



HAL
open science

Mécanismes de coupe induits par le brochage d'un acier inoxydable ferrito-martensitique

Dorian Fabre

► **To cite this version:**

Dorian Fabre. Mécanismes de coupe induits par le brochage d'un acier inoxydable ferrito-martensitique: Application aux plaques entretoises de générateurs de vapeur. Génie des procédés. Ecole centrale de Lyon; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, 2016. Français. NNT: 2016LYSEE002 . tel-01494019

HAL Id: tel-01494019

<https://hal.science/tel-01494019>

Submitted on 22 Mar 2017

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

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



N° d'ordre NNT : 2016LYSEE002

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

opérée conjointement au sein de

l'École Centrale de Lyon et de

l'École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Étienne

École doctorale n° 488 Science Ingénierie Santé, spécialité Mécanique et Ingénierie

Soutenue publiquement le 21 Octobre 2016 par

Dorian FABRE

Mécanismes de coupe induits par le brochage d'un acier inoxydable ferrito-martensitique

Application aux plaques entretoises de générateurs de vapeur

Devant le jury composé de :

M. Philippe LORONG	Professeur, ENSAM (Paris)	Président
M. Pedro ARRAZOLA	Professeur, Université de Mondragon (Espagne)	Rapporteur
M. Jean-Yves HASCOET	Professeur, École Centrale de Nantes	Rapporteur
M. Cédric BONNET	Docteur, AREVA NP (Saint-Marcel)	Examinateur
M. Olivier CAHUC	Professeur, Université de Bordeaux	Examinateur
M. Joël RECH	Professeur, ENISE (Saint-Étienne)	Directeur
M. Tarek MABROUKI	Professeur, ENIT (Tunis)	Co-directeur

Spécialités doctorales :
 SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCÉDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL

Responsables :
 K. Wolski Directeur de recherche
 S. Drapier, professeur
 F. Gruy, Maître de recherche
 B. Guy, Directeur de recherche
 D. Graillet, Directeur de recherche
 O. Roustant, Maître-assistant
 O. Boissier, Professeur

EMSE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

AVRIL	Stéphane	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	PR2	Sciences et génie de l'environr	FAYOL
BENABEN	Patrick	PR1	Sciences et génie des matériat	CMP
BERNACHE-ASSOLLAN	Didier	PR0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean Pierre	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaid	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR1	Informatique	FAYOL
BORBELY	Andras	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environr	SMS
BOUCHER	Xavier	PR2	Génie Industriel	FAYOL
BRODHAG	Christian	DR	Sciences et génie de l'environr	FAYOL
BURLAT	Patrick	PR2	Génie Industriel	FAYOL
COURNIL	Michel	PR0	Génie des Procédés	DIR
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences et génie des matériat	SMS
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR1	Génie Industriel	CMP
DEBAYLE	Johan	CR	Image Vision Signal	CIS
DELAFOSSÉ	David	PR1	Sciences et génie des matériat	SMS
DESRAYAUD	Christophe	PR2	Mécanique et ingénierie	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR0	Génie Industriel	FAYOL
DRAPIER	Sylvain	PR1	Mécanique et ingénierie	SMS
FEILLET	Dominique	PR2	Génie Industriel	CMP
FOREST	Bernard	PR1	Sciences et génie des matériat	CIS
FORMISYN	Pascal	PR0	Sciences et génie de l'environr	DIR
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences et génie des matériat	SMS
GARCIA	Daniel	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
GERINGER	Jean	MA(MDC)	Sciences et génie des matériat	CIS
GIRARDOT	Jean-jacques	MR(DR2)	Informatique	FAYOL
GOEURIOT	Dominique	DR	Sciences et génie des matériat	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences et génie de l'environr	SPIN
GROSSEAU	Philippe	DR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	PR1	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	DR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HAN	Woo-Suck	CR	Mécanique et ingénierie	SMS
HERRI	Jean Michel	PR1	Génie des Procédés	SPIN
INAL	Karim	PR2	Microélectronique	CMP
KERMOUCHE	Guillaume	PR2	Mécanique et Ingénierie	SMS
KLOCKER	Helmut	DR	Sciences et génie des matériat	SMS
LAFOREST	Valérie	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environr	FAYOL
LERICHE	Rodolphe	CR	Mécanique et ingénierie	FAYOL
LI	Jean Michel		Microélectronique	CMP
MALLIARAS	Georges	PR1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	PR2	Mécanique et ingénierie	CIS
MONTHEILLET	Franck	DR	Sciences et génie des matériat	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR2	Génie des Procédés	DFG
PIJOLAT	Christophe	PR0	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean Charles	PR0	Image Vision Signal	CIS
POURCHEZ	Jérémy	CR	Génie des Procédés	CIS
ROUSTANT	Olivier	MA(MDC)		FAYOL
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences et génie des matériat	SMS
SZAFNICKI	Konrad	MR(DR2)	Sciences et génie de l'environr	CMP
TRIA	Assia		Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	MA(MDC)	Sciences et génie des matériat	SMS
VIRICELLE	Jean Paul	MR(DR2)	Génie des Procédés	SPIN
WOLSKI	Krzystof	DR	Sciences et génie des matériat	SMS
XIE	Xiaolan	PR0	Génie industriel	CIS

ENISE : Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

BERGHEAU	Jean-Michel	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
BERTRAND	Philippe	PU	Génie des procédés	ENISE
DUBUJET	Philippe	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FEULVARCH	Eric	MCF	Mécanique et Ingénierie	ENISE
FORTUNIER	Roland	PR	Sciences et Génie des matériat	ENISE
HAMDI	Hédi	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
LYONNET	Patrick	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
RECH	Joël	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
SI LARBI	Amir	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
SMUROV	Igor	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
TOSCANO	Rosario	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE
ZAHOUANI	Hassan	PU	Mécanique et Ingénierie	ENISE

PR 0 Professeur classe exceptionnelle
 PR 1 Professeur 1^{ère} classe
 PR 2 Professeur 2^{ème} classe
 PU Professeur des Universités

Ing. Ingénieur
 MCF Maître de conférences
 MR (DR2) Maître de recherche
 CR Chargé de recherche

SMS Sciences des Matériaux et des Structures
 SPIN Sciences des Processus Industriels et Naturels
 FAYOL Institut Henri Fayol
 CMP Centre de Microélectronique de Provence

Remerciements

Le travail de thèse est souvent assimilé à l'activité d'une personne isolée. J'ai maintenant la certitude qu'il n'en est rien, et tenais par conséquent à adresser mes remerciements à toutes les personnes ayant participé de quelque façon que ce soit à l'aboutissement de ce travail de thèse.

J'adresse tout d'abord mes remerciements à la société AREVA à l'initiative de ce travail de thèse, ainsi qu'à l'ensemble des personnes ayant participé au montage de ce projet.

Je souhaite aussi remercier les membres du jury et notamment à Pedro ARRAZOLA, Jean-Yves HASCOET, Olivier CAHUC et Philippe LORONG qui ont accepté d'évaluer ces travaux de thèse.

Je souhaite témoigner toute ma reconnaissance à mes encadrants, académiques et industriels pour leur confiance et leur suivi. Je pense tout d'abord à Joël RECH pour sa disponibilité, sa fiabilité et son éthique professionnelle. Je souhaite également remercier Cédric BONNET pour son implication dans ce travail de thèse ainsi que pour son soutien. Merci aussi à Tarek MABROUKI pour ses conseils toujours avisés et sa sagesse. J'ai également une pensée pour Jean-Michel CHANUSSOT, Youri BOUGEANT ainsi que Delphine BOSSU, Benoit SANCHEZ, Philippe GILLES et Valentin MAGDELAINE qui ont participé au suivi et à l'avancée de ces travaux.

De nombreuses autres personnes ont également participé à l'avancement de ces travaux. Je tiens donc à remercier le « peuple du pôle » dans son ensemble, d'abord pour leur bonne humeur et leur convivialité, mais aussi pour leur soutien technique. Je pense notamment à Patrick POLLY et Hervé SEUX sur qui j'ai toujours pu compter, même lorsque des essais un peu farfelus étaient envisagés. Je souhaite en profiter pour exprimer ma gratitude à Maryane JACQUIER (et également la remercier pour son soutien précieux au cours des Travaux Pratiques de matériaux métalliques), Florian DUMONT ou encore Julien SIJOBERT, Christophe CLAUDIN ou Florent MISSEMER.

Difficile de continuer cette liste sans remercier également les personnes avec qui des échanges formels ou informels ont orienté l'avancée de ce travail de thèse. Je pense à Cédric COURBON, Ferdinando SALVATORE, Jean-Christophe ROUX, Frédéric CABA-

NETTES, Frédéric VALIORGUES et tous ceux que je ne cite pas. J'en profite pour adresser mes sincères remerciements à Isabelle PLETTO pour son soutien logistique et moral.

J'ai une pensée également pour les personnes de l'École des mines de Saint-Étienne, et en particulier Guillaume KERMOUCHE, Max BOUDES ou encore David PIOT.

Comment clôturer ces remerciements sans évoquer mes chers camarades doctorants, actuels et passés. Je pense notamment à Axel GIOVENCO, Mathieu GIRINON, Rafał KAMIŃSKI, Yassine SAADLAOUI, Sawsen REZIG, Mayssa GUEDICHE, Najib DOUK ou encore Sylvain ZUCHIATTI, Alexis VAN ROBAEYS, Victor LACAILLE, Pierre LEQUIEN, Fabien GRANGE, Hussein AMIN-EL-SAYED, Pierre NAISSON ou Pierre FAVERJON. Ces nombreuses discussions techniques, philosophiques ou bien plus légères, ont toutes été très enrichissantes. Ces trois années de thèse ont souvent été à l'origine de remises en question. Celles-ci ont contribué à une prise de recul à l'origine d'une mise en perspective essentielle d'un point de vue professionnel et personnel.

Si je ne devais adresser qu'un remerciement, ça serait à ma famille et à mes proches. Difficile d'exprimer en quelques mots la gratitude que j'éprouve à leur égard. Leur soutien moral indéfectible, leur compréhension, leur écoute ont été la condition sinequanone à l'aboutissement de ces années d'études. Je remercie tout particulièrement du plus profond de mon cœur Sabrina, ma sœur, ma mère, mon père.

*« Plutôt que l'amour, que l'argent, que la foi, que la célébrité, que la justice...
donnez-moi la vérité »
Henry David Thoreau*

Liste des symboles

α	Angle de dépouille [°]
α_d	Coefficient de dilatation thermique [/ $^{\circ}\text{C}$]
α_{fe}	Angle de dépouille en travail [°]
α_i	Angles caractéristiques de la section de copeau [α_i]
α_{oe}	Angle de dépouille sur flanc [°]
β_0	Angle d'hélice[°]
δt	Durée [s]
$\dot{\epsilon}_0$	Vitesse de déformation de référence [s^{-1}]
$\dot{\epsilon}^e$	Vitesse de déformation élastique [s^{-1}]
$\dot{\epsilon}^{ip}$	Vitesse de déformation visco-plastique [s^{-1}]
$\dot{\epsilon}$	Vitesse de déformation [s^{-1}]
η	Coefficient de viscosité
γ	Angle de coupe [°]
γ_{fe}	Angle de coupe en travail [°]
λ	Conductivité thermique [$\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}$]
λ_S	Angle d'inclinaison d'arête [°]
μ	Coefficient de frottement
ϕ	Angle de cisaillement primaire [°]
$\phi_{chaleur}$	Flux de chaleur [W]
ρ	Masse volumique [kg/m^3]
σ	Contrainte [MPa]
σ_{seuil}	Seuil plastique [MPa]

ε^e	Déformation élastique
ε^{vp}	Déformation visco-plastique
φ_{Meule}	Angle d'inclinaison de la trajectoire de meule d'affûtage [°]
A_c	Aire de la section du copeau non broché [N]
A_{min}	Surface de la section minimale de broche [mm ²]
a_p	Largeur usinée [mm]
C_P	Capacité thermique massique ou chaleur spécifique [$\frac{J}{kg \times K}$]
D_B	Diamètre de base [mm]
D_G	Diamètre du guide avant et de la première dent d'ébauche [mm]
E	Module d'Young [GPa]
E_{plaque}	Épaisseur de la plaque entretoise [mm]
F	Effort [N]
F_c	Effort dans la direction de la coupe [N]
F_h	Effort dans la direction de la progression [N]
F_{max}	Effort de traction de broche admissible [N]
f_{propre}	Fréquence propre [Hz]
h	Progression (parfois noté RPT pour <i>Rise Per Tooth</i>) [mm]
h'	Épaisseur du copeau déformé [mm]
H_D	Hauteur de dent [mm]
i	Progression au diamètre ($2 \times h$) [mm]
I_{Gz}	Moment quadratique [mm ⁴]
k	Raideur [N/m]
k_M	Scission maximale du matériau usiné [Pa]
$k_{sécu}$	Coefficient de sécurité
$K_{c,c}$	Effort spécifique de coupe dans la direction de la coupe [N/mm ²]
$K_{c,h}$	Effort spécifique de coupe dans la direction de la progression [N/mm ²]
L'	Longueur du copeau après brochage [mm]

L_{Aar}	Longueur d'accroche arrière [mm]
L_{Aav}	Longueur d'accroche avant [mm]
L_C	Longueur de taillant de la broche [mm]
L_D	Largeur de denture [mm]
L_{Gar}	Longueur de guidage arrière [mm]
L_{Gav}	Longueur de guidage avant [mm]
L_T	Longueur totale de broche [mm]
L_U	Longueur usinée [mm]
m	Masse [kg]
M_f	Moment de flexion [Nm]
P	Pas de denture [mm]
R	Limite élastique [N/mm ²]
$R_{(//)}$	Rugosité mesurée parallèlement à la direction de la coupe
$R_{(\perp)}$	Rugosité mesurée perpendiculairement à la direction de la coupe
R_β	Rayon d'acuité d'arête [mm]
$R_{\Delta q}$	Pente quadratique moyenne
R_D	Rayon de dent de broche [mm]
R_{sk}	Paramètre d'asymétrie de rugosité (<i>skewness</i>)
Ra	Rugosité arithmétique [μm]
Rq	Rugosité moyenne quadratique [μm]
Rt	Rugosité totale [μm]
Rz	Rugosité maximale [μm]
S_C	Aire de la chambre à copeaux dans le plan direction de coupe/ direction de progression [mm ²]
S_E	Aire du copeau dans le plan direction de coupe/ direction de progression [mm ²]
T	Température [°]
T_0	Température de référence [°C]
T_f	Température de fusion [°C]

V_c	Vitesse de coupe [m/min]
X	Taux de remplissage de la chambre à copeaux
y''	Dérivée seconde de la déformée [mm ⁴]
ALE	Arbitrairement Lagrangien ou Eulérien ou <i>Arbitrary Lagrangian-Eulerian</i>
CNC	Commande numérique ou <i>Computer Numerical Control</i>
DSP	Densité Spectrale de Puissance
EA	Émissions acoustiques
HRC	Dureté Rockwell
HSS	Acier rapide ou <i>High Speed Steel</i>
HV	Dureté Vickers
ILaM	Modélisation Lagrangienne Itérative ou <i>Iterative Lagrangian Model</i>
MLQ	Lubrification par micro-pulvérisation <i>Micro-Quantity Lubrication</i>
PVD	Dépôt physique en phase vapeur ou <i>Physical Vapor Deposition</i>
SPH	Hydrodynamique des particules lisses ou <i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>
TCC	Taux de compression de copeau
VB	Usure moyenne en dépouille de l'outil [mm]
VOD	Décarburation sous vide par oxygène ou <i>Vacuum Oxygen Decarburization</i>

Table des matières

Introduction	1
1 Le procédé de brochage et ses pratiques technologiques	9
1.1 Généralités	11
1.1.1 Introduction	11
1.1.2 Domaines d'application	12
1.2 Conception et désignation d'une broche	12
1.2.1 Structure générale d'une broche	13
1.2.2 Attelage de broche	15
1.2.3 Dent élémentaire de brochage	16
1.2.4 Combinaison des dents de brochage	22
1.2.5 Matériaux de broche	27
1.3 Fabrication et réaffûtage d'une broche	29
1.3.1 Processus d'obtention d'une broche	29
1.3.2 Rectitude de broche	35
1.3.3 Réaffûtage de broche	36
1.4 Paramètres procédé	38
1.4.1 Vitesse de coupe	38
1.4.2 Lubrification	39
1.5 Machines de brochage	40
1.5.1 Brocheuses horizontales	40
1.5.2 Brocheuses verticales	41
1.5.3 Types de commandes	42
1.6 Conclusion	43
2 Études scientifiques de l'enlèvement de matière par brochage	45
2.1 Introduction	46
2.2 Dispositifs d'étude du brochage	48
2.2.1 Dispositifs expérimentaux	48

2.2.2	Modélisation du procédé de brochage	51
2.3	Qualité de la pièce brochée	54
2.3.1	Dimensions	54
2.3.2	Rugosité	56
2.3.3	Intégrité de surface - dureté et contraintes résiduelles	60
2.4	Indicateurs physiques	62
2.4.1	Évolution des efforts de coupe	62
2.4.2	Températures induites par le processus de coupe	67
2.4.3	Vibrations induites par l'interaction outil/matière	70
2.5	Qualité de l'outil broche	73
2.5.1	Formation du copeau	73
2.5.2	Optimisation de la structure de l'outil	78
2.5.3	Usure de l'outil de brochage	80
2.6	Conclusion	84
3	Étude élémentaire de la coupe en brochage	89
3.1	Introduction	90
3.1.1	Contexte : le brochage des plaques entretoises	90
3.1.2	Problématique industrielle	95
3.1.3	Banc de brochage	97
3.1.4	Démarche adoptée pour l'étude expérimentale de la coupe	100
3.2	Étude de l'état de surface sur banc de brochage	102
3.2.1	Vitesse de coupe	102
3.2.2	Outil : la progression	107
3.2.3	Outil : les angles de denture	112
3.2.4	Outil : le substrat	118
3.2.5	Lubrification	121
3.2.6	Matériau broché	130
3.2.7	Conclusion sur l'étude de l'état de surface	136
3.3	Formation du copeau	136
3.3.1	Diamètre d'enroulement	137
3.3.2	Taux de compression de copeau	143
3.3.3	Formation du copeau et efforts de coupe	146
3.3.4	Conclusion sur l'étude de la formation du copeau	152
3.4	Conclusion	152

4	Application industrielle	155
4.1	Introduction	156
4.2	Prédiction et surveillance des efforts de coupe	156
4.2.1	Structure d'une courbe d'effort de brochage	157
4.2.2	Détermination de l'évolution de l'aire de coupe A_c	160
4.2.3	Détermination de l'effort spécifique de coupe	163
4.2.4	Comparaison des efforts théoriques et expérimentaux	164
4.3	Stratégie de disposition des brise-copeaux	167
4.3.1	Présentation de la démarche	168
4.3.2	Modélisation du copeau	170
4.3.3	Centre de gravité de la section	170
4.3.4	Calcul du moment quadratique	172
4.3.5	Résultats sur broche de production	174
4.4	Conclusion	176
5	Simulation numérique	179
5.1	Introduction	180
5.2	Rigidité de la coupe en brochage de production	180
5.2.1	Rigidité d'une dent de broche	181
5.2.2	Déformation des ligaments au cours du brochage	186
5.3	Simulation de l'enroulement du copeau	190
5.3.1	Modélisation élémentaire	190
5.3.2	Simulation aux temps longs	193
5.3.3	Validation du modèle	196
5.4	Conclusion sur la simulation du brochage	200
	Conclusion	203
	A Inclinaison de meule d'affûtage	209
	B Plan d'une broche quadri-foliée.	213
	C Rigidité du banc de brochage	215
	D Analyse de l'huile Houghton Cutmax 1529 FR4	217
	E Abaque trou quadri-folié et tri-folié, dents et profil broché	219

Introduction

Les différentes études menées dans le cadre de ce doctorat ont été initiées par l'usine d'Areva Chalon/Saint-Marcel¹, spécialisée dans la fabrication d'équipements lourds de composants de centrales nucléaires.

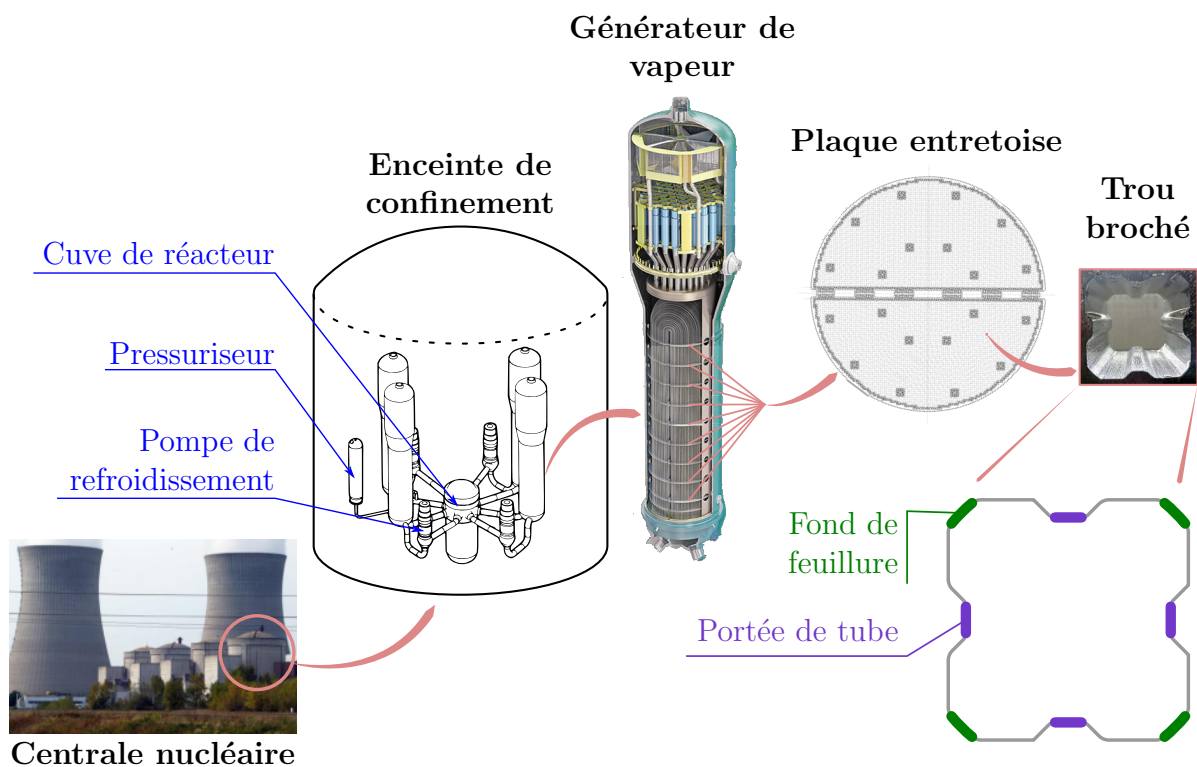


FIGURE 1 : Emplacement des plaques entretoises au sein de l'usine nucléaire

Cette usine fournit aussi bien les cuves de réacteurs que leur couvercle, ou encore les internes de cuve, de même que les générateurs de vapeur, pressuriseurs, et autres composants auxiliaires. Depuis sa création en 1975, l'usine a fourni l'essentiel des composants lourds destinés aux tranches de 900 et 1450 MWe du parc français. Par ailleurs, plus de 20% des produits issus de l'usine d'AREVA sont destinés à l'exportation, que ce soit en

1. http://cdn.streamlike.com/hosting/areva/index.php?med_id=4aa3ee19c6cf4d19&subtitlePath=http://www.areva.com/mediatheque/liblocal/docs/sous-titres/11635_FR.xml&skincolor=CC0033

Europe, Asie, Afrique du sud ou aux États-Unis. L'usine emploie plus de 1 100 personnes, sur un site de plus de 35 hectares et abritant environ 39 000 m² d'ateliers.

Les travaux présentés dans ce document traitent de la problématique du brochage des plaques entretoises. Ces plaques entretoises sont actuellement présentes au nombre de 9 au sein d'un générateur de vapeur, les réacteurs à eau pressurisée modernes étant constitués de 4 générateurs de vapeur. Leur positionnement au sein de l'usine nucléaire est présenté sur la figure 1.

La structure de ces plaques entretoises dépend du modèle de générateur de vapeur, ainsi que de la puissance qu'il est en mesure de générer. À l'heure actuelle, les plaques entretoises destinées aux tranches de 900 MWe ont un diamètre de l'ordre de 3 m et sont pourvues d'un total de 8 944 trous brochés de forme quadri-foliée. Les unités de 1450 MWe sont quant à elles pourvues de demi-plaques entretoises d'un diamètre de l'ordre de 3.3 m comportant chacune 6010 trous brochés tri-foliés, soit un total de plus de 12 000 trous brochés par plaque. L'épaisseur des plaques entretoises est de l'ordre de 30 mm.

L'opération de brochage réalisée par Areva sur ces composants a pour objectif de transformer un trou circulaire réalisé par perçage, en un trou de forme complexe, tri ou quadri-folié en fonction du modèle de centrale souhaité, comme présenté sur la figure 2.

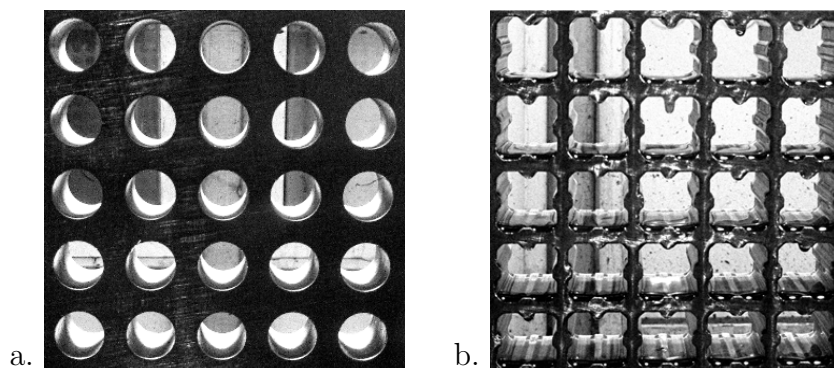


FIGURE 2 : Plaque entretoise percée, avant brochage (a.) et après brochage quadri-folié (b.)

Il s'agit ainsi de réaliser des surfaces de haute qualité dimensionnelle et d'état de surface, en un temps réduit. Ces différentes contraintes expliquent le choix de l'utilisation du procédé de brochage. Les outils ainsi mis en œuvre peuvent mesurer près de deux mètres, et possèdent un profil évolutif complexe rendant leur étude particulièrement délicate. La figure 3 présente un exemple d'outil de brochage quadri-folié.

La réalisation de cellules au profil complexe (tri ou quadri-folié) permet l'échange thermique entre le circuit primaire et secondaire, nécessaire au fonctionnement de la centrale électrique, comme schématisé sur la figure 4. Les lobes ainsi créés permettent en effet une circulation de l'eau du circuit secondaire au travers des plaques entretoises. Cette



FIGURE 3 : Exemple de vue arrière d'une broche quadri-foliée

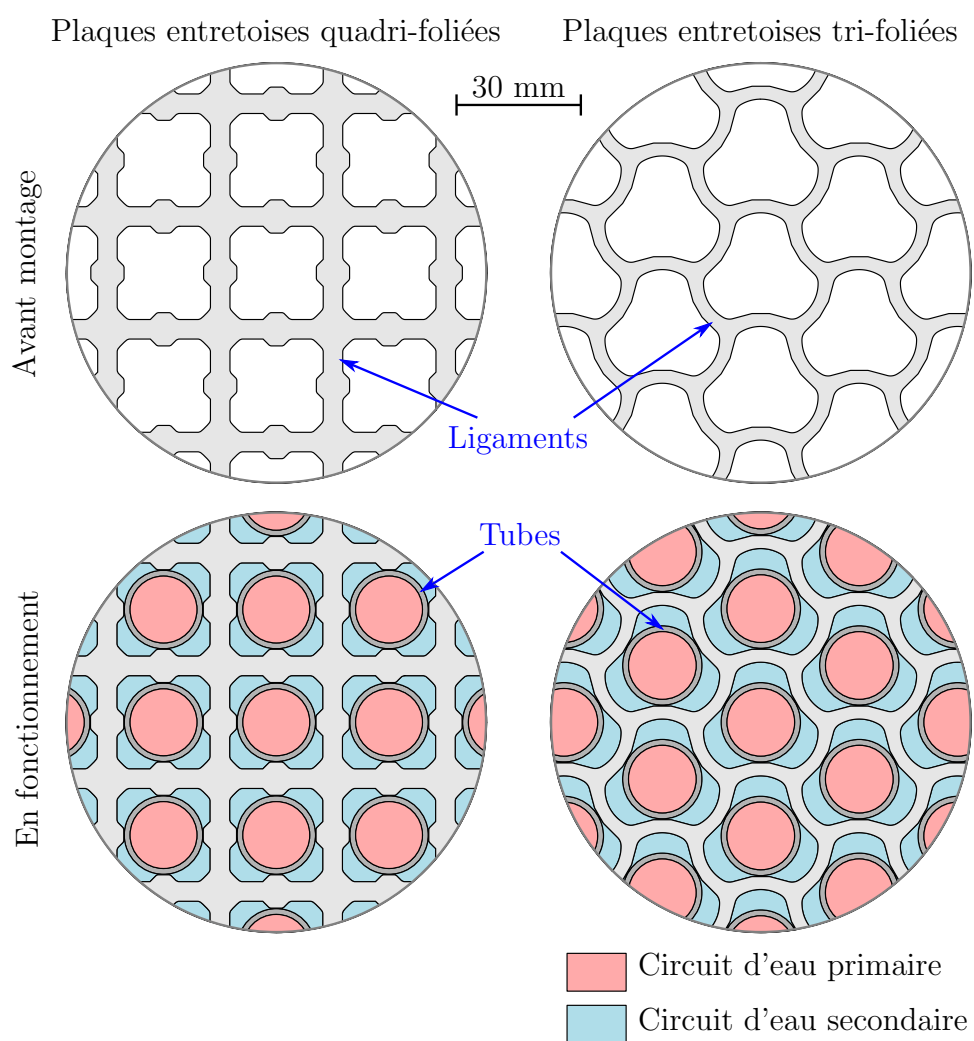


FIGURE 4 : Profils des cellules brochées

forme lobée assure à la fois le positionnement des tubes, tout en permettant la conservation d'une surface d'échange convenable entre l'eau du circuit primaire et le faisceau tubulaire.

Si l'opération de brochage s'avère idéale à la réalisation de ces profils (qualité théorique excellente et vitesse d'exécution parmi les plus réduites), elle peut être à l'origine de défauts, notamment d'état de surface (quelques exemples sont présentés sur la figure 5). Lorsque ces défauts s'avèrent trop importants (comme sur la figure 5.a.), la plaque est rebutée ce qui génère des pertes significatives associées à un retard de production. Dans certains cas de figure, la surface est reprise manuellement ce qui peut permettre d'éviter la mise en rebut, mais allonge également considérablement les temps de fabrication.

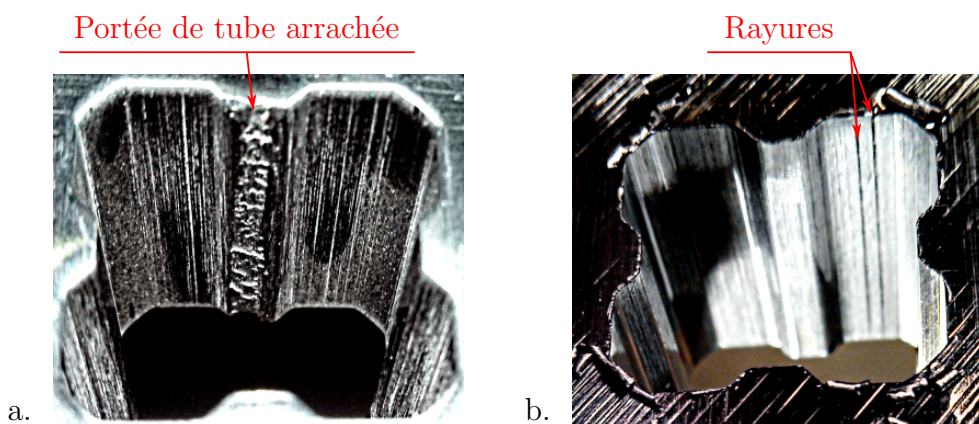


FIGURE 5 : Exemples de défauts de brochage sur portée de tube (a.) et sur feuillures (b.)

Un effort particulier a ainsi été apporté à l'amélioration de ce procédé par la société AREVA, celui-ci se traduisant par une collaboration étroite entre le laboratoire LTDS de l'ENISE, le service Développement des Procédés et Industrialisation de l'usine, le centre technique AREVA du Creusot, les méthodes, la production et les fabricants de broche. L'indicateur de qualité de premier ordre pouvant être à l'origine du rebut de plaque est l'état de surface broché. En effet, chaque trou subit un contrôle visio-tactile après brochage, ainsi qu'un contrôle dimensionnel au moyen de jauges Go/No Go. Si les critères dimensionnels étaient très bien maîtrisés, une forte variabilité d'état de surface pouvait apparaître au lancement de cette étude.

En effet, alors que certaines broches étaient en mesure de réaliser plus de 3000 trous sans défauts, certaines étaient à l'origine de défauts dès le premier trou, d'autres encore se révélaient défectueuses après quelques dizaines ou centaines de trous brochés. De plus, chaque broche est conçue afin de pouvoir subir plusieurs réaffûtages de la face de coupe. Il arrivait ainsi qu'une broche conforme lors de son premier cycle d'affûtage s'avère non conforme après réaffûtage.

Ainsi, outre l'amélioration de la qualité de surface, il s'agissait de stabiliser la qualité

des surfaces brochées, et d'améliorer la maîtrise du procédé en vue de faire plus aisément le lien entre un défaut de brochage et sa source. Cela permet de réduire le temps d'intervention séparant l'apparition d'un défaut et l'application de mesures correctives.

Pour ce faire, une première étape a consisté à réaliser un état de l'art balayant à la fois les pratiques technologiques du brochage, et les résultats issus d'études scientifiques de ce procédé. Cette étape s'est révélée essentielle dans la mesure où le savoir-faire lié à la conception, à la fabrication et au fonctionnement des broches est très majoritairement détenu par les fabricants de broches et de machines de brochage. La réalisation d'un état de l'art synthétique et étendu faisant le lien entre la vision technique de la fabrication et la vision scientifique de l'influence de cette fabrication sur les mécanismes de coupe s'est avérée fondamentale à l'initiation de ce travail. Ce dernier a pour vocation de fournir une vision générale du fonctionnement du procédé aux utilisateurs du brochage.

L'objectif du premier chapitre de ce document est ainsi de référencer et synthétiser l'essentiel de ces pratiques, afin notamment d'être en mesure de mieux appréhender les choix techniques effectués par les fabricants de broche, et les contraintes liées à ces choix. Celui-ci est complété par un état de l'art scientifique permettant d'apporter des explications physiques aux choix technologiques effectués par les concepteurs de broches. Ce second chapitre apporte également des pistes de compréhension des sources de défauts observés industriellement lors du brochage des plaques entretoises.

Si une amélioration de la compréhension du procédé de brochage de façon générale est rendue possible par l'état de l'art présenté au cours des deux premiers chapitres, le brochage des plaques entretoises chez AREVA présente néanmoins des spécificités propres. Le troisième chapitre vise ainsi à améliorer la compréhension des mécanismes de coupe observés en brochage dans les conditions spécifiques de mise en œuvre par AREVA.

Pour ce faire, l'évolution de l'état de surface en fonction d'un grand nombre de paramètres est étudiée dans un premier lieu. Puis le chapitre se poursuit par l'étude de la formation et de l'enroulement du copeau.



FIGURE 6 : Exemple de copeaux collés sur arêtes de coupe après brochage

Le lien entre enroulement de copeau et état de surface ou efficacité énergétique est ainsi mis en évidence. La problématique de l'enroulement de copeau est notamment mise

en évidence dans cette étude car le copeau de brochage se forme dans un espace confiné, et celui-ci tend à adhérer à la face de coupe après brochage (comme présenté sur la figure 6), ce qui peut avoir une influence sur le processus de coupe.

À l'issue de ces trois premiers chapitres, les mécanismes de coupe pouvant intervenir dans les conditions de mise en œuvre d'AREVA sont bien mieux maîtrisés. La compréhension accrue du procédé ainsi acquise a alors pu être mise en application sur des cas industriels de production. Le quatrième chapitre présente quelques un de ces cas d'application, liés à l'amélioration des méthodes de détection des défauts par une surveillance des efforts de coupe, ou à l'élaboration d'une nouvelle méthode de dimensionnement des brise-copeaux.

Parallèlement aux études expérimentales présentées tout au long de ces différents chapitres, des études numériques ont été menées. Celles-ci sont présentées dans le cinquième chapitre. Une étude des déformations au niveau de la zone de coupe induites par les efforts de brochage (déformation de la plaque entretoise ainsi que de la dent de broche) a été menée dans un premier temps. Ce travail numérique s'est poursuivi par le développement d'un modèle original de simulation numérique de la coupe. Celui-ci permet la représentation de la formation d'un copeau de brochage sur des temps d'usinage importants, proches de ceux mis en jeu par une dent de broche industriellement. Ce modèle vise à représenter les champs de paramètres physiques (contraintes, déformations, etc.) créés par la coupe en brochage, en vue d'affiner la compréhension élémentaire de la coupe.

État de l'art

Chapitre 1

Le procédé de brochage et ses pratiques technologiques

Sommaire

1.1	Généralités	11
1.1.1	Introduction	11
1.1.2	Domaines d'application	12
1.2	Conception et désignation d'une broche	12
1.2.1	Structure générale d'une broche	13
1.2.2	Attelage de broche	15
1.2.3	Dent élémentaire de brochage	16
a.	Forme générale d'une dent	16
b.	Les angles de brochage	16
c.	Les brise-copeaux	19
1.2.4	Combinaison des dents de brochage	22
a.	La progression	22
b.	La chambre à copeaux	23
c.	Le pas	24
d.	Stratégies de brochage	25
1.2.5	Matériaux de broche	27
1.3	Fabrication et réaffûtage d'une broche	29
1.3.1	Processus d'obtention d'une broche	29
a.	Ébauche et traitement thermique	31
b.	Réalisation des dépouilles, du profil et du revêtement	31
c.	Finition de la face de coupe	33
1.3.2	Rectitude de broche	35

1.3.3	Réaffûtage de broche	36
1.4	Paramètres procédé	38
1.4.1	Vitesse de coupe	38
1.4.2	Lubrification	39
1.5	Machines de brochage	40
1.5.1	Brocheuses horizontales	40
1.5.2	Brocheuses verticales	41
1.5.3	Types de commandes	42
a.	Brocheuses à commande hydraulique	42
b.	Brocheuses à commande électromécanique	42
1.6	Conclusion	43

1.1 Généralités

1.1.1 Introduction

Le brochage est un procédé d'usinage prenant origine dans les années 1860 aux États-Unis, initialement utilisé pour la réalisation de rainures de clavettes de poulies ou engrenages. Les premières opérations de brochage étaient réalisées manuellement, l'opérateur faisant progresser l'outil broche dans la pièce par l'application répétée de coups de marteau sur l'outil. Le terme « brochage » apparaît pour la première fois en 1873 lors du dépôt de brevet de Anson P. Stephens au sujet d'un projet d'amélioration de machine à brocher (Stephens, 1873).

C'est entre 1898 et 1902 que le canadien Francis J. Lapointe utilise pour la première fois ce procédé industriellement, au moyen d'une brocheuse horizontale par mécanisme vis/écrou dont il dépose le brevet en 1914 (Lapointe, 1914), système qu'il améliore en 1920 (Lapointe, 1920). En 1921, la société Oilgear Co. met en vente la première brocheuse à traction hydraulique.

Le brochage consiste en un usinage de surfaces intérieures et extérieures par mouvement de coupe rectiligne, auquel peut être associé un mouvement de rotation dans le cas du brochage hélicoïdal. Les mécanismes de coupe mis en œuvre au cours d'une opération de brochage sont très similaires à ceux engendrés par une opération de mortaisage à la différence près que l'outil utilisé se compose de plusieurs dents successives et étagées.

Quelques exemples de trous réalisés par brochage sont présentés sur la figure 1.1.

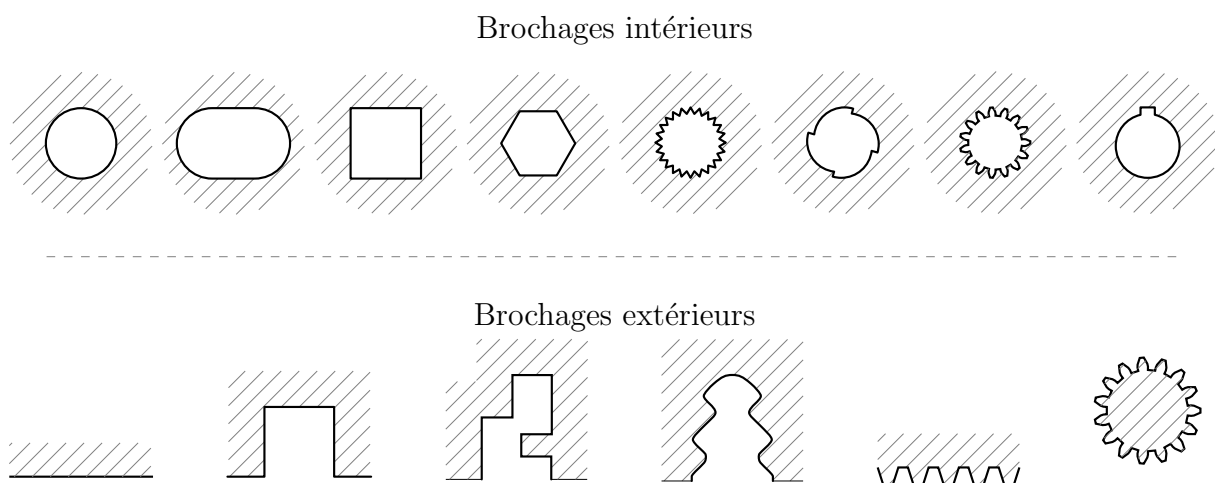


FIGURE 1.1 : Exemples de profils brochés

1.1.2 Domaines d'application

L'utilisation du brochage est généralement envisagée dans deux cas de figures. Il offre tout d'abord l'une des meilleures productivités observées en usinage, et s'adapte donc parfaitement à la production de pièces en grandes voire moyennes séries. Il est généralement plus rentable que des opérations d'alésage ou de fraisage, et affiche des temps d'exécution de 3 à 4 fois inférieurs à ceux engendrés par ces procédés ([Cubberly et Bakerjian, 1989](#); [Masseglia, 2009](#)).

S'il permet un débit copeau très élevé, il permet par ailleurs de générer des surfaces d'une grande précision, avec des qualités dimensionnelles ISO variant de 7 à 9, et des rugosités arithmétiques s'étendant sur une plage de 3.2 à 0.4 μm . La génération de ces surfaces étant réalisée en une seule passe, chaque broche comporte à la fois des dents dédiées à l'ébauche, la semi-finition et la finition.

La cinématique de coupe est généralement triviale (mouvement de translation), le brochage nécessite donc l'utilisation de machines de conception assez simple (machines à cycles) dont la mise en fonctionnement est généralement simple. Ce procédé induit en revanche des efforts de coupe conséquents étant donné une aire de coupe importante et le travail simultané de plusieurs sections de coupe. Par ailleurs, les vitesses de coupe sont généralement très basses en brochage (la plupart du temps inférieures à 6 m/min), c'est pourquoi des machines à actionneurs hydrauliques sont généralement privilégiées.

1.2 Conception et désignation d'une broche

L'un des éléments clés de la qualité d'une opération de brochage réside dans le soin apporté à la réalisation de la broche. En effet, dans la plupart des opérations d'usinage le nombre d'arêtes de coupe est limité (moins d'une dizaine dans le cas du fraisage), et leur géométrie est très simple et aisément caractérisable. Le brochage en revanche met en œuvre des outils possédant une multitude de sections de coupe (jusqu'à 200) composées d'arêtes dont la géométrie est généralement aussi complexe que variable. Ces spécificités compliquent considérablement la conception, la fabrication et le contrôle de ces outils.

Il existe une très importante diversité de broches qui diffèrent aussi bien par leur application, leur géométrie, leur composition métallurgique ou encore leur revêtement. Il est courant de distinguer le brochage intérieur et le brochage extérieur dont les mises en œuvre et applications sont très différentes. Le brochage intérieur a principalement pour vocation la réalisation de trous divers, du simple trou circulaire jusqu'à la cannelure en passant par la rainure de clavette. Le brochage extérieur est quant à lui beaucoup utilisé dans des applications automobiles ou aéronautiques, pour la fabrication de crémaillères

ou d'ancrages de pieds de pales de turbines. Dans le cadre de notre étude, une attention particulière est portée aux problématiques liées au brochage intérieur.

1.2.1 Structure générale d'une broche

La réalisation d'une opération de brochage intérieur peut impliquer un outil tiré ou poussé. Ce dernier mode d'action est utilisé marginalement au niveau industriel, généralement sur des presses à brocher. La longueur de brochage d'une broche poussée est limitée au vu des risques de flambage inhérents au mode d'application de l'effort (figure 1.2). Un rapport maximal de 25 entre la longueur de la broche et son diamètre doit être respecté afin de limiter ce risque. Ces broches sont principalement utilisées pour des opérations ne nécessitant qu'un faible enlèvement de matière ou un très bon état de surface, telles que les étapes de calibrage.

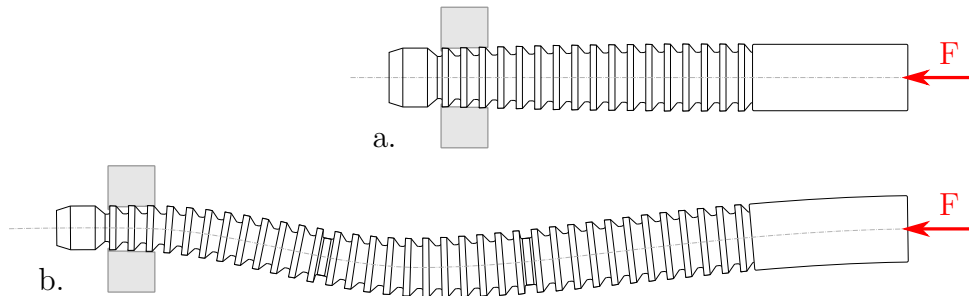


FIGURE 1.2 : Schématisation d'une broche poussée conforme (a.) et d'une broche poussée trop longue subissant du flambage (b.)

Les broches tirées peuvent quant à elles mesurer jusqu'à plusieurs mètres, et sont essentiellement limitées par la surface de la section minimale de la broche A_{min} , et donc le diamètre de base pour une broche circulaire. C'est en effet à ce niveau que la rupture interviendra de manière privilégiée. La norme DIN 1417 propose une normalisation de l'effort de traction maximal admissible sur les broches en fonction du diamètre nominal et de la longueur de celles-ci. Le [Manuel Forst](#) propose quant à lui un calcul de résistance mécanique en traction de cette broche, présenté par l'équation 1.1. Il s'agit de limiter l'effort de traction maximal F_{max} afin de ne pas dépasser la limite élastique R .

$$F_{max} < \frac{R \times A_{min}}{k_{sécu}} \quad (1.1)$$

avec $1.2 \leq k_{sécu} \leq 1.4$ et $R = 250 \text{ N/mm}^2$ pour un outil en acier rapide

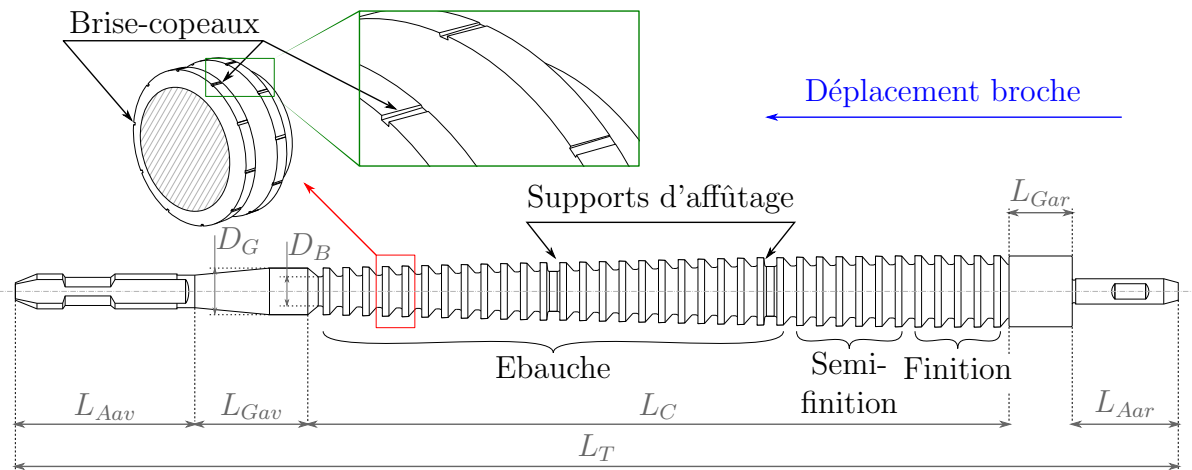


FIGURE 1.3 : Schématisation de la géométrie d'une broche d'intérieur tirée

La figure 1.3 présente la structure typique d'une broche. Afin de mieux appréhender la fonction de chaque élément de cet outil, il est intéressant de se pencher sur le déroulement d'un cycle de brochage, en s'appuyant sur le schéma de la figure 1.4.

