $V_c$ ) et de constantes liées au couple outil et matériau usiné ( $C$ ,  $E$ ,  $F$ ,  $G$ ), comme détaillé à l'EQ. 1.16. Ces mêmes paramètres opératoires définissent notamment une section coupée et donc des efforts de coupe.

$$V_c \times T^G \times f^E \times a_p^F = C \tag{1.16}$$

De manière analogue, selon une approche phénoménologique, Oraby [Oraby et al. 04] propose également une modélisation de la durée de vie d'outil (temps nécessaire pour atteindre un niveau d'usure en dépouille égal à 0.25 mm) reposant sur une partie dite « statique » fonction

$T$  : durée de vie de l'outil

des paramètres opératoires et une partie dite « dynamique » fonction de l'évolution des composantes de l'effort de coupe (EQ. 1.17). Oraby [Oraby et al. 91] tente aussi de prédire l'évolution de l'usure de l'outil en fonction des efforts de coupe pour plusieurs critères étudiés séparément (i.e. le raisonnement n'est plus global au sens d'une durée de vie d'outil, mais davantage local au sens où les usures en différents endroits de l'outil coupant sont traitées indépendamment, comme précisé à l'EQ. 1.18, par exemple : l'usure en dépouille sur l'arête de coupe principale, l'usure en dépouille dans le nez de l'outil, etc.). Ces deux études sont effectuées dans le cadre du tournage d'un acier allié à l'outil carbure revêtu. Pareillement, la prédiction de l'usure en dépouille est l'objet de travaux menés par Ravindra [Ravindra et al. 93] qui propose une estimation de ce niveau d'usure en comparant plusieurs modèles uniquement basés sur l'évolution des composantes de l'effort de coupe et leurs différents ratios. Attanasio [Attanasio et al. 13], sur le même principe, suggère de modéliser l'évolution de l'usure de l'outil sur la face de coupe selon plusieurs méthodes de résolution, en s'intéressant notamment à la largeur de cratère.

$$T = AV_c^{\alpha} f^{\beta} a_p^{\gamma} + Be^{\delta(R_f - R_0)} \quad \text{avec } R_0 = \frac{F_{xz0}}{F_y} \text{ et } R_f = \frac{F_{xz}}{F_y} \quad (1.17)$$

$$W = W_0 + a_0 (F_i - F_{i0})^{a_1} \quad \text{avec } W \in \{AW ; NW\} \quad (1.18)$$

Selon une approche mécaniste, la communauté scientifique s'attache à modéliser l'usure engendrée lors de la coupe, caractérisée par la notion de taux d'usure, par un ou plusieurs mécanisme(s) d'usure donné(s). Pour plusieurs modélisations visant à caractériser l'influence des mécanismes d'abrasion et d'adhésion, un parallèle peut être fait avec la contribution des efforts de coupe au sens où ces modélisations s'articulent autour d'une pression de contact à l'interface entre le matériau usiné et l'outil coupant comme proposé par Archard [Archard 53] à l'EQ. 1.19. L'autre moyen couramment utilisé dans ce type de modélisations est l'exploitation de la loi d'Arrhenius [Usui et al. 78]. Zanger [Zanger et al. 13], synthétise différentes contributions formulées par la communauté scientifique pour évaluer l'évolution du taux d'usure d'un outil coupant et compare les résultats fournis par ces différentes suggestions dans la coupe orthogonale en tournage de l'alliage de titane Ti6Al4V.

$$\frac{W}{s} = K_A \times p \quad (1.19)$$

En définitive, il est à noter que quelle que soit l'approche de modélisation retenue, la géométrie de la pièce usinée n'intervient pas comme paramètre influent dans l'optique de modéliser l'usure de l'outil coupant. À l'instar des observations faites concernant la modélisation

---

$W$  : taux d'usure de l'outil

$AW$  : usure en dépouille de l'outil moyenne ;  $NW$  : usure en dépouille dans le nez de l'outil

$K_A$  : coefficient d'usure ;  $p$  : pression à l'interface outil-pièce ;  $s$  : distance de glissement

---

des efforts de coupe, il semble intéressant d'éclaircir le lien entre d'une part la géométrie à l'interface de la pièce usinée et de l'outil coupant et d'autre part l'usure de l'outil. Cet aspect peut s'avérer d'autant plus important dans le cas des opérations d'usinage proposant des conditions abrasives intenses, comme c'est le cas pour l'usinage des alliages à base de titane.