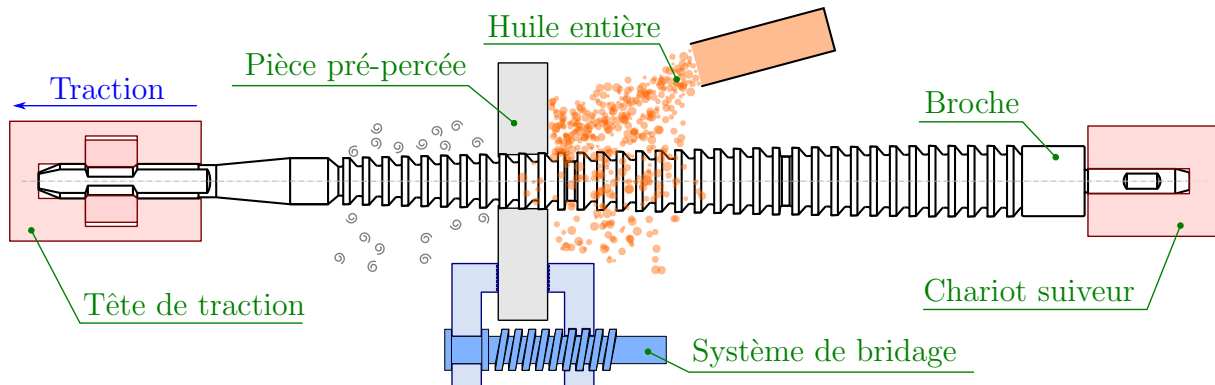


FIGURE 1.4 : Schématisation d'une broche tirée en fonctionnement

Tout d'abord, la pièce à brocher doit être percée, et positionnée sur un support reprenant l'effort de coupe de la broche. La pièce peut également être maintenue par un système d'étau améliorant la rigidité du montage. Au départ du cycle, la broche est uniquement maintenue par la queue par l'intermédiaire d'un chariot suiveur qui fait dans un premier temps passer la tête d'attelage dans le trou de perçage.

Une fois passée, la tête de traction saisit la broche par la tête d'attelage, la broche se centre alors dans le trou grâce au guide avant, et l'enlèvement de matière commence. Le chariot reste solidaire à la queue de broche le temps de l'opération, afin d'éviter le phénomène de fouettement caractérisé par une oscillation de la queue de broche. Ce phénomène est notamment responsable d'une usure prématurée des arêtes de coupe, de

défauts dimensionnels voire de rupture de la broche par flexion dans les cas les plus sévères. Ce chariot peut également assurer une mise en tension de la broche, assurant une meilleure rigidité dans certaines applications.

En fin d'opération, les dernières dents sont stabilisées par le guide arrière, et la broche termine sa course maintenue uniquement par l'attelage avant. La pièce brochée est alors retirée et le chariot suiveur saisit de nouveau la broche pour la ramener en position initiale.

1.2.2 Attelage de broche

Il existe quatre types génériques de systèmes d'attelage de broche, dont l'utilisation dépend de la dimension de la broche ou du niveau d'automatisation de l'opération. Les systèmes les plus courants (Bellais, 1997; Bertin, 1975) sont présentés sur la figure 1.5. On distingue ainsi les attelages :

- **à gorge** : système le plus répandu, la broche se bloque automatiquement dans la tête de traction. Celles-ci peuvent comporter un méplat permettant leur indexation, comme représenté sur la figure 1.5;
- **à cran** : également très répandu, leur utilisation est analogue aux attelages à gorges;
- **à goupille ou clavette** : utilisé pour des broches de petites dimensions ($D_B < 12$ mm), pour des broches respectivement cylindriques et non cylindriques;
- **à lumière** : pour des broches dont le diamètre n'excède pas 63 mm.

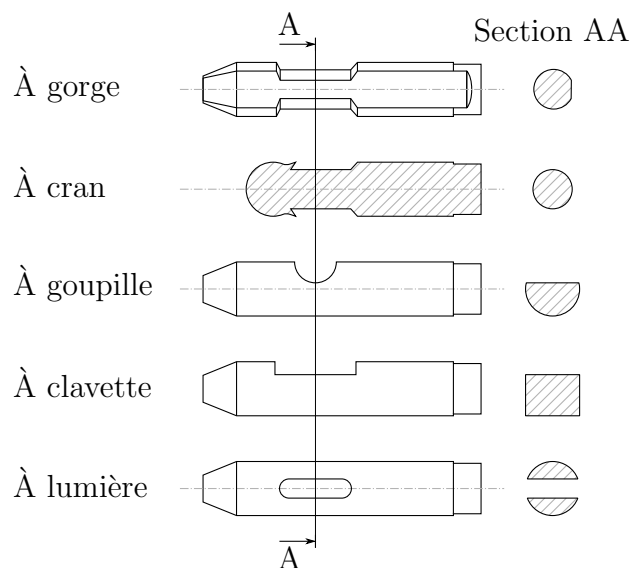


FIGURE 1.5 : Systèmes d'attelage de broches

L'attelage d'une broche peut être monobloc, ou réalisé au moyen d'un embout rapporté

et vissé. Cette dernière solution permet de réaliser des broches plus courtes, et d'utiliser un acier moins onéreux pour l'attelage que pour la partie active de la broche. Cette solution était principalement envisagée pour la réalisation d'attelages non-indexés. Cependant, l'ajustement broche/attelage est moins précis que celui permis par les systèmes monoblocs. De plus le surcoût lié à l'utilisation d'acier rapide pour l'attelage est devenu moindre ce qui explique l'utilisation presque exclusive des systèmes monoblocs.

La qualité de fabrication de l'attelage de broche aura une influence sur le fonctionnement de l'outil et la qualité générée (précision angulaire, etc.). Pourtant, la zone la plus sensible reste naturellement la partie active de la broche, et notamment les différentes sections de coupe. La maîtrise de la conception, de la fabrication et du contrôle de cette zone influencera directement la qualité finale du brochage généré. Plusieurs échelles doivent être considérées afin de saisir la complexité de cette zone, l'échelle macroscopique avec l'arrangement des sections de coupe successives, et l'échelle mésoscopique avec par exemple l'observation d'une dent de brochage. Le procédé de fabrication même de la broche est également un facteur de premier ordre influençant la qualité de l'outil final.

1.2.3 Dent élémentaire de brochage

Les conditions opératoires couramment employées en brochage se situent en dehors de celles utilisées dans la plupart des procédés d'usinage. On rencontre ainsi généralement des vitesses de coupe très faibles ($V_c \leq 8$ m/min (Degarmo *et al.*, 1988)), de même que la génération de copeaux la plupart du temps très fins ($h \leq 0.1$ mm (Bellais, 1997)). Cela explique l'utilisation de géométries de dentures très spécifiques, avec notamment des angles de coupe importants ($\gamma \geq 15^\circ$) (Bellais, 1997) ou des acuités d'arêtes très fines ($5 \leq R_\beta \leq 15$ μm (Makarov, 2008)).

a. Forme générale d'une dent

Considérons dans un premier temps une section de quelques dents de brochage. La figure 1.6 présente la structure d'une broche plate élémentaire (pouvant par exemple être destinée à la réalisation de rainures de clavettes).

b. Les angles de brochage

Comme il l'a été évoqué précédemment, l'angle de coupe γ utilisé en brochage est généralement très positif (de l'ordre de 20°), la valeur d'angle de dépouille α est en revanche très limitée, de l'ordre de 1 à 2° . Ceci s'explique principalement par la combinaison d'une faible épaisseur de copeaux et de l'utilisation d'acier rapide pour la fabrication de

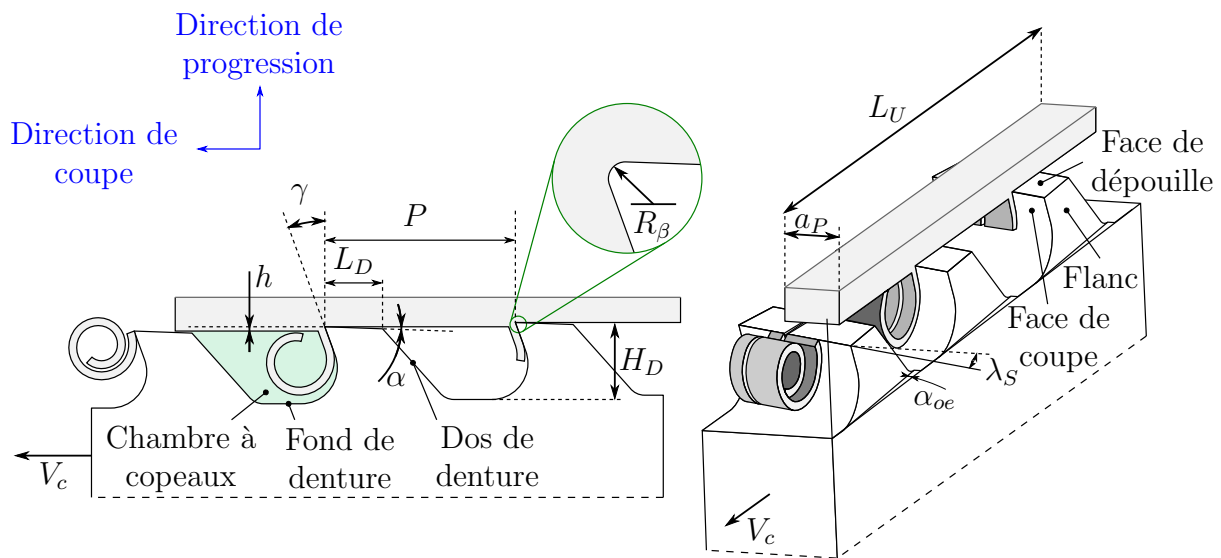


FIGURE 1.6 : Schématisation de la géométrie d'une broche plate élémentaire en action

la plupart des broches. Cette sous-section présente les différents angles caractéristiques d'une broche, et les valeurs couramment utilisées en brochage.

Angles de coupe γ et de dépouille α

Plusieurs documents traitent du choix des angles de coupe, en fonction principalement du type d'opération et du matériau à brocher. La réalisation de tels abaques s'appuie essentiellement sur le retour d'expérience lié à l'utilisation des outils, et sur l'observation qui en résulte (forme du copeau, état de surface, éventuellement effort de coupe).

Tableau 1.1 : Aide au choix des angles de coupe et de dépouille en brochage (Manuel Forst, Bellais (1997))

Matière	Limite élastique	Angle de coupe γ [°]	Angle de dépouille α [°]
Aciers	$R \leq 400$ MPa	18-25	2-4
	$400 < R \leq 700$ MPa	15-22	2-3
	$700 < R \leq 1200$ MPa	15-20	2-3
Fontes		8-12	2
Alliages d'aluminium		12-25	1-4

Le tableau 1.1 propose une synthèse des valeurs proposées dans différents ouvrages. Précisons par ailleurs que ceux-ci stipulent généralement que ces valeurs doivent être considérées comme une « ligne directrice » dans la conception initiale d'une broche (Ma-

nuel Forst, Bellais (1997)); un affinement de ces valeurs en fonction des conditions réelles de brochage pourra être réalisé.

Les angles de coupe et de dépouille sont largement maîtrisés et aisément modifiables en brochage. L'angle de dépouille sur flanc α_{oe} est quant à lui plus délicat à générer, et offre moins de libertés lors de sa réalisation.

Angle de dépouille sur flanc α_{oe}

Qu'il s'agisse de broches plates ou circulaires, il arrive que l'utilisation d'une dépouille sur flanc soit nécessaire pour éviter le blocage de la broche dans le trou, issu d'un talonnement de l'outil (cf. figure 1.6). En effet, la pression potentiellement excessive dans cette zone entraîne l'apparition de phénomènes de micro-soudures sur le flanc des dents. Les méthodes courantes d'obtention de ces dépouilles sur flanc d'outils sont présentées plus en détail ultérieurement dans la section 1.3.b.

Notons que les flancs des dents jouent également le rôle de stabilisateur et favorisent le guidage de la broche en situation de travail lorsque ceux-ci sont en appui sur la matière brochée. Ainsi, un angle de dépouille sur flanc faible tendra à augmenter la zone de contact dépouille/matière ce qui rendra l'opération de coupe plus rigide et stable.

Angle d'inclinaison d'arête λ_S et broches hélicoïdales

Deux morphologies de broches peuvent être distinguées. Les premières présentées sur la figure 1.7.a. sont des broches hélicoïdales, principalement utilisées pour la réalisation de cannelures hélicoïdales intérieures. Une rotation de la broche est combinée au déplacement linéaire habituel afin de générer ce profil hélicoïdal caractéristique. Les secondes présentées sur la figure 1.7.b sont conçues avec des dents possédant un angle d'inclinaison d'arête λ_S permettant une entrée dans la matière plus progressive et l'application d'un effort de coupe moins saccadé que pour des broches droites standard. Ces broches suivent une trajectoire rectiligne simple.

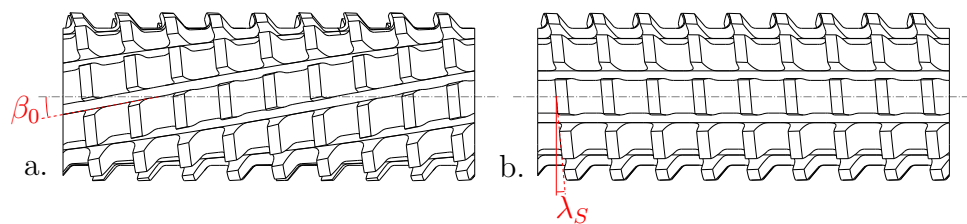


FIGURE 1.7 : Broche hélicoïdale (a.) et broche droite (b.) avec angle d'inclinaison d'arête

À noter que l'utilisation d'un angle λ_S est à l'origine d'une composante tangentielle dans les efforts de coupe, responsable de l'apparition d'une contrainte de torsion dans l'outil en cours de brochage. Cela peut provoquer une déviation dimensionnelle du profil final, ou une dégradation des dents de coupe ou de l'outil si cet angle est trop important.

c. Les brise-copeaux

En usinage, le brise-copeaux désigne généralement une cavité générée sur la face de coupe d'un outil (fraise, outil de tour, etc.) visant à favoriser la fragmentation du copeau en exerçant sur celui-ci une contrainte excessive. Le brise-copeaux de brochage est différent, il désigne une encoche réalisée au niveau de l'arête de coupe et permettant de sectionner un copeau trop large en plusieurs petits copeaux de largeur moindre. Cette largeur est généralement limitée à 5 mm. L'objectif est de faciliter sa formation et son évacuation. En d'autres termes, le brise-copeaux de tournage permet de réduire la longueur du copeau, alors qu'en brochage il permet de réduire sa largeur.

Trois solutions sont couramment utilisées pour des considérations techniques et économiques, les brise-copeaux plats, en encoches, et en V. Ces différentes solutions sont présentées sur la figure 1.8, la zone en vert représente l'aire de coupe de la dent considérée.

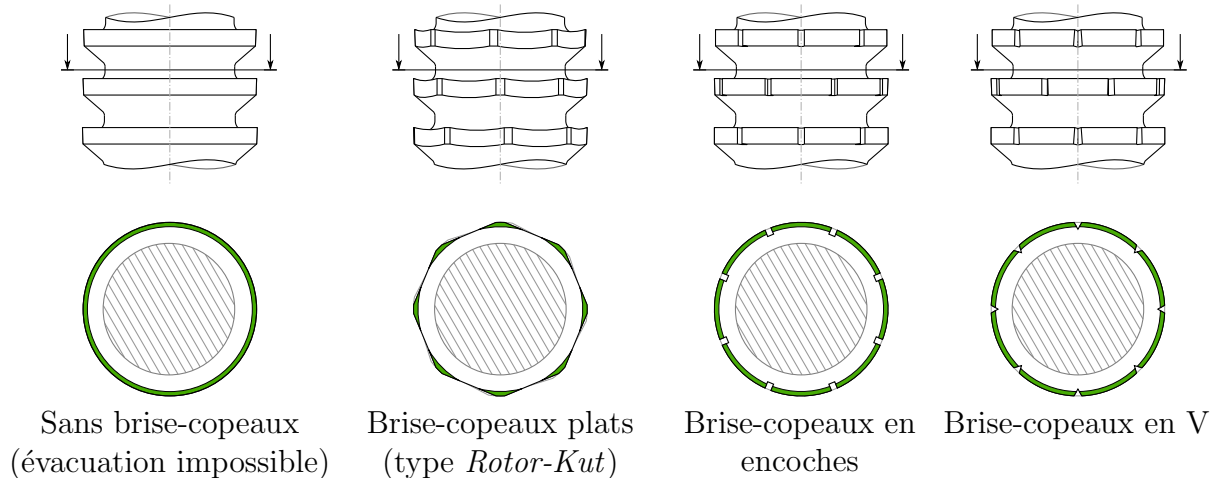


FIGURE 1.8 : Formes des brise-copeaux usuels, et sections de broches associées

Les brise-copeaux plats sont réalisés au moyen de meules plates ou de meules boisseaux. Un angle de dépouille peut leur être appliqué. L'angle de pointe situé sur le bec de la dent est très obtus permettant une transition progressive entre les chargements sur les arêtes de coupe principales et secondaires, limitant donc les contraintes sur le bec (l'effet de l'angle de bec sur la concentration de contrainte est schématisé sur la figure 1.10). Ils présentent cependant le défaut d'être très favorables à l'apparition de copeaux mini

pouvant engendrer des défauts d'état de surface. Cette technique est notamment utilisée pour la réalisation de broches *Rotor-Kut*, présentées plus en détail dans la suite de ce document.

Les brise-copeaux en encoches sont les plus répandus. Aucune dépouille sur flanc ne peut être réalisée (cf. figure 1.9.a), l'entaille étant réalisée par une meule cylindrique. L'angle de pointe est très aigu, favorisant l'apparition de concentrations de contraintes et la dégradation du bec (cf. figure 1.10.a.). Ils présentent toutefois l'avantage d'être rapides à réaliser et peu onéreux, puisqu'ils ne nécessitent pas l'utilisation de meules de forme.

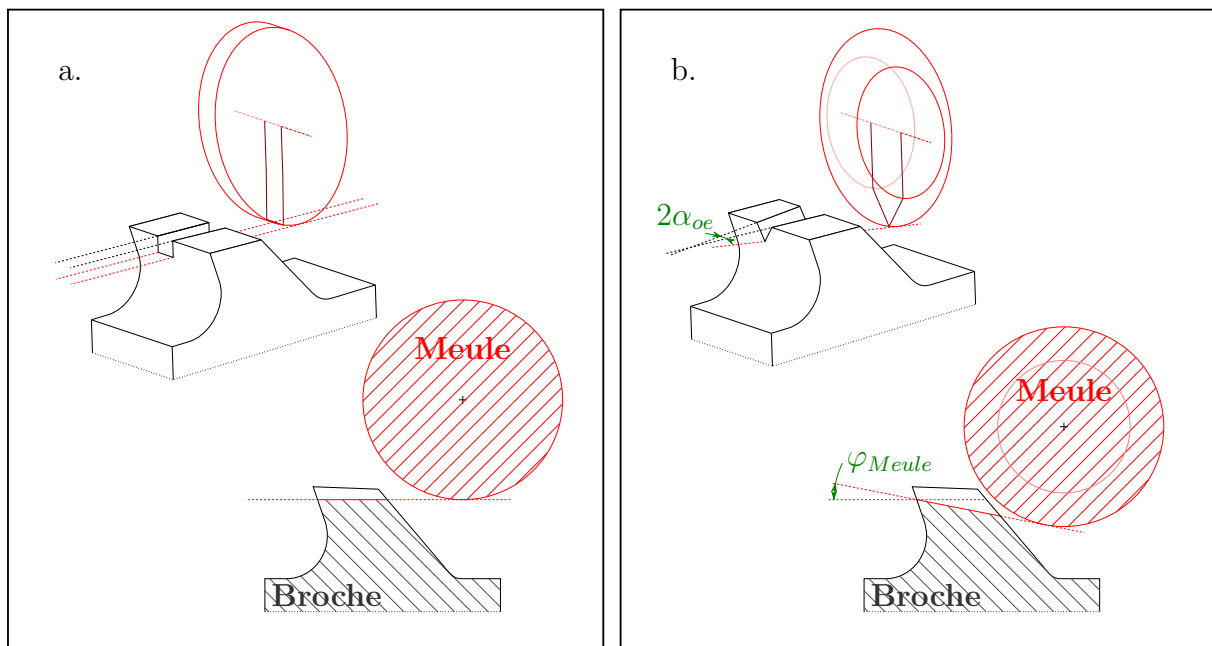


FIGURE 1.9 : Influence d'un brise-copeaux à encoche (a.) et en V (b.) sur l'angle de dépouille sur flanc

Les brise-copeaux en V présentent des caractéristiques intermédiaires. Ils sont usinés par une meule de forme, et permettent également de générer un angle de dépouille sur le flanc du brise-copeau, selon le principe schématisé sur la figure 1.9.b. Les brise-copeaux en V permettent la réalisation d'angles de pointe moins vifs que ceux obtenus avec les copeaux en encoches, limitant les phénomènes de concentration de contraintes sur le bec (cf. figure 1.10.b.).

Si les brise-copeaux sont essentiels au déroulement du brochage, il convient toutefois d'en limiter le nombre. En effet, le rayon de bec est une zone propice à l'apparition de concentration de contraintes pouvant détériorer l'intégrité du bec. Or, un bec abîmé peut être à l'origine d'une dégradation de l'état de surface du trou généré. De plus, lorsqu'un brise-copeaux est positionné sur une arête, la surépaisseur non brochée devra être reprise par la dent suivante. Ceci entraîne une progression double localement, comme présenté

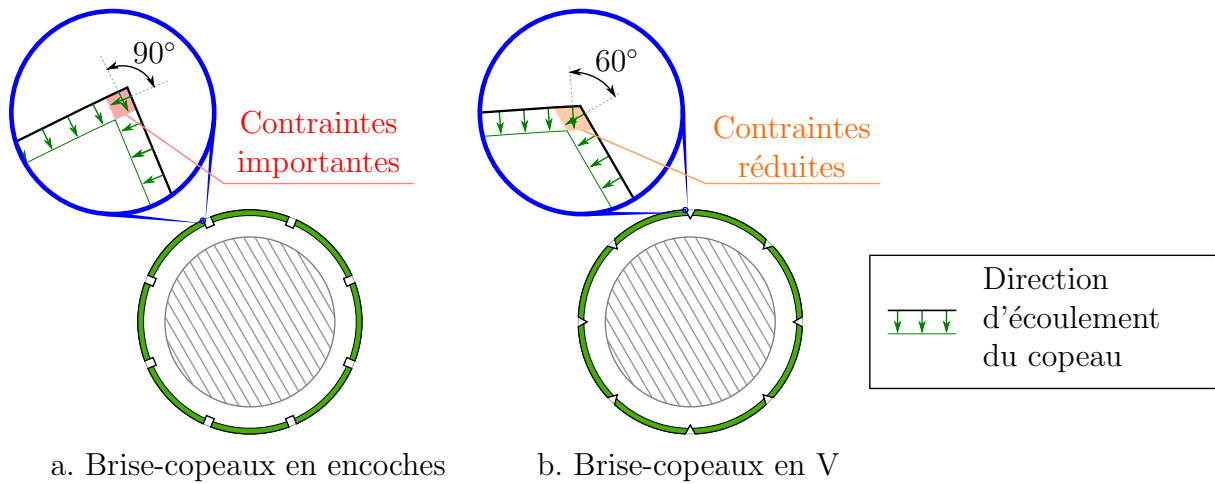


FIGURE 1.10 : Schématisation de la forte concentration de contrainte observée au niveau du bec pour un brise-copeaux à encoche (a.), et concentration réduite pour un brise-copeaux en V (b.)

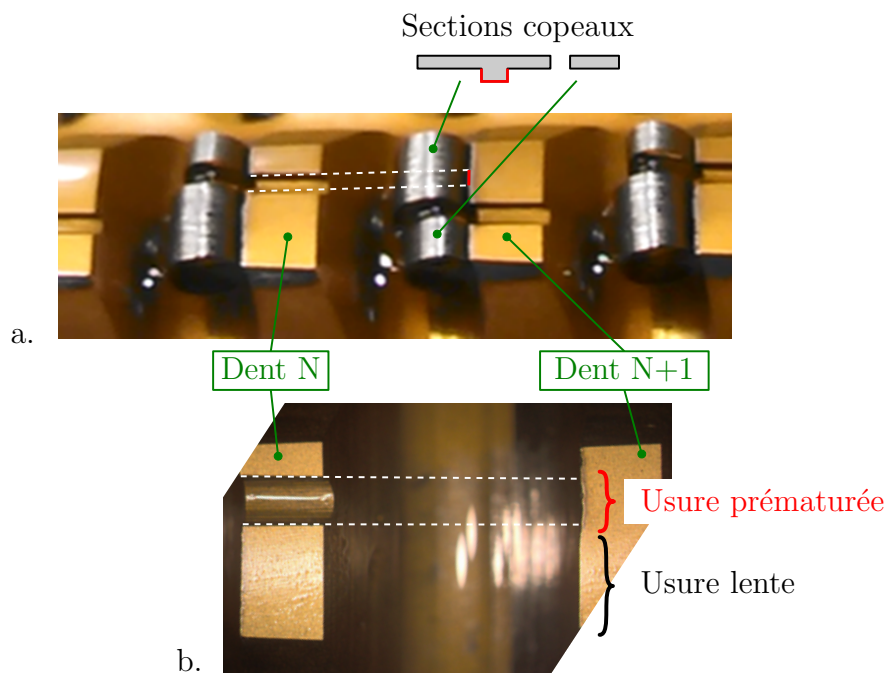


FIGURE 1.11 : Schématisation de la nervure issue du brise-copeaux précédent (a.) et influence sur l'usure d'outil en dépouille (b.)

sur la figure 1.11.

1.2.4 Combinaison des dents de brochage

Jusqu'à présent, la géométrie et les spécificités d'une dent de brochage ont été étudiées de manière isolée. Or si le bon déroulement de la coupe à l'échelle mésoscopique dépend essentiellement de la qualité de conception et de fabrication d'une dent, l'interaction efficace de ces différentes dents est garante de la qualité du trou broché, ainsi que de la durée de vie de l'outil.

Le fonctionnement caractéristique du procédé de brochage réside dans l'utilisation d'un nombre conséquent de dents, réalisant chacune un seul copeau par opération. Cela est rendu possible par la géométrie variable de la section de coupe, se caractérisant essentiellement par la progression des dents successives dans le matériau broché.

a. La progression

La progression h (schématisée précédemment sur la figure 1.6) peut être assimilée à l'avance rencontrée dans un procédé de tournage. Elle désigne en effet l'épaisseur du copeau avant coupe. La littérature donne des valeurs de progression indicatives, classées la plupart du temps par matériau de broche, par type de brochage, et par opération. Le tableau 1.2 présente les progressions usuellement employées avec une broche en acier rapide (Manuel Forst, Bellais (1997)).

Tableau 1.2 : Progressions de brochage h [μm] (Manuel Forst, Bellais (1997))

Matériau	Brochage intérieur cylindrique		Brochage intérieur de cannelures		Brochage extérieur	
	ébauche	finition	ébauche	finition	ébauche	finition
acier	15-25	4-10	30-80	4-15	30-120	5-25
fontes	15-20	4-8	30-70	4-8	30-120	5-12
métaux non ferreux	20-30	10-15	30-80	10-15	50-160	10-20

De façon générale, les fabricants de broches tendent à minimiser la progression lorsque le matériau broché produit des copeaux peu enroulés, lorsque ce dernier possède une haute limite élastique ou encore lorsque la coupe s'effectue à haute vitesse.

b. La chambre à copeaux

À la différence de procédés tels que le tournage ou le fraisage, le brochage a la spécificité de générer un copeau encapsulé au sein de la chambre à copeaux.

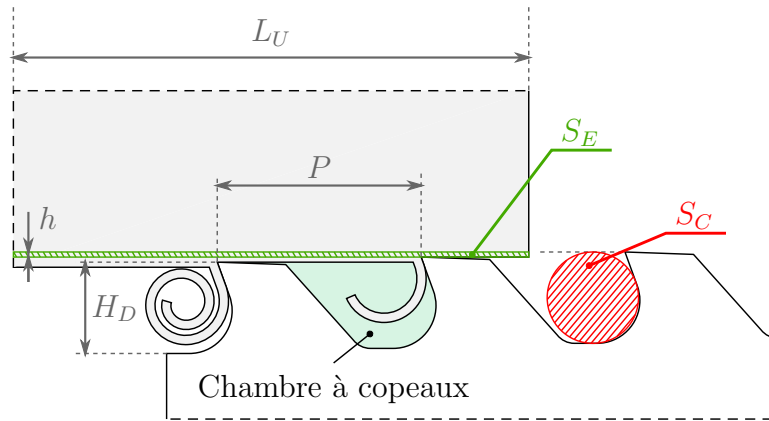


FIGURE 1.12 : Paramétrage lié au dimensionnement de la chambre à copeaux

Le dimensionnement de cette chambre à copeaux doit permettre la formation et l'évacuation des copeaux. En effet, une chambre à copeaux trop petite peut être à l'origine d'un blocage du copeau, alors qu'une chambre à copeaux trop grande fragilise inutilement la broche et nécessite un enlèvement de matière sur la broche et donc un temps de fabrication plus important. Notons tout d'abord que la norme NF E66-620 propose une standardisation du pas P , hauteur de denture H_D , largeur de denture L_D et rayon de fond de denture R_C (cf. figure 1.6) en lien avec la dimension minimale de chambre à copeaux à respecter. Une standardisation similaire se retrouve dans la norme allemande DIN 1416. D'autres méthodes de dimensionnement de cette chambre à copeaux sont très répandues industriellement, s'appuyant notamment sur la notion de taux de remplissage de la chambre à copeaux noté X .

Ce dernier est un indicateur utilisé pour estimer l'espace nécessaire à la formation du copeau. Il correspond à un simple rapport géométrique entre le volume disponible dans la chambre et le volume du copeau généré par une dent comme présenté par l'équation 1.2. Ce rapport de volume est simplifié en un rapport entre les surfaces S_C et S_E présentées sur la figure 1.12.

$$X = \frac{S_C}{S_E} = \frac{\pi \cdot \frac{H_D^2}{4}}{h \cdot L_U} \quad (1.2)$$

Il s'agit ainsi de vérifier que ce taux de remplissage est supérieur à une référence déterminée de manière empirique en fonction du type d'opération et du type de broche (Bellais, 1997). Ces valeurs sont présentées sur le tableau 1.3. Les principaux paramètres

intervenant dans cet ajustement sont ainsi la hauteur de dent H_D voire la progression h afin que ce taux de remplissage corresponde aux valeurs préconisées.

Tableau 1.3 : Taux de remplissage X préconisés (Bellais, 1997)

Type de brochage	Type de broche	Progression h (1) (mm)	Métaux à copeaux courts (fontes, bronzes, laitons)	Métaux à copeaux longs	
				Aciers $R \leq 800$ MPa	Aciers $800 < R \leq 1070$ MPa
INTÉRIEUR	Clavettes	$\leq 0,05$	3,2	4 (2)	4
	Cannelures droites	$\leq 0,05$	6,3	10 (4)	12
		$0,05 < h \leq 0,15$	5	8	10
		$0,15 < h \leq 0,25$	4	6,3	8
	Cannelures développantes	$\leq 0,05$	3,2	4	5
		$0,05 < h \leq 0,15$	2,5	3,2	4
		$0,15 < h \leq 0,25$	2,5	3,2	4
	Rondes	$\leq 0,025$	8	10 (8)	12,5 (10)
$0,025 < h \leq 0,05$		6,3	8	10	
Rotor-Kut ou ébauche profonde	$0,15 < h \leq 0,40$	2	2,5	(1,6)	
EXTÉRIEUR	À surfacer droite (copeaux se dégageant mal) $\lambda = 0$	$0,012 < h \leq 0,075$	5	6,3	8
		$0,075 < h \leq 0,25$	4	5	6,3
	À surfacer inclinée $\lambda > 0$ Progression frontale	Le rapport donné pour $\lambda = 0$ est à réduire $\lambda > 0$. À titre d'exemple, si $\lambda = 15^\circ$, le coefficient peut être de 0,8 à 0,5 suivant le dégagement			
À progression latérale	Le rapport peut descendre au-dessous de 1.				
Les valeurs () correspondent à des cas particuliers donnant satisfaction (1) sur rayon pour broche intérieure.					

c. Le pas

Une fois la hauteur de dent et la progression ainsi fixées, le pas P entre les dents de brochage successives peut-être déterminé.

Pour calculer le pas, l'équation 1.3 a longtemps été appliquée, parfois affinée par l'utilisation de l'équation 1.4 pour de courtes longueurs de brochage.

$$L_U > 16 \Rightarrow P = 1,75\sqrt{L_U} \quad (1.3)$$

$$L_U \leq 16 \Rightarrow P = 0,4 \cdot L_U \quad (1.4)$$

À l'heure actuelle la formulation la plus courante permettant de déterminer le pas est celle décrite par l'équation 1.5. Notons que le pas ainsi calculé correspond à 3.25 fois le côté d'un carré issu de la quadrature de la surface S_C , soit environ 3 fois la hauteur H_D .

$$P = 3,25\sqrt{\pi \cdot \frac{H_D^2}{4}} = 3,25\sqrt{h \cdot L_U \cdot X} \quad (\approx 3 \cdot H_D) \quad (1.5)$$

Le choix du pas de denture adéquat doit également prendre en considération des critères de stabilité de coupe. En effet, cette stabilité est très dépendante du nombre

de dents en prise. Ainsi plus le pas sera réduit, plus le nombre de dents en prise sera important et plus la coupe sera stable.

De plus, la plupart des broches à dentures droites travaillent par à-coups provoqués par l'entrée/sortie de dents. Augmenter le nombre de dents en prise augmentera les efforts de coupe, mais diminuera la variation d'effort issue de l'entrée ou de la sortie d'une dent. Prenons l'exemple d'une broche possédant une seule dent en prise, celle-ci étant à l'origine d'un effort de coupe de 5 000 N. L'entrée d'une dent supplémentaire augmentera l'effort de 5 000 N soit +100% d'effort. En revanche, si 4 dents sont déjà en prise, l'effort de coupe atteindra déjà 20 000 N, une dent supplémentaire n'augmentera donc l'effort total que de 5 000 N soit une variation de 25%.

d. Stratégies de brochage

Deux stratégies de progression des dents dans la matière sont couramment utilisées industriellement, le travail d'enveloppe et le travail de forme schématisés sur la figure 1.13. Dans le premier cas, seul le rayon de raccordement entre l'arête principale et secondaire de la dent de broche génère la surface finale. La qualité de cette dernière est alors très dépendante de l'alignement de la broche et de la rigidité du montage.

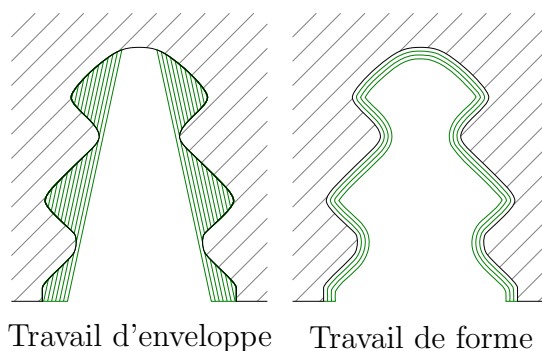


FIGURE 1.13 : Méthodes de génération de surfaces par brochage

Le travail de forme permet quant à lui d'obtenir un meilleur guidage de la broche par un équilibrage adéquat des efforts et une stabilité accrue de la broche dans son logement. La réalisation de ces broches est cependant plus technique et est soumise à des coûts de fabrication plus importants que ceux engendrés par la réalisation de broches travaillant en enveloppe.

Comme il l'a été évoqué, une broche se compose de dents pouvant assurer des fonctions différentes. De façon générale, les premières dents rencontrées par la matière à brocher sont destinées à une opération d'ébauche. Elles possèdent des progressions importantes, et des brise-copeaux afin de permettre un débit copeau maximal.

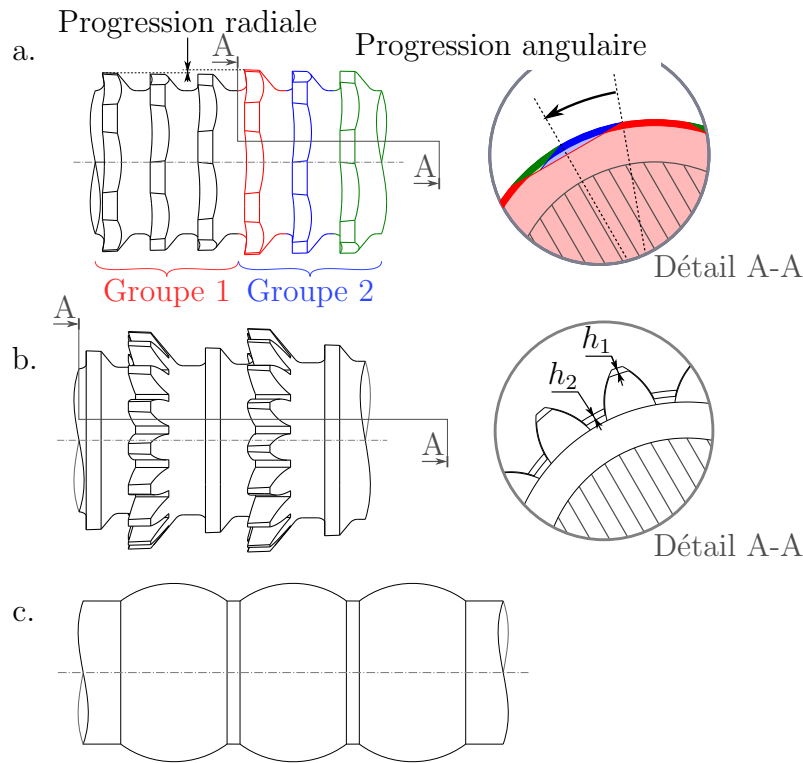


FIGURE 1.14 : Présentation des structures *Rotor-Kut* (a.), à denture alternée (b.) et d'une broche munie d'olives de brunissage (c.)

Pour remplacer les dents d'ébauche, ou en amont de celles-ci, il peut être intéressant d'utiliser des dentures *Rotor-Kut* (parfois désignées sous les termes *jump-cut* ou broche à coupe rotative), qui associent une progression angulaire à la progression radiale conventionnelle. Cette structure est présentée sur la figure 1.14.a.

Cette stratégie est généralement appliquée à des opérations d'écroûtage d'un pré-trou brut de fonderie ou d'estampage, et met en œuvre des progressions radiales très importantes. Une denture ainsi produite se compose de plusieurs groupes de dents de même diamètre, la progression radiale n'ayant lieu que lors du passage d'un groupe à l'autre. Des méplats sont réalisés sur les dents d'un même groupe avec un décalage angulaire constant permettant de parcourir l'ensemble du profil souhaité. On retrouve une stratégie similaire appliquée aux broches plates (broches à coupe double), mais cette fois la progression tangentielle est permise par la réalisation d'un brise-copeaux de moins en moins large.

Les dents d'ébauche sont suivies de dents de semi-finition et finition. Ces dernières ne possèdent généralement pas de brise-copeaux, et ont une progression pouvant être très faible (de l'ordre du micron). Généralement plusieurs dents de mêmes dimensions sont positionnées après la finition, pouvant à la fois constituer une réserve pour le réaffûtage des broches, et assurer une fonction de calibrage de la surface finale.

La denture alternée est une autre stratégie de brochage permettant la réalisation de cannelures. Celle-ci consiste en l'alternance entre les dents réalisant la denture et celles réalisant le fond de l'alésage. Cela permet notamment de s'assurer de la concentricité entre les diamètres de tête, primitif et de pieds de la denture, en améliorant le guidage de la broche. Ce type de broche est présenté sur la figure 1.14.b.

Si l'état de surface obtenu après le passage des dents de finition, et de calibrage n'est toujours pas satisfaisant, une forme spécifique peut être réalisée après les dernières dents. Cette zone de brunissage mécanique présentée sur la figure 1.14.c permet de lisser les aspérités de la surface par une déformation plastique superficielle issue du glissement relatif de l'outil sur la surface brochée. Cela provoque par ailleurs un écrouissage de la surface, augmentant ainsi sa dureté superficielle. Pour une précision géométrique optimale, il arrive également qu'une progression négative de quelques microns soit appliquée en fin de broche, permettant de compenser les déformations de la matière provoquées par l'effort de pénétration des dents de brochage d'après des observations empiriques.

1.2.5 Matériaux de broche

Dans la plupart des cas, le brochage est réalisé au moyen d'outils monoblocs en acier rapide (HSS pour *High Speed Steel*). Si de très nombreuses formulations d'acier rapide étaient utilisées au début de l'utilisation industrielle du brochage, un effort de standardisation a été effectué menant finalement à l'utilisation d'une quantité limitée d'aciers rapides particulièrement qualifiés pour la mise en œuvre de ce procédé. Notons également l'utilisation marginale d'aciers fortement alliés et fortement chargés en chrome dans certains cas d'applications spécifiques. L'utilisation d'outils carbure peut par ailleurs présenter certains avantages, notamment en termes de diminution d'usure en dépouille secondaire VB (selon les critères décrits dans la norme NF ISO 3685), bien que la fragilité accrue de ces outils ne limite leur utilisation dans le domaine du brochage.

Les aciers rapides sont des aciers fortement alliés contenant toujours environ 4% de chrome, plus de 0.7% de carbone, du tungstène, du molybdène, du vanadium et du cobalt. Même si certains de ces aciers sont connus depuis 1868 (aciers Muschet), leur amélioration a été rendue possible par Taylor et White en 1900 au travers de la découverte d'un traitement thermique spécial. Celui-ci consiste en une chauffe lente jusqu'à 850 °C, puis rapide jusqu'à 1250 °C environ (proche de la température de fusion) suivi d'une trempe. Par la suite un ou plusieurs revenus sont réalisés, on distingue notamment la réalisation du revenu dit de *durcissement secondaire* à des températures comprises entre 600 et 675 °C, et permettant la précipitation du carbone sous la forme de carbures de chrome (Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$) de molybdène (Mo_2C) ou de vanadium (V_4C_3) (Murry, 2016). La présence de ces carbures inclus au sein d'une structure martensitique enrichie en chrome influence

considérablement la dureté et la résistance de ces matériaux (Debongnie, 2006).

Grâce à ces traitements, les aciers rapides conservent une dureté de 60 à 70 HRC jusqu'à une température d'environ 600 °C, tout en conservant une résistance à la flexion remarquable (de l'ordre de 3600 MPa), ce qui en fait des matériaux très adaptés à la réalisation d'outils longs comme les broches.

La désignation normalisée des aciers rapides (basée sur la norme allemande, le S est omis en France) se présente comme suit. Lorsque le cobalt n'entre pas dans la composition du matériau, seulement 3 lettres suivent la lettre S.



Le standard américain défini par l'AISI possède une méthode de classification différente. Les aciers rapides possédant du tungstène ou du molybdène comme l'un des éléments d'alliage principal sont désignés respectivement par les lettres T et M. Cette lettre est suivie d'un nombre faisant référence au classement de l'AISI. Les aciers M sont reconnus pour leur meilleure résistance à l'abrasion que les séries T, et sont moins sujets aux distorsions au cours des traitements thermiques. Ils sont par ailleurs généralement moins chers que les aciers des séries T (Debongnie, 2006). En revanche, la dureté à chaud des aciers de type T est plus importante que celle des aciers de type M (Bayer *et al.*, 1989). Le taux de cobalt peut également avoir une influence sur la durée de vie des outils. Le Manuel Forst précise que de meilleurs résultats (état de surface et durée de vie) ont été observés lors de l'utilisation d'aciers rapides contenant du cobalt en brochage.

Outre la composition, les méthodes d'obtention et de mise en forme influencent également les propriétés du matériau. Si la plupart des aciers rapides sont obtenus par une fusion conventionnelle, le frittage a permis d'améliorer considérablement les caractéristiques du matériau. Ceci permet notamment l'obtention d'un acier d'une extrême pureté, près de 90 % des inclusions non-métalliques peuvent être éliminées et les inclusions restantes sont de très petite taille ce qui réduit les risques d'écaillage. Le frittage permet également de réduire la taille de grain et d'assurer une excellente homogénéité du matériau. En revanche, la résistance à la flexion de ces aciers est inférieure à celle observée sur les aciers rapides standards. La norme ISO 4957 classe ainsi les aciers rapides en 4 catégories référencées dans le tableau 1.4.

La société Erasteel qui est l'un des principaux producteurs d'aciers rapides et l'un des précurseurs de la fabrication d'aciers rapides frittés désigne ces aciers fabriqués par métallurgie des poudres par ASP®.

Dans certaines applications, un traitement de nitruration peut être appliqué sur les broches en acier rapide. Si celui-ci peut aisément être source d'une fragilité critique de l'arête de coupe, une adaptation de ce traitement aux outils de brochage peut être à

Tableau 1.4 : Classification des aciers rapides selon la norme ISO 4957

	Acier rapide contenant moins de 4.5 % de cobalt et moins de 2.6 % de vanadium	Acier rapide contenant au moins 4.5 % de cobalt ou au moins 2.6 % de vanadium
Aciers rapides conventionnels	HSS	HSS-E
Aciers rapides issus de la métallurgie des poudres	HSS-PM	HSS-E-PM

l'origine d'une réduction du coefficient de frottement entre l'outil et un matériau propice à l'adhésion ([Manuel Forst](#)).

Généralement, le revêtement d'outil est privilégié face au traitement de nitruration, car plus aisé à mettre en œuvre et également mieux maîtrisable dans les conditions particulières du brochage (arêtes de coupe très aiguës, etc.). En brochage, les revêtements les plus couramment rencontrés sont les revêtements TiN, TiAlN voire TiCN généralement de 1 à 5 μm d'épaisseur. Un réaffûtage de la face de coupe est généralement réalisé après revêtement afin de limiter le rayon d'acuité d'arête, comme présenté sur la figure 1.15.

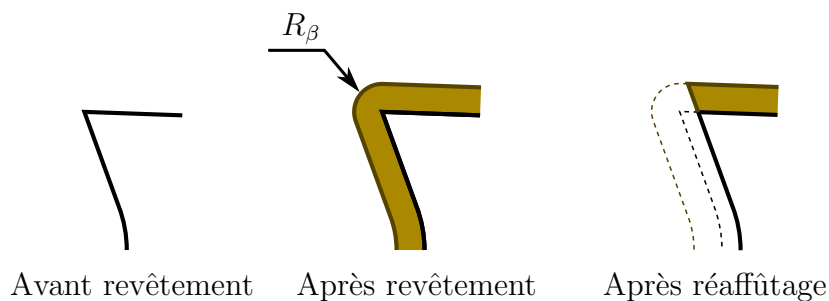


FIGURE 1.15 : Influence du revêtement sur le rayon d'acuité d'arête R_β , schématisation d'une section de dent de broche

1.3 Fabrication et réaffûtage d'une broche

1.3.1 Processus d'obtention d'une broche

Une broche d'intérieur est réalisée en plusieurs étapes faisant intervenir des compétences en métallurgie, usinage ou encore dans le domaine des revêtements PVD (*Physical Vapor Deposition*).

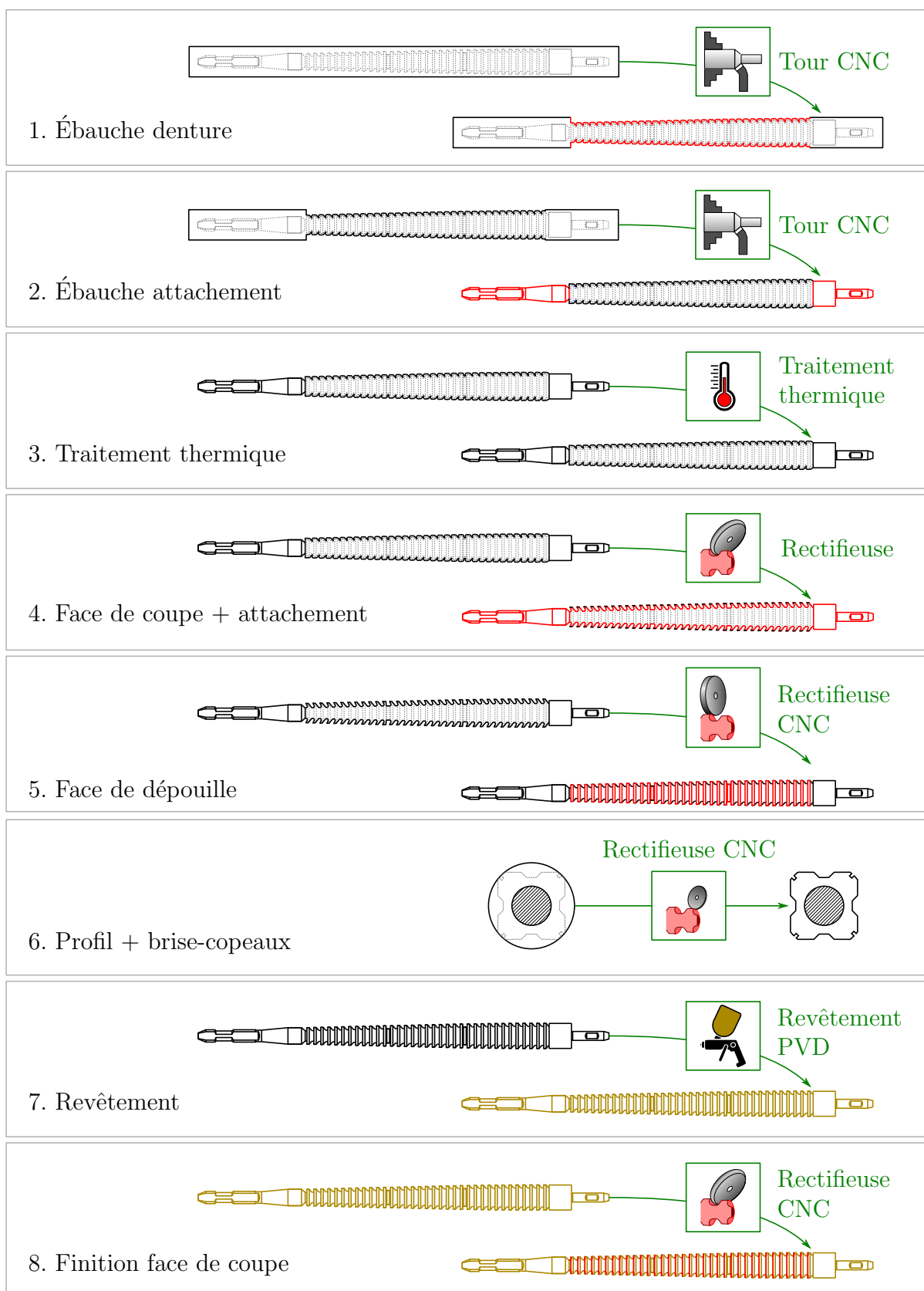


FIGURE 1.16 : Étapes de fabrication d'une broche circulaire d'intérieur

La figure 1.16 illustre les différentes étapes nécessaires à la fabrication de ces broches. Dans un premier temps, le barreau d'acier rapide est mis en forme avant d'être approvisionné au fabricant de broche.

a. Ébauche et traitement thermique

L'étape 1 consiste en une ébauche sur tour CNC des dents de broche. À ce stade, l'attachement de la broche n'est pas réalisé.

C'est seulement à partir de l'étape 2 que l'attachement est usiné, de nouveau au moyen de tours à commande numérique. Cette étape a lieu avant traitement thermique pour faciliter l'opération, l'acier rapide ne possédant alors pas ses propriétés mécaniques finales.

Au cours de l'étape 3 sont réalisés les traitements thermiques de l'ébauche de l'outil broche. Cette étape est souvent sous-traitée, ce qui participe à l'augmentation des délais de fabrication.

À ce stade, le tour est remplacé par la rectifieuse en vue de la réalisation de l'étape 4. Dans un premier temps, l'attachement ainsi que les guides avant et arrière de la broche sont repris en finition au moyen d'une rectifieuse conventionnelle. Une rectifieuse CNC est ensuite utilisée pour la réalisation de la chambre à copeaux et de chacune des faces de coupe, celles-ci devront être reprises en rectification après revêtement.

b. Réalisation des dépouilles, du profil et du revêtement

La fabrication se poursuit avec l'étape 5 mettant de nouveau en œuvre une rectifieuse CNC pour la réalisation de la dépouille principale des dents de brochage. Après cette étape, la broche est en mesure de brocher un trou circulaire.

Afin de donner un profil particulier au trou que réalisera la broche, la forme de chacune des dents est modifiée par rectification à commande numérique ; il s'agit de l'étape 6. Pour assurer le fonctionnement de la broche ainsi réalisée, une dépouille sur flanc doit également être générée au cours de cette opération. En effet, réaliser le profil directement par balayage d'une meule de forme le long de l'axe de la broche engendrerait l'apparition d'une dépouille nulle sur les flancs, pouvant résulter en un blocage de l'outil dans le trou en cours de brochage. Afin d'éviter cela, la stratégie généralement retenue consiste en l'ajout d'un angle d'inclinaison à la trajectoire de la meule φ_{Meule} . Celle-ci ne se déplacera alors plus dans l'axe de la broche, mais plongera vers le centre de la broche alors qu'elle avancera en direction de l'arrière de celle-ci.

Cette stratégie de meulage est présentée de manière schématique sur la figure 1.17.b. De cette opération résulte un angle de dépouille sur flanc noté α_{oe} , généralement très faible (inférieur à 1°). Notons que le profil initial de la dent se trouve également modifié,

engendrant théoriquement l'apparition de créneaux sur la surface brochée. Cependant, les dimensions des créneaux ainsi créés sont négligeables devant la rugosité obtenue en brochage, l'influence de ce crénelage sur la pièce finale n'est pas détectable.

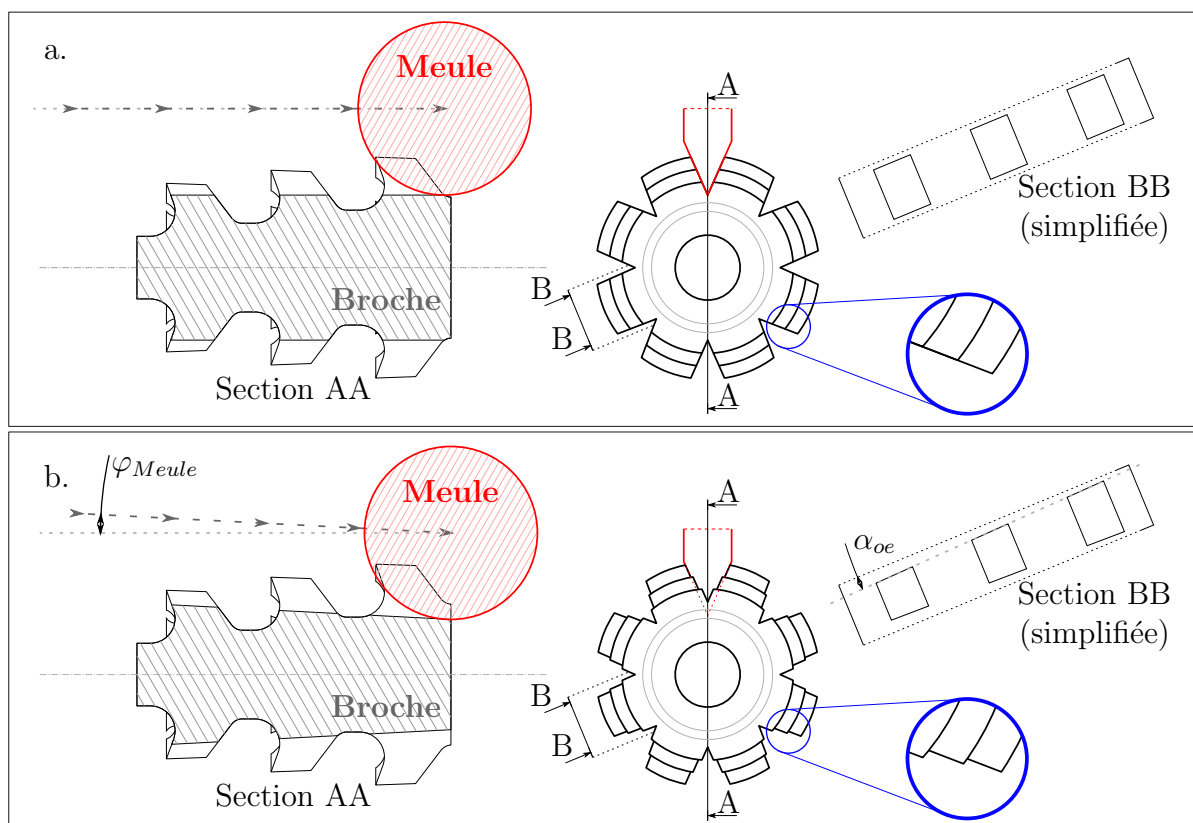


FIGURE 1.17 : Meulage (a) sans inclinaison de la trajectoire de meule (sans dépouille sur flanc) et (b) avec inclinaison de l'axe de meule (avec dépouille sur flanc α_{oe})

La réalisation de la broche se poursuit par la génération de brise-copeaux. La méthode de positionnement des brise-copeaux couramment employée consiste en la limitation de la largeur du copeau à environ 5 mm.

Avant l'étape 7 de revêtement de la broche, il arrive qu'un coupon témoin soit demandé par le client. Il s'agit alors de brocher un échantillon de matière pré-percé, avant contrôle du respect dimensionnel et d'état de surface du trou généré. Un exemple de coupon ainsi obtenu après brochage est présenté sur la figure 1.18. Cette pratique est maintenant essentiellement proscrite avant revêtement à cause des risques de collage de matière sur l'outil. En effet, le revêtement de ces éventuels dépôts est critique, l'arête de coupe serait ébréchée au premier essai de brochage entraînant un rebut immédiat de l'outil.

Cependant, le brochage de ce coupon témoin est parfois vu comme une opération d'ébavurage avant revêtement. Si certaines bavures peuvent effectivement être ainsi



FIGURE 1.18 : Exemple de coupon broché

éliminées, l'intégrité de l'arête de coupe peut en être affectée. Certains fabricants privilégient un brossage à la brosse métallique avant réaffûtage. Si à l'heure actuelle aucune préparation d'arête n'est réalisée sur les dents de brochage, la maîtrise de l'acuité d'arête est néanmoins primordiale afin d'obtenir une formation de copeau stable, sans refus de coupe ou labourage.

Les outils de brochage sont fréquemment revêtus. Cependant, l'affûtage a pour effet d'éliminer le revêtement sur la face de coupe. Les outils de brochage ont ainsi la particularité d'être très souvent revêtus uniquement en face de dépouille. Au premier abord ce choix est surprenant, une grande partie du contact et donc du frottement outil/matière ayant lieu sur la face de coupe. Cependant, cela se justifie notamment par la nécessité d'obtenir une acuité d'arête aussi fine que possible. L'aspect économique est également considéré, un revêtement des broches après chaque réaffûtage étant généralement trop coûteux.

c. Finition de la face de coupe

Une fois revêtue, la broche passe à l'étape 8 finale de fabrication au cours de laquelle la face de coupe est reprise de manière à réduire le rayon d'acuité d'arête. Cette étape est particulièrement sensible dans le cas de broches circulaires. En effet, si l'angle d'inclinaison de la meule d'affûtage est reporté à l'identique sur la face de coupe dans le cas d'une broche plate, un enlèvement de matière supplémentaire est induit par la circularité de la broche.

La figure 1.19.a. présente le lien entre angle d'inclinaison de meule et angle de coupe dans le cas d'une broche plate. Le mouvement relatif de l'axe de la meule sur l'outil est rectiligne, la meule balaye alors une zone identique à sa section et l'angle d'inclinaison de

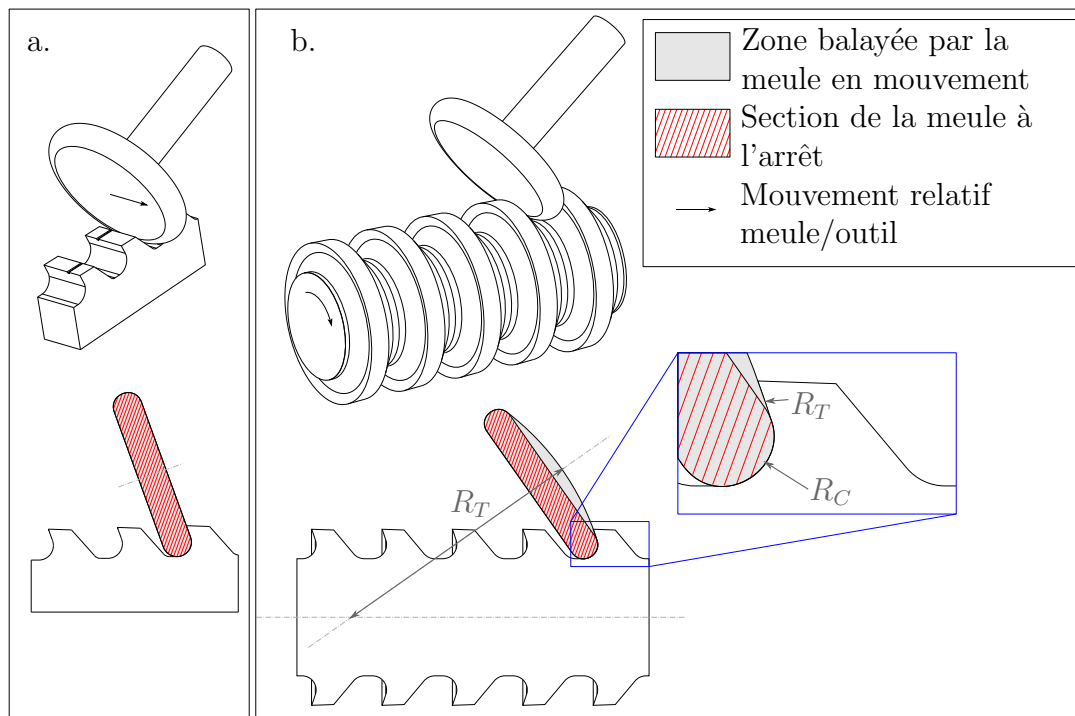


FIGURE 1.19 : Influence de la trajectoire de meule pour la réalisation (a) d'une broche plate et (b) d'une broche circulaire

meule est reporté sur l'angle de coupe de l'outil.

En revanche, pour une broche circulaire la forme et la trajectoire des meules d'affûtage influencent l'angle de coupe final; l'angle d'inclinaison de la meule pourra être très différent de l'angle de coupe. En effet, la rotation de la broche autour de son axe entraîne une augmentation de la zone balayée par la meule. Cette aire de balayage supplémentaire est représentée en gris sur la figure 1.19.b.

Ce profil spécifique aux broches circulaires est généralement pris en compte par les fabricants de broches au cours de l'affûtage, au moyen d'abaques considérant aussi bien la géométrie de la broche, du barreau à affûter et de leur position relative. L'annexe A présente un document de ce type, ainsi qu'une nouvelle méthode de détermination de l'angle de coupe en fonction des différents paramètres d'affûtage, mise en évidence au cours de ce travail de thèse.

Une fois la face de coupe affûtée, un contrôle de l'angle de coupe réalisé peut être nécessaire. Pour les raisons évoquées précédemment, il est impossible de réaliser ce contrôle au projecteur de profil sur les broches circulaires. Il arrive alors qu'un dispositif de mesure composé d'une pige aimantée positionné sur la face de coupe soit utilisé. Celui-ci permet d'identifier visuellement la valeur d'angle de coupe comme présenté sur la figure 1.20. Au vu de la géométrie complexe de la face de coupe et de l'ensemble des incertitudes induites

par cette méthode, la précision de mesure de ce dispositif est limitée.

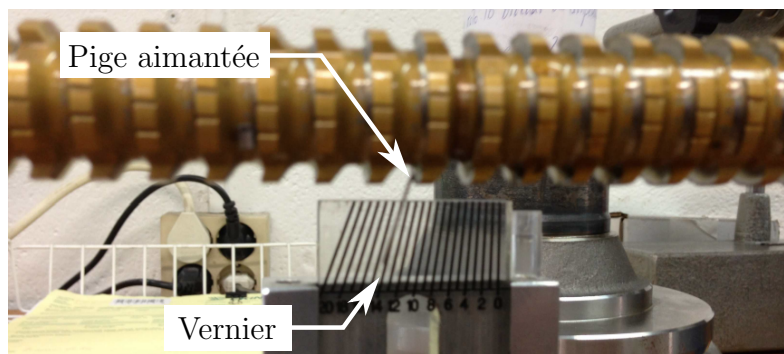


FIGURE 1.20 : Contrôle optique de l'angle de coupe sur broche circulaire

Une fois l'ensemble de ces opérations effectuées, un coupon témoin est réalisé afin de vérifier la qualité du trou final. Notons que dans le cas du brochage, le client formule très souvent un cahier des charges lié uniquement aux dimensions et états de surface du trou broché, la structure même de l'outil n'est que rarement contrôlée ou maîtrisée par le client. Le coupon matière est ainsi livré avec la broche correspondante, l'inspection de la qualité de l'outil étant faite indirectement par l'analyse de ce coupon.

1.3.2 Rectitude de broche

Au cours de sa réalisation, une broche est soumise à de nombreuses sollicitations, d'origines mécaniques et thermiques. Si cela peut avoir une incidence sur sa résistance, ses propriétés dimensionnelles peuvent également être modifiées, ce qui peut aller jusqu'à la rendre inutilisable. La limite de défaut de rectitude couramment admise est de l'ordre de 30 μm .

Le redressement des broches a ainsi lieu régulièrement au cours de leur fabrication. Pour ce faire, l'opérateur positionne l'outil sur un banc de mesure muni d'un palpeur, et étudie la déformée de la broche maintenue en position à chacune de ses extrémités en la faisant tourner autour de son axe. Lorsque le sens de courbure est établi, un burin est positionné en fond de denture, sur la partie concave de la broche, et frappé afin d'obtenir un redressement de cette broche par libération des contraintes résiduelles de compression présentes dans cette zone.

L'enclume en bronze positionnée du côté convexe peut être en contact directement avec les dents, ce qui présente des risques non négligeables d'apparition de défauts, dans certains cas cette enclume est remplacée par un vé en appui directement sur le fond de la chambre à copeaux. Cette opération présentée sur la figure 1.21 est répétée jusqu'à s'assurer de l'obtention d'une rectitude optimale de l'outil. La précision demandée et la

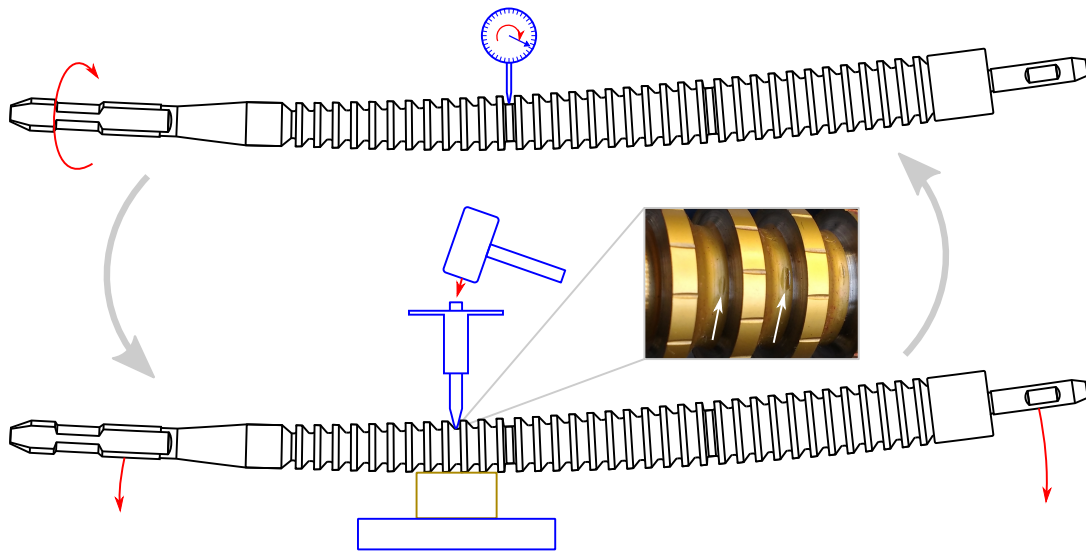


FIGURE 1.21 : Méthode de contrôle et de correction de la rectitude de broche

difficulté de mise en œuvre liée notamment aux risques d'ébréçage des dents de coupe rend cette opération particulièrement sensible. Elle constitue l'une des principales sources de rebut des broches au cours de leur fabrication.

1.3.3 Réaffûtage de broche

Une broche est un outil complexe et pouvant s'avérer très coûteux. Afin de maximiser leurs cycles d'utilisation, leur conception initiale prévoit la possibilité de les réaffûter généralement entre 3 et 5 fois. Une broche peut ainsi parvenir à réaliser jusqu'à plus de 3 000 brochages par affûtage, soit un total de 15 000 cycles par broche.

Après un certain nombre de cycles, les arêtes de coupe s'usent, entraînant une dégradation de l'état de surface généré. Cela a aussi une influence sur les efforts de brochage. On estime couramment que l'affûtage est nécessaire lorsque l'augmentation de l'effort de coupe sur l'ensemble de la broche est de l'ordre de 25 à 40%. Le réaffûtage d'une broche est la plupart du temps réalisé sur la face de coupe. Cela consiste à faire reculer cette dernière afin de supprimer les traces d'usure en dépouille et d'utiliser une arête possédant une acuité optimale. Il arrive que l'affûtage soit réalisé sur la face de dépouille dans certaines applications particulières (brochage en pot par exemple).

Lors du réaffûtage de la face de coupe d'une dent de brochage, la hauteur de dent diminue mécaniquement à cause de l'angle de dépouille. Cette diminution de la hauteur des dents est généralement compensée par la duplication en fin de brochage de dents possédant les mêmes dimensions (dents de réserve), la diminution de hauteur de la première d'entre

elles sera alors compensée par la suivante et ainsi de suite. Ce mécanisme est schématisé sur la figure 1.22.

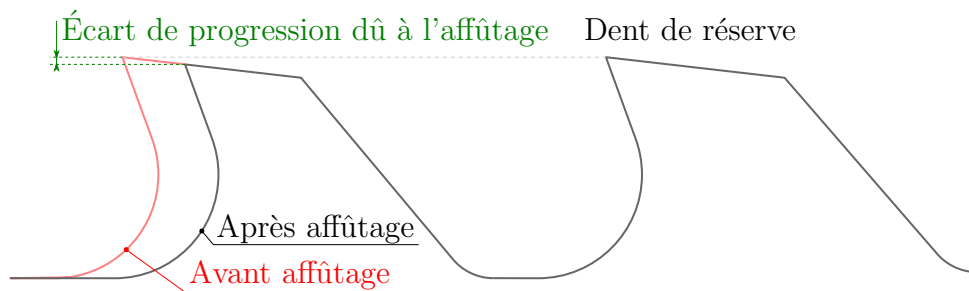


FIGURE 1.22 : Schématisation de l'écart de progression induit par l'affûtage de la face de coupe

La qualité de réalisation de ce réaffûtage et la maîtrise de la trajectoire de la meule d'affûtage sont essentielles à l'enroulement correct du copeau. En effet, une pénétration de meule trop importante peut entraîner la formation d'une zone propice au blocage du copeau, comme présenté sur la figure 1.23, ce qui peut affecter aussi bien l'état de surface généré que l'intégrité de la dent de coupe.

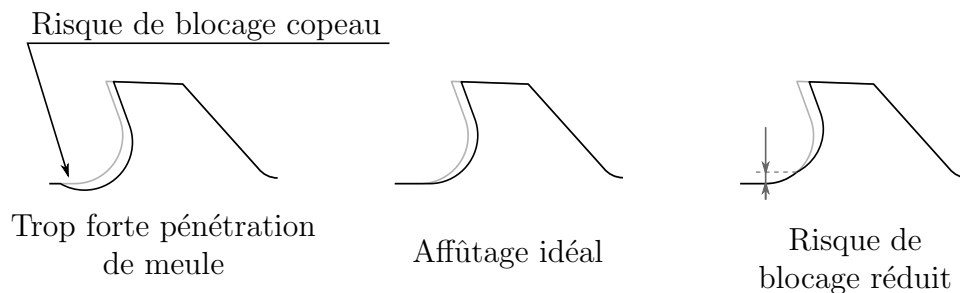


FIGURE 1.23 : Stratégies d'affûtage et risques de blocage des copeaux associés

Lors du réaffûtage, le recul d'arête est généralement de l'ordre de 0.2 mm. Il arrive cependant qu'au cours d'une opération de brochage, ou de maintenance des broches, une dent soit plus sévèrement affectée et que ce recul d'arête soit plus important. Deux choix sont alors couramment effectués. Le premier consiste à faire reculer l'ensemble des dents de la broche de cette même valeur. Ce choix permet notamment de conserver des progressions identiques à celles de la broche neuve, et également de maintenir un pas de denture constant le long de la broche. Une autre solution consiste à réaffûter de façon plus importante la dent détériorée, et à répartir sur les quelques dents en amont et en aval de celle-ci cet écart de recul d'arête et donc de progression. Ainsi sur quelques dents en amont de la dent abîmée la progression sera légèrement plus faible que celle au plan, et le pas plus important, alors que la progression sera légèrement plus importante et le pas plus faible sur les quelques dents suivantes.

Une autre technique de réaffûtage des broches peut également être évoquée. Celle-ci consiste à retoucher non pas la face de coupe, mais la face de dépouille. Dans ce cas, l'épaisseur de dent n'est pas affectée, mais la progression est réduite. Les dents de réserve sont alors utilisées afin de compenser cet écart de progression. Notons que cette technique est généralement plus contraignante dans la mesure où le revêtement en face de dépouille est enlevé. La broche doit alors être de nouveau revêtue après réaffûtage.

À l'heure actuelle, certains fabricants de broche réalisent certaines opérations d'affûtage et réaffûtage au moyen de rectifieuses à commande numérique munies de palpeurs intégrés permettant une mesure en continu du diamètre de dent. L'avantage est double. La précision de réalisation est moins sensible à la variabilité induite par l'opérateur, et il est ainsi possible de conserver aisément un historique complet de l'ensemble des propriétés dimensionnelles des broches. Cela permet notamment une bien meilleure prise en charge des différents cycles de réaffûtage successifs.

1.4 Paramètres procédé

1.4.1 Vitesse de coupe

Les vitesses de coupe couramment utilisées en brochage sont extrêmement faibles, de l'ordre de 5 m/min. En effet, la forte productivité de ce procédé est davantage issue des importantes aires de coupe qu'aux vitesses de coupe.

Historiquement, les efforts de coupe étant conséquents, les machines de brochage hydrauliques étaient privilégiées, les vitesses de coupe permises par ces machines dépassant rarement 10 m/min. Actuellement des machines de brochage à commandes électromagnétiques permettent d'accroître considérablement ces vitesses, facilitant le développement de l'utilisation d'outils en carbure.

Le tableau 1.5 récapitule les ordres de grandeur de vitesses de coupe couramment utilisées en brochage.

Tableau 1.5 : Vitesses de coupe en brochage V_c (valeurs en m/min) (Bellais, 1997).

		Outil HSS	Outil Carbure
Aciers	$400 < R \leq 700$ MPa	10-24	12-24
	$700 < R \leq 1100$ MPa	8	
Fontes		8	30-34
Alliages d'aluminium		10-40	25-30

À noter que la vitesse de coupe a une influence sur le flux de chaleur généré à l'interface outil matière et donc une influence sur l'usure des outils, en brochage comme dans tout

autre procédé de coupe. Si l'usure est plus rapide à haute vitesse, l'adoucissement thermique ayant lieu dans les zones de cisaillement peut s'avérer bénéfique au niveau de l'état de surface généré. La vitesse joue également un rôle dans les mécanismes de formation et d'enroulement du copeau, ceux-ci étant critiques dans le cas du brochage. Pour finir, la vitesse de coupe est directement liée à l'apparition de phénomènes vibratoires pouvant survenir en cours d'opération et auxquels le procédé de brochage est particulièrement sujet de par la mise en œuvre d'outils parfois très longs et de montages de grandes dimensions.

1.4.2 Lubrification

Le mode de lubrification a une influence directe sur l'état de surface ainsi que sur l'usure de l'outil.

Le lubrifiant joue 5 grands rôles en usinage (Byers, 2006) :

- Il permet de réduire le coefficient de frottement entre l'outil et la matière. La formation du copeau peut ainsi être facilitée, réduisant le flux de chaleur généré à l'interface.
- Les additifs présents dans l'huile permettent de limiter les affinités chimiques entre l'outil et la matière. Ceci peut réduire les phénomènes de micro-soudure et donc les risques d'apparition d'arête rapportée.
- La surface fraîchement usinée est très sujette à l'apparition de corrosion, l'huile de coupe peut limiter les réactions chimiques intervenant en surface du matériau broché.
- En plus d'avoir un effet sur la source même de chaleur, le lubrifiant permet d'évacuer une partie de la chaleur générée. Le choix du lubrifiant (huile, émulsion, azote liquide, etc.) ainsi que sa méthode d'application (flux constant, MQL, etc.) peuvent modifier de manière significative les températures au niveau de l'arête de coupe.
- Le dernier point particulièrement utile en brochage concerne l'évacuation des copeaux. La zone de coupe étant inaccessible en cours de brochage, un flux très important d'huile de coupe est généralement appliqué sur les broches avant et après brochage afin d'évacuer les copeaux.

Concernant ce dernier point, l'utilisation de jets d'huiles sous haute pression offre des résultats probants concernant l'évacuation des copeaux, mais peut être à l'origine de l'apparition de brouillards d'huile rédhibitoires d'un point de vue sanitaire en l'absence de carénages appropriés. L'utilisation de brosses peut également être requise afin d'améliorer encore davantage l'évacuation des copeaux. Il s'agira alors de trouver un compromis entre efficacité d'évacuation et usure des broches et des brosses.

L'utilisation d'huile de coupe entière est généralement privilégiée en brochage, en raison des faibles vitesses de coupe et des hautes pressions en jeu dans la zone de coupe. Ainsi des huiles entières très polaires et chargées en additifs hautes pressions sont majoritairement employées. Notons que l'utilisation de chlore ou de soufre est de plus en plus proscrite lors de l'élaboration des huiles de coupe destinées au brochage. Bien que leur effet bénéfique sur le coefficient de friction soit reconnu comme présenté sur la figure 1.24, les contraintes sanitaires et environnementales ne permettent plus leur emploi.

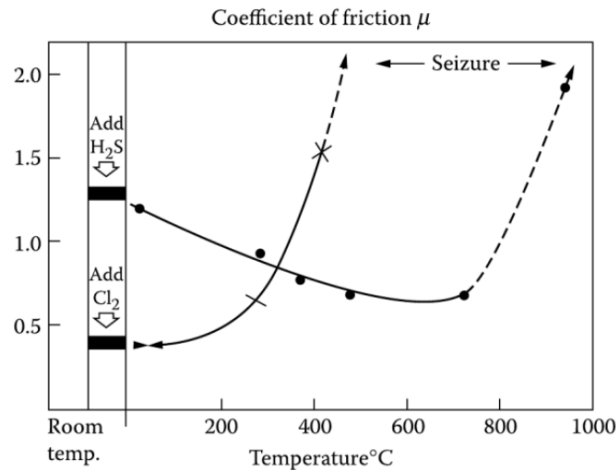


FIGURE 1.24 : Influence du soufre et du chlore sur le coefficient de frottement (Byers, 2006)

1.5 Machines de brochage

Le choix de la machine de brochage est très dépendant de l'opération réalisée. Selon les dimensions des pièces à brocher, des outils broches ou encore du type de brochage (intérieur ou extérieur), des conceptions de brocheuses différentes seront privilégiées. La normalisation allemande propose une classification des machines de brochage, présentée sur la figure 1.25.

1.5.1 Brocheuses horizontales

Dans l'automobile, ces machines sont particulièrement mises en œuvre pour le brochage extérieur de pièces de petites dimensions. Équipées de broches fixes, elles sont approvisionnées en continu au moyen de porte-pièces fixés sur chaînes, les pièces sont mises en mouvement et passent au travers d'un tunnel de brochage. Ce type de conception permet d'obtenir une productivité record, mais la qualité obtenue peut s'avérer aléatoire au vu du manque de rigidité du montage des pièces.

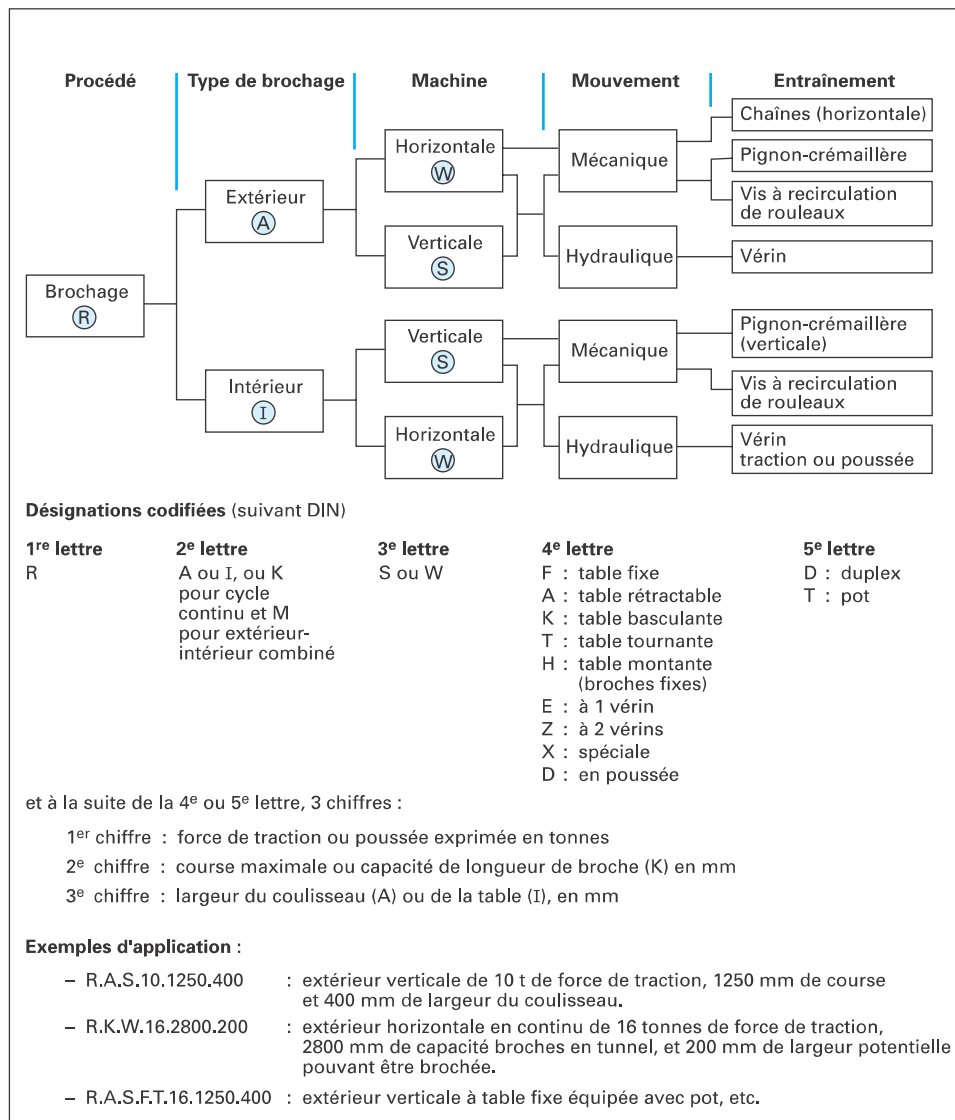


FIGURE 1.25 : Classification des machines de brochage (Bellais, 1998).

Le brochage horizontal peut également être utilisé avec broches mobiles. Il s'agira alors le plus souvent de brochage intérieur de pièces de grandes dimensions ou de conceptions dédiées à des applications spécifiques.

1.5.2 Brocheuses verticales

Beaucoup utilisées en brochage intérieur, les brocheuses verticales permettent de limiter l'espace nécessaire à l'implantation d'un poste de brochage, en facilitant également l'accès à toutes les zones de la machine par les opérateurs. Afin de permettre l'automatisation de l'opération de brochage, un chariot mobile équipé d'une tête de relevage est installé afin de remettre en position initiale l'outil après brochage. Ceci permet également

de limiter l'apparition de phénomènes de fouettement au cours de la coupe. Ce chariot mobile peut également appliquer un effort opposé au sens de brochage, permettant de mettre en tension la broche, ce qui peut améliorer la qualité des surfaces générées.

1.5.3 Types de commandes

Deux types de commandes sont utilisés sur les machines de brochage ; on retrouve ainsi des machines à commandes hydrauliques et électromécaniques.

a. Brocheuses à commande hydraulique

L'utilisation d'une centrale hydraulique est pratiquement indispensable sur les machines de brochage. En effet, même s'il arrive que la mise en mouvement des broches ou pièces à brocher n'utilise pas la pression hydraulique, cette dernière peut être utilisée pour le bridage, le transfert de pièces, etc. Si initialement le groupe hydraulique était intégré à la machine même de brochage, il est dorénavant plus courant de dissocier cette centrale de la partie active de la brocheuse. Cela permet notamment de limiter l'échauffement induit par cette centrale, ou encore les phénomènes vibratoires induits par les pompes hydrauliques.

Les premières brocheuses ayant été développées utilisaient une commande hydraulique. L'avantage essentiel réside dans leur conception simple et la possibilité de générer les efforts de coupe importants et précis, nécessaires en brochage. Cette technologie est encore la plus utilisée industriellement, même si de nouvelles conceptions basées sur une commande électromécanique sont maintenant monnaie courante.

b. Brocheuses à commande électromécanique

Si les brocheuses hydrauliques sont généralement privilégiées lorsque les efforts de brochage sont très élevés, les machines de brochage à commande électromécanique permettent d'atteindre des vitesses de coupe élevées, particulièrement pertinentes lors de l'utilisation de broches en carbure. Il existe trois types d'actionneurs différents pour ce type de machines, les transmissions par :

- chaîne et roue crantée
- vis à recirculation de rouleaux (figure 1.26-a.)
- pignon-crémaillère (figure 1.26-b.)

Notons que la motorisation par pignon-crémaillère est notamment retenue pour les efforts importants admissibles, et les vitesses de coupe importantes, alors que le système par vis à recirculation de rouleaux permet de transmettre des efforts moins conséquents.

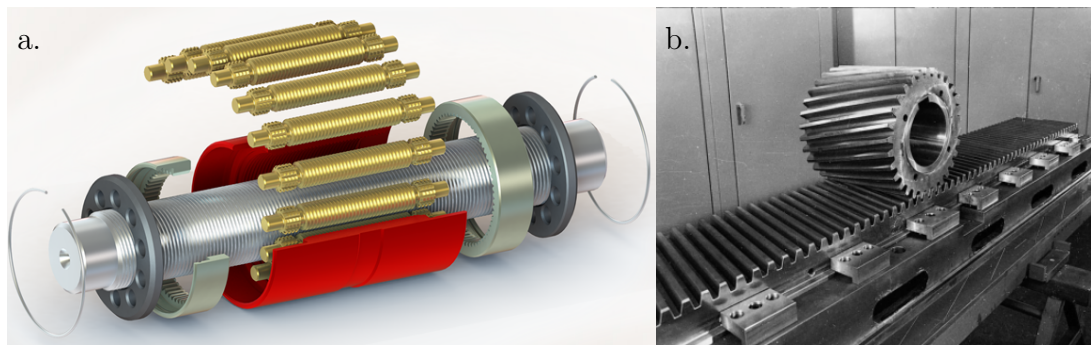


FIGURE 1.26 : Entraînement par (a.) vis à recirculation de rouleaux (<http://rollvis.com>) et (b.) pignon-crémaillère (Bellais, 1998).

1.6 Conclusion

Le brochage est un procédé de coupe ancien et mettant en œuvre des cinématiques généralement basiques (déplacement linéaire). Pourtant la diversité importante de profils brochés, et la structure complexe des outils rend leur conception particulièrement délicate. Par ailleurs, si la maîtrise de sa conception est essentielle, la fabrication de l'outil nécessite la mise en œuvre d'une précision micrométrique, aussi bien au niveau d'une seule dent (progression, dépuilles, etc.) que de manière globale à l'échelle de la broche (déformation et redressage de broche). Ainsi, conception et fabrication de broche, de même que les conditions opératoires de brochage et les machines utilisées ont une influence directe sur la qualité de brochage, qu'il s'agisse d'état de surface, d'usure d'outil, etc.

Dans ce chapitre, une synthèse illustrée des pratiques technologiques en brochage a donc été élaborée. La construction et l'archivage de ce document était en effet nécessaire à la société AREVA en vue de comprendre les choix notamment des fabricants de broches. Ce chapitre permet de prendre rapidement connaissance du fonctionnement général d'une opération de brochage, ce qui est particulièrement intéressant du point de vue des utilisateurs du brochage.

Afin de caractériser l'influence des différentes sources de défauts potentielles sur la qualité de brochage, il est essentiel d'être en mesure d'allier le savoir-faire détenu industriellement par les fabricants de broche et utilisateurs de brochage, à une démarche scientifique permettant par exemple de mieux appréhender les mécanismes de séparation de la matière. Ces travaux présentés au cours du chapitre suivant visent donc à apporter des éléments de compréhension permettant d'adapter et améliorer les conditions de mise en œuvre du procédé de brochage.

Chapitre 2

Études scientifiques de l'enlèvement de matière par brochage

Sommaire

2.1	Introduction	46
2.2	Dispositifs d'étude du brochage	48
2.2.1	Dispositifs expérimentaux	48
2.2.2	Modélisation du procédé de brochage	51
2.3	Qualité de la pièce brochée	54
2.3.1	Dimensions	54
2.3.2	Rugosité	56
2.3.3	Intégrité de surface - dureté et contraintes résiduelles	60
2.4	Indicateurs physiques	62
2.4.1	Évolution des efforts de coupe	62
2.4.2	Températures induites par le processus de coupe	67
2.4.3	Vibrations induites par l'interaction outil/matière	70
2.5	Qualité de l'outil broche	73
2.5.1	Formation du copeau	73
2.5.2	Optimisation de la structure de l'outil	78
2.5.3	Usure de l'outil de brochage	80
2.6	Conclusion	84

2.1 Introduction

Bien que le brochage soit un procédé très ancien, le choix des conditions d'utilisation s'appuie essentiellement sur un savoir-faire métier. Les connaissances qui lui sont relatives sont essentiellement détenues par les fabricants de broches et machines de brochage voire quelques utilisateurs experts. Peu d'études scientifiques sont parues à son sujet comparativement aux procédés plus conventionnels tels que le tournage ou le fraisage. La figure 2.1 a été réalisée afin de faire état de la plupart des études publiées sur le brochage au cours de ces dernières années.

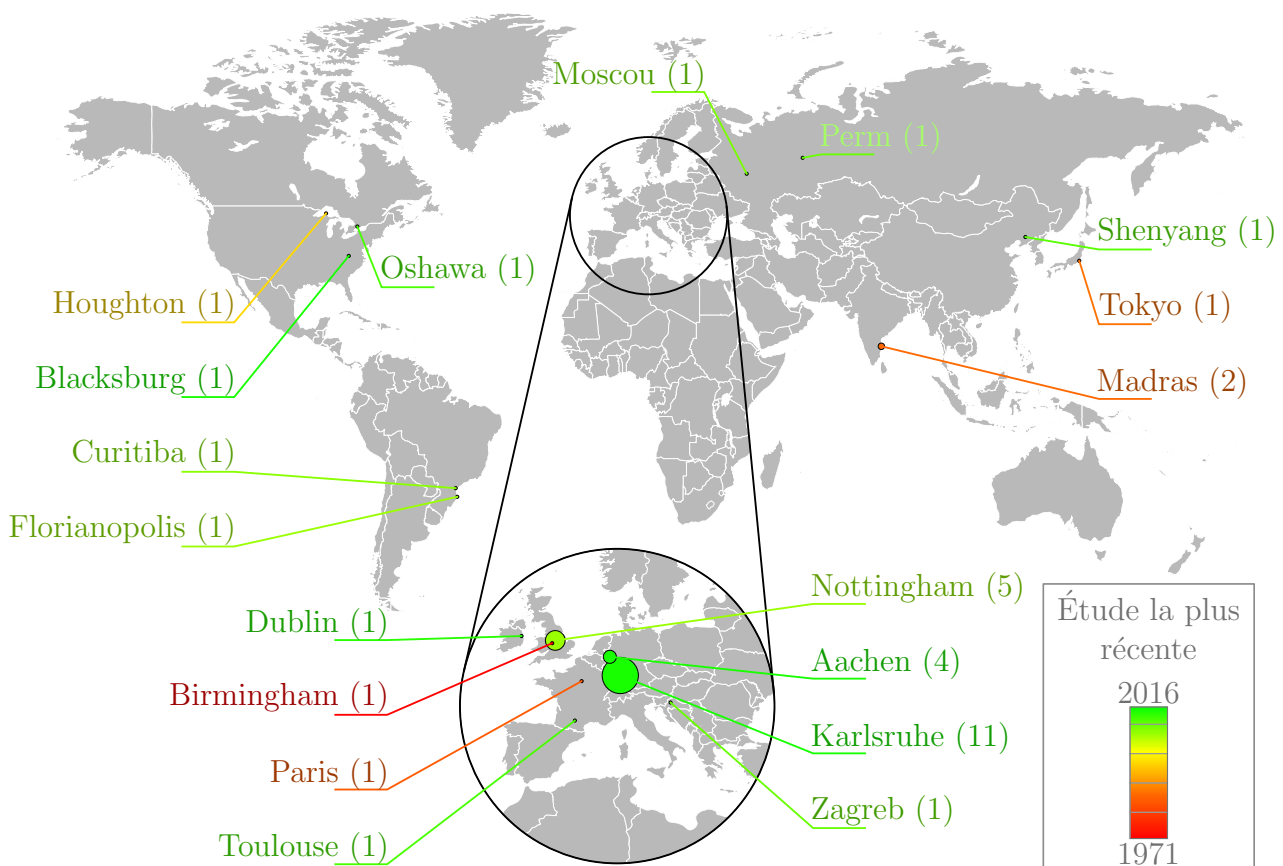


FIGURE 2.1 : Études scientifiques du brochage dans le monde -
Ville (nombre de publications)

Si les règles de dimensionnement et d'utilisation ainsi établies s'avèrent le plus souvent pertinentes, la compréhension des mécanismes physiques responsables de la coupe peut permettre l'optimisation de l'efficacité du procédé (amélioration des surfaces générées et de la productivité, diminution des coûts, etc). Pour ce faire, une approche scientifique de l'étude d'une opération de coupe s'avère plus pertinente que l'approche phénoménologique mise en place par retour d'expérience.

Il convient ainsi dans un premier temps d'identifier les paramètres de brochage afin de pouvoir étudier leur influence sur les différents résultats de brochage mis en évidence, ceux-ci sont présentés sur la figure 2.2.

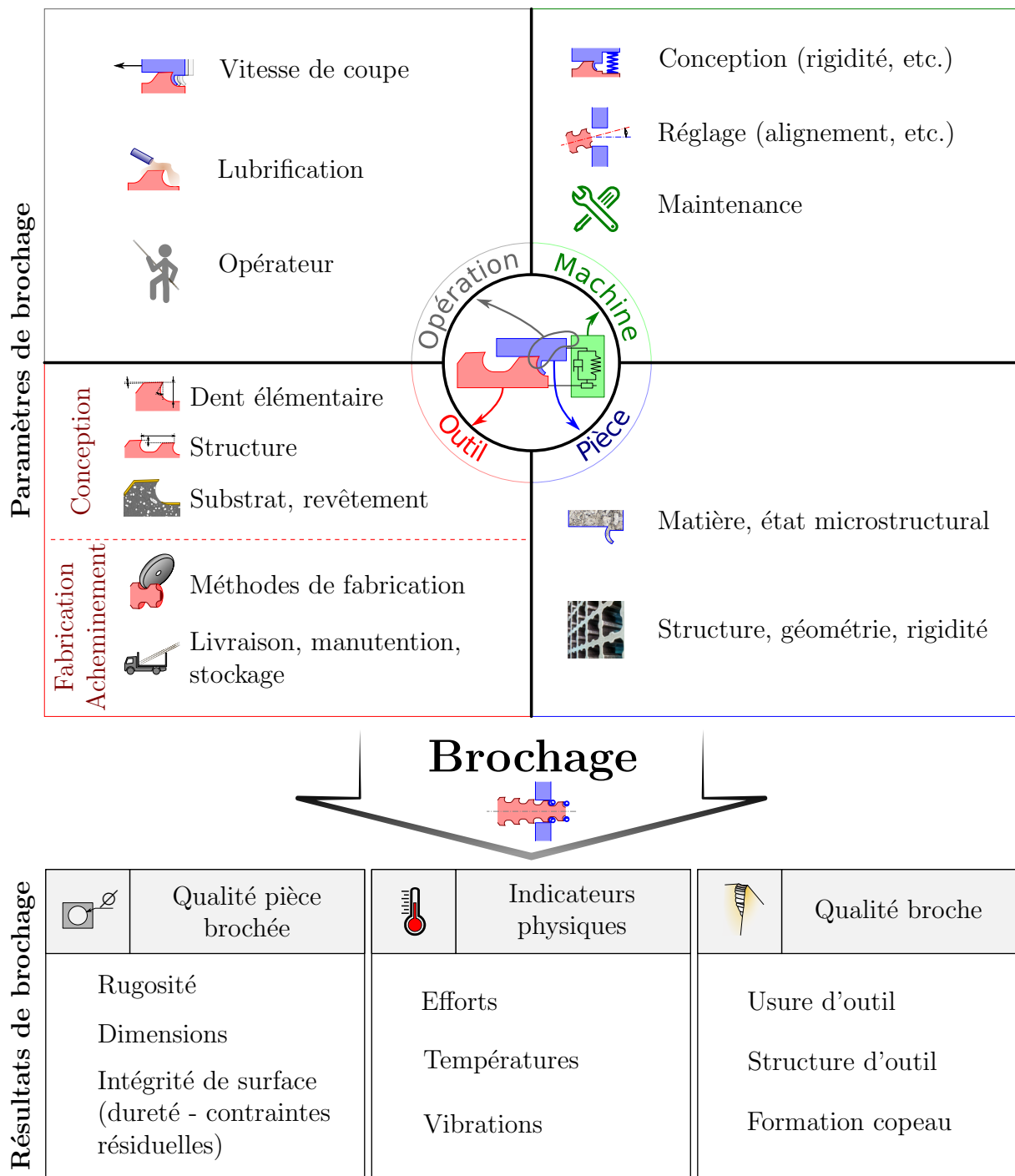


FIGURE 2.2 : Paramètres de brochage et résultats correspondants

Dans le cas du brochage, nous retrouvons usuellement quatre familles de paramètres modifiables, dépendant de l'outil, de la pièce brochée, de la machine de brochage ou encore de l'opération en elle-même. En ce qui concerne les résultats de brochage, trois grandes catégories peuvent être dissociées :

- *La qualité de la pièce brochée* : Ces paramètres correspondent aux indicateurs de la qualité obtenue après une opération de brochage. Ils peuvent être fixés par le cahier des charges établi par le client, le brocheur sera tenu de respecter les contraintes ainsi spécifiées.
- *Les indicateurs physiques* : Il s'agit d'étudier les conséquences des actions thermomécaniques de l'opération de coupe. Ces paramètres sont souvent essentiels à la compréhension des mécanismes physiques, chimiques ou thermiques mis en jeu lors de la coupe. La surveillance de l'opération de brochage passe généralement par l'étude de l'évolution de ces paramètres.
- *La qualité de la broche* : Les indicateurs de la qualité d'une broche sont observés par le brocheur pour évaluer la faculté d'un outil à réaliser une opération spécifique de manière efficace. Les critères (généralement de durée de vie, de prix voire dimensionnels) liés aux outils broches sont ainsi définis par le brocheur. Le fabricant de broche sera alors tenu de respecter les contraintes ainsi spécifiées.