### 1.3.3 Modèles d'efforts de coupe tenant compte de l'usure de l'outil

À l'inverse de la démarche présentée au paragraphe 1.3.2, plusieurs membres de la communauté scientifique s'intéressent à la modélisation des efforts de coupe en tenant compte de l'usure de l'outil. Le paragraphe suivant vise à proposer les principales méthodologies, existantes à ce jour, pour aborder cet aspect scientifique selon une approche phénoménologique ou mécaniste. D'après une approche phénoménologique, en s'appuyant sur les avancées proposées par Mackinnon [Mackinnon et al. 86], Oraby [Oraby et al. 91] suggère d'introduire l'usure en dépouille de l'outil moyenne dans la modélisation des efforts de coupe à l'aide d'un modèle linéaire du premier ordre. Cette formulation, dans l'hypothèse que les constantes sont déterminées en accord avec leur sens physique, permet de traduire l'augmentation des efforts de coupe lors de la propagation de l'usure de l'outil, comme précisé à l'EQ. 1.20.

$$F_i(t) = C_1 V_C^{C_2} f^{C_3} a_p^{C_4} (1 + C_5 V_B(t)) \quad (1.20)$$

Selon une approche mécaniste, la formulation des efforts de coupe incluant l'effet de l'usure de l'outil est notamment traitée par Smithey [Smithey et al. 00]. La modélisation proposée par Smithey s'articule premièrement autour de la dissociation des efforts générés respectivement par la face de coupe et la face de dépouille de l'outil coupant, deuxièmement autour de la définition d'une contrainte appliquée sur la zone d'usure en dépouille de l'outil qui conduit à des efforts de coupe dans cette même zone (EQ. 1.21). Comme illustré à la FIGURE 1.10, la contrainte appliquée entre la zone d'usure en dépouille de l'outil coupant et la surface usinée dépend du comportement mécanique de la zone usée (i.e. deux cas sont distingués, où le comportement est plastique ou élastique, à partir d'un modèle de progression de la région d'écoulement plastique). Le même type de formulation est également employé par Chinchankar [Chinchankar et al. 15] dans le cadre de l'usinage d'un acier dur.

$$\begin{aligned} F_{tw} &= w \int_0^{V_B} \sigma_w(x) dx \\ F_{cw} &= w \int_0^{V_B} \tau_w(x) dx \end{aligned} \quad (1.21)$$

$w$  : largeur de coupe ;  $x$  : distance par rapport à l'arête de coupe

$\sigma_w$  : contrainte normale induite par l'usure en dépouille de l'outil

$\tau_w$  : contrainte de cisaillement induite par l'usure en dépouille de l'outil

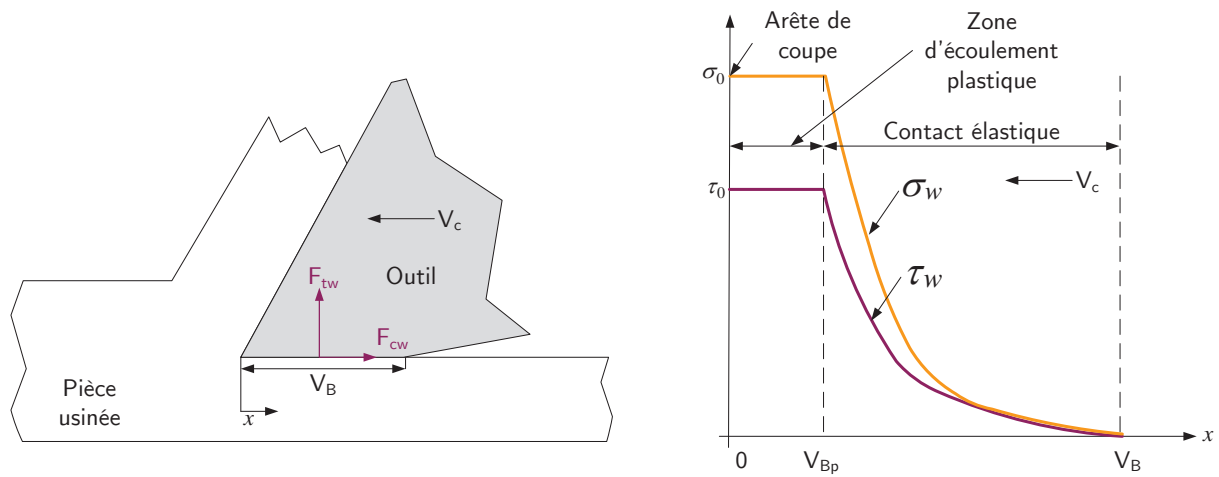


FIGURE 1.10 Modélisation des efforts de coupe générés par l'usure en dépouille, d'après [Smithey et al. 00]