Afin de mener à bien l'étude de l'influence de ces différents paramètres, un certain nombre d'outils peuvent être impliqués, qu'il s'agisse d'un banc de brochage expérimental instrumenté, ou de moyens d'étude numérique de la coupe. Ces dispositifs sont présentés dans la section suivante.

2.2 Dispositifs d'étude du brochage

Afin d'analyser l'influence des paramètres précédemment évoqués, plusieurs échelles et outils d'étude peuvent être considérés, de l'opération de brochage « industrielle » jusqu'à l'étude du comportement tribo-chimique à l'interface outil/matière. Lorsqu'il s'agit de représenter l'opération d'usinage en elle-même, deux approches complémentaires sont couramment envisagées ; la mise en place d'un banc d'essai expérimental, et la représentation du processus de coupe au moyen de la modélisation et de la simulation numériques. Nous détaillons ici chacune de ces approches et les méthodes utilisées pour les mettre en œuvre.

2.2.1 Dispositifs expérimentaux

La plupart des études expérimentales présentes dans la littérature ont été réalisées au moyen de machines dédiées au brochage (Axinte *et al.*, 2005; Bejnoud *et al.*, 2015;

[Schulze et al., 2011](#)). Celles-ci offrent en effet de nombreux avantages tels qu'une rigidité importante et un mode d'asservissement identique à celui utilisé industriellement. Cela permet notamment de considérer le travail d'un outil broche dans son intégralité, pour étudier par exemple l'évolution des efforts de coupe.

[Kishawy et al. \(2012\)](#) a ainsi mis en œuvre un outil de brochage intérieur sur une machine de brochage équipée d'une platine d'effort, comme présenté sur la figure 2.3. Cet outil comporte 44 dents, ce qui permet d'obtenir l'évolution des efforts de coupe tout au long de l'opération de brochage dans des conditions industrielles. [Bejnoud et al. \(2015\)](#) a utilisé une approche similaire pour l'étude des déformations d'une pièce induites par une opération de brochage intérieur.

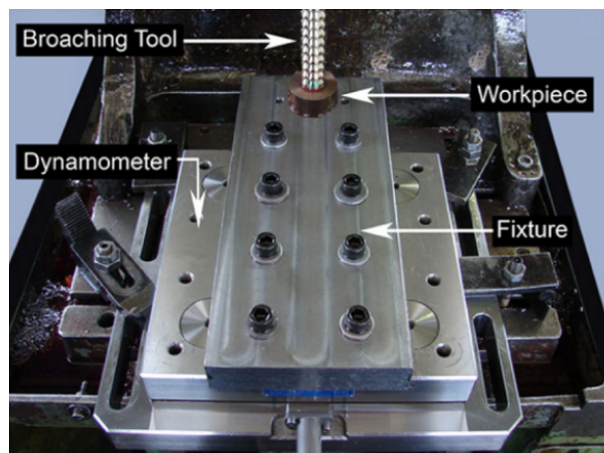


FIGURE 2.3 : Brochage intérieur multi-dent ([Kishawy et al., 2012](#))

Cependant, ces deux exemples mettent en œuvre un outil de brochage intérieur à géométrie axiale, ce qui induit une compensation des efforts de pénétration (seuls les efforts de coupe peuvent être mesurés). Or les efforts de pénétration sont généralement plus sensibles aux variations de mécanismes de coupe en jeu à l'interface outil/matière par exemple. C'est pourquoi le brochage extérieur est parfois privilégié à l'échelle de l'étude en laboratoire. Celui-ci permet en effet de mesurer les efforts de pénétration en plus des efforts de coupe, voire également les efforts latéraux engendrés par une éventuelle inclinaison d'arête.

Par ailleurs, l'utilisation d'une géométrie de dent simple (type coupe orthogonale) permet de réaliser une étude plus fondamentale, comparativement à l'utilisation d'une arête de coupe trop complexe (avec angles variables, etc.), et de concentrer l'étude sur les mécanismes de séparation de la matière. Les résultats ainsi obtenus peuvent par la suite être extrapolés à des cas d'études plus complexes.

Plusieurs études ont ainsi été réalisées au moyen d'outils de brochage extérieurs à coupe orthogonale. On retrouve notamment le travail de [Klocke et al. \(2011\)](#) avec l'utilisation

d'un outil à 13 dents, ou [Mo et al. \(2005\)](#) sur un outil à 5 dents ou encore les travaux de [Weule et al. \(2005\)](#). [Schulze et al. \(2010\)](#) a également étudié une opération de brochage extérieur, mais avec un outil de production composé de trois rangées de 88 dents. L'objectif étant alors d'observer le travail de l'outil de manière globale et non de se focaliser sur le travail d'une dent. L'étude d'un outil de brochage destiné à la réalisation de logements de pieds d'aubes de turbines a également été réalisée par [Axinte \(2007\)](#).

Lorsqu'il s'agit d'étudier l'influence des paramètres liés à la structure même d'une dent de brochage, il peut s'avérer intéressant de s'affranchir de l'interaction de plusieurs dents. [Vogtel et al. \(2013\)](#) a dans ce but utilisé lui aussi une machine de brochage extérieur, mais cette fois avec un outil ne possédant qu'une seule dent (figure 2.4). Dans cette étude, la chambre à copeaux n'est pas présente sur l'outil, ses effets s'en trouvent donc négligés.

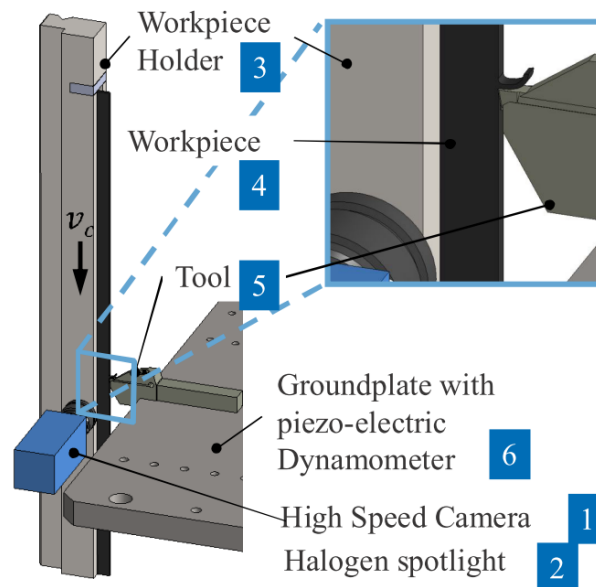


FIGURE 2.4 : Brochage extérieur à une dent ([Vogtel et al., 2013](#))

Ainsi, la mise en œuvre d'un outil muni d'une seule dent permet de représenter une opération de coupe orthogonale avec les particularités du brochage (faibles progressions, angles de coupe importants, très faible dépouille, etc.). On trouve ainsi dans la littérature des montages mis en place sur des fraiseuses CNC destinés à représenter une opération de coupe orthogonale élémentaire de micro-usinage. [Malekian et al. \(2012\)](#) étudie par exemple les résultats issus d'une opération de coupe avec une avance de seulement quelques microns. [Ducobu et al. \(2016\)](#) utilise quant à lui un système similaire pour l'étude d'avances plus importantes, jusqu'à quelques dixièmes de millimètres (figure 2.5).

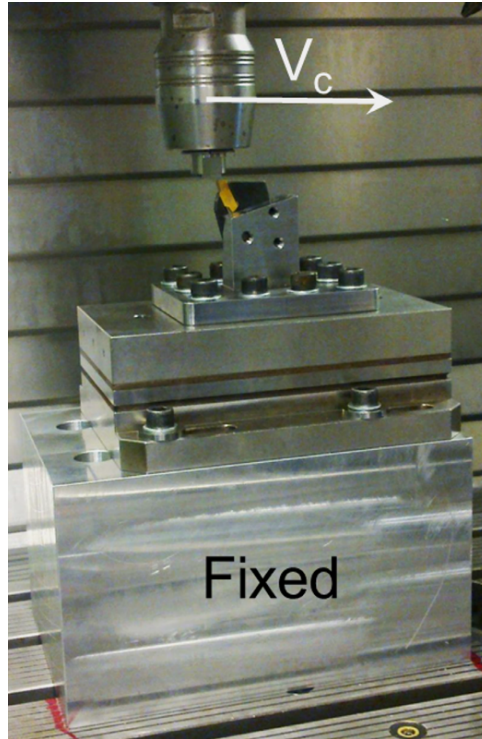


FIGURE 2.5 : Montage expérimental à une dent sur fraiseuse CNC (Ducobu *et al.*, 2016)

2.2.2 Modélisation du procédé de brochage

Au même titre que les dispositifs expérimentaux précédemment évoqués, différentes approches de modélisation d'un procédé peuvent être envisagées en fonction du phénomène que l'on souhaite mettre en évidence.

Dans le cas particulier du brochage, il est courant de retrouver des méthodes analytiques de prédiction, particulièrement adaptées aux efforts de coupe, et nécessitant peu de ressources de calcul. On retrouve notamment les travaux de Gilormini *et al.* (1984) destinés à la comparaison des efforts de coupe simulés avec des relevés expérimentaux, ou ceux de Schroeter *et al.* (2007) ou encore Suthurland *et al.* (1997). La formulation de modèles analytiques (par exemple d'efforts de coupe) peut permettre une étude macroscopique du fonctionnement global d'un outil. Mandrile *et al.* (2012) présente par exemple la corrélation entre une usure prématurée de dents de broche et un effort expérimental supérieur aux efforts analytiques.

Mais lorsque l'on souhaite davantage se focaliser sur les mécanismes physiques en jeu à l'interface outil/matière, l'utilisation de codes de calculs basés sur des méthodes éléments finis est aujourd'hui incontournable. Pour représenter une opération élémentaire d'usinage, plusieurs méthodes de modélisation sont couramment employées. La formulation Lagrangienne consiste à représenter la matière fixe au sein d'un maillage prédéfini et à

déplacer un outil sur les éléments de la pièce à usiner. Afin de représenter la séparation de la matière, la pièce peut être divisée en 3 zones ; un massif, un copeau et une zone intermédiaire au niveau de laquelle les éléments peuvent être supprimés lorsqu'une condition limite est atteinte, permettant la formation du copeau.

Cette méthode développée par [Mabrouki *et al.* \(2008\)](#) permet notamment de représenter avec fidélité la formation du copeau et son éventuelle segmentation. [Kong *et al.* \(2011\)](#) a ainsi mis en œuvre une méthode de ce type sur le logiciel Abaqus Explicit en 2D pour représenter une opération de brochage (figure 2.6).

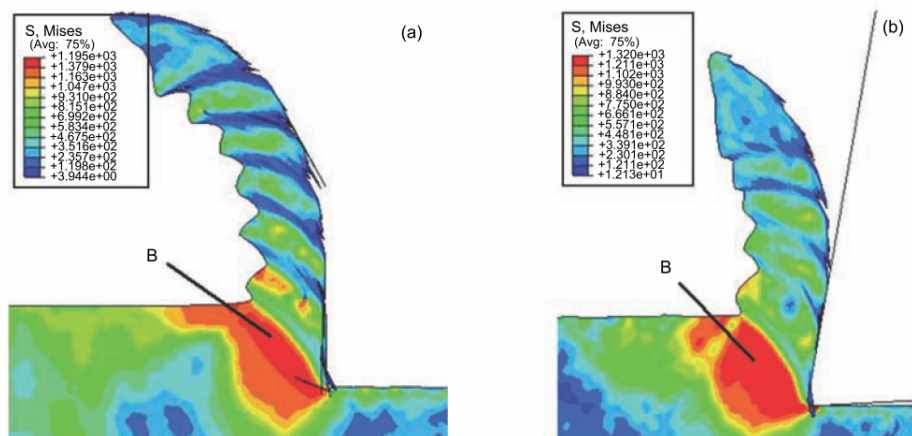


FIGURE 2.6 : Simulation lagrangienne de la zone de coupe pour des angles de coupe de 0° (a.) et 10° (b.) ([Kong *et al.*, 2011](#))

Une autre stratégie de simulation de l'opération de brochage également basée sur une modélisation Lagrangienne a été développée par [Schulze *et al.* \(2011\)](#). Dans ce cas, il n'est plus nécessaire de diviser la pièce en 3 zones, la séparation de la matière est permise par un algorithme de remaillage. Comparativement à la méthode Lagrangienne précédemment évoquée, cela permet d'assurer une meilleure représentation du contact au niveau de l'arête de coupe, mais nécessite également des temps de calculs bien supérieurs. Ceci se traduit généralement par la génération d'un copeau plus court. Le festonnage du copeau ne peut être représenté par cette méthode.

Dans cette étude, [Schulze *et al.* \(2011\)](#) couple cet algorithme de remaillage à une stratégie de réimportation des champs, afin de considérer l'influence des dents précédentes, notamment sur les contraintes résiduelles. Cette même stratégie de réimportation et remaillage est également utilisée par [Zanger *et al.* \(2014\)](#) pour représenter le travail d'une seule dent sur une plus longue distance, et former ainsi un copeau plus représentatif.

D'autres méthodes de simulation de la coupe sont couramment employées pour l'étude

de procédés tels que le tournage ou le fraisage. On retrouve par exemple les simulations ALE (Arbitrary Lagrangian/Eulerian), la matière à usiner est alors assimilée à un fluide pouvant circuler au travers d'un maillage qui peut lui-même se déformer (figure 2.7).

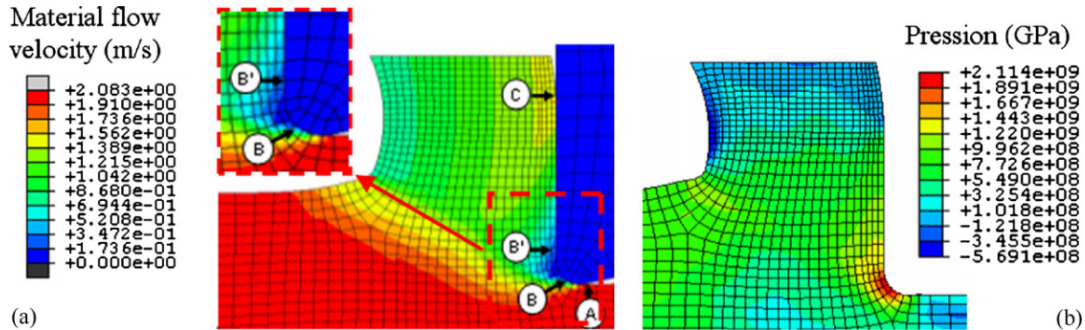


FIGURE 2.7 : Simulation ALE d'une opération de coupe orthogonale (Bonnet *et al.*, 2008)

Cette méthode, notamment utilisée pour la simulation de la coupe par Bonnet *et al.* (2008), est particulièrement adaptée à la représentation de l'interface outil/matière. Si les temps de calcul requis sont réduits, seule la racine du copeau peut être représentée. Aucune étude de ce type en brochage n'apparaît dans la littérature, ce qui s'explique probablement par l'intérêt porté à la formation du copeau dans ce procédé.

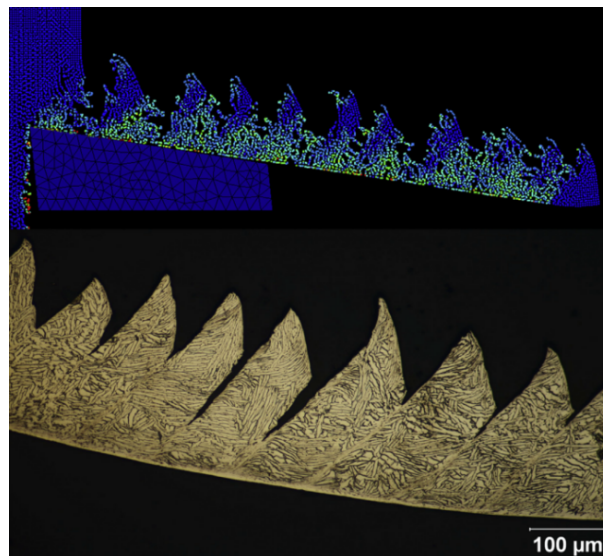


FIGURE 2.8 : Simulation SPH d'une opération de coupe orthogonale (Xi *et al.*, 2014)

Une autre méthode de simulation de la coupe cette fois non basée sur l'étude d'éléments finis peut être présentée; la méthode SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics). La matière est alors discrétisée en particules élémentaires ce qui permet de s'affranchir

des problèmes de distorsion, courants lors de l'utilisation des méthodes de simulation précédemment évoquées. De plus, l'utilisation de critères d'endommagement n'est pas nécessaire contrairement à certaines formulations Lagrangiennes. Cette méthode permet par ailleurs de représenter la segmentation du copeau comme présenté sur la figure 2.8.

Au même titre que la méthode ALE précédemment évoquée, cette méthode n'a pas à l'heure actuelle été utilisée pour représenter une opération de brochage.

2.3 Qualité de la pièce brochée

L'opération d'usinage a pour objectif de réaliser des surfaces respectant un cahier des charges préalablement établi, le plus souvent sous la forme d'un plan exigeant un ensemble de critères de qualification (état de surface, cotes dimensionnelles et spécifications géométriques). Les critères ainsi exprimés par le client sont donc à la base du développement d'une opération de coupe, le brochage ne faisant pas exception à cette règle.

2.3.1 Dimensions

Étant donné le caractère fondamental lié au respect des cotations et tolérancements géométriques, ce critère fait l'objet d'études référencées depuis plus de 30 ans. En effet, [Moffatt et Prakash \(1971\)](#) ont par exemple étudié l'influence de l'alignement du trou pilote réalisé par perçage sur la rectitude du trou après brochage intérieur. Cette étude met notamment en évidence la faible influence du trou pilote sur la qualité finale de la surface brochée. Lorsque le trou pilote est incliné de plus d'un degré par rapport à la normale à la surface brochée, l'opération de brochage permet de rectifier cet écart en le réduisant à une valeur proche de 0. Cela est évidemment valable dans la mesure où le déplacement de la broche est normal à la surface de la pièce. Notons par ailleurs qu'il est également question du brochage de trous situés entre des pièces composées de matériaux différents. Ainsi dans le cas d'un brochage composite acier/aluminium, la prise de passe est supérieure du côté de l'aluminium, mais lors d'un brochage acier/bronze, celle-ci s'avère supérieure du côté de l'acier. Cela tend à prouver que la dureté n'est pas le principal facteur responsable de ce décalage.

Cet effet positif du brochage sur la précision dimensionnelle a également été observé par [Bejnoud *et al.* \(2015\)](#). Celui-ci a en effet étudié l'écart de circularité entre le trou pilote percé et le trou après brochage (brochage intérieur de manchons coulissants de boîtes de vitesses). En se basant sur la classification des différents niveaux de déformation établie par [Surm \(2011\)](#) (figure 2.9), il a ainsi démontré l'effet de calibrage permis par le brochage

et la bonne circularité de l'outil broche utilisé. Cela permet notamment une diminution de la distorsion de 2^e ordre.

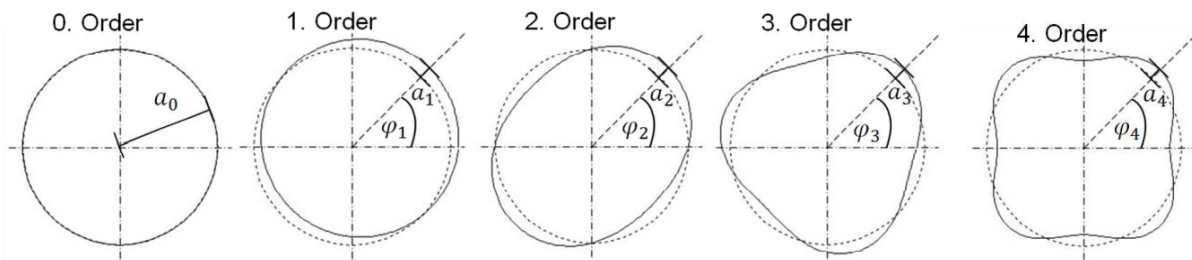


FIGURE 2.9 : Les différents ordres de déformation de forme (Surm, 2011)

En revanche, la structure de la pièce étudiée nécessite un enlèvement de matière plus important sur trois zones situées à 120°. Ceci tend à augmenter la distorsion de 3^e ordre. Une méthode permettant de diminuer ces effets consiste à augmenter la vitesse de coupe afin de diminuer l'augmentation de température globale de la pièce, limitant ainsi cet effet de triangularité. Pour finir, des mesures sur le diamètre extérieur de la pièce prouvent qu'aucune déformation plastique de cette dernière n'est induite à l'échelle macroscopique par l'opération de brochage, puisqu'aucune déformation d'ordre 0 n'a été observée sur la pièce.

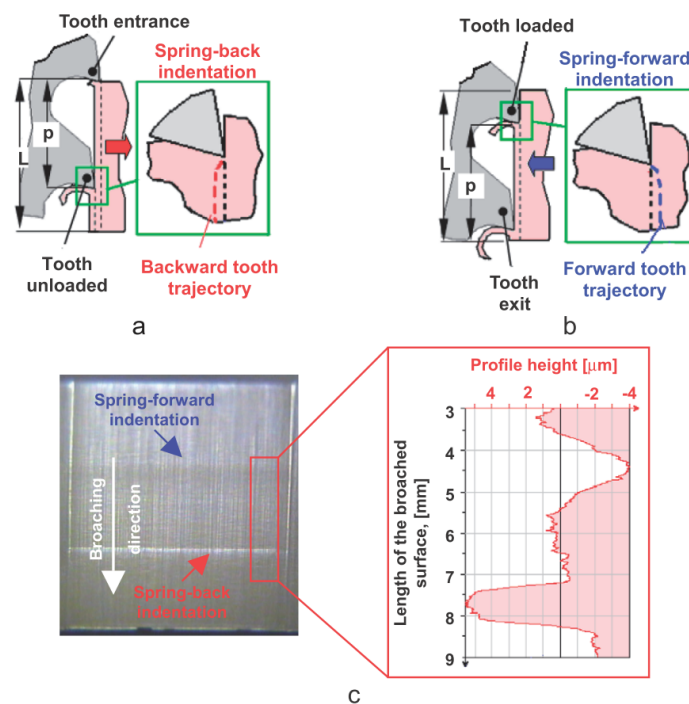


FIGURE 2.10 : Impact de l'entrée (a) ou de la sortie (b) d'une dent sur les dimensions d'une surface brochée (c) (Axinte, 2007)

Des études dimensionnelles plus locales ont également été réalisées. L'influence de l'entrée/sortie de dents sur les dimensions finales d'une surface brochée a notamment fait l'objet d'une étude menée par [Axinte \(2007\)](#). La broche étant composée de plusieurs sections de coupes successives, plusieurs dents travaillent simultanément, et au cours du travail d'une dent a lieu l'entrée et la sortie d'autres dents de la zone de coupe. Ainsi, en considérant une dent en phase de travail, il s'avère que l'entrée d'une dent située en amont de celle-ci entraîne l'apparition d'une surépaisseur sur la surface générée, alors que la sortie d'une dent en aval entraîne la formation d'un creux. Ce phénomène est schématisé sur la figure 2.10.

Finally, the dimensional respect of a surface realized by broaching is primarily dependent on the quality of fabrication of the broach itself, (circularity and geometric precision). The process also plays a role on the fine pieces, notably through the mastery of the temperature rise of the broached part which can lead to deformations. Moreover, if an increase in cutting speed leads to an increase in the heat flux, the interaction time is also reduced which can have the effect of reducing the global temperature rise of the part. The mastery of broaching efforts also contributes to the reduction of mechanical deformations suffered by the part during the operation.

2.3.2 Rugosité

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 1.2.1, un seul outil broche permet de réaliser les étapes d'ébauche, de semi-finition et de finition. La maîtrise de l'état de surface et notamment de la rugosité est donc essentielle en brochage. Afin de mettre au jour les leviers d'action influençant la rugosité issue du brochage, [Mo et al. \(2005\)](#) a réalisé une analyse de la variance faisant intervenir des paramètres liés à la mise en œuvre de l'opération de brochage tels que la vitesse de coupe (2 à 6 m/min) ou le lubrifiant, ou des paramètres de conception d'outil comme la progression (de 25 à 80 μm , notée RPT pour *Rise per tooth* sur la figure 2.11) et l'angle de coupe (12 à 18°). Cette étude menée sur des alliages à base nickel et titane met notamment en évidence l'effet prépondérant de l'angle de coupe sur la rugosité arithmétique R_a , suivi du lubrifiant et de la progression en 3^e position (figure 2.11). Dans ce cas d'étude, la vitesse de coupe est très peu influente, notons toutefois la plage d'étude réduite de cette vitesse de coupe.

La sensibilité de l'état de surface à l'angle de coupe est également présentée dans le [Manuel Forst](#). La figure 2.12 présente ainsi le lien entre l'augmentation d'angle de coupe et

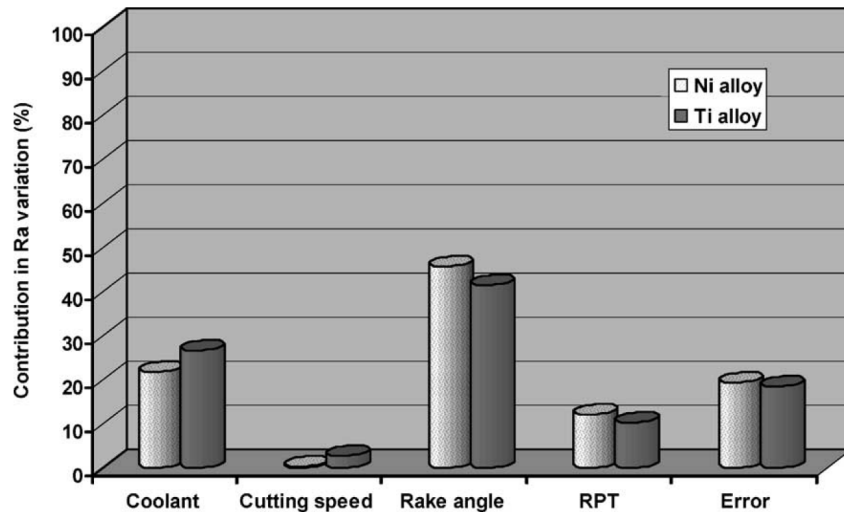


FIGURE 2.11 : Étude ANOVA de la variation de Ra (Mo *et al.*, 2005)

l'amélioration d'état de surface. Dans ce travail, aucune influence de l'angle de dépouille α ou de l'angle d'inclinaison d'arête λ_S sur la rugosité ou les mécanismes de formation de l'arête rapportée n'a été mise en évidence. En revanche l'augmentation de rayon d'acuité d'arête est à l'origine d'une dégradation de la rugosité.

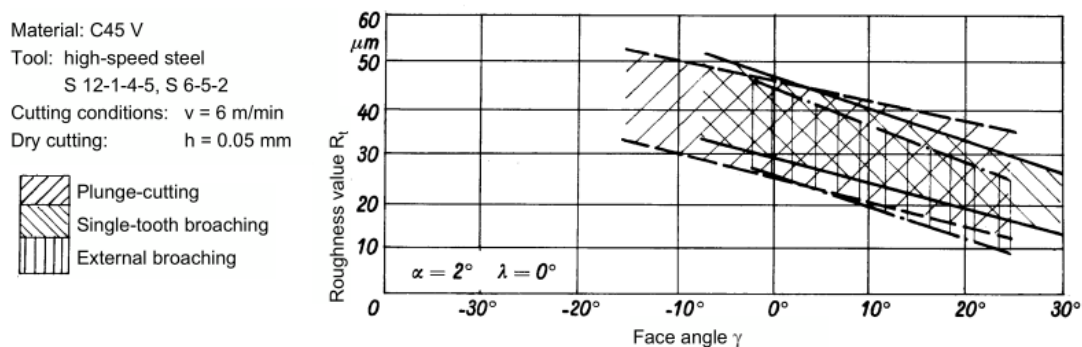


FIGURE 2.12 : Influence de l'angle de coupe sur l'état de surface (Manuel Forst)

Une influence significative de la progression sur la rugosité a également été observée par Zanger *et al.* (2014). Le Ra moyen observé pour une progression de 40 μm est plus de 3 fois supérieur à celui observé pour une progression de 20 μm . Dans cette même étude, le profil d'une surface brochée est dissocié en deux zones. Dans la première phase du brochage, une surface très lisse est générée. Ceci est attribué à l'effet de plongée de la dent dans la matière (et potentiellement à une brève diminution de l'angle de dépouille). Après quelques dixièmes de millimètres brochés, l'état de surface se dégrade fortement jusqu'à la fin du brochage. La vibration issue de la structure de la machine est mise en cause, la formation du copeau le long de l'arête de coupe pourrait également être un

facteur de dégradation de l'état de surface (copeau plus long \rightarrow plus de frottement \rightarrow formation du copeau dégradé).

L'influence négative de l'augmentation de progression sur la rugosité totale R_t est également mise en évidence par le [Manuel Forst](#), en particulier pour des vitesses de coupe inférieures à 30 m/min. Au delà, l'état de surface est beaucoup moins dépendant de la progression.

L'influence de la vitesse de coupe sur la rugosité de la surface brochée a fait l'objet de nombreuses études. En effet dans la plupart des procédés d'usinage, l'augmentation de la vitesse de coupe entraîne un adoucissement thermique de la pièce, source d'une diminution du coefficient de frottement ([Rech et al., 2013](#)), ce qui a un effet bénéfique sur l'état de surface. Or, [Kuljanić \(1975\)](#) a par exemple observé une dégradation de R_a entre 1 et environ 3 m/min, suivie d'une amélioration jusqu'à 6 m/min lors du brochage d'un acier 16MnCr5. Ceci doit de nouveau être mis en lien avec les très faibles vitesses de coupe étudiées, généralement proscrites en usinage et apparaissant hors des plages de vitesse testées dans l'étude du coefficient de frottement précédemment évoquée.

Dès lors que des vitesses de coupe plus élevées sont étudiées, on retrouve l'effet bénéfique de cette augmentation de vitesse sur la rugosité. Ceci a par exemple été observé par [Weule et al. \(2005\)](#) lors du brochage à sec d'un acier XC48 avec outil acier rapide revêtu, pour une plage de vitesse de coupe s'étendant de 15 à 105 m/min (étude du paramètre R_z présentée sur la figure 2.13). L'étude de l'impact de l'utilisation d'outils PcBN sur l'état de surface a par ailleurs permis de déterminer que la concentration en PcBN de l'outil a une influence significative sur les résultats d'état de surface bien qu'aucune tendance claire ne puisse être mise en évidence.

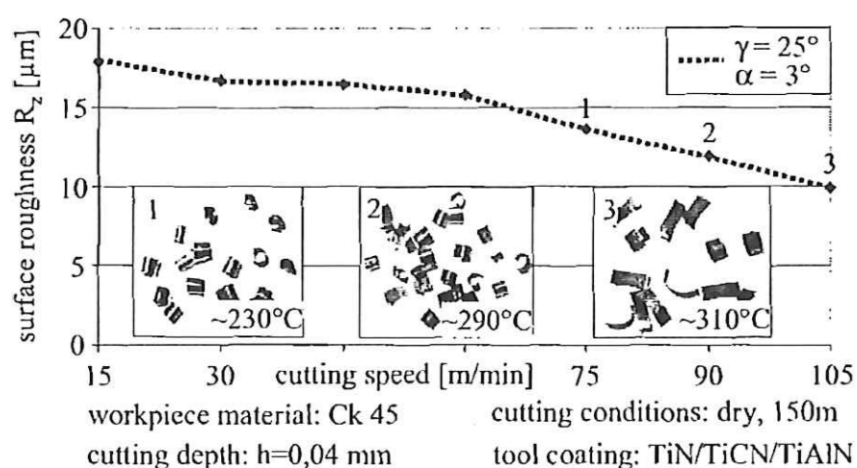


FIGURE 2.13 : Évolution de la rugosité R_z avec la vitesse de coupe ([Weule et al., 2005](#))

De même, [Schulze et al. \(2012b\)](#) a mis en évidence l'amélioration de la rugosité lors de

l'augmentation de la vitesse de coupe de 10 à 50 m/min, avec cependant une dégradation de Ra lors de la transition d'une vitesse de 7 à 10 m/min sous huile entière d'un acier 20MnCr5. Au cours de cette étude, aucune influence du revêtement (TiAlN ou AlCrN) sur la rugosité n'a pu être démontrée, et l'utilisation d'huile ne permet pas une amélioration significative de la rugosité comparativement aux essais réalisés à sec. Ces derniers tendent même à être source d'une rugosité plus faible sous forte progression ($h = 60 \mu\text{m}$).

Une étude menée par [Meier *et al.* \(2014\)](#) au moyen d'outils carbures coupant à des vitesses cette fois très élevées (entre 60 et 100 m/min) a quant à elle mis en évidence la stabilité du paramètre de rugosité Ra lors de la variation de vitesse de coupe en brochage dur. Cette étude a également mis en exergue l'absence d'effets du traitement thermo-chimique de cémentation subi par la pièce à brocher sur la rugosité finale Ra de la surface brochée.

Le [Manuel Forst](#) présente l'influence de l'apparition d'arête rapportée sur la rugosité après brochage. Une augmentation de rugosité est observée entre 2 et 10 μm alors que celle-ci est significativement améliorée jusqu'à 50 μm . Ces tendances sont présentées sur la figure 2.14.

Dans cette étude, un lien est proposé entre le taux de soufre présent dans le matériau broché et l'état de surface. L'augmentation du taux de soufre est à l'origine d'une amélioration significative de l'état de surface broché. L'amélioration d'usinabilité induite par une composition en soufre comprise entre 0.15 et 0.35 % est couramment admise en usinage ([Trombert, 1998](#)). De plus, une amélioration d'état de surface a été observée lors du brochage de matériaux possédant une microstructure plus fine (taille de grains, espace inter-lamellaire). Le taux de compression de copeau semble également être un indicateur de l'état de surface généré, les plus hauts taux de compression de copeaux coïncidant avec l'observation des plus faibles rugosités.

Pour conclure, une forte dépendance de la rugosité à la progression a été démontrée au travers des différentes études précédemment évoquées. Les nombreuses études faisant état de l'influence de la vitesse de coupe présentent quant à elles des résultats moins évidents. De façon générale, une augmentation de vitesse de coupe tend à améliorer la rugosité. Cependant, à basse vitesse de coupe (inférieure à 10 m/min) des résultats différents peuvent apparaître, plusieurs études faisant ainsi état d'une amélioration de rugosité à très basses vitesses. Les quelques travaux traitant du revêtement des outils ou de la lubrification ne mettent pas en évidence de sensibilité significative de l'état de surface à ces différents paramètres.

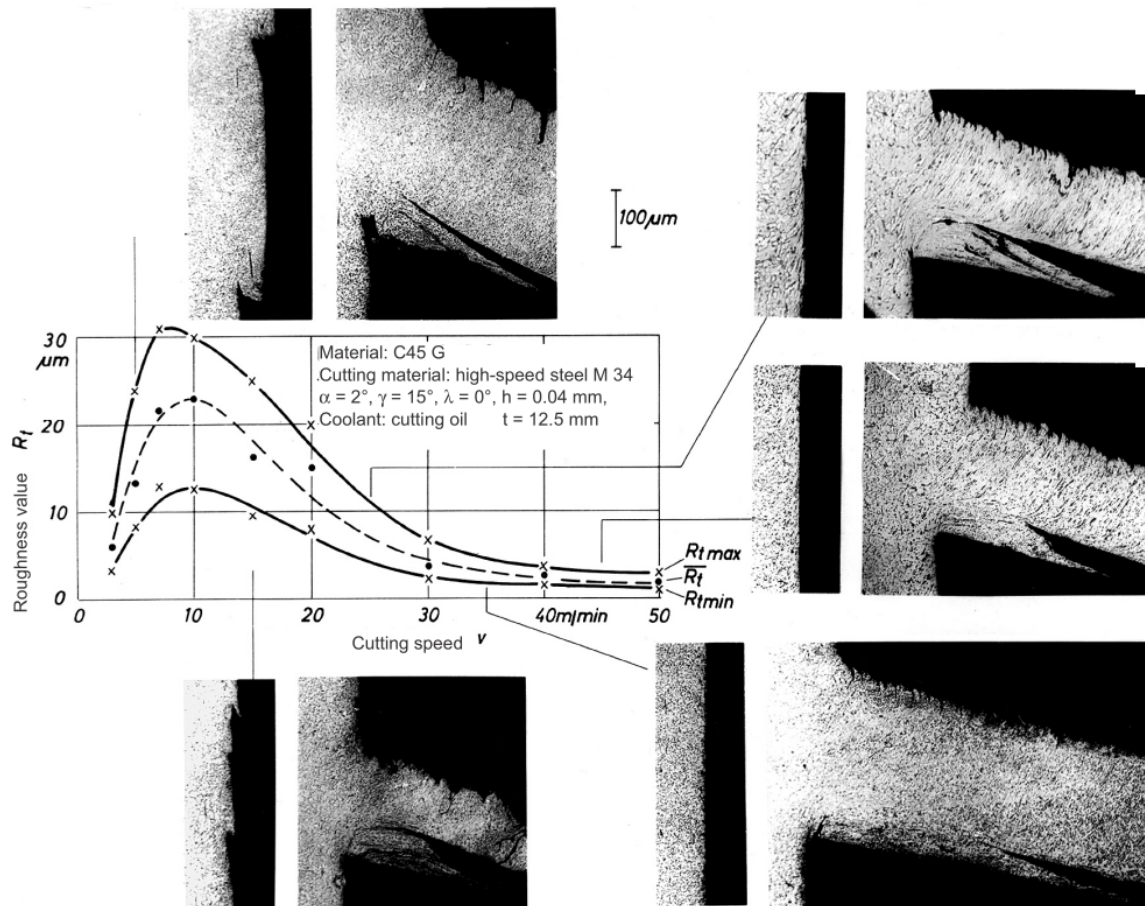


FIGURE 2.14 : Évolution de la rugosité R_t avec la vitesse de coupe (Manuel Forst)

2.3.3 Intégrité de surface - dureté et contraintes résiduelles

Si le brochage induit une modification de la structure géométrique et topographique de la surface générée, les contraintes thermomécaniques qu'il induit sont également source de modifications microstructurales pouvant impacter la dureté et les contraintes résiduelles en extrême surface comme en profondeur. Afin de déterminer la profondeur de la couche affectée, des observations concernant l'évolution de la microstructure peuvent être réalisées, de même que des filiations de micro-dureté ou de contraintes résiduelles.

Une observation au microscope de la microstructure d'un Inconel 718 a par exemple mis en évidence une zone déformée de l'ordre de $10 \mu\text{m}$ suite au passage d'une dent de brochage usinant à moins de 10 m/min avec une progression de $40 \mu\text{m}$ (Klocke *et al.*, 2011). Par ailleurs, l'épaisseur affectée par le passage de la dent de brochage est d'autant plus importante que la vitesse de coupe est élevée.

Lors du brochage d'un acier C45 ($V_c = 17 \text{ m/min}$ et $h = 20 \mu\text{m}$), Zanger *et al.* (2014) a mesuré l'apparition de contraintes résiduelles de tractions sur une profondeur du même

ordre, à savoir 20 μm .

D'autres études de l'évolution des contraintes résiduelles en brochage suggèrent que la profondeur affectée par l'apparition de contraintes résiduelles de traction est bien plus importante. Ainsi le brochage dur d'un acier AISI 5120 cémenté (outil carbure, $V_c = 60 - 100$ m/min et $h = 40 - 60$ μm) réalisée par Meier *et al.* (2014) met au jour l'apparition de contraintes résiduelles de traction sur une profondeur de l'ordre de 100 μm après brochage. Schulze *et al.* (2011) attribue l'apparition de contraintes résiduelles de traction essentiellement à des effets thermiques, en s'appuyant sur la constatation d'une augmentation des contraintes de traction en surface lors de l'augmentation des vitesses de coupe (et donc de la température).

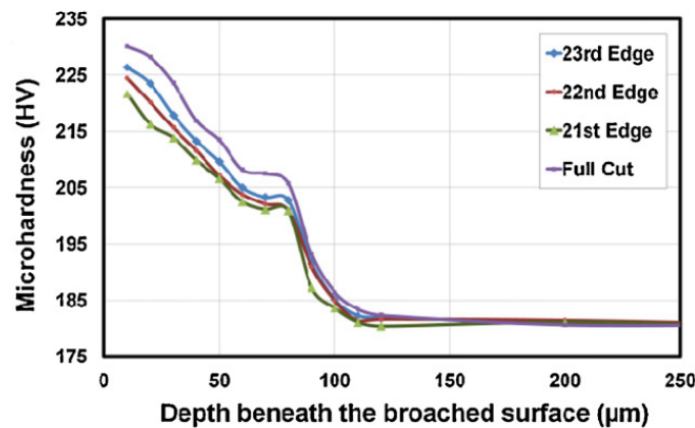


FIGURE 2.15 : Filiation de micro-dureté (Kishawy *et al.*, 2012)

De façon similaire, une élévation de micro-dureté sur une profondeur de l'ordre de 100 μm a été mesurée par Kishawy *et al.* (2012) après brochage intérieur. Dans ce cas d'étude présenté sur la figure 2.15, un acier AISI 12L40 a été broché à une vitesse de coupe fixée à 1 m/min et une progression de 30 μm , et l'étude a été réalisée après le passage de plusieurs dents.

L'une des spécificités du brochage réside dans le passage successif de plusieurs arêtes de coupe sur une même zone, ce qui peut avoir une influence sur l'évolution des contraintes internes, et donc sur le chargement final. Une étude réalisée aux moyens d'outils de simulation numérique par Schulze *et al.* (2011) a mis en évidence l'apparition de contraintes résiduelles de traction d'autant plus importantes en profondeur que le nombre de passages de dents successives est élevé.

De façon générale, le brochage induit l'apparition de contraintes résiduelles de traction sur la surface brochée. La zone ainsi affectée est d'autant plus profonde que la vitesse de coupe est élevée, et que le nombre de passages de dents successives est important. Cela se traduit également par une augmentation de dureté en surface, et par une distorsion de la matière visible par des observations microscopiques. Concernant la profondeur de cette zone, les différentes études traitant de cette problématique en brochage proposent une fourchette de profondeurs s'étendant de 10 à 100 μm .

2.4 Indicateurs physiques

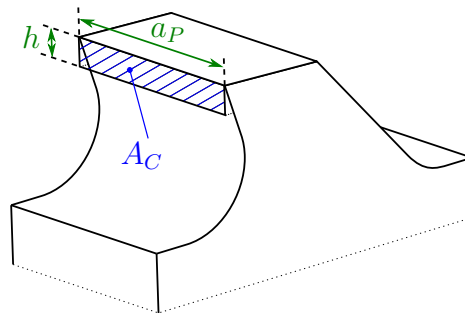
La maîtrise des critères précédents est de fait un élément de premier ordre, ceux-ci pouvant être imposés contractuellement par le client (que ce soit pour des problématiques de fonctionnement ou de durée de vie d'un composant broché). D'autres grandeurs physiques peuvent toutefois faire l'objet d'études afin d'améliorer notamment la compréhension des mécanismes de coupe en jeu lors du brochage. Ces données a priori de second ordre, constituent davantage des indicateurs des phénomènes thermomécaniques entrant en jeu au cours de l'opération de coupe. Ils nous informent aussi bien sur la sévérité du contact outil-matière (efforts, températures, etc.) que sur l'apparition de phénomènes issus de l'interaction du système de brochage dans son intégralité (comme par exemple de vibrations). Ils sont ainsi particulièrement intéressants dès lors que la surveillance de l'opération de brochage est envisagée.

2.4.1 Évolution des efforts de coupe

La plupart des études en lien avec le procédé de brochage présentées dans cette synthèse bibliographique traitent directement ou indirectement de la caractérisation des efforts lors de la coupe. Certaines présentent le développement de modèles de prédiction davantage destinés à la surveillance du déroulement de la coupe alors que d'autres se focalisent sur la sensibilité des efforts de brochage.

L'utilisation de méthodes analytiques de simulation des efforts de coupe est courante. Celles-ci nécessitent peu de ressources de calcul et s'avèrent particulièrement adaptées à la prédiction des efforts de coupe générés par une géométrie de broche définie, même complexe. De plus, les modèles de prédiction ainsi établis sont aisément transférables et utilisables dans la sphère industrielle.

Généralement, l'effort de coupe est ainsi modélisé par le produit de l'aire de coupe projetée ($a_P \times h$ d'après le paramétrage décrit sur la figure 2.16) avec l'effort spécifique

FIGURE 2.16 : Schématisation de l'aire de coupe A_C

de coupe $K_{c,c}$ (cf. équation 2.1). La variante décrite dans l'équation 2.2 concerne quant à elle la prédiction de l'effort spécifique dans la direction de la progression.

$$F_c = K_{c,c} \times A_c = K_{c,c} \times (a_P \times h) \quad (2.1)$$

$$F_h = K_{c,h} \times A_c = K_{c,h} \times (a_P \times h) \quad (2.2)$$

Cette méthode très répandue en usinage est par exemple utilisée par [Suthurland *et al.* \(1997\)](#), [Schroeter *et al.* \(2007\)](#), [Ozlu *et al.* \(2010\)](#) ou encore [Vogtel *et al.* \(2013\)](#) pour comparer des efforts de coupe simulés avec des relevés expérimentaux en brochage. [Gilormini *et al.* \(1984\)](#) utilise un modèle très proche, qui décompose l'effort spécifique de coupe $K_{c,c}$ en deux composantes, la première fixe destinée à représenter la formation du copeau et la seconde variable en fonction du temps destinée à représenter son évacuation.

Notons par ailleurs que l'effort spécifique de coupe $K_{c,c}$ est homogène à une pression et peut ainsi s'exprimer en N/mm^2 . Mais cette grandeur peut également être considérée d'un point de vue énergétique comme un indicateur de l'efficacité d'un procédé (énergie dépensée pour l'enlèvement d'un volume spécifique de matière), on l'exprimera alors en J/m^3 . Une approche énergétique similaire a été utilisée par [Kishawy *et al.* \(2012\)](#) en brochage (figure 2.17), celui-ci se basant sur une méthode de décomposition de l'énergie spécifique mise au point par [Astakhov et Xiao \(2008\)](#) sur une opération de tournage. Les résultats ainsi obtenus sont présentés sur la figure 2.17.

Une fois le modèle d'effort établi et validé expérimentalement, il peut être implémenté dans des utilitaires destinés aux brocheurs et visant à détecter des défauts de brochage. [Mandrile *et al.* \(2012\)](#) présente par exemple une méthode de détection de défauts de broche par comparaison des efforts de coupe de production et théoriques. Il peut par ailleurs être utile aux concepteurs de broches en vue de l'équilibrage des efforts de coupe, une démarche de ce type est présentée par [Vogtel *et al.* \(2015\)](#).

Si la prédiction des efforts de brochage est utile à la maîtrise du procédé, l'étude de

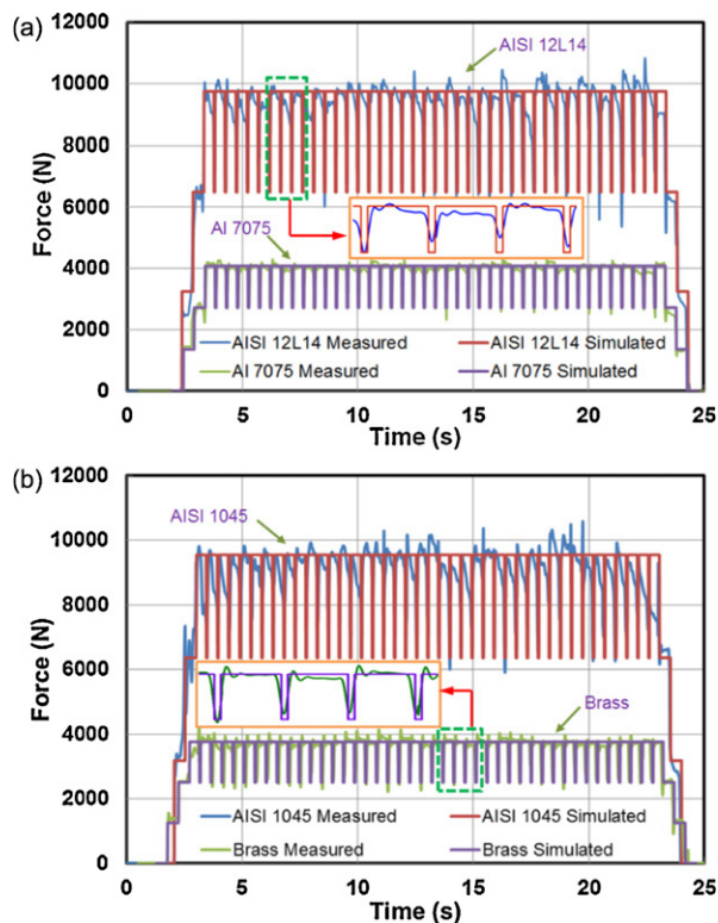


FIGURE 2.17 : Comparaison des efforts de coupe simulés et expérimentaux au cours d'une opération de brochage (Kishawy *et al.*, 2012)

la sensibilité de ces efforts peut également améliorer la compréhension des mécanismes de coupe en vue d'affiner les conditions mêmes de mise en œuvre de ce procédé.

Mo *et al.* (2005) a notamment étudié la sensibilité de la variation des efforts de coupe et de pénétration à quelques paramètres tels que la progression, la vitesse et l'angle de coupe ou la lubrification. Ainsi, l'effort de coupe F_c (noté F_Z sur la figure 2.18) est essentiellement dépendant de la progression, voire dans une moindre mesure, de l'angle de coupe dans le cas d'alliages de titane. L'effort de pénétration est quant à lui également très dépendant de la progression, mais également de l'angle de coupe, la lubrification ou la vitesse de coupe. Ainsi, l'effort de pénétration est porteur de davantage d'informations sur le déroulement de la coupe que l'effort de coupe, étant donnée sa sensibilité accrue à la variation des différentes variables d'entrée étudiées par Mo *et al.* (2005).

L'importance attribuée à la progression sur la variation d'effort de coupe est clairement visible dans la formulation de l'équation 2.1. En revanche, l'effort spécifique de coupe est lui-même dépendant de la progression comme défini dans la norme NF E66-520. Ainsi,

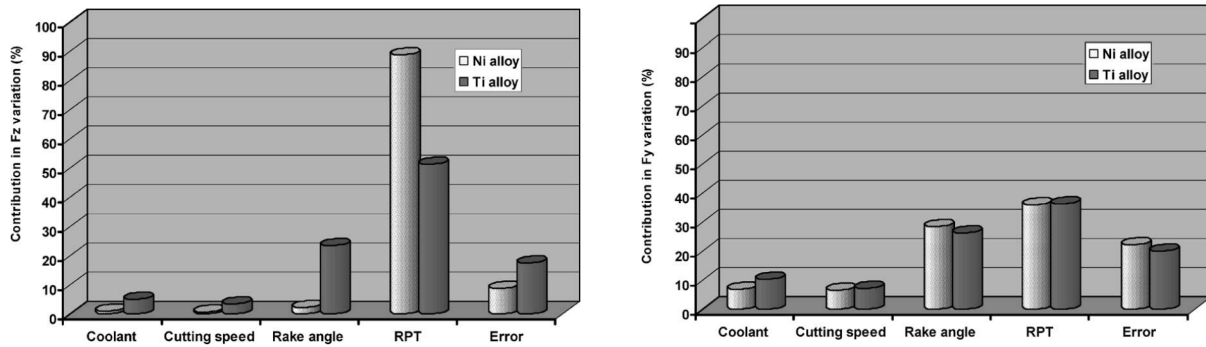


FIGURE 2.18 : Étude ANOVA de la variation d'effort de coupe (F_Z) et de pénétration (F_Y) (Mo *et al.*, 2005)

une augmentation de progression entraînera une augmentation d'effort de coupe dans des proportions moindres, ce qui résultera en une diminution de K_c .

La constatation de ce phénomène a été faite par Schulze *et al.* (2012c) sur un acier C45. Dans cette étude, une diminution d'effort spécifique de coupe est observée lors de l'augmentation de progression. Une sensibilité importante des efforts à la vitesse de coupe a également été observée. L'augmentation de vitesse entre 7 et 50 m/min résulte en une diminution de l'effort de coupe. Une observation similaire a été faite sur une plage de vitesse inférieure (entre 1 et 6 m/min) par Kuljanić (1975) sur un acier 16MnCr5. Meier *et al.* (2014) explique cette diminution d'effort de coupe par un adoucissement thermique du matériau broché supérieur provoqué par les hautes températures apparaissant à l'interface avec une haute vitesse de coupe. Des résultats différents ont été publiés par Klocke *et al.* (2011). Dans cette étude menée sur un Inconel 718, une augmentation de vitesse de coupe de 3 à 10 m/min n'entraîne aucune variation d'effort de coupe, ni même d'effort de pénétration. Cet écart par rapport aux précédentes observations peut être expliqué par la bonne conservation des propriétés mécaniques de l'Inconel à hautes températures, annihilant les effets de l'adoucissement thermique à ces basses vitesses de coupe.

Le Manuel Forst présente des résultats liés à la variation d'efforts de coupe et de pénétration en fonction de la progression, de la vitesse de coupe mais aussi du traitement thermique subi par un acier C45. Comme ce qui a pu être observé dans la plupart des études précédemment évoquées, l'effort de coupe tend à diminuer légèrement lorsque la vitesse augmente. L'effort de pénétration quant à lui augmente entre 5 et 30 m/min), avant de diminuer de nouveau.

Dans cette étude, l'effort de coupe plus élevé observé sur un acier C45 recuit est attribué à une proportion de ferrite supérieure qui, bien que possédant de moins bonnes propriétés mécaniques, est source d'un taux de compression de copeau plus élevé.

Si l'état du matériau broché a une influence significative sur les efforts en brochage,

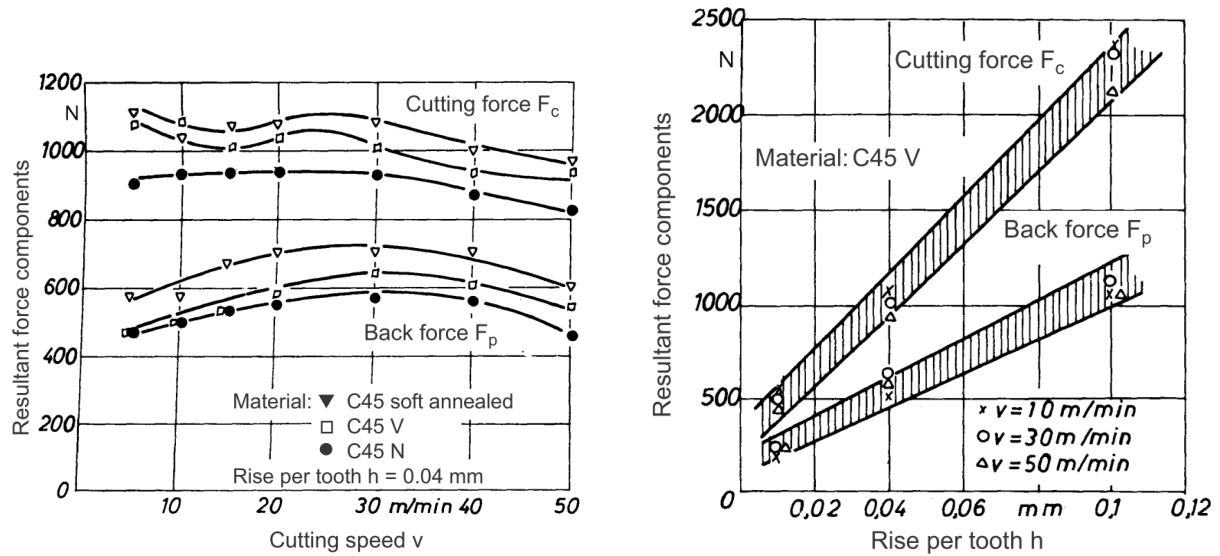


FIGURE 2.19 : Influence de la vitesse de coupe (gauche) et de la progression (droite) sur les efforts de brochage (Manuel Forst)

le substrat ainsi que le revêtement de l'outil ont également fait l'objet d'études. Weule *et al.* (2005) a par exemple réalisé des essais de brochage au moyen d'outils composés de nitrure de bore polycristallin (PcBN) possédant des concentrations en PcBN différentes. Il apparaît ainsi que l'effort de coupe tend à décroître lorsque la concentration en PcBN diminue. L'influence de revêtements TiAlN et AlCrN appliqués sur un outil carbure en brochage a également été étudiée par Schulze *et al.* (2012c). Les efforts de coupe issus d'outils revêtus TiAlN sont inférieurs de l'ordre de 1/3 aux efforts obtenus avec un revêtement AlCrN.

Ainsi, l'analyse et la comparaison d'efforts de brochage moyennés sur une certaine distance brochée dont il a été question jusqu'à présent nous donne des informations sur les conditions les plus favorables de mise en œuvre du brochage. Une attention particulière peut également être portée à l'évolution des efforts de coupe au cours même d'une opération de brochage. Ce travail réalisé par Zanger *et al.* (2014) met notamment au jour une première phase de génération d'efforts plus élevés, suivie d'une stabilisation d'effort de coupe à un niveau plus bas, ce qui est attribué à des effets de rigidité de machine, et de modification de phénomènes de coupe en cours de brochage. L'effet de plongée de l'outil en début de brochage, réduisant l'angle de dépouille et augmentant ainsi la zone de frottement en dépouille est également probablement une source d'augmentation des efforts. Kong *et al.* (2011) a quant à lui étudié par simulation numérique l'influence du festonnage du copeau. Un copeau festonné est source de plus de fluctuations de l'effort de coupe, ce qui est notamment attribué à l'instabilité thermoplastique au niveau de la zone de cisaillement secondaire.

Au vu des nombreuses études et observations dont les efforts de coupe ont fait l'objet, un certain nombre de tendances peuvent être identifiées. La première source de variation d'effort est la progression. Une progression plus importante sera source d'efforts de coupe et de pénétration supérieurs. De même, d'après la littérature l'augmentation de vitesse de coupe sur une plage située entre 1 et 50 m/min résulte dans la majorité des cas en une diminution d'effort de coupe en brochage. Peu de travaux traitent de la variation d'effort de pénétration en fonction de la vitesse de coupe, ce qui s'explique en partie par la difficulté que représente la mise en place de l'instrumentation de l'effort dans cette direction. Sur un acier C45, une première phase d'augmentation d'effort de pénétration entre 5 et 30 m/min est suivie par une diminution de cet effort jusqu'à 50 m/min ([Manuel Forst](#)).

De même, les efforts de brochage présentent une grande sensibilité à l'état dans lequel se trouve le matériau broché. Il est apparu qu'un matériau sujet à de forts taux de compression de copeaux (comme la ferrite) est source d'efforts importants, la résistance mécanique n'est pas la propriété pilote des efforts en brochage. Le matériau et le revêtement de l'outil de brochage influencent également l'effort de coupe. Il a été observé qu'un revêtement TiAlN génère moins d'efforts de coupe qu'un revêtement AlCrN lors du brochage d'un acier SAE 5120.

2.4.2 Températures induites par le processus de coupe

Nous avons évoqué au cours de la section précédente une tendance à la diminution des efforts de coupe avec l'augmentation de la vitesse, ce qui s'explique essentiellement par des phénomènes d'adoucissement thermique à l'interface outil/matière. Le lien entre vitesse de coupe et température à l'interface est confirmé par [Kong *et al.* \(2011\)](#) ou [Vogtel *et al.* \(2013\)](#) au moyen d'essais expérimentaux et de modèles numériques. Ceci prouve que la température a une influence sur les mécanismes de coupe et indirectement sur la qualité et la productivité du procédé.

En effet, la nécessité de maintenir une température limitée au niveau de l'arête de coupe est l'une des raisons fondamentales des très faibles vitesses de coupe généralement utilisées en brochage, les broches étant actuellement majoritairement fabriquées en acier rapide. Or leurs propriétés mécaniques se dégradent rapidement dès lors que leur température atteint des valeurs trop élevées, leur plage d'utilisation étant réduite à quelques centaines de degrés comme le présente la figure 2.20 issue du [Manuel ASM](#).

Il convient donc de maîtriser les paramètres responsables de l'élévation de température au cours de la coupe. Ainsi, la vitesse est effectivement un facteur de premier ordre à

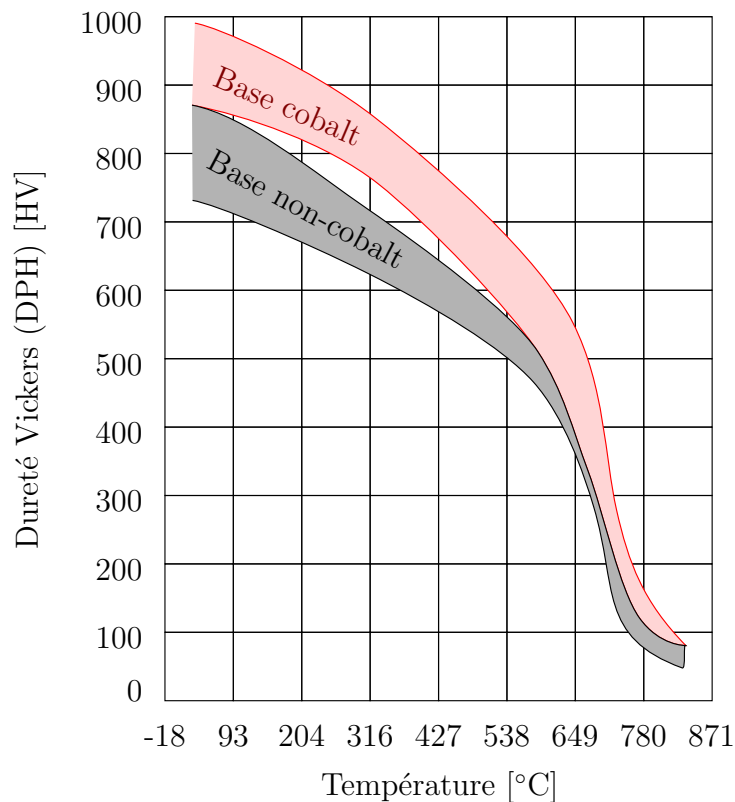


FIGURE 2.20 : Évolution de la dureté en fonction de la température des aciers rapides (Manuel ASM)

prendre en considération. Cependant, d'autres variables telles que la progression ou la méthode de lubrification influencent également l'élévation de température dans la zone de coupe. Le rôle de ces paramètres est présentée sur la figure 2.21 issue du Manuel Forst.

On remarque notamment que les températures observées sous émulsion sont inférieures à celles obtenues sous huile entière ; le coefficient de frottement obtenu sous huile entière étant très inférieur à celui obtenu sous émulsion d'après Rech *et al.* (2013), on peut en déduire que l'émulsion possède une meilleure faculté d'évacuation thermique que l'huile entière (ceci étant notamment attribué à un meilleur coefficient d'échange thermique entre la zone de coupe et l'eau contenue dans l'émulsion qu'avec l'huile).

Si à l'échelle locale de la zone de coupe, l'augmentation de vitesse de coupe est synonyme d'élévation thermique, la tendance peut être très différente lorsqu'on considère la pièce brochée dans son intégralité. Afin de mieux appréhender les effets thermiques induits par une opération de coupe, il s'avère plus pertinent de considérer la notion de chaleur que celle de température. En effet, le flux de chaleur dépend des conditions de coupe ; l'augmentation de vitesse de coupe résulte ainsi en une augmentation du flux de chaleur. Mais comme le présente l'équation 2.3, la température finale T_{finale} est fonction

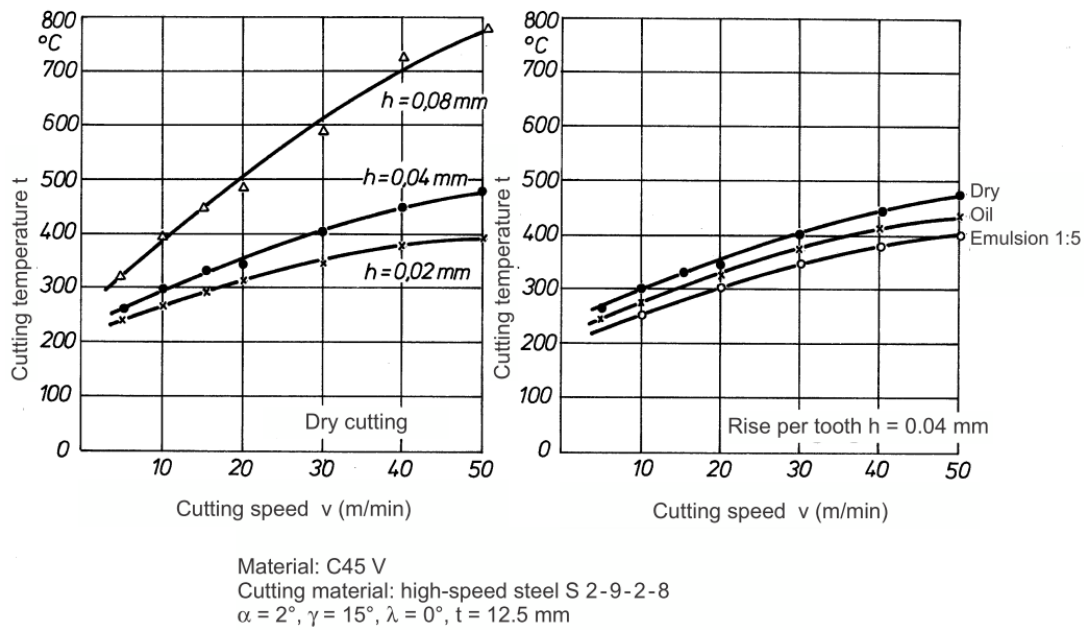


FIGURE 2.21 : Influence de la vitesse de coupe, de la progression et du mode de lubrification sur les températures de la zone de coupe en brochage (Manuel Forst)

du flux de chaleur $\phi_{chaleur}$ mais également de la durée de son application Δt .

$$T_{finale} = T_{initiale} + \frac{\phi_{chaleur} \times \Delta t}{m \times c_p} \quad (2.3)$$

Ainsi, l'augmentation de vitesse est à l'origine d'un flux de chaleur généré à l'interface outil matière plus important (comme prouvé expérimentalement par Courbon (2011)). Elle engendre également la réduction de la durée d'application de ce flux, ce qui peut résulter en une augmentation de température globale de la pièce plus importante à basse vitesse. Ceci a été observé par Bejnoud *et al.* (2015) au moyen de mesures par caméra thermique. Notons toutefois que ce phénomène est dépendant de la durée du brochage, ainsi que du nombre de brochages réalisés en un temps limité sur une même pièce. En effet, Klocke *et al.* (2011) a remarqué que l'élévation de température provoquée par la succession de dents est d'autant plus importante que la vitesse de coupe est élevée ; brocher de manière répétée une même pièce au moyen d'outils pourvus de nombreuses dents entraînera probablement une augmentation significative de la température de cette pièce.

Afin de s'assurer de la conservation de l'intégrité de l'outil au cours de l'opération de brochage, Klocke *et al.* (2014) a analysé l'évolution de la température sur l'outil de coupe. Au vu des très faibles progressions et vitesses de coupe, celui-ci a constaté des écarts significatifs entre les distributions de températures calculées théoriquement par le modèle de Komanduri et Hou (Komanduri et Hou, 2000, 2001a,b), et les mesures

expérimentales par caméra thermique. L'auteur a donc développé un nouveau modèle analytique de prédiction des températures rencontrées dans l'outil, adapté aux conditions de coupe rencontrées en brochage. Ce modèle peut ainsi être utilisé afin de déterminer les conditions de brochage critiques pour l'intégrité des arêtes de coupe.

Pour conclure, la maîtrise de l'élévation de température issue d'une opération de brochage est essentielle du point de vue de la coupe comme de la durée de vie de l'outil. En effet, si celle-ci est favorable à l'adoucissement thermique du matériau broché et donc à la diminution des efforts de coupe, elle peut s'avérer néfaste dès lors que certains niveaux sont atteints, affectant alors la résistance de l'acier rapide composant la plupart des broches actuelles. Ainsi, la littérature met en évidence l'impact de la vitesse de coupe, de la progression ou encore de la lubrification sur l'évolution de la température, aussi bien au niveau de l'arête de coupe que sur la pièce brochée dans sa globalité.

2.4.3 Vibrations induites par l'interaction outil/matière

L'analyse vibratoire est une méthode de référence de détection de défauts ou usures de pièces, très répandue pour la surveillance du fonctionnement d'engrenages ou de roulements. Pour réaliser ces relevés, l'utilisation d'accéléromètres est courante. Ceux-ci permettent notamment une analyse fréquentielle sur une plage relativement basse de fréquences (de 0 à 25 kHz) à partir de la détection des mouvements relatifs d'une structure soumise à des sollicitations dynamiques. Actuellement, des capteurs complémentaires aux accéléromètres sont de plus en plus mis en œuvre industriellement, notamment pour la détection précoce de défauts essentiellement d'usure. Ceux-ci s'appuient sur le relevé temporel des émissions acoustiques (EA) obtenues à hautes fréquences (de 20kHz à plusieurs MHz). Ces émissions acoustiques sont provoquées par des micro-déplacements internes (comme les dislocations) issus de la sollicitation statique ou dynamique de la pièce (([CE-TIM et Zani, 2000](#))).

En usinage, l'apparition de phénomènes vibratoires est généralement à proscrire, cela pouvant entraîner des problèmes de qualité d'état de surface, voire détériorer l'outil de production. Afin d'évaluer l'influence des paramètres de brochage, et en particulier de la vitesse de coupe sur l'apparition de ces phénomènes vibratoires, [Belov \(1976\)](#) propose une formulation analytique de l'amplitude et de la fréquence de vibration issus du brochage à différentes vitesses, et avec un outil broche à pas variable. L'auteur observe que la réduction du niveau de vibration est d'autant plus importante que la fréquence propre

du système est élevée. En considérant l'installation comme un système masse ressort, on observe que l'augmentation de fréquence propre est liée à l'augmentation de rigidité k du système (cf. équation 2.4).

$$f_{propre} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.4)$$

La formulation analytique utilisée dans ce travail permet également de déterminer qu'une faible variation de vitesse de coupe, ou une légère variabilité du pas de denture peut avoir une influence significative sur les effets vibratoires induits par la coupe.

Afin de mieux maîtriser les effets de ces vibrations sur l'état de surface généré en brochage, une étude plus approfondie de l'impact de la rigidité d'une machine de brochage a été menée par [Schulze et al. \(2013\)](#). Ainsi les résultats issus de la simulation de la machine par des systèmes masses-ressorts-amortisseurs ont été confrontés aux mesures de vibrations expérimentales, puis couplés à la simulation de l'interaction outil/matière afin de simuler l'état de surface final obtenu après brochage.

L'étude des effets liés à l'apparition de vibrations lors du brochage est un sujet ayant également été traité à plusieurs reprises par Axinte ([Axinte et Gindy, 2003](#); [Axinte et al., 2005](#); [Axinte, 2006, 2007](#)). Celui-ci distingue notamment deux sources d'excitations spécifiques au brochage; *l'excitation localisée* issue de l'entrée/sortie des dents et responsable de la variation de progression, et *l'excitation non-identique* provoquée par la modification continue de la section de coupe au cours de la progression de l'outil dans la matière ([Axinte, 2007](#)).

L'analyse des surfaces issues du brochage d'un profil en queue d'aronde a notamment permis d'identifier deux types de défauts, présentés sur la figure 2.22. Il est d'abord question d'une zone d'indentation assez étendue (de l'ordre du millimètre), consécutive à l'entrée/sortie de la dent et issue d'un sur-amortissement du système. Les dents responsables de ce défaut sont droites et coupent dans une seule direction (typiquement les dents d'ébauche). Un second défaut apparaît lors du travail des dents de finition dont le profil reprend intégralement la forme de la queue d'aronde. Dans ce cas, des marques de vibrations attribuées cette fois à un sous-amortissement du système apparaissent. Leurs forme et inclinaison s'expliquent notamment par la combinaison d'oscillations en 3-dimensions.

Si l'apparition de vibrations au cours de l'usinage peut entraîner des défauts de surface, elle peut également être utilisée à des fins de surveillance de l'opération de coupe, afin cette fois d'identifier aussi rapidement que possible un défaut sur l'outil avant que celui-ci ne devienne critique pour l'intégrité de la pièce usinée. [Axinte et al. \(2005\)](#) a mis en place une méthode de détection de différents défauts basée sur l'étude des efforts de coupe, des émissions acoustiques (EA) ainsi que des densités spectrales de puissance (DSP). Ce dernier critère représente la répartition de puissance d'un signal en fonction de la

Tableau 2.1 : Efficacité de la méthode de surveillance en fonction du capteur utilisé (Axinte et Gindy, 2003)

Tool condition	Output signals			
	Cutting forces	AE	Vibration	Hydraulic pressure
Chipped tooth (CT)	●	○, ■/□		
Weakened tooth (WT)	●	○, ■	●, □	
Broken tooth (BT)	●	●	●	●
Worn teeth (WoT)	●	●, ■	●, ■	●

^a Time domain: (●) high effectiveness; (○) reduced effectiveness.
 Frequency domain: (■) high effectiveness; (□) reduced effectiveness.

Ainsi, il convient de limiter l'apparition de vibrations, ce qui peut être favorisé par la modification des conditions de brochage (vitesse de coupe, pas variable de dents, type, forme et structure de dent, etc.). Bien que néfastes, les vibrations sont également une mine d'informations, et peuvent ainsi être utilisées pour la surveillance de l'opération de coupe afin de détecter au plus tôt un dysfonctionnement de brochage, notamment dû à une non conformité d'outil (défaut de dent, usure importante, etc).

2.5 Qualité de l'outil broche

Au cours des sections précédentes, nous avons étudié les paramètres révélateurs de la qualité générée par une opération de brochage, de même que les indicateurs pouvant être observés en temps réels pour la détection de défauts de brochage. Un troisième axe d'étude concerne la caractérisation de la qualité d'une broche. Ceci passe notamment par l'étude de différents paramètres caractérisant son efficacité et son fonctionnement. L'analyse de ces paramètres est détaillée dans les sous-sections suivantes.

2.5.1 Formation du copeau

Un premier élément d'étude concerne la notion de formation et d'enroulement du copeau. En effet, le brochage est un procédé clos, qui génère un copeau dans un espace confiné devant donc être dimensionné afin d'assurer le bon fonctionnement de l'outil. La maîtrise de la formation, de l'enroulement et de l'évacuation du copeau permet au fabricant de broche de s'assurer du bon dimensionnement géométrique de l'outil conçu.

Ceci a notamment été évoqué dans le chapitre 1.2.4.b. traitant du dimensionnement de la chambre à copeaux.

La géométrie de l'outil est un premier élément ayant un impact sur la formation et l'enroulement du copeau. Dans le cas d'un alliage à base Nickel GH4169, [Kong et al. \(2011\)](#) a par exemple étudié l'influence de l'angle de coupe sur la formation de bandes de cisaillement adiabatiques (comme dans l'exemple présenté sur la figure 2.23). Il représente une opération de brochage à très haute vitesse (250 m/min) et met en évidence un festonnage (exemple présenté sur la figure 2.23) du copeau d'autant plus important que l'angle de coupe est réduit. Dans ces conditions, le copeau est pratiquement continu dès lors que l'angle de coupe est supérieur à 15° .

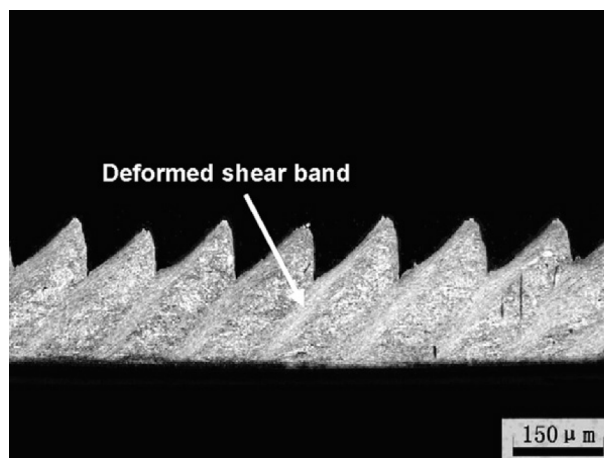


FIGURE 2.23 : Exemple de copeau de tournage festonné ([Duan et Zhang, 2012](#))

Afin de caractériser l'importance du festonnage du copeau, [Vogtel et al. \(2013\)](#) utilise un indicateur caractérisé par le rapport entre l'épaisseur maximale (pic du feston) et minimale (creux du feston) de celui-ci; le taux de festonnage du copeau (*chip serration ratio*). Si pour une plage de vitesse comprise entre 10 et 50 m/min aucune tendance claire ne semble identifiable, l'étude expérimentale de l'augmentation de progression entre 20 et 100 μm semble être favorable à une augmentation du taux de festonnage du copeau.

La maîtrise du copeau est essentielle en brochage, sa structure et sa forme étant des indicateurs efficaces de la qualité de conception d'un outil. Ils peuvent également être utilisés comme indicateurs physiques du déroulement de la coupe, en fournissant des informations sur les chargements thermomécaniques en jeu lors de l'opération d'usinage.

En brochage, un copeau continu et long est préférable dans la mesure où son interaction avec les dents suivantes peut être limitée. De petits copeaux fragmentés pourraient en effet aisément se retrouver bloqués entre l'une des arêtes de coupe et la matière, par exemple au niveau du flanc d'une dent, ce qui aurait des conséquences désastreuses sur l'état de surface. L'apparition de bandes de cisaillement adiabatiques peut augmenter la propension

à la rupture du copeau (Mabrouki *et al.*, 2008). Ceci explique en partie les fortes valeurs d'angle de coupe couramment rencontrées en brochage limitant l'apparition de festonnage.

Si la continuité du copeau est essentielle au bon déroulement de la coupe, son rayon d'enroulement est quant à lui déterminant quant à la géométrie même de la broche. Ce dernier est directement lié au volume qu'occupera le copeau après brochage, et donc au volume que devra pouvoir contenir la chambre à copeau. Aucune étude ne traite directement du volume occupé par le copeau après brochage, mais certaines se concentrent sur des paramètres fortement liés à cet enroulement tels que l'angle de cisaillement. Schulze *et al.* (2013) présente par exemple la simulation de l'évolution de cet angle lors de la plongée d'une dent dans la matière à différentes profondeurs, mais pour une même vitesse de plongée. Ceci est représenté sur la figure 2.24.

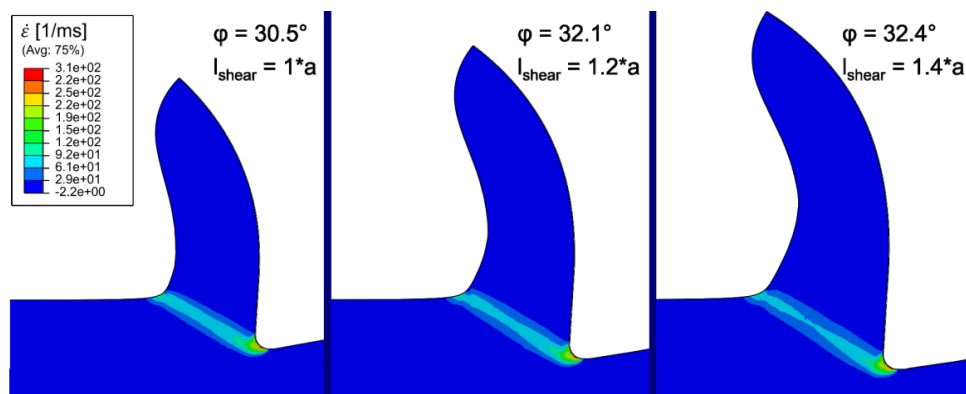


FIGURE 2.24 : Angles de cisaillement observés pour différentes profondeurs de plongée (du moins profond à gauche au plus profond à droite) (Schulze *et al.*, 2013)

Une profondeur plus importante résulte dans cette étude en un angle de cisaillement plus important, et donc potentiellement en un rayon d'enroulement de copeau plus important. Par analogie, il pourrait en être déduit qu'une progression plus importante est à l'origine d'un angle de cisaillement plus important, et donc d'un rayon d'enroulement lui aussi plus important ; le copeau créé occupera ainsi plus de volume, nécessitant une chambre à copeau plus spacieuse. L'observation expérimentale de cette augmentation de rayon d'enroulement avec la progression a été réalisée par Schulze *et al.* (2012c) sur un acier 20MnCr5 entre des progressions de 40 et 60 μm . L'influence d'un grand rayon d'enroulement de copeau sur l'effort de coupe a été observée par Mandrile *et al.* (2012). Celui-ci estime qu'une augmentation du diamètre d'enroulement est à l'origine d'un effort supplémentaire provoqué par le frottement du copeau sur la face de coupe de l'ordre de 40 %, ce qui incite de nouveau à viser une réduction de ce rayon d'enroulement.

Schulze *et al.* (2012c) a également observé une augmentation du rayon d'enroulement

de copeau avec l'augmentation de vitesse de coupe de 7 à 50 m/min. De plus, il est apparu que lors du brochage à sec, un outil revêtu TiAlN est source de copeaux plus enroulés qu'un outil AlCrN. Les mêmes essais réalisés sous huile entière mettent au jour une tendance différente, la dépendance entre diamètre d'enroulement et revêtement d'outil n'est plus aussi significative. Ces observations sont présentées sur la figure 2.25. En s'appuyant sur les résultats présentés dans la section 2.4.1 où une diminution d'effort de coupe apparaissait lors de l'utilisation d'outils revêtus TiAlN (par rapport aux outils revêtus AlCrN) il est possible de supposer que le coefficient de frottement est inférieur avec un revêtement TiAlN qu'avec AlCrN. Ainsi, la réduction du rayon d'enroulement passe par la réduction du coefficient de frottement entre l'outil et la matière, ce qui peut également être permis par une lubrification adaptée comme observé précédemment.

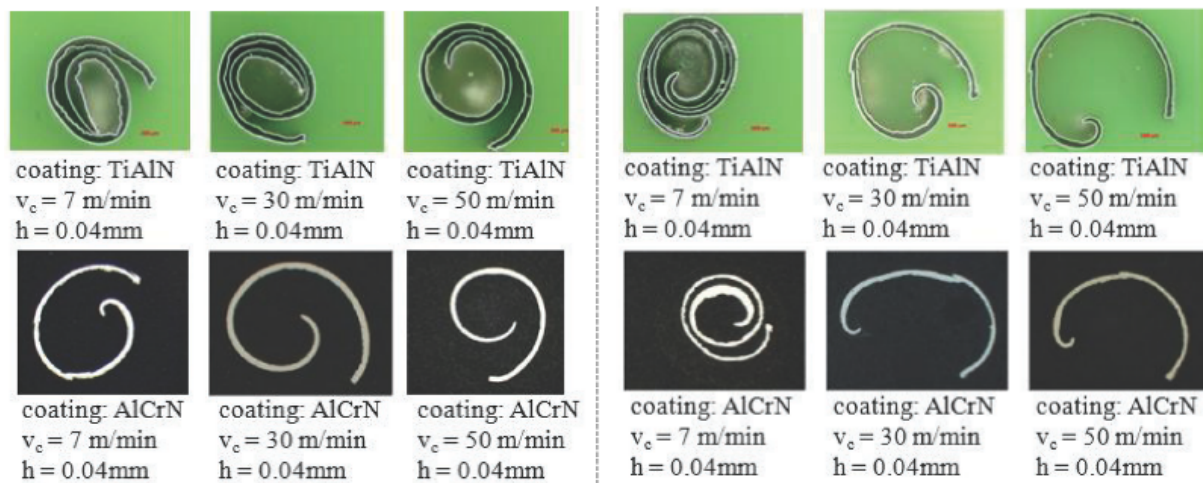


FIGURE 2.25 : Copeaux observés lors d'essais de coupe à sec (gauche) et sous huile entière (droite) (Schulze *et al.*, 2012c)

Pour finir, l'influence à la fois de la vitesse de coupe et de l'état microstructural d'un acier C45 sur les mécanismes de formation du copeau est présentée dans le Manuel Forst (C45N : normalisé, C45V : trempé-revenu). La figure 2.26 met notamment en évidence la nécessité de diminuer la vitesse de coupe en vue de diminuer l'enroulement du copeau (ce qui est favorable à une meilleure évacuation). Par ailleurs l'enroulement est également fortement dépendant de l'état microstructural, un acier C45 ayant subi un recuit doux (alors fortement concentré en ferrite) est à l'origine de copeaux peu enroulés.

Au travers des études réalisées autour de la formation du copeau, il est apparu que la génération d'un copeau continu est préférable en brochage. Pour limiter les risques de segmentation du copeau, il convient notamment de réduire son festonnage, ce qui passe par l'utilisation d'angles de coupes élevés, généralement supérieurs à 15°.

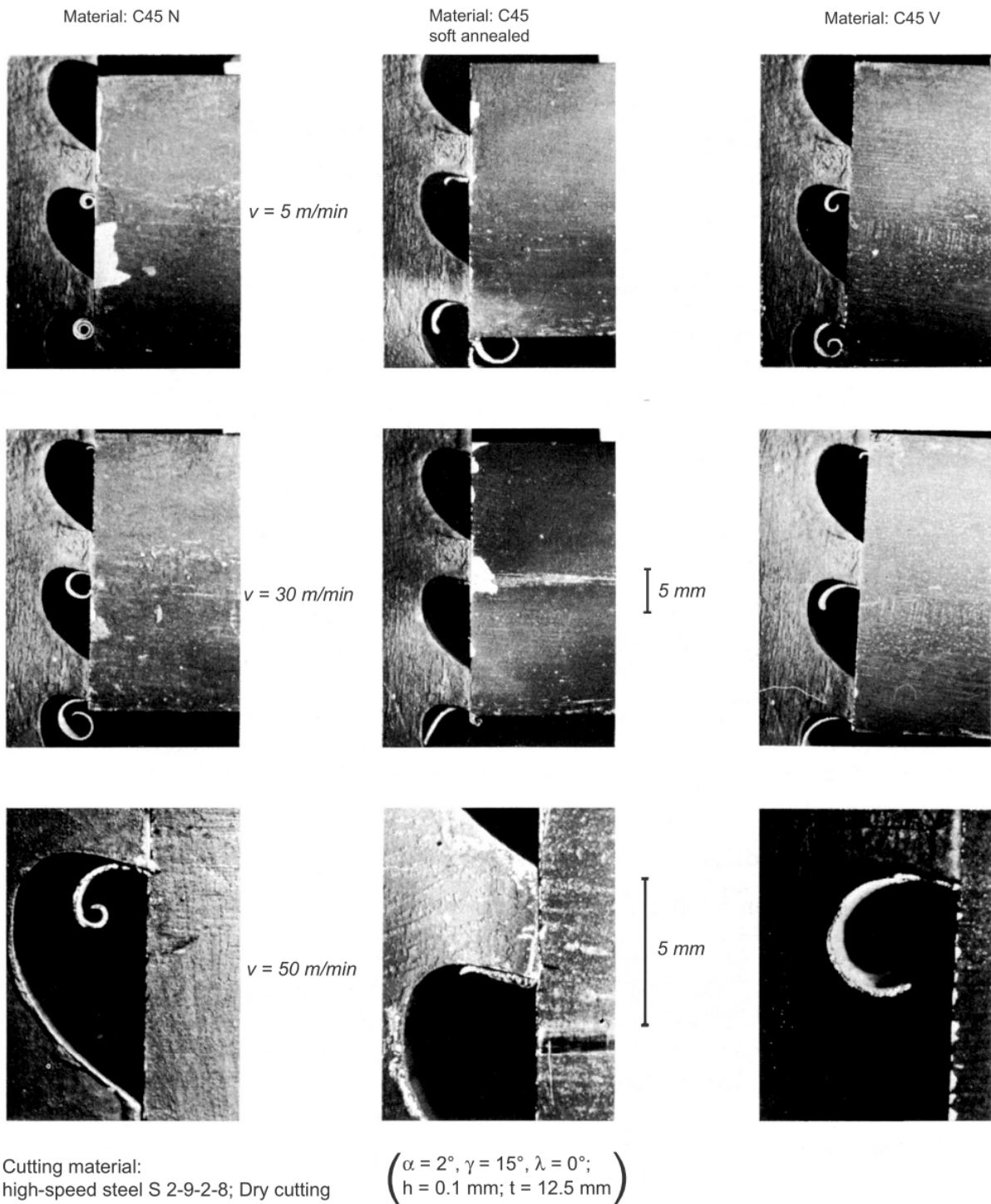


FIGURE 2.26 : Influence de la vitesse de coupe et de la microstructure sur l'enroulement de copeau (Manuel Forst)

L'obtention d'un copeau continu est essentielle pour limiter les risques de blocage susceptibles de dégrader l'état de surface. Si le blocage du copeau est un risque de premier ordre, le dimensionnement de la chambre destinée à recevoir ce copeau est également primordiale. Il est aussi à noter que le diamètre d'enroulement du copeau (directement lié au volume apparent de celui-ci après brochage), dépend notamment de la progression, de la vitesse de coupe et du frottement à l'interface outil/copeau. D'après la littérature, le copeau sera d'autant plus enroulé que la vitesse de coupe, la progression et le coefficient de frottement sont faibles. La microstructure du matériau broché a également une influence significative sur l'enroulement du copeau.

2.5.2 Optimisation de la structure de l'outil

L'optimisation de la structure de l'outil de brochage peut être à l'origine d'une réduction de son coût (réduction de longueur, méthode de travail des dents permettant une simplification des stratégies d'affûtage, etc.), ou encore de l'amélioration de la qualité des surfaces brochées.

L'enchaînement des sections de coupe d'une broche est l'un des leviers de base du fabricant de broche. Généralement, la modification de la succession des sections de coupe et progressions est réalisée par le fabricant de broche, la conception d'un nouvel outil nécessitant de réétudier systématiquement sa structure. Lorsqu'il s'agit de reproduire des profils similaires (dont les spécifications peuvent toutefois évoluer), l'utilisation de méthodes de génération d'outil automatisées peut être envisagée. L'avantage essentiel de ce type d'outil réside dans la possibilité de prendre en compte et optimiser des critères préalablement définis (progression maximale, effort de coupe, type de stratégie de brochage par zone, etc.) en un temps réduit, tout en réduisant les risques d'erreur de dimensionnement.

Ce travail a par exemple été mis en œuvre par [Vogtel et al. \(2015\)](#) pour le dimensionnement de broches destinées à la réalisation de brochages externes pied-de-sapin. Il convient alors de déterminer les critères nécessaires à l'optimisation de l'outil ainsi dimensionné. [Vogtel et al. \(2015\)](#) évoque notamment l'établissement de limites hautes et basses pour la progression, la longueur de broche, l'effort maximal sur la broche et acceptable par la machine. Ceci est rendu possible par une détermination analytique préalable de l'évolution de la pression de coupe (selon la méthode décrite par l'équation 2.1). Une fois ces éléments renseignés, de même que les dimensions du trou broché théorique et la stratégie de brochage à adopter suivant la zone de brochage (coupe une taille, puis deux tailles, puis *full-form* comme évoqué sur la figure 2.27), les sections de coupes idéales

peuvent être calculées et optimisées, ce qui sera ainsi utilisé par le fabricant de broche pour la réalisation de l'outil final .

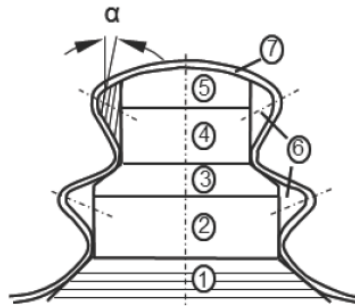


FIGURE 2.27 : Profil de brochage pied de sapin et présentation de l'ébauche (1-5), la semi-finition (6) et la finition(7) (Vogtel *et al.*, 2015)

L'optimisation des broches conventionnelles peut favoriser une réduction de leur coût de fabrication, et une rationalisation de leur conception. Cependant, il s'agit d'outils à forte valeur ajoutée car complexes et nécessitant de nombreuses opérations de fabrication faisant intervenir de nombreux corps de métier différents (métallurgie, usinage, revêtement, affûtage, etc.), ce qui a un impact aussi bien sur le prix de l'outil que sur les délais de sa fabrication. En vue de réduire les coûts de production de ces outils et de les rendre plus flexibles et accessibles, Yokoi *et al.* (1987) a étudié la viabilité d'un outil réalisé par une méthode non conventionnelle, à savoir la découpe par électro-érosion par fil de sections de broches en acier (de composition différente suivant le travail des dents considérées) qui sont ensuite assemblées pour former une broche. Le principe de réalisation est présenté sur la figure 2.28. Cette étude, bien que préliminaire, met en évidence la possibilité de réaliser des broches à façon et à prix réduit, parfaitement adaptées à certains cas d'application de très petites séries par exemple.

Dans cette sous-section, il a tout d'abord été question de l'automatisation de la conception de broches, afin d'optimiser leurs caractéristiques et à réduire leur coût de fabrication. L'objectif est dans ce cas d'améliorer la compétitivité du brochage ainsi que de fiabiliser la conception de ces outils par la systématisation de la procédure de dimensionnement. Par ailleurs, les verrous freinant le développement de l'utilisation du brochage à de petites séries voire des pièces unitaires résident dans les coûts et délais de fabrication unitaire de ces outils. Dans l'optique de lever ces verrous, des études traitent par exemple de la réalisation de broches par empilement de sections de coupes obtenues par découpe électro-érosion.

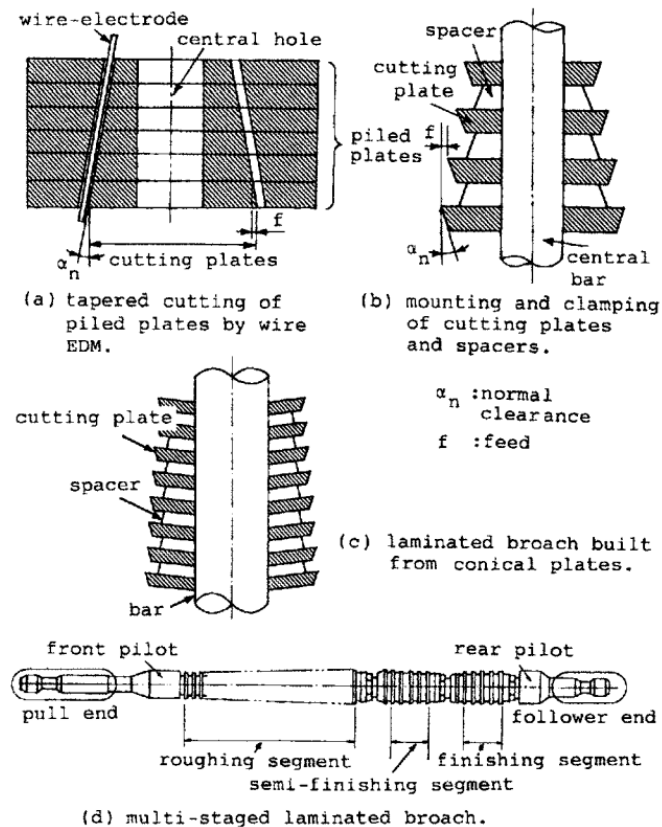


FIGURE 2.28 : Principe de réalisation d'une broche par empilage de sections découpées par électro-érosion (Yokoi *et al.*, 1987)

2.5.3 Usure de l'outil de brochage

En brochage comme dans tout procédé de coupe, la résistance à l'usure d'un outil est un critère essentiel, pouvant même être imposée contractuellement par l'utilisateur auprès du fabricant de broches. Ceci se traduit par exemple par un nombre de cycles de brochage minimum. En usinage, la plupart des modèles de simulation de l'usure d'outil sont dépendants des chargements thermomécaniques appliqués sur l'outil (température, pression, etc). Un résumé des différents modèles d'usure courants est notamment proposé par (Yen *et al.*, 2004). En brochage, les très faibles vitesses de coupe et progressions associées aux angles de coupe très positifs sont à l'origine de modes d'usure particuliers. Mo *et al.* (2005) a par exemple étudié l'évolution de l'usure d'outil lors du brochage d'alliages de nickel et de titane au moyen d'outils en acier rapide dans deux conditions ; une première peu sollicitante (angle de coupe élevé, faibles vitesses et progressions) et une seconde plus sévère. Aucun écart significatif d'usure entre ces deux conditions n'a été mis en évidence. Cependant, l'analyse de la dépouille des dents de brochage après usure dans un alliage nickel révèle la distinction de trois zones (figure 2.29 gauche) :

- Très proche de l'arête, le matériau d'outil est usé mais les efforts tangentiels élevés dans cette zone ne permettent pas au Nickel d'adhérer à l'outil ;
- En s'éloignant légèrement, on retrouve une zone de forte adhésion du Nickel sur l'outil, avec une bande de dépôt de nickel ;
- La dernière zone correspond au matériau n'étant pas entré en contact avec la matière, et donc non usé.

Dans le cas de l'alliage de Titane, l'adhésion du matériau broché sur l'outil est moins importante ; on retrouve seulement quelques zones très localisées d'adhésion de la matière sur la face de dépouille de l'outil (figure 2.29 droite).

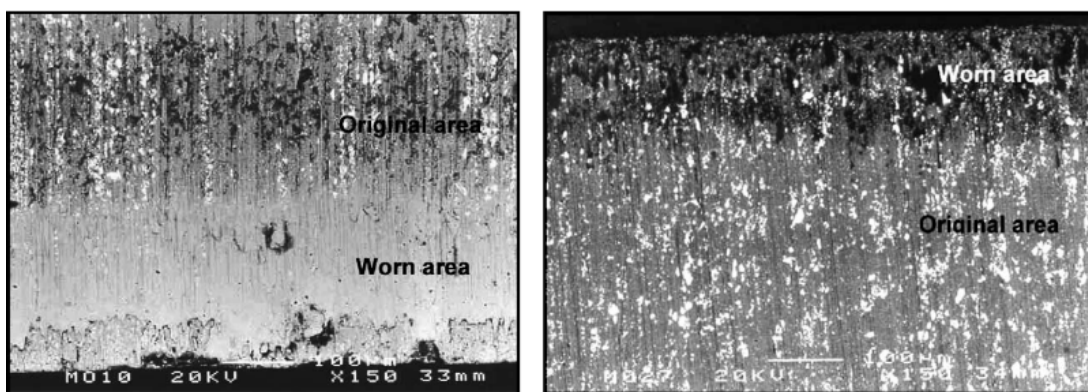


FIGURE 2.29 : Image MEB de la dépouille d'un outil après essais d'usure sur alliage de nickel (gauche) et de titane (droite) (Mo *et al.*, 2005)

Si peu d'influence des conditions de chargement sur l'usure d'outil n'a été observée dans cette étude, Weule *et al.* (2005) a quant à lui mis en évidence des tendances d'évolution d'usure différentes lors du brochage d'acier XC48 pour deux vitesses de coupe différentes, au moyen d'outils en acier rapide (cf. figure 2.30). Notons que les vitesses utilisées correspondent à la plage haute des vitesses rencontrées en brochage.