Cette proposition, formulée par Smithey, est également élargie selon une approche phénoménologique par Sun [Y. Sun et al. 13] dans le cadre du fraisage de finition de l'alliage de titane Ti6Al4V à l'outil en carbure (EQ. 1.22), permettant l'introduction de la dimension inclinaison d'arête par rapport aux avancées proposées par Smithey [Smithey et al. 00].

$$F_{jw} = \int_0^{b'} C_{jw} V_B db = \frac{C_{jw} b V_B}{\cos(i)} \text{ avec } j \in \{t; f\} \quad (1.22)$$

Toutefois, il est à noter que ces modélisations visant à introduire l'usure de l'outil dans la prédiction des efforts de coupe sont, à l'heure actuelle, encore peu nombreuses en raison de la difficulté à appréhender l'usure de l'outil (phénomène parfois peu répétable, notamment dans le cas de l'usinage des alliages de titane) et ne tiennent pas toujours compte de l'évolution locale de l'épaisseur coupée, comme cela peut être le cas en fraisage et dans certains cas particulier en tournage.

En définitive, d'après ces résultats bibliographiques, les futures actions de recherche doivent contribuer à éclaircir trois verrous scientifiques :

- la détermination de l'influence de la géométrie de contact à l'interface entre la pièce usinée et l'outil coupant sur l'évolution de l'usure de l'outil ;
- la prédiction de l'usure de l'outil à l'échelle locale, c'est-à-dire en tenant compte de l'évolution des paramètres significatifs tels que l'épaisseur coupée ;
- proposer une modélisation de l'évolution de l'usure de l'outil suffisamment simple en vue d'être intégrée au sein d'une modélisation des efforts de coupe transposable vers le milieu industriel.

---

$F_{tw}$ ,  $F_{cw}$  : efforts induits par l'usure en dépouille de l'outil dans les directions normale et de la vitesse de coupe



## 1.4 Méthodologies employées pour modéliser des efforts de coupe

Dans l'optique de modéliser les composantes de l'effort de coupe plusieurs méthodologies existent. L'objectif du paragraphe suivant est de présenter les méthodologies et concepts retenus dans le cadre de cette étude en vue de prédire l'effort de coupe.

### 1.4.1 Concepts de discrétisation d'arête et du couple arête-matière

Le principe du concept de discrétisation d'arête vise à aborder un problème complexe comme un ensemble de problèmes d'un degré inférieur. Dans le cas de la détermination des efforts de coupe, ce concept permet de décomposer n'importe quelle opération d'usinage complexe en une succession de cas d'usinage simples (coupe orthogonale, coupe oblique), comme l'explique [Shaw et al. 52]. Cette méthodologie est donc fortement appréciée par sa capacité à être en partie indépendante de la géométrie d'outil et de la technique d'usinage, elle offre donc un domaine de validité théorique large et en adéquation avec la volonté de proposer une modélisation en tournage et fraisage dans le cadre de cette étude. Par conséquent, de nombreuses contributions s'appuient sur cette méthodologie en vue de prédire les efforts de coupe générés pendant l'usinage [Armarego et al. 85, Bissey 05, Kaymakci et al. 12, Campocasso et al. 15]. Ce concept, illustré à la FIGURE 1.11 dans le cas d'une opération de chariotage avec une plaquette rhombique, se décline en quatre étapes :

- définition de la section coupée ;
- calcul des épaisseurs coupées le long de l'arête en prise ;
- discrétisation de l'arête en prise à l'aide de segments rectilignes. Définition des propriétés intrinsèques à chaque segment ;
- calcul des efforts locaux sur chaque segment de l'arête discrétisée. Projection et sommation en vue de déterminer les efforts de coupe globaux.