Ainsi, au cours des 5 premiers mètres brochés, l'usure est très rapide à basse vitesse de coupe, puis cette vitesse d'usure diminue et se stabilise jusqu'à environ 70 mètres de brochage avant d'augmenter de nouveau. En revanche, la vitesse d'usure à haute vitesse de coupe est constante, et globalement plus importante à 80 m/min qu'à 30 m/min. Ceci prouve que les mécanismes d'usure en jeu à basse vitesse sont différents de ceux rencontrés à haute vitesse.

Le Manuel Forst présente la comparaison des niveaux d'usure observés lors du brochage au moyen d'outils en acier rapide et en carbure. Il apparaît ainsi qu'un outil carbure présente des niveaux d'usure bien inférieurs malgré une vitesse d'usure plus importante pour l'outil carbure à partir d'environ 70 mètres brochés (cf. figure 2.31).

Afin de limiter l'influence de l'usure, trois niveaux peuvent être considérés. Le premier

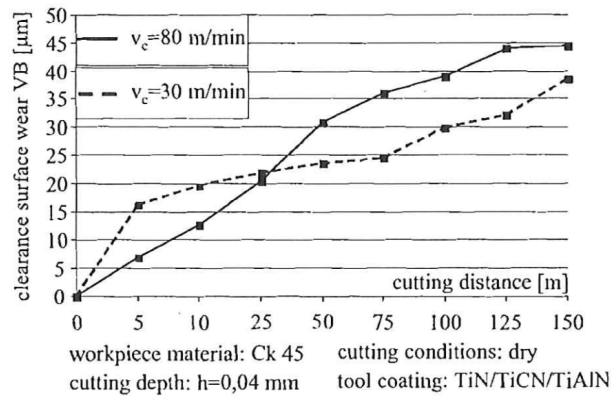


FIGURE 2.30 : Courbes d'usure en dépouille d'un outil acier rapide pour deux vitesses de coupe (Weule *et al.*, 2005)

situé en amont consiste en l'étude des paramètres influents sur l'usure et à l'optimisation de ces paramètres lors d'essais expérimentaux de référence, puis à l'extrapolation de ces résultats sur les broches de production. C'est ce niveau d'étude dont il est question dans les quelques paragraphes précédents. Le second niveau concerne la surveillance des indicateurs physiques (évoqués dans la section 2.4) en vue de détecter en situation de production les signes de cette usure. Un troisième niveau concerne le suivi en temps réel et en situation de production du niveau d'usure. Si ceci s'avère envisageable avec les procédés ne mobilisant qu'une arête de coupe, la multiplicité des dents et de leur forme observée en brochage rend ce suivi particulièrement complexe. De plus, les critères d'usure qui sont généralement utilisés en usinage présentent de fortes variabilités, associées aussi bien aux méthodes et moyens de mesure qu'à la sensibilité même de l'opérateur réalisant la mesure.

Afin de rendre la systématisation du suivi de l'usure d'outils broche en situation de production, Loizou *et al.* (2015) propose l'utilisation d'un critère d'usure différent de l'usure en dépouille VB généralement utilisé pour la caractérisation d'usure en usinage ; la mesure de l'aire usée. En effet, les différents essais réalisés mettent en évidence une bien meilleure stabilité et répétabilité de ce critère d'aire usée par rapport au VB.

Un banc de mesure optique adapté aux broches a été développé et est présenté dans ce travail. Le dispositif ainsi mis en œuvre consiste en l'utilisation d'une caméra haute résolution associée à un objectif télécentrique. Cela permet d'obtenir une image de la dépouille d'une dent spécifique. Cette image est ensuite redimensionnée précisément afin d'identifier la position de l'arête, puis filtrée, passée en niveaux de gris et nettoyée, en vue de pouvoir extraire l'aire usée.

Notons également le développement de méthodes de prédiction de l'usure des broches basées sur des techniques nouvelles de modélisation par apprentissage automatique (Shi *et Gindy*, 2007). La comparaison des résultats issus de cette méthode de prédiction avec

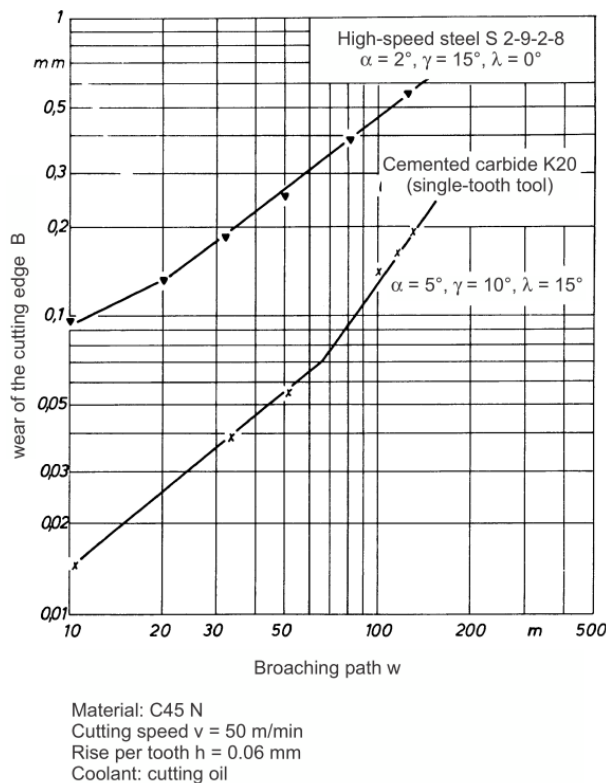


FIGURE 2.31 : niveaux d'usure observés pour un outil acier rapide et carbure (Manuel Forst)

ceux obtenus expérimentalement met en évidence une fiabilité très importante du modèle ainsi développé.

Au travers de la présentation de ces quelques études traitant de l'usure en brochage, trois niveaux d'analyse ont été dissociés.

Il est tout d'abord possible d'observer l'évolution de cette usure en amont de l'opération de production, sur banc d'essai, et d'extrapoler les résultats aux conditions opératoires industrielles. Les études ainsi réalisées mettent en évidence une faible influence de la sévérité des conditions de coupe (vitesses, progression, angle de coupe, etc.) sur la vitesse d'évolution de l'usure. D'autres observent cependant une vitesse d'usure plus importante lors de l'utilisation de vitesses de coupe plus élevées. De plus, les durées de vie d'outils carbure apparaissent bien supérieures à celles d'outils en acier rapide.

La maîtrise de l'usure peut également passer par le suivi d'indicateurs physiques tels que les efforts, les vibrations ou la température, afin d'identifier des niveaux critiques signes d'une usure trop importante, devant entraîner un changement ou un réaffûtage de l'outil.

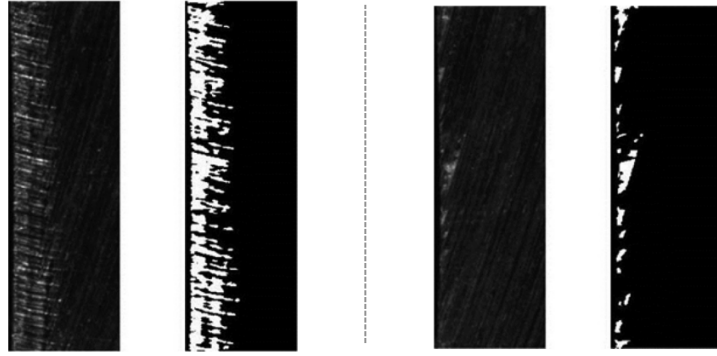


FIGURE 2.32 : Relevés optiques de la face de dépouille de dents de brochage et identification d'images binaires pour relevé d'aire usée (zone claire) (Loizou *et al.*, 2015)

Pour les cas où l'usure d'outil est un facteur de premier ordre, un contrôle en situation de production de cette usure peut être envisagé. Au vu de la complexité de cette tâche (nombre conséquent de dents à géométrie variable, etc.), des outils de mesure spéciaux et automatisés ont été développés, s'appuyant sur la mesure d'aire d'usure dérivée de la mesure du VB, mais permettant une meilleure répétabilité et représentativité de l'usure de l'outil. Ces méthodes de détection pourront à l'avenir s'appuyer sur des modèles de plus en plus fiables de prédiction des vitesses d'usure pour détecter par exemple une usure anormalement rapide, pouvant résulter de défauts de conception d'outils, de composition de matériaux, etc.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une synthèse des résultats issus des études traitant du brochage a été proposée. Un certain nombre d'observations ont pu être réalisées en fonction des différents paramètres de sortie étudiés. Ainsi, une amélioration de rugosité résulte généralement d'une augmentation d'angle de coupe, ou de vitesse de coupe. Les résultats obtenus à très basse vitesse (< 5 m/min) sont quant à eux très variables et dépendants des conditions opératoires (matériau et état microstructural, revêtement, lubrification, etc.). Les mécanismes à l'origine de telles variations d'état de surface à basse vitesse de coupe restent mal compris.

En ce qui concerne l'enroulement de copeau dont la compréhension est essentielle au fonctionnement des outils de brochage, un certain nombre de tendances ont pu être mises en évidence. Ainsi, une augmentation de progression tend à augmenter le rayon d'enroulement des copeaux générés. De même, une vitesse de coupe plus élevée sera à

l'origine de copeaux moins enroulés. Cependant, les plages de vitesse étudiées restent élevées (> 7 m/min) et les mécanismes responsables de cet enroulement mal maîtrisés.

Par ailleurs, les résultats observés sont très dépendants du matériau broché et des conditions opératoires, chaque opération de brochage possède donc des spécificités propres. Ainsi, une étude des mécanismes de coupe en brochage influençant aussi bien les résultats d'état de surface que la formation du copeau a été menée sur un inox ferrito-martensitique Z10C13. Ce dernier est en effet utilisé par la société AREVA pour la réalisation de plaques entretoises de générateur de vapeur.

Cette étude – présentée dans le chapitre suivant – vise notamment à améliorer la compréhension fondamentale des mécanismes de coupe en jeu lors du travail d'une dent élémentaire de brochage, dans des conditions similaires à celles utilisées industriellement.

Étude et amélioration du brochage des plaques entretoises

Chapitre 3

Étude élémentaire de la coupe en brochage

Sommaire

3.1	Introduction	90
3.1.1	Contexte : le brochage des plaques entretoises	90
3.1.2	Problématique industrielle	95
3.1.3	Banc de brochage	97
3.1.4	Démarche adoptée pour l'étude expérimentale de la coupe	100
3.2	Étude de l'état de surface sur banc de brochage	102
3.2.1	Vitesse de coupe	102
3.2.2	Outil : la progression	107
3.2.3	Outil : les angles de denture	112
3.2.4	Outil : le substrat	118
3.2.5	Lubrification	121
3.2.6	Matériau broché	130
3.2.7	Conclusion sur l'étude de l'état de surface	136
3.3	Formation du copeau	136
3.3.1	Diamètre d'enroulement	137
3.3.2	Taux de compression de copeau	143
3.3.3	Formation du copeau et efforts de coupe	146
3.3.4	Conclusion sur l'étude de la formation du copeau	152
3.4	Conclusion	152

3.1 Introduction

3.1.1 Contexte : le brochage des plaques entretoises

Comme il l'a été évoqué en introduction de ce document, le brochage est utilisé par la société AREVA pour la réalisation des plaques entretoises de générateurs de vapeur.

Si ce procédé est mis en œuvre pour la réalisation de l'une des opérations essentielles de la fabrication d'une plaque entretoise, un certain nombre d'étapes en amont et en aval de celle-ci doivent également être maîtrisées afin d'obtenir une qualité de produit optimale. La première d'entre elles consiste en la formulation de l'acier utilisé pour ces plaques, et en sa mise en forme. C'est actuellement l'usine ARCELOR MITTAL située au Creusot qui fournit les disques d'inox qui seront utilisés pour la réalisation de ces plaques entretoises.

La réalisation de ces disques se déroule en plusieurs étapes :

1. L'acier est tout d'abord élaboré par voie électrique et affiné par VOD (*Vacuum Oxygen Decarburization*). Cette opération est suivie d'une analyse de la coulée produite ;
2. L'acier est ensuite chauffé puis laminé ;
3. L'étape suivante consiste en un traitement thermique de trempe + revenu de la plaque obtenue. Une austénitisation à des températures comprises entre 960 et 1050 °C est d'abord effectuée, suivie d'un maintien pendant 30 minutes avant refroidissement à l'eau. Le revenu est quant à lui réalisé à des températures comprises entre 715 et 770 °C, maintenu pendant 2 heures et refroidi à l'air ;
4. S'en suit une série d'opérations destinées à améliorer l'état de surface de la plaque. Un grenailage, puis un meulage et enfin un polissage permettent de limiter la rugosité moyenne Ra à un maximum de 6.3 μm ;
5. À ce stade, un contrôle ultrason complet de la plaque est réalisé, avant que les disques ne soient découpés aux dimensions définies dans le cahier des charges ;
6. Pour finir, un contrôle par ressuage est effectué avant lustrage complet de la plaque. Différents contrôles de conformité sont également réalisés avant emballage et expédition.

Ces plaques entretoises sont réalisées dans un acier inoxydable Z10C13. Le traitement thermique de trempe+revenu, associé à l'opération de laminage donne à cet acier une structure bi-phasée de bandes de ferrite comprises au sein d'une matrice martensitique. Une micrographie de cet acier est présentée sur la figure 3.1.

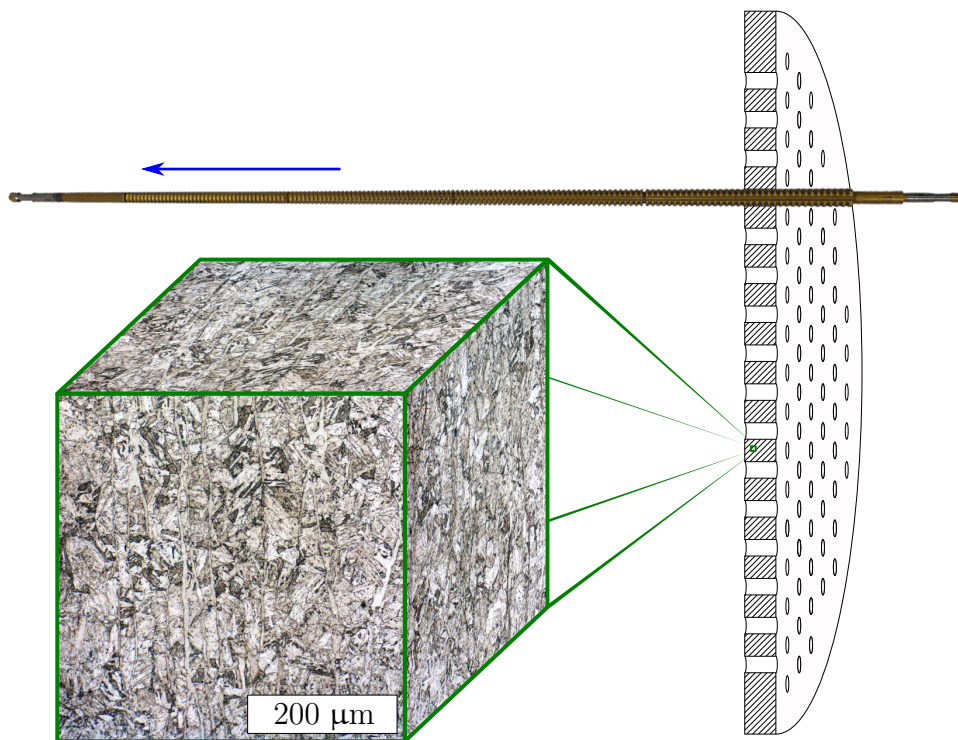


FIGURE 3.1 : Microstructure de l'inox Z10C13 au sein des plaques entretoises

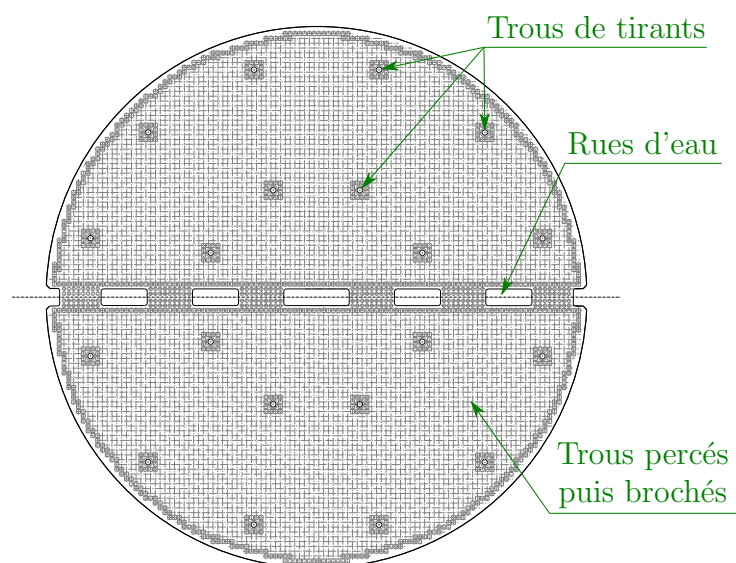


FIGURE 3.2 : Structure générale d'une plaque entretoise

Une fois réceptionnées à l'usine AREVA de Chalon/Saint-Marcel, les plaques sont d'abord contrôlées. La première étape consiste à percer les trous de tirants (figure 3.2) qui seront utilisés pour la fixation de la plaque (non brochés). Puis les trous destinés à recevoir les faisceaux de tubes sont percés avant d'être brochés.

S'en suit une étape de brossage robotisé de chacune des deux faces de la plaque, visant à éliminer les bavures issues du brochage. Une photographie des brosses mises en œuvre pour la réalisation de cette étape est présentée sur la figure 3.3. Le diamètre extérieur des plaques est ensuite fraisé de même que les zones de rue d'eau à l'intérieur des plaques, schématisées sur la figure 3.2. Pour finir ces plaques sont inspectées et nettoyées.



FIGURE 3.3 : Brosse rotative pour ébavurage après brochage

En ce qui concerne l'opération de brochage en elle-même, deux postes équipés chacun de deux stations de brochage horizontal (du type de celle présentée sur la figure 3.4) sont utilisés.



FIGURE 3.4 : Station de brochage composée de 3 broches travaillant simultanément

Les plaques sont indexées par l'intermédiaire de pignes, et serrées sur un portique se déplaçant d'une station à l'autre d'un même poste de brochage. Dans un premier temps, seule la partie inférieure de la plaque est brochée. La première station de brochage traite une moitié de cette demi-plaque alors que la seconde traite la moitié restante. Une fois

la demi-plaque brochée, la plaque est retournée en vue de brocher l'autre moitié selon le principe décrit précédemment. Lorsqu'une brocheuse est en situation d'usinage, la seconde ramène les broches en position initiale, en attendant que la plaque soit de nouveau positionnée sur cette brocheuse. La figure 3.5 présente les deux stations équipant l'un des deux postes de brochage présents dans l'usine de Saint-Marcel.

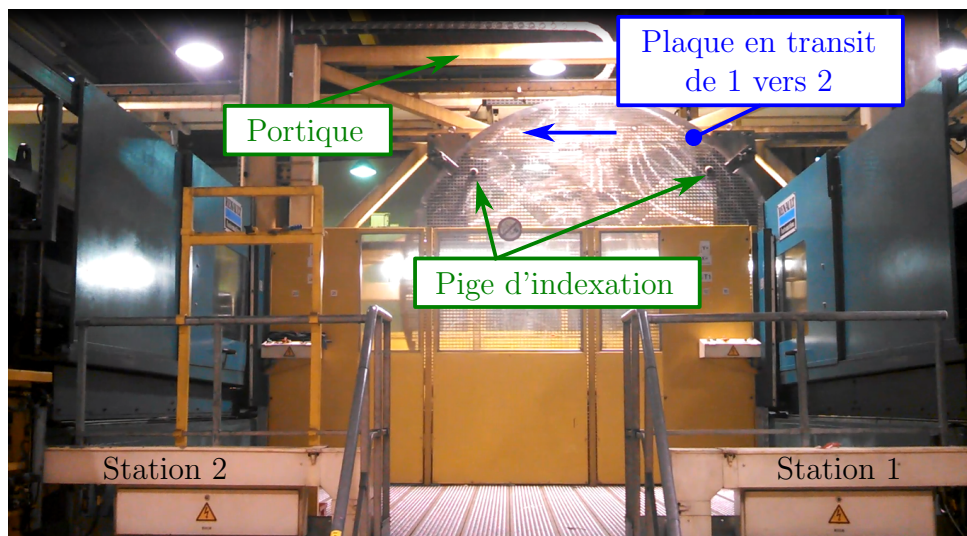


FIGURE 3.5 : Plaque en transit entre les stations 1 et 2 d'un même poste de brochage

Lors du brochage, un flux constant d'huile entière est versé sur les broches, en amont et en aval de la plaque au niveau des mors de serrage de la plaque. Il s'agit notamment d'assurer la lubrification de la zone de coupe et l'évacuation des copeaux. L'huile entière Houghton Cutmax 1529 FR4 est utilisée au cours de cette opération. Un système de filtration de l'huile non climatisé confère un seuil de filtration à $165\ \mu\text{m}$.

Si la progression peut varier de seulement quelques microns à $80\ \mu\text{m}$ (localement en considérant les brise-copeaux), la vitesse de coupe est fixée à $2.5\ \text{m/min}$, les machines utilisées étant limitées à $8\ \text{m/min}$.

Une attention particulière peut également être apportée aux outils de coupe utilisés pour cette opération. Au vu des problématiques industrielles à l'initiative de ce travail de thèse, l'analyse a été concentrée sur les outils possédant un profil quadri-folié, dont un plan est proposé en annexe B. Ces outils se composent de 153 dents travaillant par enveloppe, et possédant un profil très variable. Leur longueur totale est de l'ordre de 1,65 mètres. Réalisés en acier rapide M35, ils sont revêtus TiN en dépouille uniquement.

On peut distinguer plusieurs types de dents caractéristiques, présentés sur la figure 3.6 :

- Les premières dents de type 1 sont circulaires, et permettent d'augmenter le diamètre du trou issu du perçage ;

- Alors que la progression radiale se poursuit, un méplat apparaît sur les dents, permettant de réaliser la portée de tube. La portée de tube est ainsi réalisée par la dernière dent de type 2, plusieurs dents de mêmes dimensions (dents de réserve ou de calibration) sont positionnées à la suite ;
- À ce stade, les dents de type 3 puis 4 réalisent les flancs de feuillure. Si l'arête de coupe principale creuse la feuillure, la seule zone de la dent en contact avec la surface finale de la feuillure se situe au niveau du rayon de raccordement d'arête. Cette zone particulièrement sensible est située à l'intersection entre face de dépouille, flanc et face de coupe ;
- Pour finir, l'arête principale de la dernière dent de type 5 réalise le fond de feuillure, suivi d'une série de dents de réserve.

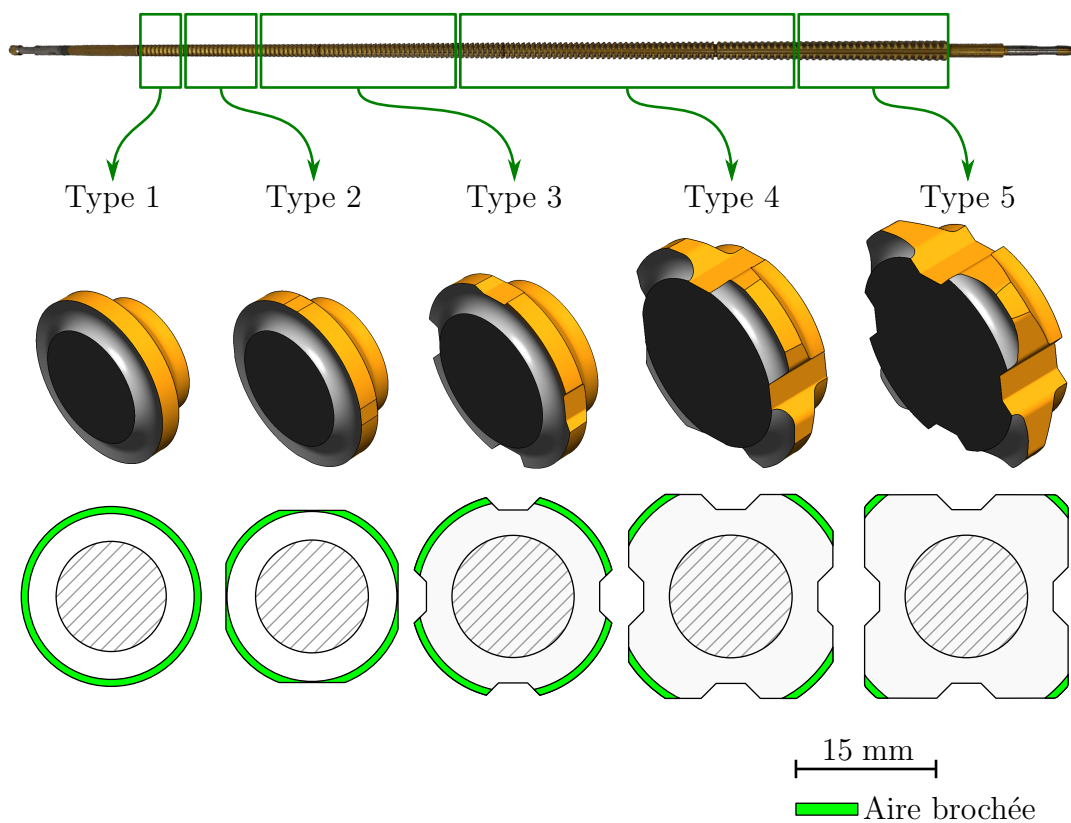


FIGURE 3.6 : Dents de broches types et schématisation des aires brochées correspondantes

Une vue en coupe présentant les dimensions d'une portion de broche utilisée en production par AREVA est présentée sur la figure 3.7.

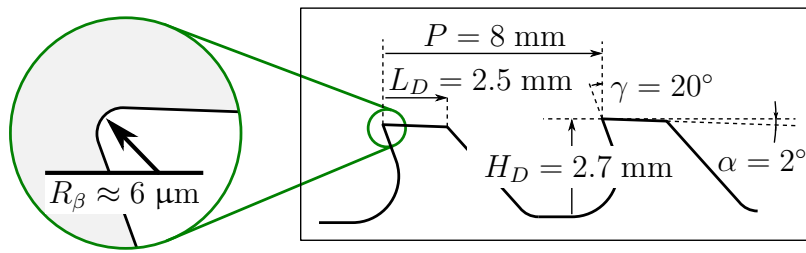


FIGURE 3.7 : Dimensions des dents de brochage couramment utilisées pour le brochage des plaques entretoises

3.1.2 Problématique industrielle

Dans notre cas d'étude, le brochage concerne donc des pièces fines et de grandes dimensions, sur lesquelles un enlèvement de matière conséquent est réalisé (plus de 45% entre la réception de la plaque et l'opération finale), modifiant en temps réel la structure et donc la rigidité de la pièce. Les outils utilisés pour réaliser cette opération de brochage sont pourvus d'un rapport longueur/diamètre de base particulièrement élevé (de l'ordre de 1000), ce qui leur confère une souplesse importante. Ceux-ci contiennent un nombre conséquent d'arêtes de coupe, possédant toutes des géométries et caractéristiques propres et nécessitant un soin de conception et de réalisation particulièrement élevés au vu des précisions dimensionnelles nécessaires (faibles progressions, faibles angles de dépouilles, etc.).

L'accumulation des spécificités ainsi présentées fait de l'étude du procédé de brochage un problème complexe et multi-factoriel. Il est nécessaire de se concentrer dans un premier temps sur les objectifs visés par cette étude élémentaire. Industriellement, un certain nombre de défauts d'état de surface ont pu être observés, une classification de ces derniers est présentée sur la figure 3.8.

Une distinction est faite entre l'état de surface obtenu sur les portées de tube, et sur les feuillures. En effet, le contact liant les tubes à leurs portées fait de la maîtrise de l'état de surface sur portée de tube un paramètre fonctionnel essentiel. L'état de surface sur les feuillures est quant à lui moins déterminant, bien que des défauts importants puissent également être source de reprises ou rebuts.

Ainsi, le critère essentiel au centre de ce travail est la qualité de surface. Cette dernière est évaluée dans un premier temps de façon qualitative par une observations visuelle similaire à celle réalisée industriellement. Puis un certain nombre de critères d'état de surface sont caractérisés, avant de se concentrer sur la notion de rugosité arithmétique R_a , qui est à l'heure actuelle le seul critère utilisé industriellement (le R_a admissible étant fixé à $3.2 \mu\text{m}$). Finalement, l'influence d'un certain nombre de paramètres sur les résultats d'état de surface est étudiée, et des tendances d'évolution de cette dernière en lien avec

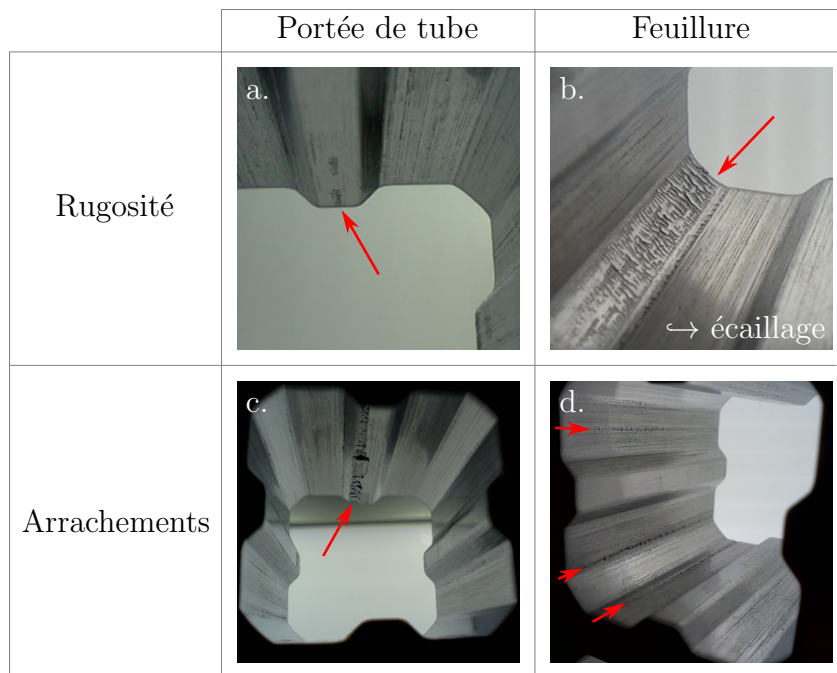


FIGURE 3.8 : Différents défauts d'état de surface observés sur les cellules brochées

les phénomènes physiques intervenant lors de la coupe sont identifiées.

Au cours des différentes investigations entreprises dans ce travail, une corrélation forte entre les résultats d'état de surface et de formation de copeau a été mise en évidence. Ainsi, la maîtrise de la formation et de l'enroulement du copeau constitue également un verrou industriel de premier ordre. La seconde partie de ce chapitre traite donc de la caractérisation de la formation et de l'enroulement du copeau, en s'appuyant sur des indicateurs tels que le taux d'enroulement de copeau ou l'angle de cisaillement primaire.

Les deux axes d'étude que représentent l'état de surface et l'enroulement du copeau ayant été mis en évidence, un outil expérimental spécifique devait être mis en place. Celui-ci devait permettre d'étudier la coupe à l'échelle mésoscopique. Il s'agissait ainsi d'éliminer l'interaction issue du travail simultané de plusieurs dents, pouvant être à l'origine de vibrations ou de brefs écarts géométriques comme évoqué dans l'état de l'art. Il devait également permettre l'utilisation d'une géométrie d'arête simple qui serait à l'origine d'une unique direction de formation de copeau (donc une arête droite plus large que la surface brochée). Par ailleurs, il était nécessaire que cet outil expérimental soit en mesure de reproduire les résultats obtenus dans les conditions de mise en œuvre industrielles d'AREVA. L'outil expérimental ainsi développé est présenté dans la sous-section suivante.

3.1.3 Banc de brochage

Afin de réaliser l'étude élémentaire des mécanismes de coupe, un montage spécial schématisé sur la figure 3.9 a été conçu et adapté sur un centre d'usinage 4 axes à broche horizontale *Météor 5* présenté sur la figure 3.10, fabriqué par la société PCI-SCHEM.

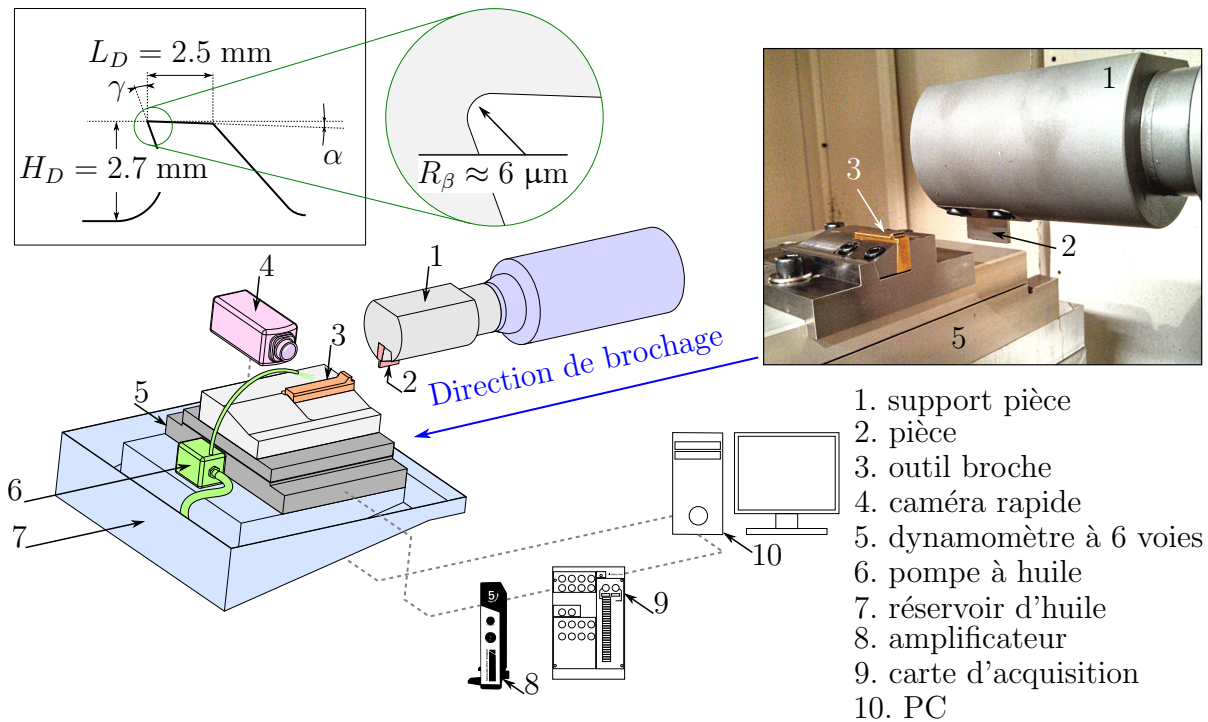


FIGURE 3.9 : Schématisation du banc de brochage

Un support matière spécialement développé est ainsi disposé sur l'électro-broche, alors que la table est équipée d'une platine d'effort à jauges de déformation 6 composantes de type MC12-4000 fabriquée par la société PM-instrumentation, sur laquelle est monté le porte-outil. Ce type de platine a été sélectionné pour ses capacités importantes, cette dernière étant en mesure de supporter un effort de 9 000 N dans la direction de coupe, et jusqu'à 18 000 N dans la direction de la progression. Notons que le centre d'usinage utilisé est en mesure de supporter des efforts pouvant atteindre 5 000 N dans chacune des directions.

Les attachements de l'outil et de l'éprouvette sont similaires, en vue d'être en mesure de les intervertir le cas échéant (en fonction de la zone d'observation privilégiée, ou du type de lubrification). Une vitesse de brochage élevée de 80 m/min est permise par ce dispositif.

Un système fermé de circulation d'huile entière a été adapté à ce banc d'essai pour éviter le contact de l'huile avec le circuit d'approvisionnement de lubrification de la machine. En effet, le centre d'usinage est conçu pour fonctionner sous émulsion, l'utilisation



FIGURE 3.10 : Photo du centre d'usinage *Météor 5* utilisé pour les essais de brochage

d'huile entière pourrait donc endommager les flexibles et joints. Une pompe à membrane a également été adaptée afin de faire circuler l'huile entière du bac d'huile vers la zone de coupe.

Ce banc peut mettre en œuvre des outils composés de 1 à 5 dents, dont la géométrie, le substrat, le revêtement, etc. peuvent être modifiés à moindre coût. L'objectif privilégié dans ce travail résidait dans la caractérisation des mécanismes de coupe induits par un outil simple et élémentaire. Pour ce faire, un outil muni d'une seule dent à l'arête de coupe rectiligne dont le profil (décrit sur la figure 3.9) est identique à celui mis en œuvre industriellement a été utilisé. Au même titre que les outils AREVA, celui-ci a été intégralement revêtu TiN par PVD, puis réaffûté en face de coupe. La largeur de l'outil est de 9 mm, alors que la largeur de la zone brochée de l'échantillon (assimilable à a_P) est de 3 mm, ce qui permet de n'utiliser que l'arête de coupe principale au cours des essais expérimentaux, et garantit une seule direction de formation du copeau.

Ce banc a ensuite été qualifié afin d'identifier sa capacité à reproduire les résultats obtenus industriellement sur les brocheuses de production AREVA. Les résultats d'effort spécifique de coupe obtenus sur ce banc ont donc été comparés à ceux obtenus en production. Une très bonne corrélation entre ces efforts a ainsi été observée, comme présenté sur la figure 3.11. Ceci permet de valider la pertinence de l'utilisation de ce banc pour la représentation des efforts de coupe obtenus industriellement. La méthode utilisée pour l'identification de ces données est discutée ultérieurement dans ce mémoire.

Les états de surfaces obtenus au niveau des portées de tubes ont également été comparés à ceux issus d'essais réalisés sur le banc de brochage dans des conditions similaires (vitesse de coupe $V_c = 2.5$ m/min, $h = 10$ μ m). Ceux-ci ont été obtenus par l'intermédiaire

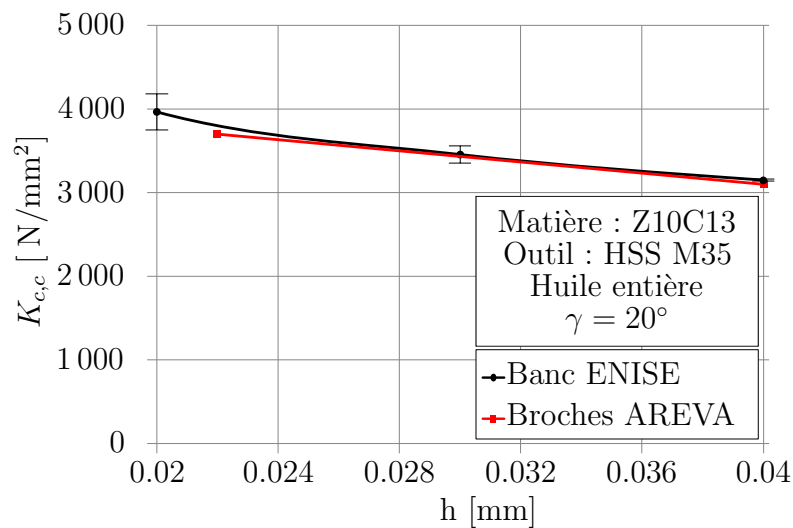


FIGURE 3.11 : Comparaison des efforts spécifiques de coupe obtenus sur banc de brochage et sur brocheuses industrielles

d'un microscope confocal avec un facteur de grossissement de 10 et une longueur de coupe de 0.8 mm. Une bonne corrélation entre les différents critères de rugosité observés est ainsi visible sur la figure 3.12.

Ainsi, en plus des efforts de brochage, la pertinence de l'utilisation de ce banc pour la mesure d'état de surface a été validée. Notons que la représentativité de ces mesures est meilleure dans la direction parallèle au déplacement de l'outil. Ceci est essentiellement imputable à une longueur de mesure plus importante. En d'autres termes, les écarts observés perpendiculairement sont probablement davantage imputables à la précision de mesure qu'à la représentativité du banc de brochage.

Des mesures de rigidité de ce banc ont également été réalisées. En usinage, la rigidité d'une machine est considérée très importante au-delà de 400 N/ μ m (Toenshoff et Denkena, 2013), et faible en dessous de 20 N/ μ m (Lalanne et Ferraris, 1998). Dans notre cas, les mesures ont mis au jour une rigidité réduite comprise entre 11 et 18 N/ μ m, la présentation de la méthode d'obtention de ces valeurs est présentée en Annexe C. Ainsi, cette faible rigidité a dû être prise en compte lors des essais, notamment par la réalisation systématique de trois opérations de brochage dans des conditions similaires avant toute mesure, en vue de stabiliser efforts et mécanismes de coupe. Les mesures sont effectuées sur 5 essais répétés dans les mêmes conditions, faisant suite à cette étape de stabilisation. Ainsi, la variabilité issue éventuellement de cette faible rigidité peut être limitée.

Les éléments faisant l'objet d'une étude dans la suite de ce chapitre ont ainsi été détaillés (état de surface, formation et enroulement du copeau) de même que le moyen expérimental qui sera mis en œuvre. La sous-section suivante vise à présenter la démarche adoptée pour mener à bien l'étude des paramètres précédemment évoqués.

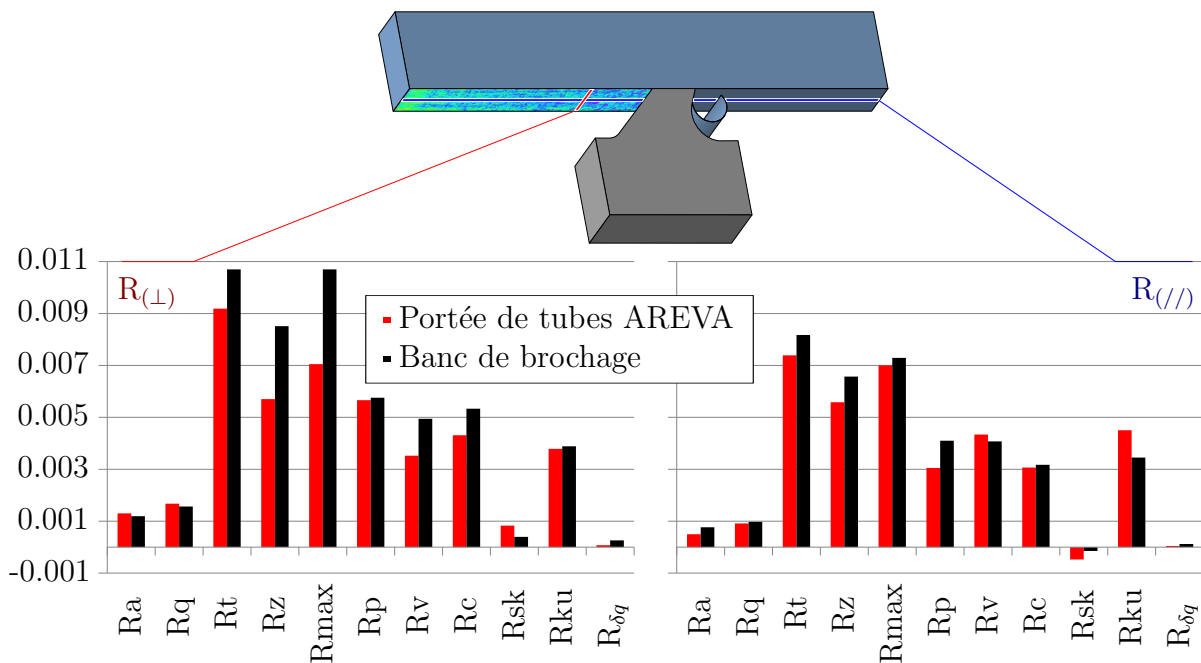


FIGURE 3.12 : Comparaison des rugosités obtenues sur portées de tubes brochées en production, et sur banc de brochage dans deux directions différentes

3.1.4 Démarche adoptée pour l'étude expérimentale de la coupe

Afin d'étudier les deux verrous que représentent l'état de surface et la formation et l'évacuation du copeau, plusieurs axes de travail ont été identifiés. Certains d'entre eux sont traités d'un point de vue industriel, alors que d'autres ont été étudiés au moyen d'une approche scientifique en laboratoire. Afin d'ordonner et prioriser les éléments d'études, la classification des différentes variables d'entrée de l'opération de brochage mise en évidence au début du chapitre 2 a été considérée. Un niveau supplémentaire de classification a été ajouté à cette précédente représentation, afin de prendre également en considération la notion de difficulté de variation de chacun de ces paramètres, d'un point de vue industriel. Le classement ainsi établi des différents paramètres d'entrée du procédé de brochage est présenté sur la figure 3.13.

Finalement, en se basant sur cette nouvelle classification pour l'étude de l'état de surface, l'influence de la vitesse de coupe a été étudiée dans un premier temps, ce paramètre étant le seul modifiable directement au pied de la machine par l'opérateur. Le second paramètre par ordre de facilité de variation concerne l'outil et sa conception. Ainsi, l'influence de la variation de la progression, des angles de l'outil ainsi que du substrat de cet outil a été caractérisée. Industriellement, changer d'huile de coupe peut être très coûteux

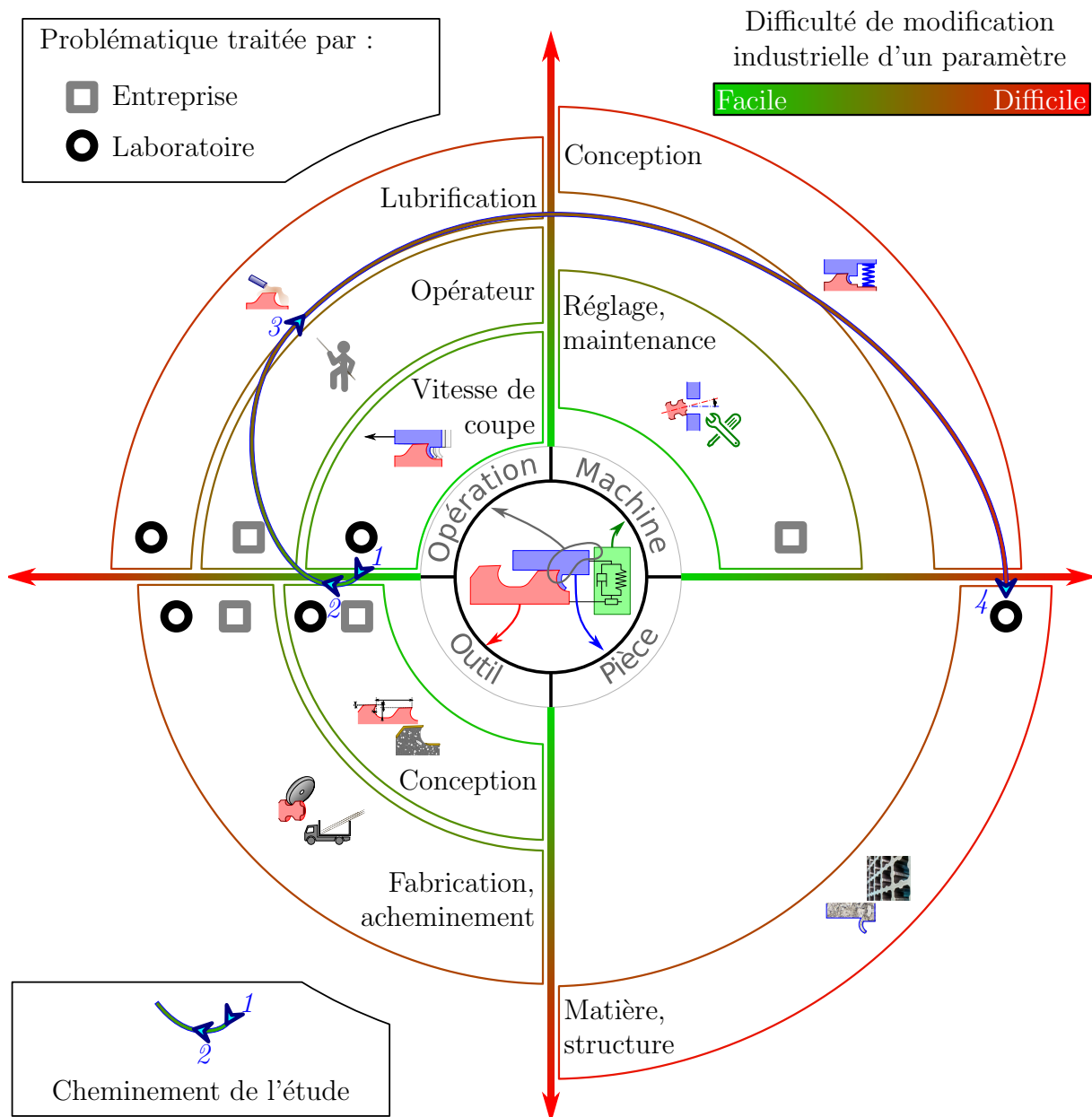


FIGURE 3.13 : Problématiques scientifiques et industrielles du brochage et qualification de leurs complexités

et complexe, de grandes quantités étant impliquées. Cette décision doit alors être motivée par un gain potentiel substantiel, c'est pourquoi le type d'huile utilisée, de même que la méthode même de lubrification ont été étudiés en troisième position. L'étude se clôt sur la présentation de l'influence du matériau de la pièce brochée, la modification de la composition du matériau broché pour des considérations d'usinabilité n'étant envisagée que dans de très rares cas d'application.

3.2 Étude de l'état de surface sur banc de brochage

La maîtrise de l'état de surface est un critère de référence du point de vue industriel dans la mesure où il peut être aisément mesuré au travers d'indicateurs comme la rugosité arithmétique R_a . Cette maîtrise passe nécessairement par une compréhension des mécanismes à l'origine de la variation des indicateurs définissant cet état de surface. Ceci est notamment visible au travers de la proportion de publications traitant de cette thématique dans le cas d'une opération de brochage (Meier *et al.*, 2014; Mo *et al.*, 2005; Zanger *et al.*, 2014). Cependant, toutes ces études ne balayent généralement que quelques conditions de coupe, lors du brochage d'un matériau spécifique, rendant délicate l'extrapolation à des cas d'études tels que celui traité dans ce document.

En vue de faire un pas vers la compréhension des mécanismes responsables des défauts de surface précédemment référencés, l'influence d'un grand nombre de paramètres sur une vaste plage d'étude a été observée. Théoriquement, la rugosité issue d'une dent de brochage dans la direction de déplacement de l'outil est nulle, alors que perpendiculairement à cette direction, la forme de l'arête de coupe est reproduite sur la surface générée. Pourtant d'autres phénomènes entrent en jeu (collage, phénomènes visqueux, etc.) à l'origine de résultats très différents.

Afin de mener à bien ces essais scientifiques tout en répondant aux attentes industrielles, le banc de brochage a été mis en œuvre pour étudier chacun de ces paramètres en partant du plus aisément modifiable, jusqu'au plus complexe en s'appuyant sur la classification de la figure 3.13.

3.2.1 Vitesse de coupe

Dans une opération de brochage, la vitesse de coupe est le seul paramètre modifiable directement au pied de la machine. Il constitue donc souvent un levier d'action privilégié, permettant de limiter l'apparition de certains défauts notamment d'état de surface. Mais les très basses vitesses de coupe intervenant en brochage sont à l'origine de conditions thermomécaniques particulières à l'interface outil/matière, rarement rencontrées en usinage.

Un premier aperçu des dégradations d'état de surface issues de l'utilisation de très faibles vitesses de coupe (inférieures à 10 m/min) est présenté sur la figure 3.14. Pour ces essais, le brochage du Z10C13 est réalisé au moyen d'une broche plate de référence en acier rapide M35 revêtu TiN en dépouille dont les dimensions ont été présentées sur la figure 3.9. La progression étudiée a été fixée à $h = 30 \mu\text{m}$, correspondant à une progression moyenne sur l'outil de production. Les essais de brochage ont été réalisés sous huile entière, l'huile Houghton 1529 FR4 utilisée industriellement a été sélectionnée comme référence dans la suite de cette étude. Une analyse de celle-ci est présentée en annexe D.

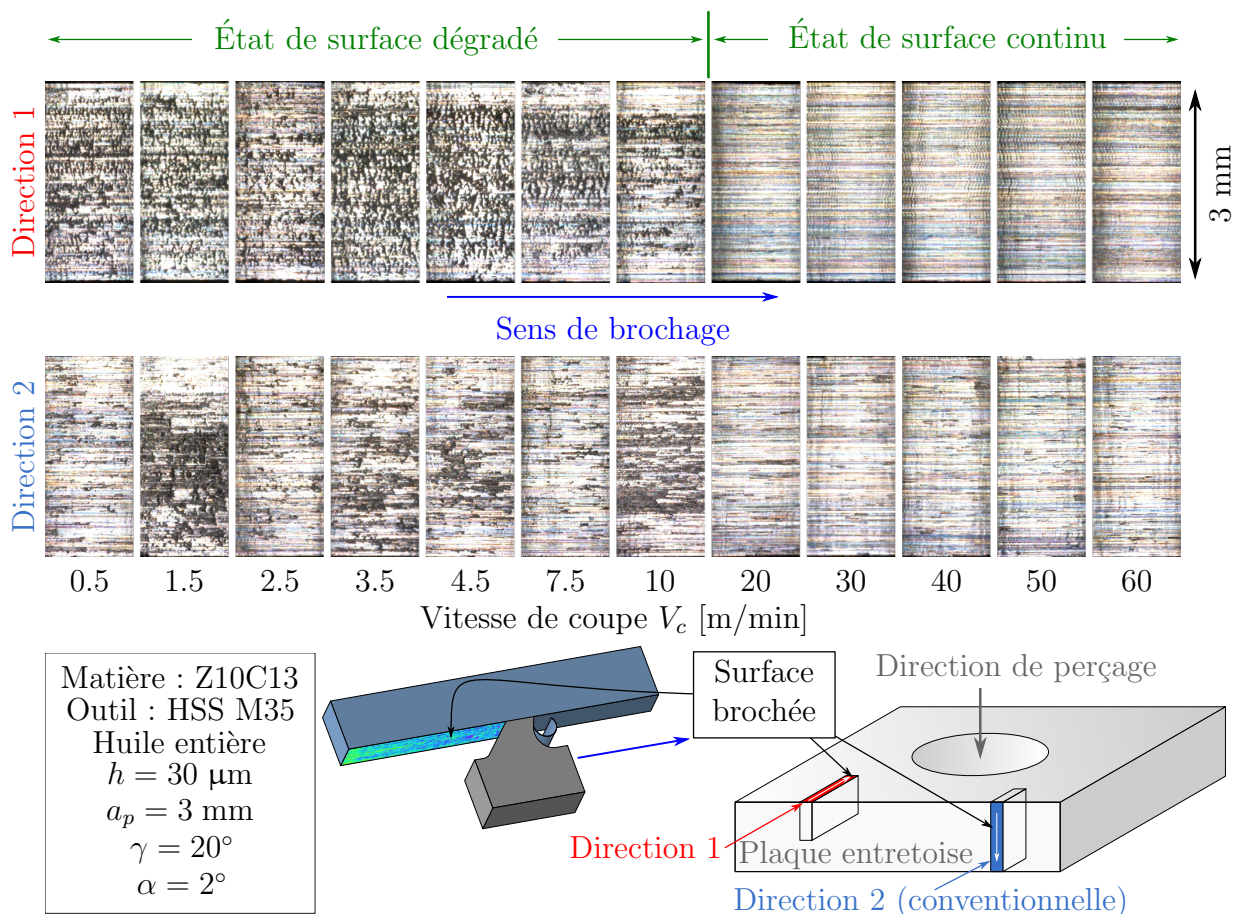


FIGURE 3.14 : État de surface observé après brochage à différentes vitesses de coupe

Deux directions de brochage sont présentées sur la figure 3.14. Il apparaît tout d'abord que la direction de brochage a une influence significative sur l'état de surface généré, les résultats observés visuellement étant très différents selon la direction. Il s'avère en effet que la direction 1 est parallèle au fibrage issu du laminage. La direction 2 est quant à elle perpendiculaire aux bandes de ferrite. Néanmoins, des tendances similaires apparaissent clairement quelle que soit la direction de brochage.

À basse vitesse, on remarque l'apparition d'un type de défaut visuel similaire à l'effet

d'écaillage mis en évidence en introduction de ce chapitre. Celui-ci tend à disparaître au delà de 10 m/min, quelle que soit la direction de brochage. Une forte sensibilité de l'état de surface à la direction de brochage est ainsi mise en évidence à basse vitesse de coupe, inférieure à 10 m/min. Dans la suite de ce travail, seule la direction 2 est considérée, correspondant à la direction brochée industriellement.

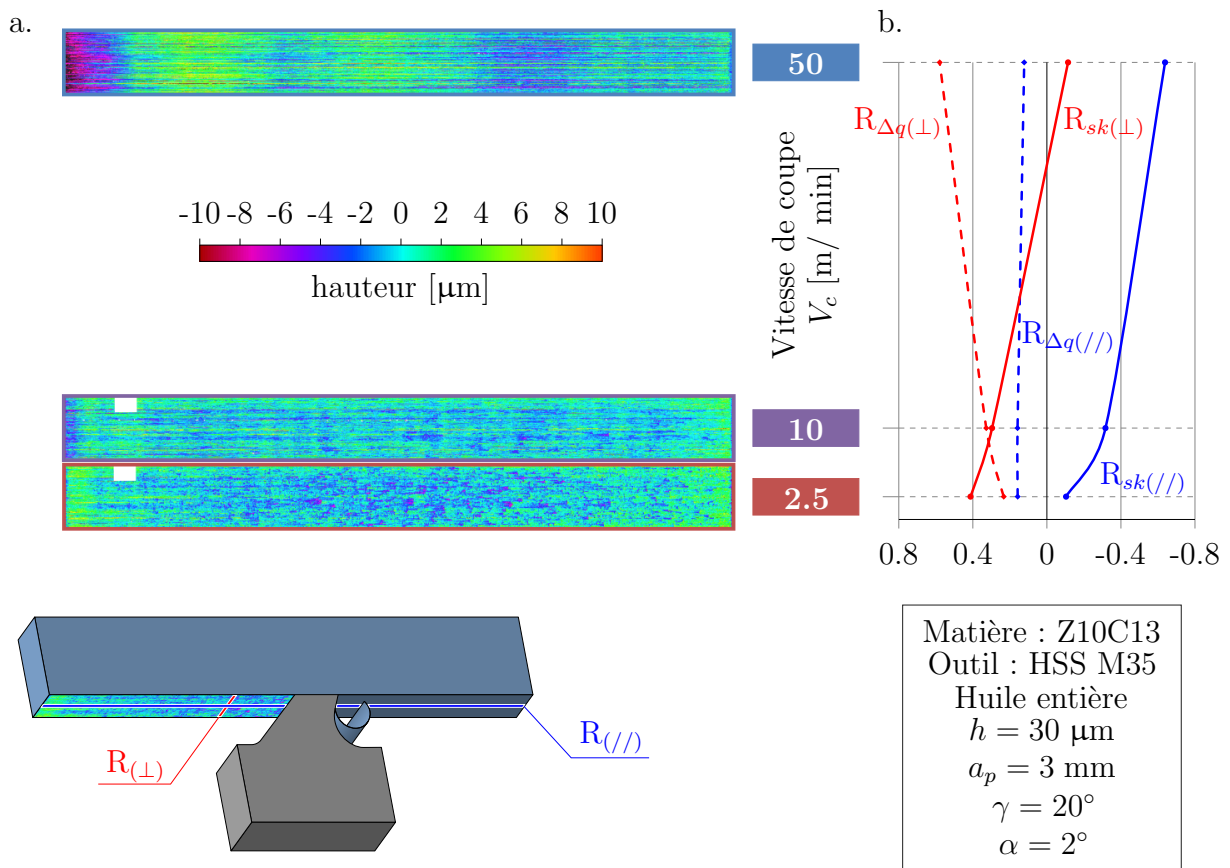


FIGURE 3.15 : Topographies de surface obtenues au microscope confocal (a.) et paramètres de rugosité mesurés parallèlement ($R_{(//)}$) et perpendiculairement ($R_{(\perp)}$) à la direction de coupe (b.) en fonction de la vitesse de coupe

Considérons tout d'abord la figure 3.15.a., présentant visuellement la topographie de surface obtenue. L'état de surface issu d'une haute vitesse de coupe semble de nouveau plus « continu », alors que les basses vitesses de coupe sont à l'origine d'une surface plus mate possédant des aspérités. Afin de caractériser la structure générale des surfaces obtenues à différentes vitesses de coupe, plusieurs critères ont été considérés après filtrage à une longueur de coupure de 0.8 mm. Ces critères de rugosité ont été mesurés au niveau de zones similaires sur les différentes surfaces, excluant les quelques dixièmes de millimètres en périphérie afin de limiter les risques de pollution de la mesure issue d'éventuels effets de bords. La mesure est donc réalisée au centre de la surface, la longueur de mesure

est de l'ordre de 30 mm parallèlement à la direction de coupe, et de seulement 3 mm perpendiculairement.

Dans un premier temps, l'évolution des critères R_{sk} et $R_{\Delta q}$ est présentée. Ceux-ci sont porteurs d'informations sur l'aspect général des surfaces brochées. Le critère R_{sk} (*skewness*) caractérise la dissymétrie de la surface générée. Il permet de déterminer si une surface présente un profil possédant une bonne portance, composé de vallées ($R_{sk} < 0$), ou bien un profil présentant de nombreuses saillies ($R_{sk} > 0$). Le critère $R_{\Delta q}$ correspond quant à lui à la moyenne des tangentes à la surface en valeur absolue. Il permet de déterminer si une surface possède un aspect globalement lisse ou irrégulier. Ce critère prend en effet en compte la notion de variation d'amplitude, ainsi que l'intensité de cette variation.

Concernant les rugosités mesurées perpendiculairement à la direction de coupe ($R_{(\perp)}$), on observe un $R_{sk(\perp)}$ positif à basse vitesse, signe d'une surface saillante. En revanche à 50 m/min, le critère $R_{sk(\perp)}$ devient négatif signifiant un inversement de tendance, la surface présente alors un profil globalement plein muni de creux. Le critère $R_{\Delta q(\perp)}$ tend quant à lui à augmenter avec la vitesse de coupe, signe d'une surface moins « lisse » à haute vitesse.

Les résultats observés dans la direction de coupe sont très différents. En effet, le critère $R_{sk(//)}$ est toujours négatif alors que $R_{\Delta q(//)}$ est stable quelle que soit la vitesse de coupe, et globalement faible. Une synthèse schématique des topographies de surface obtenues par brochage est proposée sur la figure 3.16, en s'appuyant sur les mesures de rugosité présentées précédemment.

L'étude des rugosités obtenues en brochage permet d'identifier l'implication de mécanismes de coupe différents en fonction de la vitesse de coupe. L'ondulation de la surface peut également être considérée de façon qualitative en s'appuyant sur la figure 3.17.

À une vitesse de coupe de 2.5 m/min, la surface brochée présente globalement un aspect concave, plus de matière a été enlevée au milieu du brochage qu'en début et en fin d'opération. En revanche, à haute vitesse le profil généré possède une ondulation d'amplitude bien plus importante. Le tracé présenté sur la figure 3.15.c. met au jour un phénomène d'amortissement, l'amplitude du signal observé tend à diminuer avec l'augmentation de la distance de brochage.

Des évolutions différentes des paramètres de rugosité étudiés ont été observées en fonction de la direction de mesure. Dans la direction de coupe, les paramètres étudiés ne présentent pas une forte sensibilité à la vitesse de coupe, des creux apparaissent de manière sporadique sur la surface. En revanche, perpendiculairement à la direction de coupe, deux régimes différents apparaissent en fonction de la vitesse de coupe. À basse vitesse de coupe, la surface est globalement « lisse » avec quelques pics, alors

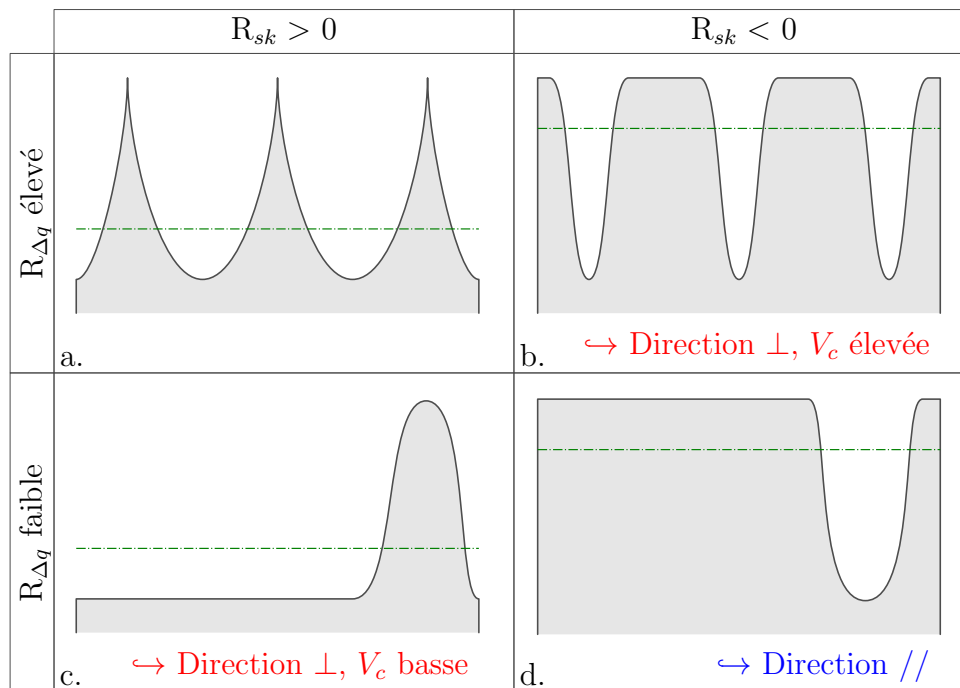


FIGURE 3.16 : Profils d'état de surface schématiques déduits de l'évolution des critères de rugosité

qu'à haute vitesse de coupe elle possède une bonne portance mais est pourvue de nombreuses vallées. Ces résultats sont résumés sur la figure 3.16.

Par ailleurs, les basses vitesses sont à l'origine d'une ondulation très limitée alors que le brochage à haute vitesse tend à augmenter l'amplitude de cette ondulation, ce qui est essentiellement attribué à l'influence de la rigidité.

Industriellement, lorsque la vitesse de coupe a été optimisée, le levier d'action suivant concerne l'outil de brochage et ses propriétés. C'est cet axe qui est mis en avant dans les sections suivantes. L'état de l'art présente notamment une tendance à la dégradation de la rugosité avec l'augmentation de progression (cf. section 2.3.2). Avant d'étudier l'influence de la progression en elle-même, des essais de variation de vitesse de coupe à trois progressions différentes de 10, 30 et 60 μm ont été réalisés. Des mesures de rugosités au moyen d'un rugosimètre tactile portatif ont été effectuées. La direction de mesure est identique à la direction de brochage, et une longueur de coupure de 0.8 mm a été utilisée, ceci dans le but de respecter au mieux les conditions de mesure mises en œuvre industriellement.

La figure 3.18 présente les résultats de R_a obtenus à différentes vitesses de coupe. Les résultats présentés correspondent à la moyenne de 3 relevés situés sur 3 zones différentes de la surface brochée. Les barres d'erreur présentées ont été identifiées par une loi de Student de probabilité 90%, méthode utilisée tout au long de ce document pour la détermination

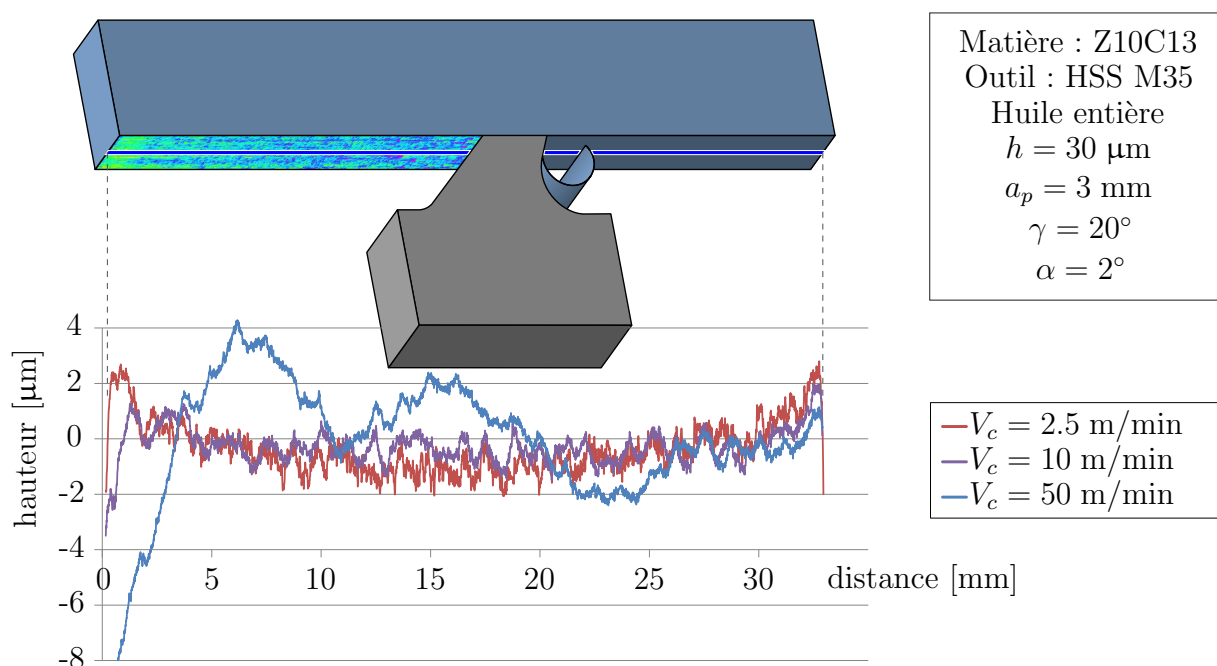


FIGURE 3.17 : Tracé de la topographie de surface dans la direction de coupe pour différentes vitesses de coupe

de barres d'erreur (sauf indications contraires).

Ainsi, la figure 3.18 met en évidence une amélioration de la rugosité R_a lors de l'augmentation de vitesse avec une progression élevée. Ceci est moins immédiat avec une progression faible de $10 \mu\text{m}$. Ce comportement est révélateur de la corrélation qui existe entre vitesse et progression sur les résultats d'état de surface. De façon générale, les meilleurs résultats sont obtenus à haute vitesse de coupe et/ou faible progression.

3.2.2 Outil : la progression

La progression a donc une influence significative sur la rugosité arithmétique R_a , ce qui confirme les observations réalisées dans l'état de l'art.

Afin de mieux comprendre les mécanismes à l'origine du lien entre progression et rugosité, une étude similaire à celle traitant de la vitesse de coupe présentée précédemment a été réalisée.

Avant tout, une vitesse de référence devait être déterminée. Pour ce faire, la méthode du couple outil/matière référencée par la norme NF66-520 a été mise en application. Ainsi en s'appuyant sur cette norme, l'effort spécifique de coupe en fonction de la vitesse a été étudié pour une progression de $30 \mu\text{m}$. Notons que les relevés d'effort présentés dans ce document correspondent à la moyenne entre 5 répétitions d'essais de brochage. 3 essais sans relevés ont été réalisés avant chaque condition de brochage afin de stabiliser le

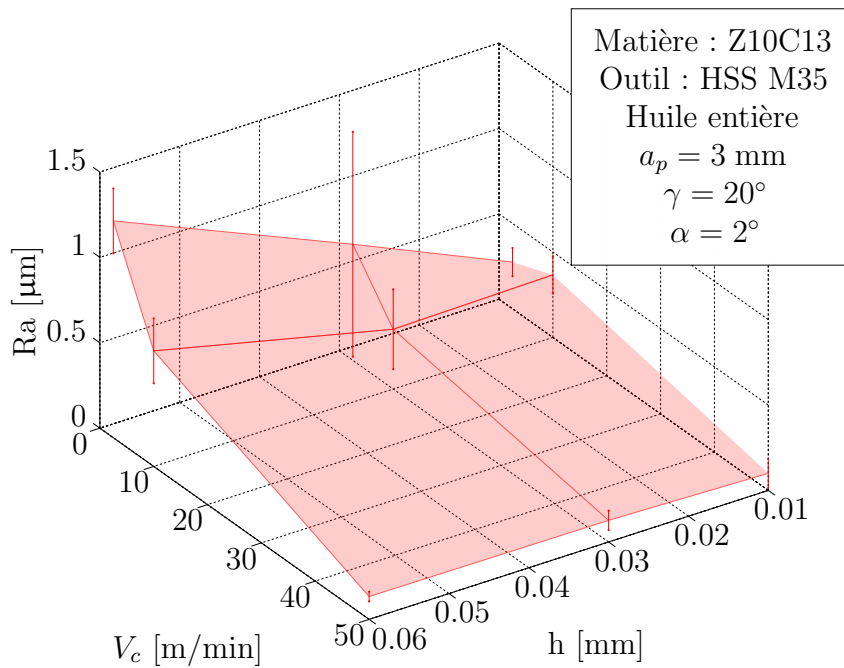


FIGURE 3.18 : Rugosité Ra en fonction de la vitesse de coupe, pour différentes progressions

processus de coupe et à compenser les effets de la rigidité du montage.

Dans la plupart des procédés d'usinage conventionnels, l'augmentation de vitesse de coupe entraîne une diminution d'effort spécifique (NF66-520), la vitesse optimale étant située à 20% au-dessus de l'intersection entre les asymptotes inférieures et supérieures comme le présente la figure 3.19 issue de cette norme.

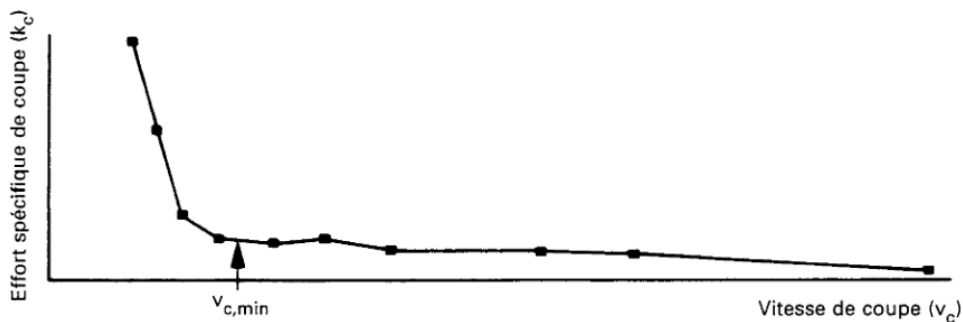


FIGURE 3.19 : Courbe typique d'effort spécifique de coupe issue de la norme NF66-520

Dans notre cas d'étude, l'évolution de l'effort spécifique de coupe $K_{c,c}$ en fonction de la vitesse est inversée, celle-ci tend en effet à augmenter avec la vitesse de coupe avant de se stabiliser. Ceci est présenté sur la figure 3.20. En appliquant le principe évoqué dans le couple outil matière malgré la courbe d'effort spécifique de coupe atypique, une vitesse minimale de 4 m/min pourrait être identifiée. Cette méthode d'identification de

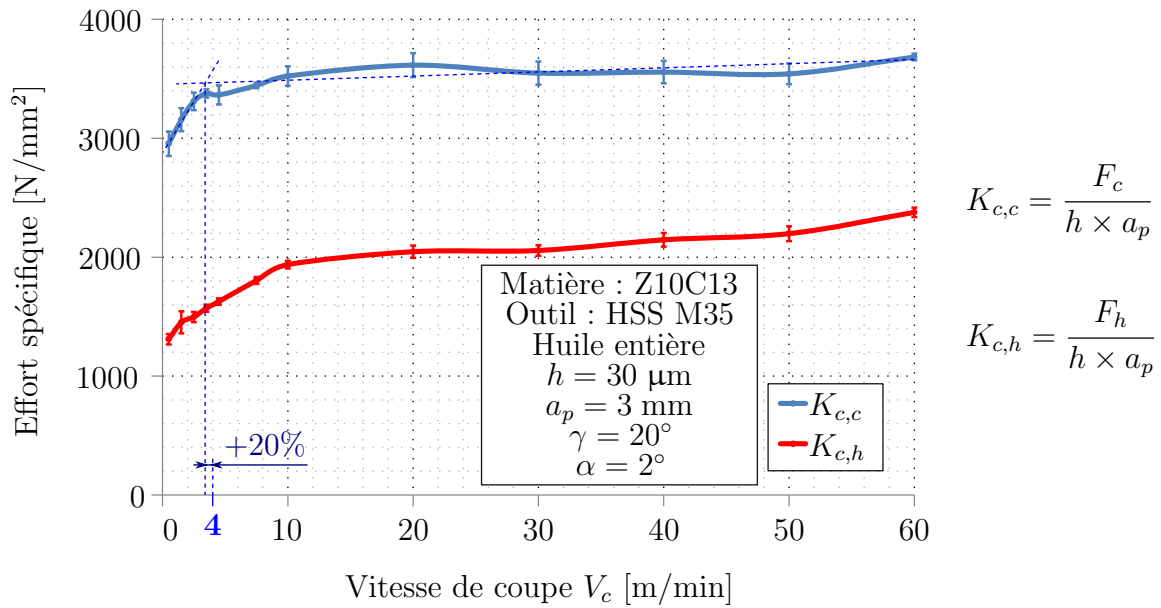


FIGURE 3.20 : Effort spécifique de coupe en fonction de la vitesse de coupe

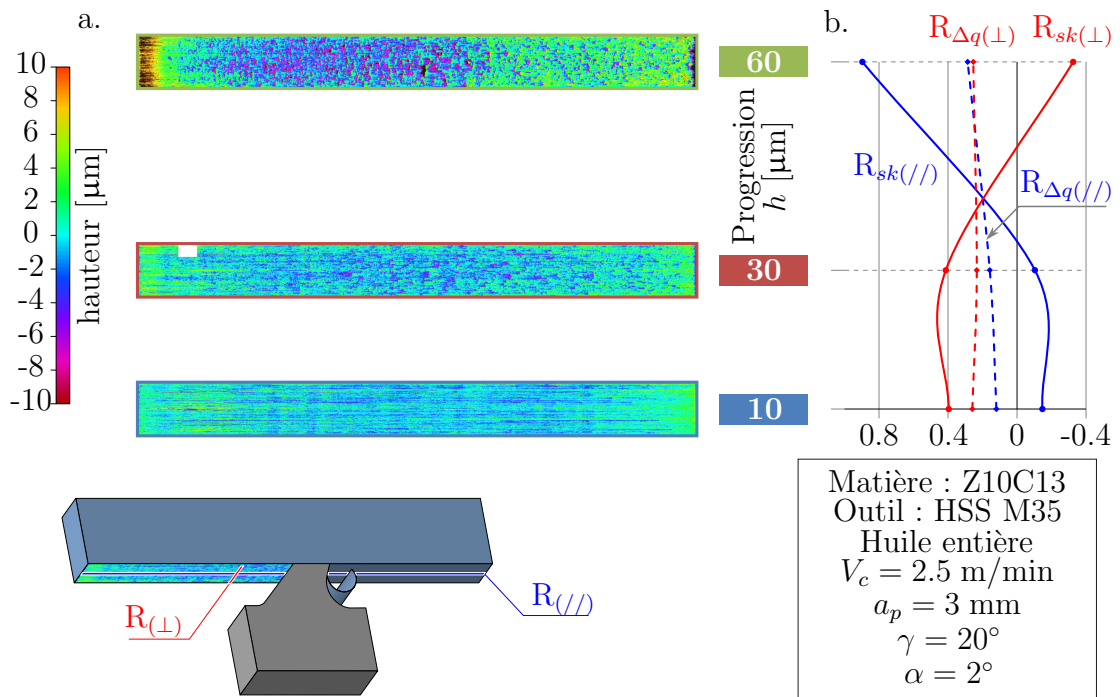


FIGURE 3.21 : Topographies de surface obtenues au microscope confocal (a.) et paramètres de rugosité mesurés parallèlement ($R_{(//)}$) et perpendiculairement ($R_{(\perp)}$) à la direction de coupe (b.) en fonction de la progression

la vitesse minimale étant non conforme et non pertinente, la vitesse de coupe utilisée industriellement de 2.5 m/min a été utilisée comme référence dans la suite de cette étude.

Ainsi, les surfaces générées par plusieurs progressions à cette vitesse de 2.5 m/min ont été analysées par microscope confocal, l'analyse de ces relevés est présentée sur la figure 3.21.

Une analyse d'abord visuelle des topographies de surface présentées sur la figure 3.21.a. confirme les constatations mise au jour par l'état de l'art ; une augmentation de progression est synonyme de dégradation d'état de surface. Si pour une progression de 10 μm la surface apparaît assez continue, une progression importante de 60 μm est source d'écaillage. Notons par ailleurs qu'à forte progression, la surface présente visuellement des états de surface différents en fonction de la zone observée, les premiers millimètres brochés générant une surface plutôt lisse (conforme aux observations réalisées par [Zanger et al. \(2014\)](#) et attribuées à la brève diminution d'angle de dépouille à l'entrée dans la matière), suivie d'une rugosité qui semble augmenter jusqu'aux 2/3 de la longueur de brochage.

Quelle que soit la progression, le critère $R_{\Delta q}$ est stable et relativement faible, la variation de rugosité est donc relativement progressive à cette basse vitesse de coupe ($V_c = 2.5$ m/min). Le critère R_{sk} est quant à lui négatif pour une faible progression dans la direction de coupe, et positif dans l'autre direction. La surface tend donc à présenter des creux dans la direction de coupe, et des bosses perpendiculairement. Ceci est inversé pour une forte progression de 60 μm .

La figure 3.22 résume schématiquement les observations précédentes effectuées lors de la variation de vitesse de coupe et de progression.

En s'appuyant sur la figure 3.23, on remarque par ailleurs que la surface présente une forme en cuvette d'autant plus prononcée que la progression est importante. Ce phénomène mis en évidence par l'état de l'art avait été attribué à la rigidité du système, ce qui est confirmé par cette observation. En effet, une progression plus importante est synonyme d'efforts de coupe et de pénétration eux aussi plus importants (cf. figure 3.24), accentuant les déformations liées à la rigidité du système.

Dans cette section, l'évolution de la morphologie de la surface obtenue par brochage a été étudiée par des mesures réalisées au microscope confocal. Une première observation qualitative de la rugosité de surface a permis de confirmer les observations de dégradation d'état de surface issues de l'augmentation de progression, présentée dans l'état de l'art. L'utilisation de faibles vitesses de coupe semble également générer des surfaces visuellement plus lisses qu'à haute vitesse de coupe.

Pour affiner ces observations, l'évolution des critères R_{sk} et $R_{\Delta q}$ en fonction de la vitesse de coupe et de la progression a été étudiée, et a permis d'établir une

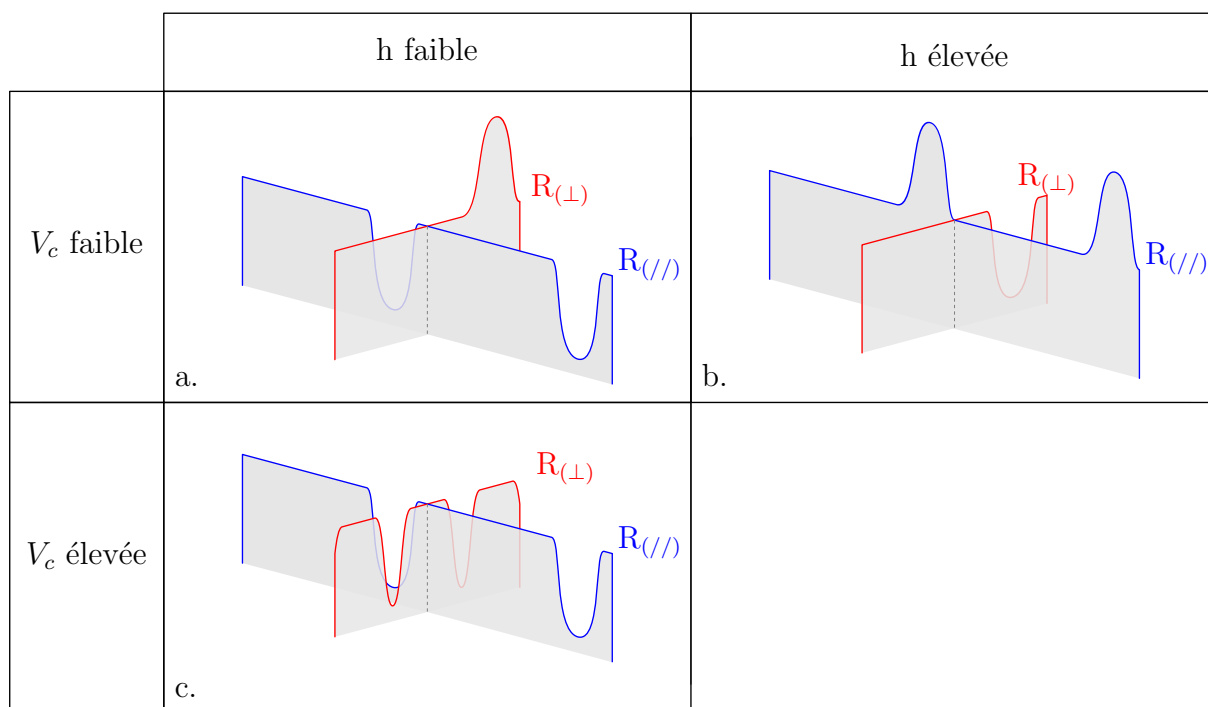


FIGURE 3.22 : Schématisation des surfaces obtenues pour différentes vitesses et progressions

représentation schématique des surfaces obtenues, présentée sur la figure 3.22. Une attention particulière peut être portée sur la rugosité mesurée parallèlement à la direction de coupe $R_{(//)}$. Alors qu'à faible progression cette rugosité présente des creux dispersés sur la surface (quelle que soit la vitesse), l'utilisation d'une progression élevée entraîne l'apparition de bosses comme présenté sur le cadran b. de cette figure 3.22.

Un lien entre la forte dégradation de surface issue des progressions importantes, et l'apparition de bosses peut ainsi être établi. Ces bosses –apparentées à un dépôt d'arête rapportée – se forment au cours du processus de coupe.

Pour finir, l'influence de la rigidité du montage a été confirmée par la variation de progression. En effet, la déformation du système est liée aux efforts appliqués, la surface générée apparaît ainsi d'autant plus concave que la progression et donc les efforts sont élevés.

L'influence significative aussi bien de la progression et de la vitesse de coupe sur l'état de surface généré en brochage a ainsi été démontrée dans ce cas d'application. Afin d'étudier l'influence des autres paramètres de brochage en fonction de la vitesse de coupe et de la progression, une matrice d'essai standard a été mise en place afin de balayer systématiquement 3 vitesses de coupe (2.5, 10 et 50 m/min) et 3 progressions (10, 30 et

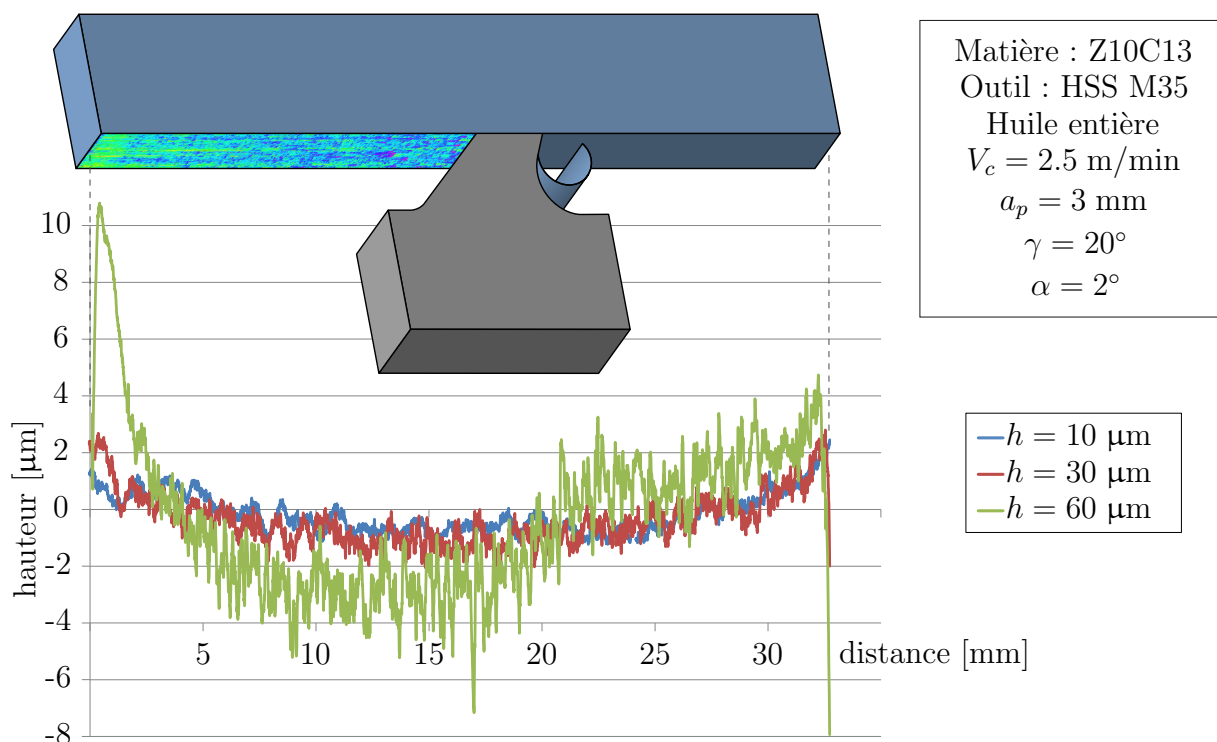


FIGURE 3.23 : Tracé de la topographie de surface dans la direction de coupe pour différentes progressions

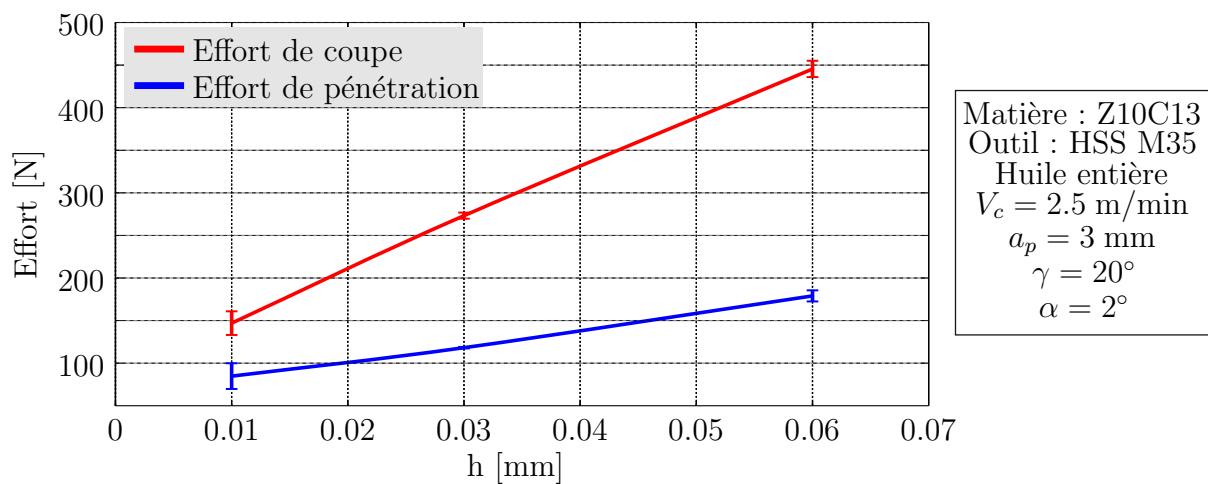


FIGURE 3.24 : Efforts de coupe et de pénétration en fonction de la progression

60 μm).

3.2.3 Outil : les angles de denture

Dans l'état de l'art, l'utilisation courante d'angles de coupe γ très positifs (de l'ordre de 20°) et d'angles de dépouille α très faibles (de l'ordre de 2°) a été évoquée. Certains

outils sont également pourvus d'angles d'inclinaison d'arête λ_S . L'influence de la variation de l'angle de coupe sur l'état de surface a été étudiée dans un premier temps, au travers d'une mesure de rugosité Ra (3 répétitions).

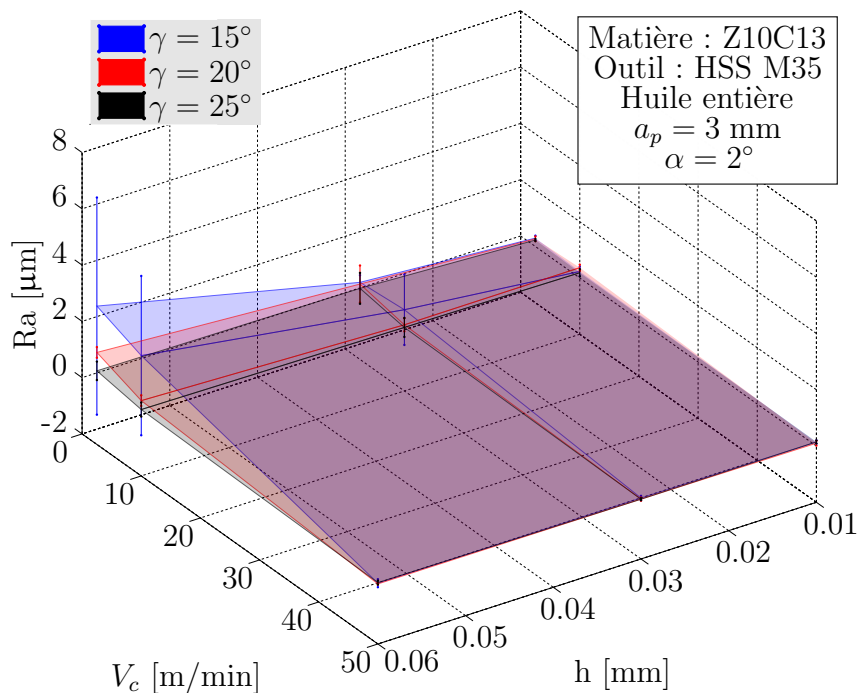


FIGURE 3.25 : Évolution de la rugosité Ra en fonction de l'angle de coupe γ

La figure 3.25 présente ainsi une amélioration d'état de surface induite par l'augmentation de l'angle de coupe. Ceci peut être expliqué par un écoulement de matière facilité par un angle de coupe élevé, limitant les risques de formation d'arête rapportée. En effet, en s'appuyant sur l'étude de [Merchant \(1945\)](#) supposant que l'angle de cisaillement primaire ϕ est tel que la puissance fournie au système est minimisée, l'équation 3.1 définissant cet angle de cisaillement en fonction de l'angle de coupe γ et du coefficient de frottement μ ([Felder, 2006](#)) peut être déduite.

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\arctan(\mu) - \gamma}{2} \quad (3.1)$$

En considérant un coefficient de frottement fixe, l'angle de cisaillement primaire ϕ est d'autant plus faible que l'angle de coupe est réduit. Ceci se traduit également par un effort de coupe moindre lorsque l'angle de coupe est très positif comme le démontre également [Merchant \(1945\)](#) par l'intermédiaire de l'équation 3.2 présentée par [Felder \(2006\)](#). L'influence de l'angle de coupe (et donc de l'angle de cisaillement primaire) sur

les efforts de coupe est illustrée sur la figure 3.26.

$$F_c = 2 k_M h a_p \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\arctan(\mu) - \gamma}{2} \right) \quad (3.2)$$

Kong *et al.* (2011) a mis en évidence ce phénomène par simulation numérique d'une opération de brochage. Un angle de coupe de 0° est à l'origine de niveaux de contraintes dans la zone primaire bien plus élevés que ceux observés pour un angle de coupe de 10° . Par ailleurs, la zone soumise à ces contraintes très importantes est plus limitée avec un faible angle de coupe, ce qui accroît le gradient de contrainte et donc les phénomènes d'écaillage.

Les effets positifs sur l'état de surface induits par une augmentation d'angle de coupe sont d'autant plus significatifs que les conditions de brochage sont difficiles, ces écarts sont ainsi particulièrement visibles à très faible vitesse de coupe et forte progression. On remarque également une erreur très importante dans ces conditions, en particulier lorsque le Ra moyen est très élevé (angle de coupe de 15°).

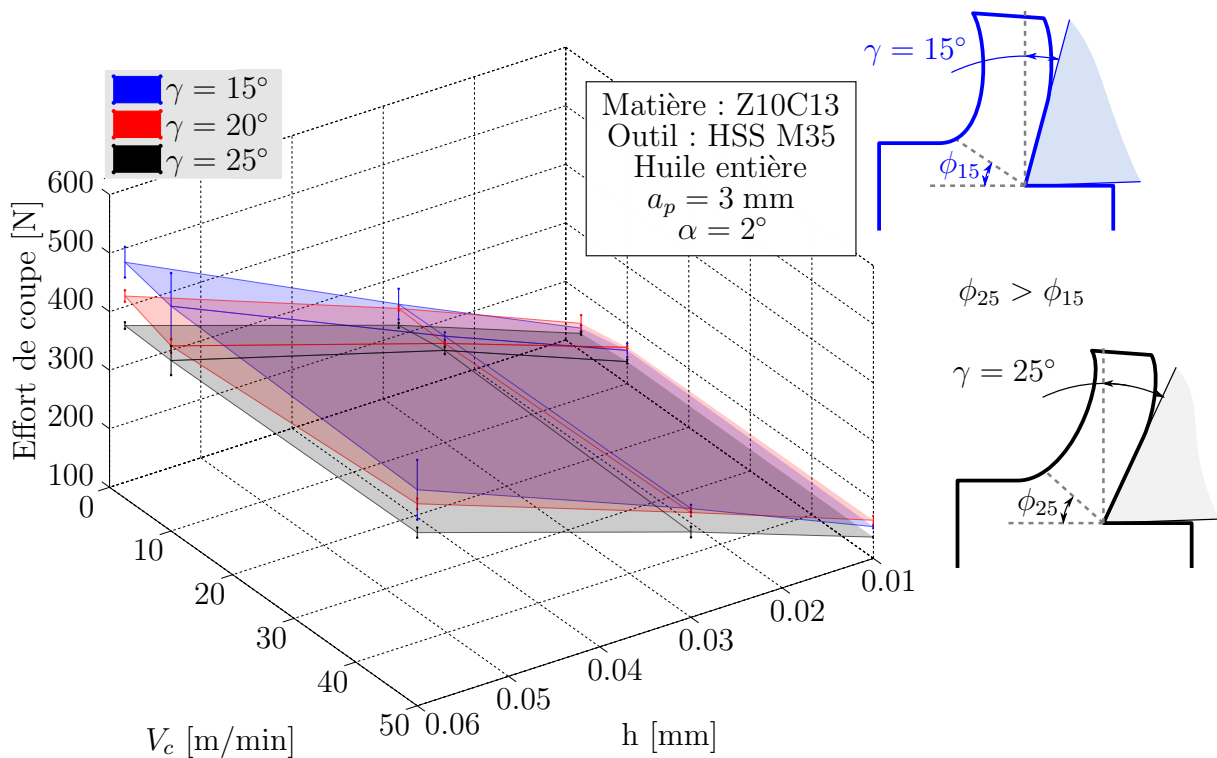


FIGURE 3.26 : Efforts de coupe en fonction de l'angle de coupe γ , et lien avec l'angle de cisaillement primaire

L'augmentation d'angle de coupe entre 15 et 25° tend à améliorer la rugosité de la surface produite. Ceci s'explique notamment par des déformations moins sévères de la matière, et des niveaux de contraintes plus faibles pour de fortes valeurs d'angle de coupe.