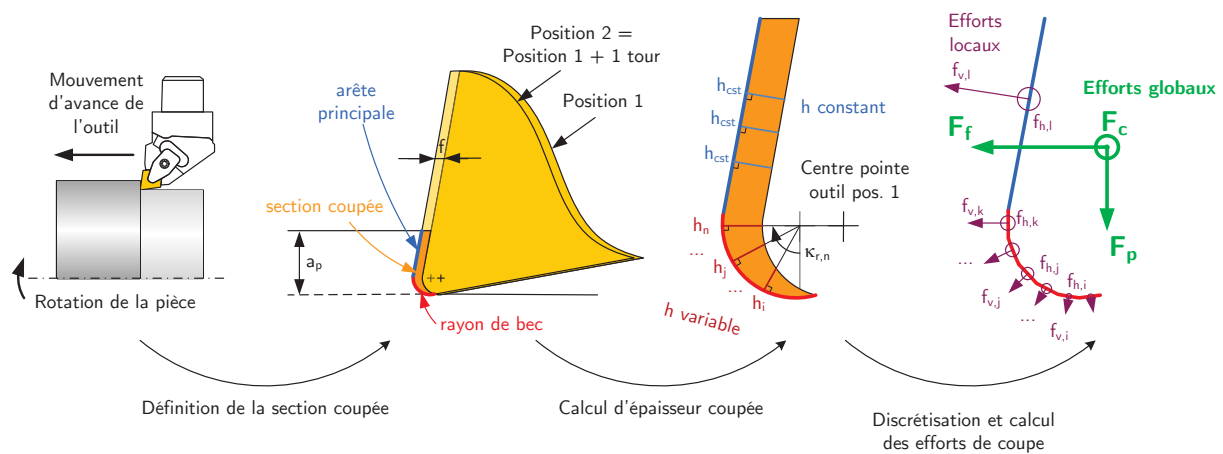
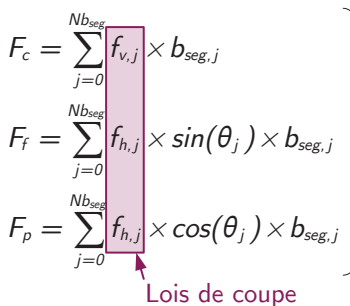


FIGURE 1.11 Détermination des efforts de coupe selon le concept de la discrétisation d'arête appliqué à une opération de chariotage avec une plaquette rhombique sans inclinaison d'arête, d'après [Campocasso et al. 13]

Les propriétés intrinsèques associées à chaque segment peuvent être de plusieurs natures : paramètres opératoires (vitesse de coupe locale, épaisseur coupée, etc.), paramètres géométriques (angle de coupe, angle de dépouille, inclinaison d'arête, rayon d'acuité d'arête), paramètres représentatifs des phénomènes physiques régissant la coupe (modèles appelés « coefficient de friction », etc.). La détermination des efforts locaux appliqués sur chaque segment se fait au moyen de *lois de coupe locales*, articulées autour de propriétés et de constantes. Comme présenté au paragraphe 1.2, ces lois de coupe locales peuvent prendre différentes formes selon le type de modélisation retenu. Dès lors les efforts de coupe locaux connus, le calcul des efforts de coupe globaux peut s'effectuer par projection et intégration des efforts de coupe locaux, comme illustré à l'EQ. 1.23, dans le cas d'une opération de tournage avec un outil sans inclinaison d'arête.

$$\left. \begin{aligned}
 F_c &= \sum_{j=0}^{Nb_{seg}} f_{v,j} \times b_{seg,j} \\
 F_f &= \sum_{j=0}^{Nb_{seg}} f_{h,j} \times \sin(\theta_j) \times b_{seg,j} \\
 F_p &= \sum_{j=0}^{Nb_{seg}} f_{h,j} \times \cos(\theta_j) \times b_{seg,j}
 \end{aligned} \right\} \text{ avec } \lambda_s = 0^\circ \quad (1.23)$$


  
Lois de coupe

Le concept du couple arête-matière intervient dans la définition des lois de coupe locales. En effet, comme le précise Bissey [Bissey 05], les termes constants d'une loi de coupe locale sont fonctions du triplet {matériau usiné ; matériau usinant ; géométrie du matériau usinant}. Dès lors, la valeur de ces coefficients identifiés est valable uniquement dans le cadre d'outils coupants appartenant à la même famille d'outils (i.e. des outils possédant une géométrie locale identique, constitués du même matériau, mais pouvant disposer d'une géométrie globale différente) et pour l'usinage d'un matériau identique à celui utilisé lors de l'identification. La définition de ces lois de coupe locales, ainsi que la valeur des coefficients utilisés, fait appel aux principes d'identifications directe et inverse.

### 1.4.2 Principes d'identifications directe et inverse

Dans l'optique de définir les lois de coupe locales, indispensables à la modélisation des efforts de coupe globaux, deux grands principes sont utilisés : les principes d'identifications directe et inverse. L'identification directe conduit à l'écriture des lois de coupe locales, tandis que l'identification inverse permet de déterminer la valeur des constantes au sein des lois de coupe locales.

L'identification directe, repose sur une philosophie proche de l'approche phénoménologique. Cette méthode consiste en l'étude de l'évolution d'une donnée de sortie à modéliser, dans le cas présent les efforts de coupe, en réponse à l'évolution d'un paramètre d'entrée (e.g. épaisseur coupée). L'objectif final est de déterminer les paramètres influents vis-à-vis de cette sortie, afin de formuler un modèle qui inclut ce(s) paramètre(s). Dans le cadre de

l'étude, cette analyse s'effectue à l'échelle locale, c'est-à-dire à l'échelle d'un segment d'une arête discrétisée, grâce à des outils coupants possédant une arête de coupe rectiligne et géométriquement en adéquation avec les plaquettes rondes cibles de l'étude. Expérimentalement, cette analyse à l'échelle locale prend la forme d'essais d'usinage simples (coupe élémentaire, coupe orthogonale, coupe oblique, etc.) et instrumentés.

L'identification inverse quant à elle, consiste en un problème d'optimisation, au sens numérique, qui a pour objectif de déterminer les coefficients/constantes d'une ou plusieurs lois de coupe locale par comparaison entre une sortie dite « modélisée » (i.e. dont les constantes/coefficients sont inconnus) et une sortie dite « mesurée » expérimentalement pour les mêmes conditions opératoires. Pour ce faire, l'objectif est de minimiser une fonction coût (le critère des moindres carrés appliqués aux efforts de coupe globaux mesurés et modélisés) par le choix de la valeur des coefficients (variables) comme illustré à la FIGURE 1.12. Ce problème peut s'avérer difficile à résoudre et nécessite des outils avancés pour la modélisation et la résolution. Le choix des outils retenus est fonction de la nature des variables et de la forme de la fonction coût.

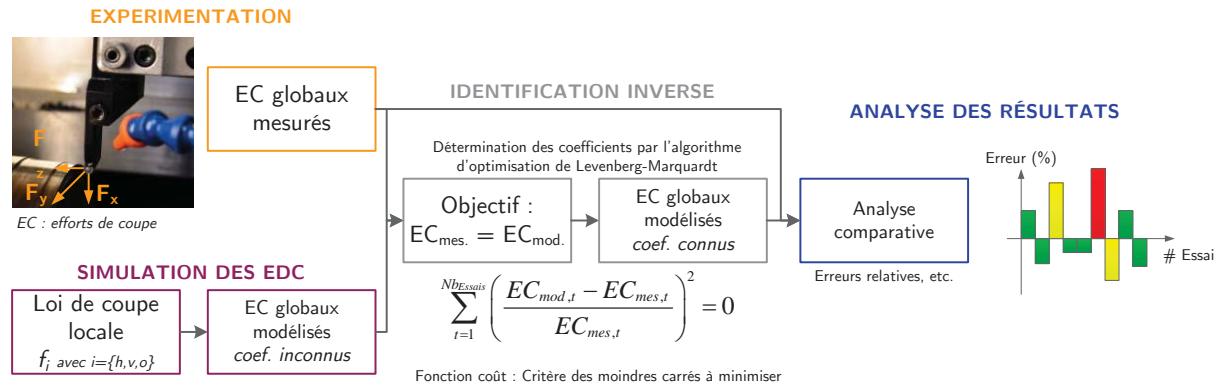


FIGURE 1.12 Principe de la méthode d'identification inverse retenue dans le cadre des travaux de recherche

Dans le cas de ces travaux de recherche, le qualificatif de méthode dite *inverse* provient du fait que ces sont des efforts de coupe à l'échelle globale qui sont comparés pour déterminer les coefficients inconnus de lois de coupe locales. Les valeurs des coefficients à déterminer sont définies dans le domaine des réels  $\mathbb{R}$  et la forme de la fonction coût est dépendante de la forme de la loi de coupe retenue (linéaire, polynomiale, exponentielle, etc.). De ce fait, parmi les méthodes génériques, seules la programmation linéaire et les méthodes méta-heuristiques (optimisation stochastiques) sont adaptées. Les principales différences entre ces deux méthodes résident dans l'unicité de la solution trouvée et dans la complexité des fonctions coût traitées. En effet, la programmation linéaire est une méthode dite *complète*, car elle permet de trouver le minimum – ou maximum – absolu de la fonction coût à optimiser. Tandis que les méthodes méta-heuristiques, dites méthodes *incomplètes*, déterminent un minimum – ou maximum – local à partir d'un point de départ (i.e. des valeurs initiales doivent être attribuées aux coefficients à déterminer avant de démarrer l'optimisation) mais s'adressent à des fonctions coût d'une complexité plus grande. À partir de ces éléments, la méthode principale qui a été retenue dans le cadre de ces travaux est l'optimisation méta-heuristique selon l'algorithme de Levenberg-

Marquardt [Levenberg 44, Marquardt 63], connu pour être bien adapté aux problèmes des minimisation du critère des moindres carrés.

### 1.4.3 Couple outil-matière

La méthodologie du couple outil-matière, comme détaillée dans la norme [NF E66 97a] pour la technique du tournage et la norme [NF E66 97b] pour la technique du fraisage, a pour objectif de définir des conditions de coupe optimales (selon plusieurs aspects : énergie spécifique de coupe, usure de l'outil, fragmentation des copeaux, etc.) pour un triplet {géométrie et matériau de l'outil coupant ; matière usinée} donné. Bissey [Bissey 05] souligne en détail les tenants et aboutissants concernant l'utilisation de cette méthodologie dans les cas du tournage et du fraisage.

Dans le cadre de cette étude, le couple outil-matière a été utilisé dans l'optique de réaliser des essais d'usinage dans des plages de fonctionnement adaptées ( $a_p$ ,  $f$ ,  $V_c$ ). Pour ce faire, les conditions de coupe fournies par l'industriel ont été confrontées à des essais de type couple outil-matière pour vérifier la validité des conditions retenues et leur influence sur la propagation de l'usure de l'outil. À partir de ces observations et confirmations, l'ensemble des essais a été réalisé pour des conditions de coupe répondant aux préconisations fournies par la méthodologie COM.

## 1.5 Conclusion

En définitive, l'état de l'art développé dans ce chapitre montre que la modélisation de la coupe est un sujet vaste qui peut être traité de nombreuses manières comme le souligne les multiples contributions sur le sujet. Le cas particulier des modélisations d'efforts de coupe semble pouvoir être classifié au moyen de plusieurs critères (l'échelle de modélisation, l'approche de modélisation, le domaine temporel de modélisation, etc.). Dans le cadre de cette étude, en accord avec les besoins précisés dans le positionnement de ces travaux de thèse, le type de modélisation retenu est une modélisation des efforts de coupe à l'échelle mésoscopique, selon une approche phénoménologique dans un domaine temporel statique (tournage) et quasi-statique (fraisage) et s'appuyant sur une résolution analytique. En effet, les aspects liés aux conditions de contact entre la face de dépouille de l'outil coupant et la surface générée sont relativement nouveaux et nécessitent, dans un premier temps, d'être convenablement identifiés et imposent donc, dans un second temps, l'utilisation d'une approche phénoménologique. À l'heure actuelle, la modélisation de ces phénomènes selon une approche mécaniste ou physique est prématurée.

Les efforts de coupe sont principalement modélisés en tenant compte de deux contributions majeures : le cisaillement primaire de la matière lors du passage de l'outil, et le cisaillement secondaire de la matière induit par l'interaction entre le copeau et la face de coupe de l'outil. Toutefois, il est démontré que dans certains cas d'usinage, les efforts générés par le cisaillement tertiaire de la matière, représentatif des interactions entre la face de dépouille de l'outil coupant et la surface générée, sont non-négligeables et parfois supérieurs à ceux induits par la formation du copeau et son interaction avec la face de coupe. Cette observation est d'autant

plus vraie pour des matériaux ductiles, en effet les phénomènes en dépouille peuvent affecter la position du point de stagnation de la matière et induire un retour élastique important après le passage de l'outil coupant, comme c'est le cas lors de l'usinage des alliages de titane.

De ce fait, la valeur ajoutée de la modélisation des efforts de coupe proposée à travers cette étude aura une visée triple. Dans un premier temps, l'objectif de ces travaux sera d'enrichir les modèles d'efforts de coupe existants en analysant l'influence de la géométrie de la pièce usinée sur les efforts de coupe. Dans un second temps, la modélisation des efforts de coupe proposée devra s'élargir à plusieurs géométries d'outil et deux techniques d'usinage ciblées dans cette étude : le tournage et le fraisage. Enfin, dans un dernier temps, la modélisation des efforts de coupe développée devra intégrer les évolutions liées à la propagation des phénomènes d'usure au cours du temps.