Notons toutefois que si un angle de coupe plus important peut être à l'origine de meilleurs états de surface, la résistance de l'arête peut également être affectée, de même que la vitesse d'usure de l'outil. Il conviendrait de réaliser des tracés d'usure en dépouille VB en fonction du temps de brochage pour ces différents angles de coupe. L'angle de dépouille intervient également dans la résistance de l'arête de coupe. Par ailleurs, alors que l'angle de dépouille est usuellement de 2°, l'état de l'art a mis au jour des pratiques industrielles visant à diminuer cet angle à 1° au niveau des dents de finition. Afin d'étudier l'impact de ces pratiques, l'angle de dépouille a été varié entre 1 et 2° pour deux vitesses de coupe utilisables industriellement, à savoir 2.5 et 4 m/min. Une augmentation de la pression de coupe lors de la diminution d'angle de dépouille a tout d'abord été observée, ce qui peut être attribué à un frottement supplémentaire en dépouille et donc un effort de coupe plus important.

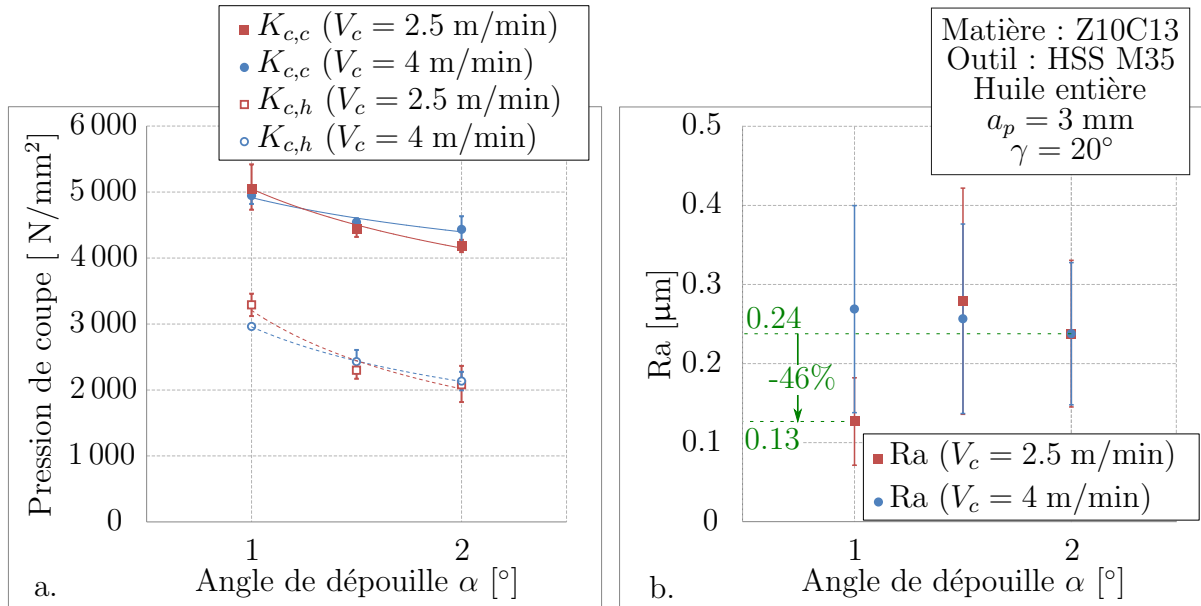


FIGURE 3.27 : Influence de l'angle de dépouille α sur la pression spécifique de coupe et la rugosité

Dans les conditions d'essais sélectionnées, l'amélioration du critère de rugosité Ra lors de la diminution d'angle de dépouille semble être conditionnée par la vitesse de coupe, comme présenté sur la figure 3.27. En effet, alors qu'une amélioration de près de

50% du Ra a été observée en passant de 2 à 1° d'angle de dépouille pour une vitesse de coupe de 2.5 m/min, aucun effet significatif n'est mis en évidence à 4 m/min. Pour cette dernière vitesse, la diminution d'angle de dépouille semble même dégrader la rugosité. L'amélioration d'état de surface à basse vitesse peut être attribuée à un phénomène proche des mécanismes issus de l'opération de brunissage mécanique. Les conditions tribochimiques à l'interface entre la dépouille et la matière sont certainement conditionnées par les températures et vitesses de déformations en jeu, ce qui explique la forte dépendance des résultats observés à la vitesse de coupe. La diminution d'angle de dépouille tend par ailleurs à améliorer le guidage de l'outil, ce dernier étant davantage « en appui » sur sa face de dépouille.

Notons que la variation d'angle de dépouille a été obtenue au moyen du même outil, seule sa trajectoire a été modifiée. Ainsi en plus du déplacement horizontal, une composante verticale a été ajoutée afin de modifier la valeur de l'angle de dépouille de l'outil en travail α_{fe} . Ceci a également pour conséquence de modifier légèrement l'angle de coupe en travail de l'outil γ_{fe} . L'impact de la faible variation de l'angle de coupe est très limité et a donc été négligé.

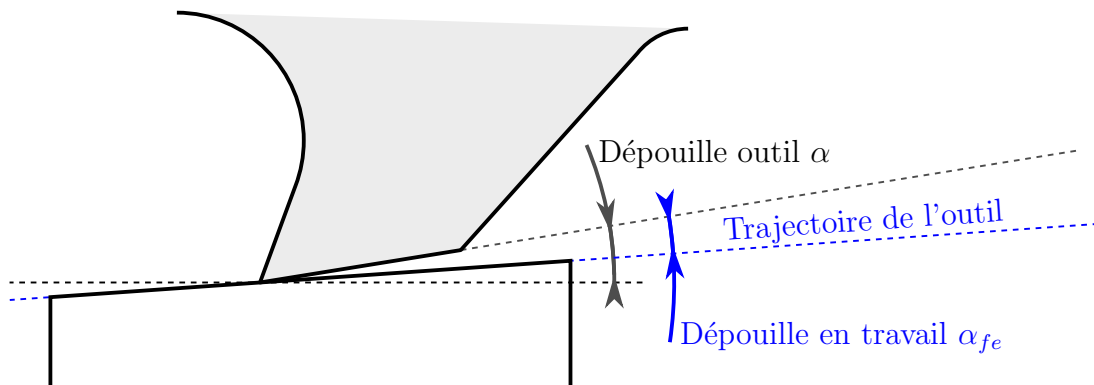


FIGURE 3.28 : Stratégie de modification de l'angle de dépouille d'outil

L'utilisation d'un angle de dépouille réduit tend à améliorer considérablement la rugosité Ra d'une surface, mais seulement dans des conditions particulières. Cette amélioration a aussi été observée à 2.5 m/min et pas à 4 m/min. Cette amélioration a été attribuée à deux phénomènes ; un effet de brunissage mécanique de la pièce par l'intermédiaire de la face de dépouille, ainsi qu'un meilleur guidage (et donc une meilleure rigidité) de l'outil muni d'un très faible angle de coupe.

Le dernier angle d'outil ayant été testé est l'angle d'inclinaison d'arête λ_s . Pour ce faire, une adaptation du banc a été nécessaire. En effet, l'inclinaison entre arête de coupe

et direction de coupe a été permise par la mise en place d'un étau possédant une platine rotative. Mais cette inclinaison est à l'origine d'une composante d'effort latérale susceptible d'engendrer la rotation de l'électro-broche lorsque son couple de maintien n'est plus suffisant. Ainsi, un système de verrouillage mécanique de cette rotation a été fabriqué. Ce dernier présenté sur la figure 3.29 consiste en une indexation du rotor par une pige liée à la bague de maintien, elle-même fixée au nez de broche (par serrage entre mors).

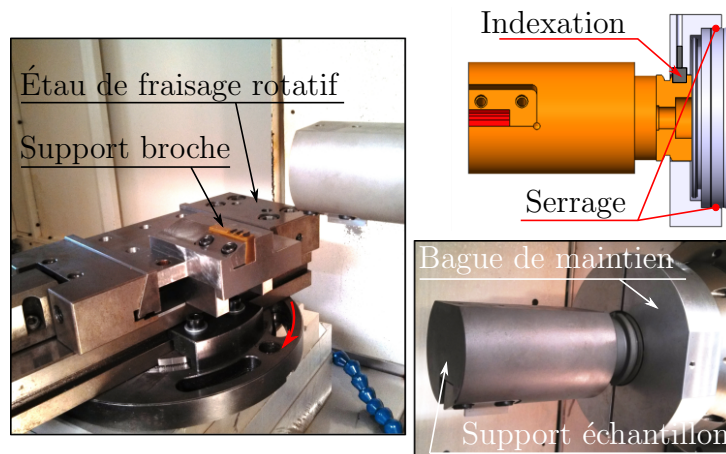


FIGURE 3.29 : Montage pour l'étude d'angle d'inclinaison d'arête

L'utilisation d'un angle d'inclinaison d'arête sur une broche est généralement très délicate et limitée par des problèmes de faisabilité d'outil. Si le profil à brocher est simple (trou cylindrique, dentures, etc.), il est possible de réaliser l'affûtage de la broche en ajoutant un angle d'hélice à la denture, résultant en l'apparition d'un angle d'inclinaison d'arête.

Même si dans le cas industriel traité dans cette étude, l'utilisation d'une telle stratégie d'affûtage semble proscrite, l'étude des effets issus d'une entrée/sortie progressive de l'arête dans la matière a été menée. Pour ce faire, des essais réalisés avec un angle d'inclinaison d'arête de 15° ont été comparés aux essais réalisés en coupe orthogonale. Ceux-ci sont présentés sur la figure 3.30.

De même que ce qui avait été observé lors de la variation d'angle de coupe, les états de surfaces les plus dégradés sont observés pour les conditions les plus sévères ; à savoir forte progression et faible vitesse de coupe. Dans cette zone, l'angle d'inclinaison d'arête de 15° tend à dégrader la rugosité. En plus de la dégradation de la valeur moyenne de rugosité, la dispersion de mesure est également bien plus importante avec un angle d'inclinaison d'arête.

Comme il l'a été évoqué, l'inclinaison de l'arête est à l'origine d'une nouvelle composante d'effort, horizontale et perpendiculaire à la direction de coupe. Cette composante est à l'origine d'un couple engendrant une torsion du support de matière, ce qui augmente

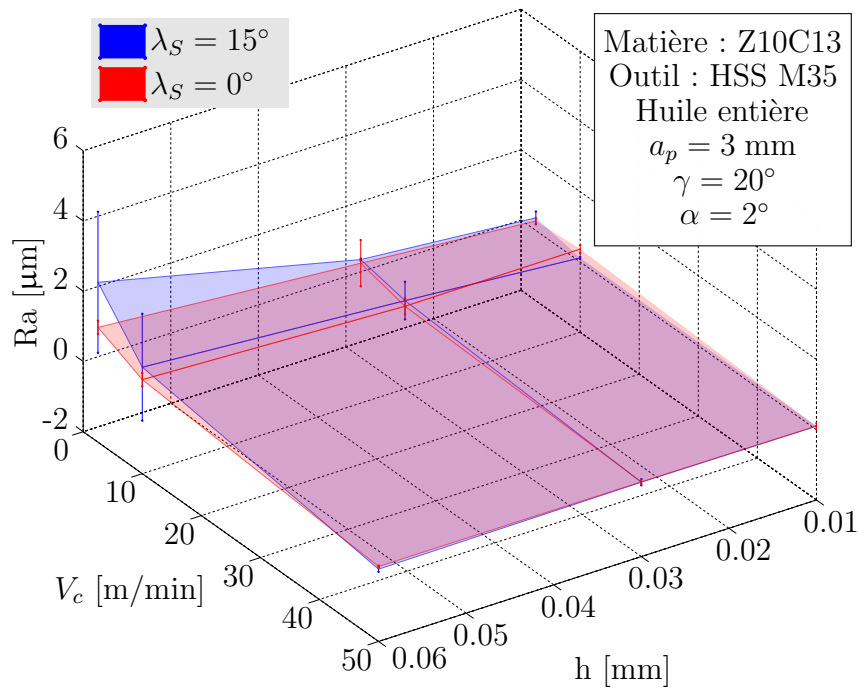


FIGURE 3.30 : Influence de l'angle d'orientation d'arête λ_S sur la rugosité

la souplesse du montage. Or, cet effort latéral est d'autant plus important que la progression est élevée comme le présente la figure 3.31. Ainsi, l'instabilité de la coupe est plus importante lorsque la progression est élevée, ce qui explique la dégradation de rugosité pour les fortes progressions. Notons qu'aucune différence d'état de surface n'est observée à 50 m/min, même avec une forte progression. Les effets thermo-mécaniques induits par l'augmentation de la vitesse permettent de compenser la souplesse supplémentaire issue de la forte progression.

L'angle d'inclinaison d'arête est à l'origine d'instabilités au niveau de la coupe, ce qui tend à dégrader l'état de surface. En revanche, couplé à une vitesse de coupe importante, ou à une très faible progression, les effets de cette instabilité sur le critère de rugosité R_a sont estompés.

3.2.4 Outil : le substrat

Le substrat de l'outil utilisé en usinage est un paramètre susceptible d'influencer aussi bien la résistance et la durée de vie de cet outil que la qualité générée. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas du brochage dans la mesure où la face de coupe de cet outil est réaffûtée après revêtement, exposant le substrat de la face de coupe à un contact

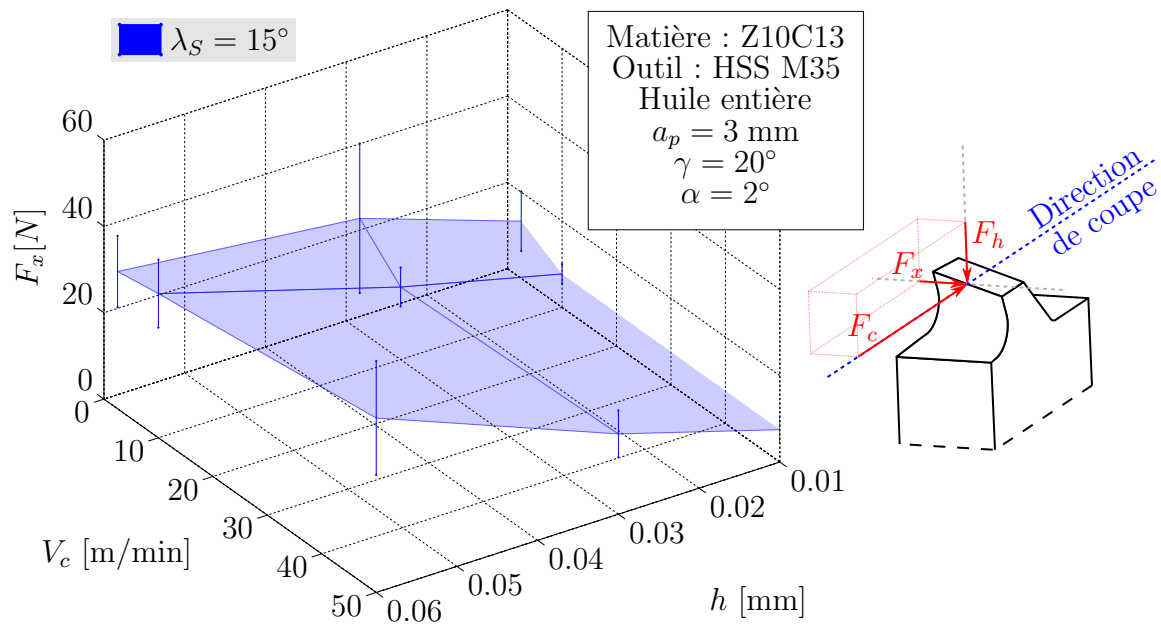


FIGURE 3.31 : Évolution de l'effort latéral induit par l'angle d'orientation d'arête λ_S

avec la matière brochée. L'utilisation d'aciers rapides frittés (comme l'ASP2052) pourrait permettre une amélioration de durée de vie, voire d'état de surface. Dans le cadre de cette étude, le choix a été porté sur l'étude de l'impact de l'utilisation du carbure. Les différences de rugosité de surfaces issues du brochage au moyen d'outils en acier rapide et en carbure sont potentiellement décuplées étant donné l'écart de composition et de structure de ces matériaux, par rapport à la proximité entre acier rapide conventionnel et fritté.

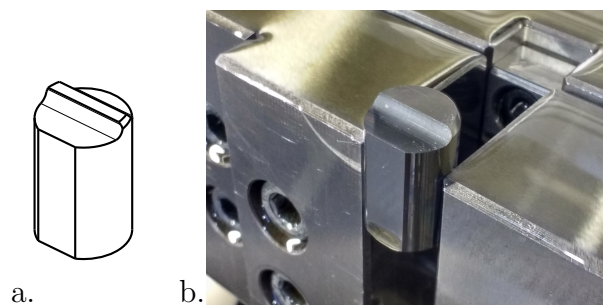


FIGURE 3.32 : Schéma de l'outil carbure utilisé (a.) et photo prise lors de sa réalisation (b.)

Ainsi, une dent de brochage en carbure H10F a été créée par rectification à partir d'un pion taillé initialement pour réaliser des essais de frottement sur tribomètre. Afin de déterminer l'influence du carbure indépendamment de la géométrie de l'outil, les mêmes propriétés dimensionnelles que celles utilisées jusqu'à présent ont été conservées

et contrôlées. La vérification de l'arête de coupe au microscope confocal a permis de valider son intégrité, un rayon d'acuité d'arête moyen de $5\ \mu\text{m}$ a été mesuré. Après la série d'essais de brochage, des mesures similaires ont permis de déterminer que l'outil n'avait pas subi de dommage ou d'usure critique.

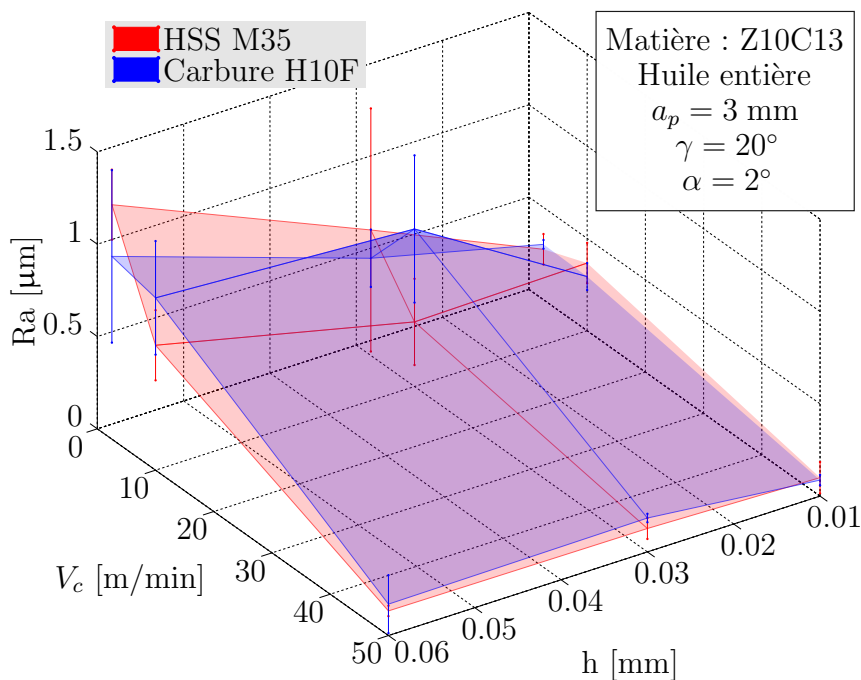


FIGURE 3.33 : Influence du substrat sur la rugosité Ra

L'utilisation d'un outil carbure non revêtu ne permet pas d'amélioration significative de l'état de surface, comparativement aux résultats obtenus au moyen d'un outil en acier rapide revêtu TiN en dépouille. Ceci est mis en évidence sur la figure 3.33. Notons qu'il serait intéressant de prendre en compte la notion d'usure en vue de compléter ces résultats. En effet, si les états de surface issus d'une arête neuve en acier rapide ou en carbure sont similaires, l'intégrité de ces arêtes peut fortement varier après plusieurs cycles de brochage. La résistance à l'usure par abrasion et diffusion du carbure est généralement meilleure pour un carbure, alors que la ténacité d'un acier rapide est globalement accrue par rapport à celle d'un carbure.

L'utilisation d'un outil carbure n'apporte pas d'amélioration significative de la rugosité obtenue par brochage, par rapport aux résultats issus d'un outil en acier rapide.

3.2.5 Lubrification

Le brochage des plaques entretoises est réalisé sous lubrification à l'huile entière. Chaque des 4 postes de brochage est équipé de bacs d'une contenance de 4 200 litres, les quantités d'huile impliquées sont donc conséquentes. Ainsi, si un changement de formulation d'huile peut être envisagé, ce remplacement doit être motivé par un avantage substantiel en performance de brochage (qualité, vitesse de coupe, etc.) ou en coût. La dégradation de l'huile dans le temps devra également être considérée pour garantir sa performance tout au long de sa durée de vie (d'autant plus que le système de filtration d'huile n'est pas équipé de climatiseur).

Afin de réaliser une étude étendue de l'influence de la lubrification, le banc de brochage a été utilisé avec différents modes de lubrification. Une première itération a consisté à comparer les résultats obtenus sous l'huile entière de référence (Houghton Cutmax 1529 FR4) à une opération de brochage réalisée à sec, ou sous émulsion à 5% d'huile Betronol EP V 1664-2 (MKU).

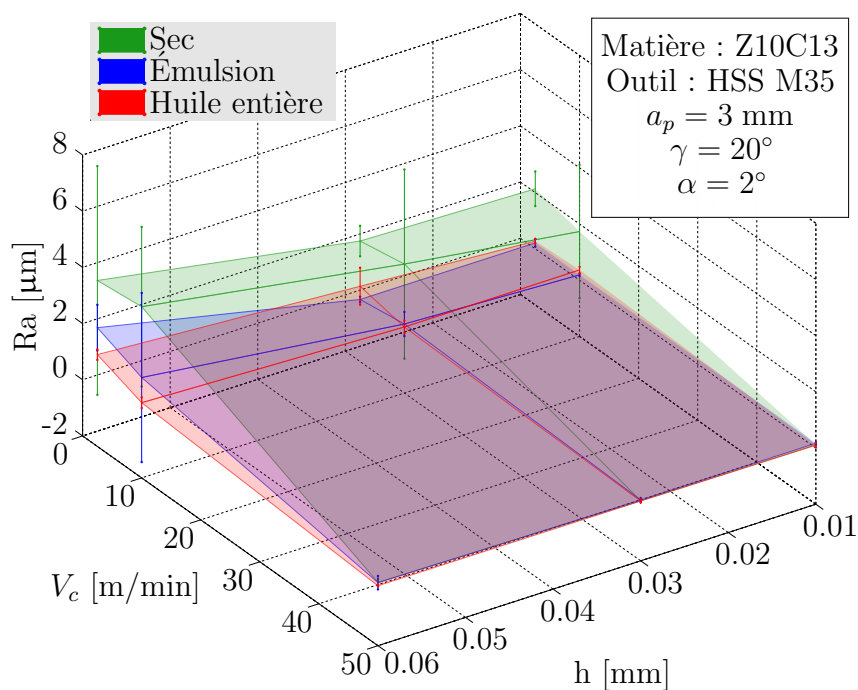


FIGURE 3.34 : Rugosité arithmétique obtenue à sec, sous émulsion et sous huile entière

Plusieurs zones distinctes liées au couple Vitesse/Progression peuvent être identifiées sur la figure 3.34. On remarque tout d'abord que les résultats obtenus à haute vitesse de coupe (50 m/min) sont très proches quel que soit le mode de lubrification. À cette vitesse, la progression n'a pas non plus d'influence sur la rugosité, et c'est dans cette zone que la rugosité R_a mesurée est la plus faible et la plus stable (barres d'erreur de faible ampleur).

En considérant une faible vitesse de coupe (≤ 10 m/min) et une progression limitée à $30 \mu\text{m}$, les rugosités obtenues sous huile entière et émulsion sont très similaires, et sont également très proches de celles observées à haute vitesse. En revanche, les essais réalisés à sec présentent des rugosités de l'ordre de 10 fois supérieures à celles obtenues avec l'un des deux modes de lubrification.

L'écart entre les essais réalisés sous huile entière et émulsion se creuse dans les conditions les plus défavorables, à savoir pour une très faible vitesse de coupe et une forte progression. Ainsi à $V_c = 2.5$ m/min et $h = 60 \mu\text{m}$, les essais sous huile entière permettent d'obtenir une faible rugosité de $1.27 \mu\text{m}$. L'émulsion est à l'origine d'une dégradation de rugosité arithmétique de 75% ($2.23 \mu\text{m}$) et les essais à sec d'un Ra trois fois plus important que les essais sous huile entière.

Finally, the most effective method to reduce surface roughness consists in increasing the cutting speed. The results obtained at 50 m/min present similar roughness values whatever the lubrication mode. If the cut is lubricated with full oil or emulsion, it appears that using low cutting speeds, inferior to $30 \mu\text{m}$, is also effective. In the most severe conditions (low cutting speed and high progression), lubrication with full oil allows the best results. This is probably due to the high polarity of this oil, allowing a more durable maintenance of the oil and in particular of the additives at high pressure at the tool/workpiece interface.

Pour compléter cette démarche, des essais de brochage sous lubrification MQL (*Micro-Quantity Lubrication*) ont été menés. L'huile Luxol A15 a été pulvérisée sous 4 bars au niveau de l'outil au moyen d'une buse fixée à l'électrobroche. Ce dispositif présenté sur la partie gauche de la figure 3.35 permet de représenter le lien entre la quantité d'huile effectivement déposée et la vitesse de coupe, une vitesse plus importante étant à l'origine d'une quantité moindre d'huile déposée.

Une autre série d'essais sous lubrification cryogénique à l'azote liquide a été réalisée. Une buse raccordée directement en sortie du Dewar permet l'approvisionnement en azote, un temps de stabilisation étant alors nécessaire pour assurer un flux d'azote à l'état liquide. Notons que des systèmes de séparation de phases tels que celui décrit par [Biček et al. \(2012\)](#) permettent de réduire les gaspillages liés à l'évaporation d'azote au cours de son approvisionnement, tout en assurant d'obtenir une phase liquide en sortie de buse quasi-instantanément. L'intégralité de la matrice d'essai habituelle n'a pas été balayée, la quantité d'azote liquide disponible n'étant alors pas suffisante.

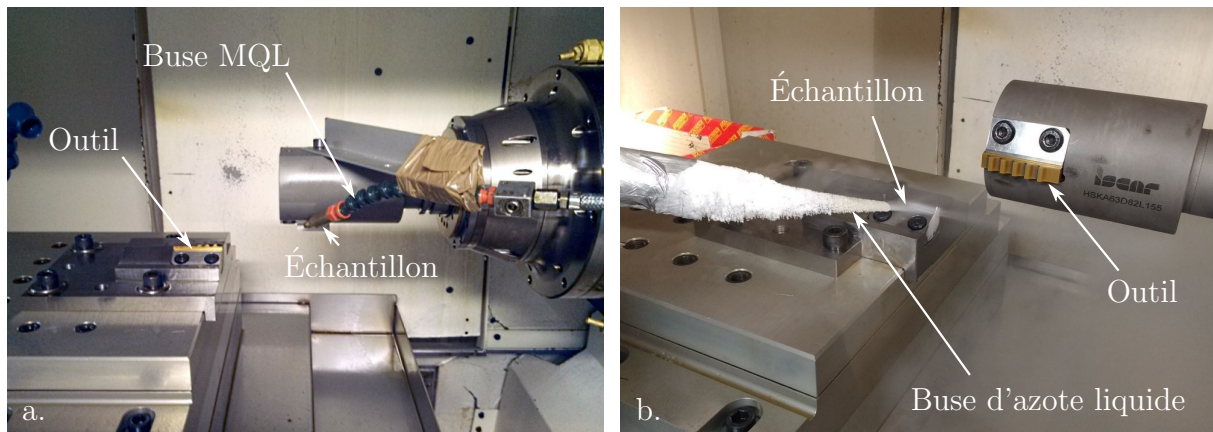


FIGURE 3.35 : Fixation de la buse d'approvisionnement en MQL (a.) et d'azote liquide (b.)

Une dernière condition a été testée, à la limite entre le revêtement d'outil et la lubrification solide. En effet, un revêtement à base de bisulfure de molybdène MoS_2 a été réalisé sur une broche d'essais. Ce revêtement offre l'une des meilleures performances de lubrification en film solide et est couramment utilisé sur les matrices d'emboutissage et pour la découpe de tôles, ou encore pour la lubrification de glissières ou rails.

De nouveau, les résultats obtenus à 50 m/min sont à l'origine d'une rugosité très

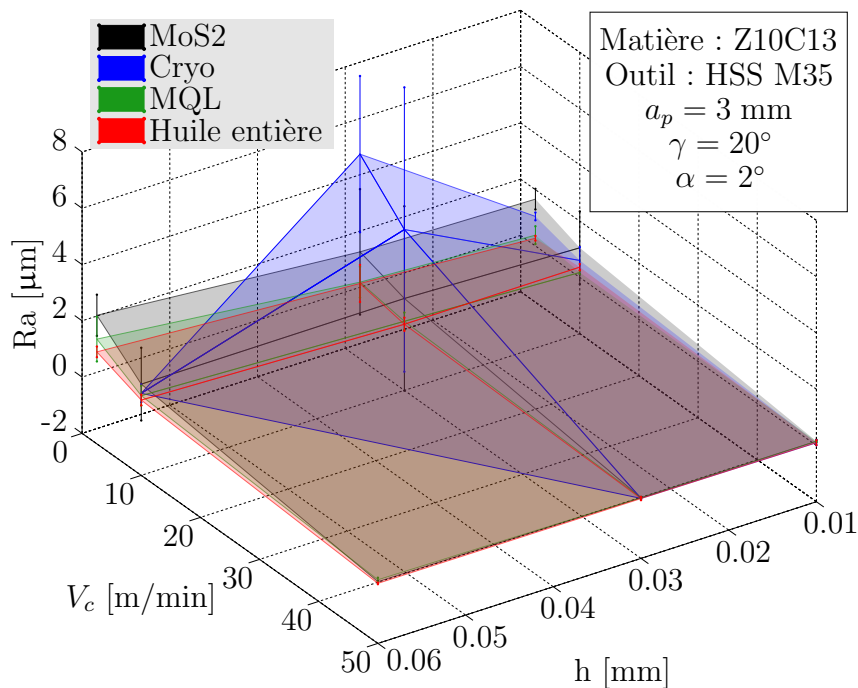


FIGURE 3.36 : Rugosité arithmétique obtenue sous refroidissement cryogénique, MQL, revêtement MoS_2 et huile entière

basse et stable, quel que soit le mode de lubrification. Si le revêtement MoS_2 génère des rugosités légèrement meilleures que celles obtenues à sec, elles restent malgré tout très supérieures à celles obtenues sous huile entière à basse vitesse. L'utilisation d'azote liquide met au jour des résultats très variables, mais globalement peu avantageux en termes de rugosité. Une forte dégradation d'état de surface a été observée à basse vitesse pour une progression de $30\ \mu\text{m}$, la rugosité est alors bien plus importante que celle obtenue à sec. Le refroidissement de la zone de coupe n'est pas favorable à une diminution de rugosité.

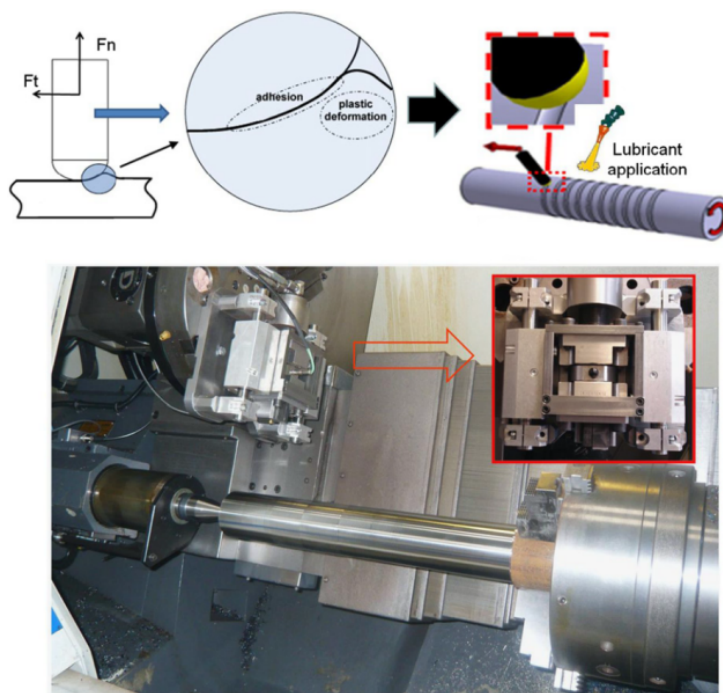
En revanche, les résultats obtenus avec une lubrification MQL sont très similaires à ceux obtenus sous huile entière, y compris dans les conditions les plus sévères de brochage.

De nouveau, les hautes vitesses offrent des résultats de rugosité optimaux. Par ailleurs, l'utilisation d'azote liquide est généralement à l'origine des rugosités arithmétiques les plus dégradées. On peut ainsi déduire que la rugosité R_a sera d'autant meilleure que la température au niveau de la zone de coupe sera élevée, dans la mesure où l'éventuelle modification de coefficient de frottement induite par l'apport d'azote liquide est négligée.

Si l'aspect thermique apparaît essentiel, la lubrification de l'interface joue également un rôle significatif. En effet, le fait que le meilleur état de surface soit obtenu sous huile entière, suivi de la lubrification MQL et de l'émulsion met en évidence le lien direct existant entre coefficient de frottement et rugosité.

Les meilleurs résultats ayant été obtenus au moyen de l'huile entière de référence, une caractérisation des coefficients de frottement impliqués dans les conditions de brochage a été réalisée. Des essais de frottement sur le tribomètre présentés par [Claudin *et al.* \(2010\)](#) et notamment mis en œuvre par [Ben Abdelali *et al.* \(2011\)](#) ont ainsi été effectués au moyen de pions en acier rapide de 8 mm de diamètre, possédant une extrémité hémisphérique de 17 mm de diamètre. En vue de se concentrer sur le frottement présent sur la face de coupe, aucun revêtement n'a été appliqué sur le pion. L'application d'un revêtement TiN pourrait permettre d'étendre cette étude à l'interface caractérisant le contact face de dépouille/matière.

Un effort de 1 000 N a été appliqué sur le pion et l'huile a été disposée en amont de la zone de frottement par pulvérisation. Au vu des très faibles vitesses de glissement nécessaires pour représenter le frottement obtenu en brochage, un déplacement longitudinal du pion sur la barre a été appliqué, sauf pour la vitesse de 50 m/min, pour laquelle le barreau de matière est mis en rotation afin d'obtenir une vitesse suffisante. Les résultats ainsi obtenus sont présentés sur la figure 3.38. Chaque condition a ici été reproduite 3 fois, et le pion a été systématiquement changé entre les essais. Les barres d'erreur corres-

FIGURE 3.37 : Tribomètre mis en œuvre (Claudin *et al.*, 2010)

pondent aux valeurs maximales et minimales obtenues au cours de ces essais.

Dans un premier temps, l'évolution du coefficient de frottement obtenu à l'interface M35/Z10C13 a été tracée en fonction de la vitesse de frottement, à sec et sous huile entière. Si le coefficient de frottement mesuré sous huile entière à très basse vitesse (≤ 2.5 m/min) est très faible (≈ 0.2), celui-ci est en revanche très élevé à partir d'une vitesse de frottement de 2.5 m/min, et avoisine les valeurs obtenues à sec. On remarque toutefois une décroissance de ce coefficient de frottement (à sec et sous huile) entre 5 et 50 m/min.

Les valeurs de coefficient de frottement obtenues sous huile entière dans la littérature excèdent rarement 0.1, comme présenté par Rech *et al.* (2013). Bien que ces valeurs aient été obtenues au moyen de pions carbures revêtus TiN, les valeurs mesurées dans notre étude apparaissent particulièrement élevées. Afin de déterminer si ce comportement particulier peut être attribué à l'acier rapide composant l'outil ou à l'inox ferrito-martensitique du barreau, d'autres combinaisons impliquant un pion carbure non revêtu et un barreau de C45 ont été testées. Dans chacune de ces configurations, le coefficient de frottement s'est avéré très bas, et stable aux alentours de 0.12. Il est possible d'en déduire qu'une affinité tribologique particulière résulte du couple acier rapide M35/Z10C13, les causes de cette dernière restant à l'heure actuelle encore mal établies.

L'observation des pistes de frottement ainsi que des zones de frottement des pions utilisés est également source d'informations quant aux phénomènes responsables des niveaux de coefficient de frottement observés. En effet, on observe notamment une coïnci-

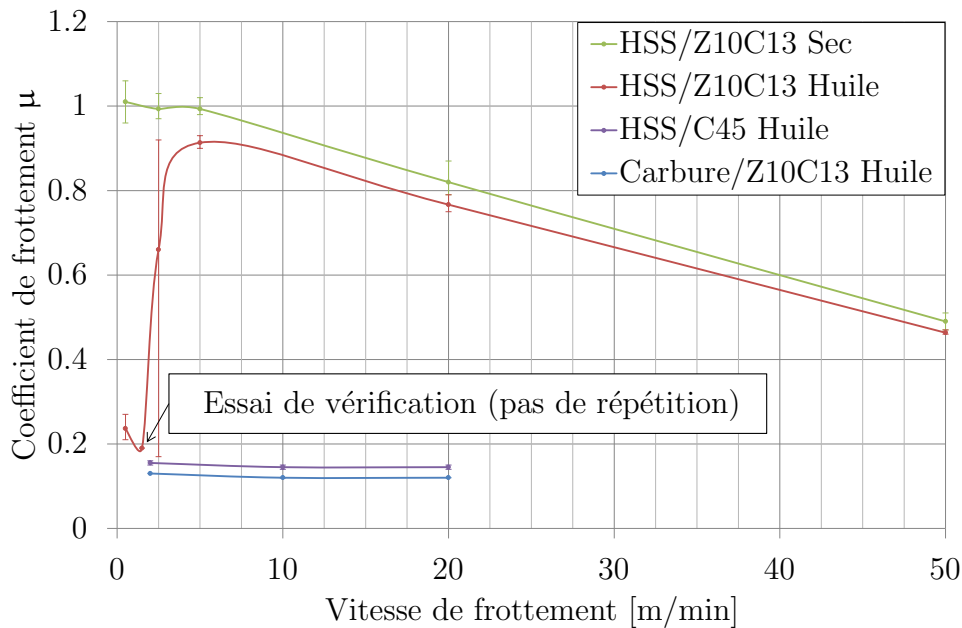


FIGURE 3.38 : Rugosité arithmétique obtenue à sec, sous émulsion et sous huile entière

dence entre les pistes de frottement à l'aspect lisse (encadrées en rouge sur la figure 3.39) et l'adhésion d'un dépôt de Z10C13 sur le pion. On peut supposer que dans ce cas, ce dépôt apparaît rapidement et les conditions thermomécaniques à l'interface permettent une forte adhésion de ce dépôt sur le pion. Ainsi, le cisaillement a lieu dans une zone située entre la matière adhérant au pion et le barreau de Z10C13, le frottement entre le pion et le matériau n'est alors pas considéré en tant que tel. Ce premier mode d'interaction est représenté sur la partie gauche de la figure 3.40.

Lorsque la piste de frottement n'a pas un aspect lisse et continu (figure 3.39), il y a probablement une alternance entre le mode 1 au cours duquel le matériau adhère au pion jusqu'à former un bourrelet en amont de la zone de frottement, et le mode 2 au cours duquel l'adhésion pion/matière n'est plus suffisante et une certaine quantité de matériau se détache en glissant le long du pion, et reste collée à la surface finale. Cela se traduit par l'apparition d'écaillés similaires à celles identifiées dans l'analyse des défauts de brochage de production de la figure 3.8.

Les coefficients de frottement les plus faibles ont été obtenus sous huile entière à très basse vitesse (inférieure à 2.5 m/min). La piste de frottement présente alors un aspect lisse et uniforme et un léger dépôt de matière reste présent après frottement sur le pion. Un lien entre l'aspect de cette piste et l'adhésion de matière sur le pion a pu être établi, l'aspect lisse étant permis par une forte adhésion de la matière sur le pion, et l'apparition d'écaillés étant imputable à une alternance entre adhésion et

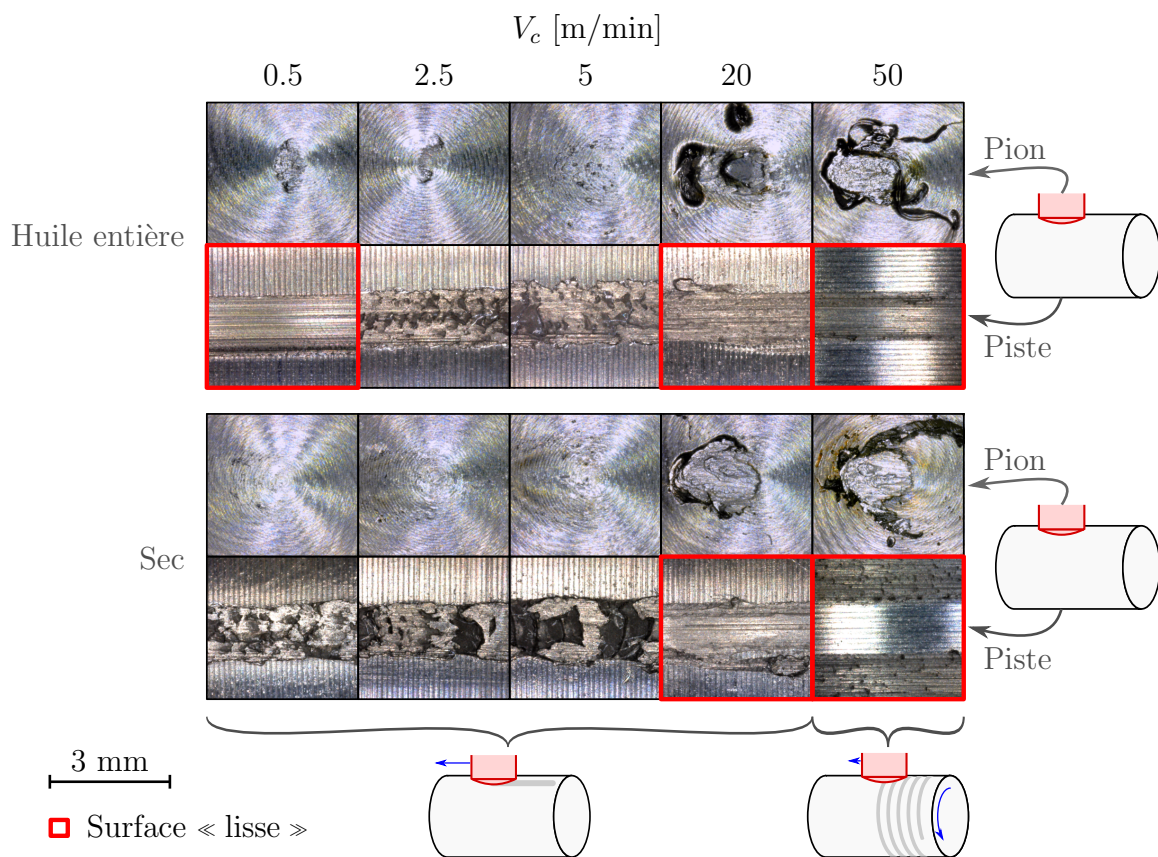


FIGURE 3.39 : Photographies des surfaces des pions en acier rapide et de la piste de frottement en Z10C13 après essais sur tribomètre sous huile et à sec

|| séparation de matière sur le pion.

Ainsi, dans les conditions industrielles de brochage c'est-à-dire lorsque des faibles vitesses de coupe sont mises en jeu, la lubrification sous huile entière présente les résultats les plus intéressants en termes de rugosité et coefficient de frottement. Une seule huile entière ayant été considérée jusqu'alors, une étude comparative de différentes huiles fournies par différents fabricants d'huiles a été menée. Cette étude visant à améliorer en priorité les résultats de finition de l'opération industrielle de brochage, une faible progression de $10 \mu\text{m}$ a été combinée à deux basses vitesses de coupe de 2.5 et 4 m/min.

Au total, 9 huiles provenant de 4 fabricants d'huiles différents ont ainsi été testées. Cette étude s'appuie sur le savoir-faire des fabricants d'huiles, seules des huiles catalogue adaptées au brochage ont ainsi été testées, un résumé des différents produits concernés et de quelques unes de leurs propriétés est présenté sur le tableau 3.1.

Si le type de lubrification présente une influence notable sur l'état de surface à basse vitesse, il apparaît au travers de cette étude que l'huile entière utilisée est également

Tableau 3.1 : Huiles entières testées en brochage

Fabricant	Désignation fabricant	Désignation étude	Viscosité cinématique à 40 °C [cst]	Taux de soufre [%]	Chimie
Houghton	CUTMAX 1529 FR4	Référence	30	2.874	Base minérale
MKU	Zusatz 2088	Huile 1	50	50	Additifs purs
MKU	Dionol ST V 1260	Huile 2	112	35	Synthétique additivée
MKU	Dionol Super 401-11	Huile 3	32	2.3	Base minérale
Fuchs	PLANTOCUT 42 AP	Huile 4	42	0.156	Base végétale
Fuchs	ECOCUT 832 DB -GG	Huile 5	20.5	4	Base minérale
Condat	NEATGreen 40	Huile 6	40	< 0.1	Base végétale
Condat	CONDACUT 620	Huile 7	17	3.1	Base minérale
Condat	EXTRUDEX 868	Huile 8	68	14	Base minérale
Condat	NEATGreen 40 EP	Huile 9	39	1.89	Base végétale

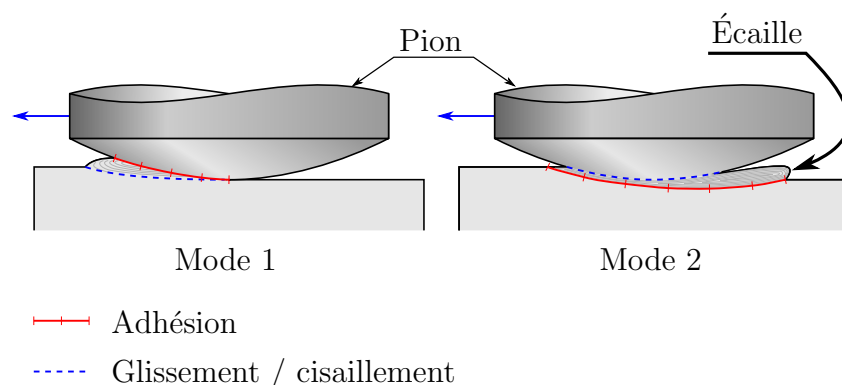


FIGURE 3.40 : Schématisation des modes d'interaction pion/lopin

déterminante, une variation de rugosité R_a pouvant atteindre 100% ayant été mesurée. Au vu des données à disposition, aucun lien entre composition ou propriété d'huile et état de surface n'est identifiable. Une étude des effets tribochimiques induits par l'utilisation de ces différentes huiles pourrait améliorer la compréhension des effets observés sur l'état de surface.

Un relevé des efforts spécifiques de coupe est également présenté sur la figure 3.41. De nouveau, aucun lien ne peut être établi entre une augmentation d'effort et une variation de rugosité, qu'il s'agisse de l'effort de coupe ou de pénétration. Toutefois, si l'effort de coupe varie très peu quelle que soit l'huile considérée, l'effort de pénétration est quant à lui davantage soumis à variation, avec un écart de l'ordre de 40% entre les efforts maximal et minimal.

En ce qui concerne la variation de rugosité R_a en fonction de la vitesse de coupe, certaines huiles permettent d'obtenir un meilleur état de surface à 2.5 m/min alors que d'autres présentent une rugosité plus faible à 4 m/min. Ces écarts peuvent être conséquents dans un sens comme dans l'autre comme illustré par les résultats observés sur les huiles 5 et 7.

Pour conclure, le choix de l'huile entière influe fortement la rugosité issue de l'opération de brochage. Si certaines huiles s'avèrent particulièrement efficaces à très basse vitesse, d'autres nécessitent une activation de certains additifs obtenue à des vitesses (et donc des températures) plus importantes. En revanche, les efforts de coupe sont sensiblement identiques quelle que soit l'huile impliquée.

L'huile de référence correspondant à l'huile utilisée en situation de production a par ailleurs démontré des résultats parmi les plus intéressants en termes d'état de surface. Ceux-ci sont également très stables sur la plage d'étude considérée (entre 2.5 et 4 m/min). Il a par conséquent été décidé de ne pas prolonger les investigations

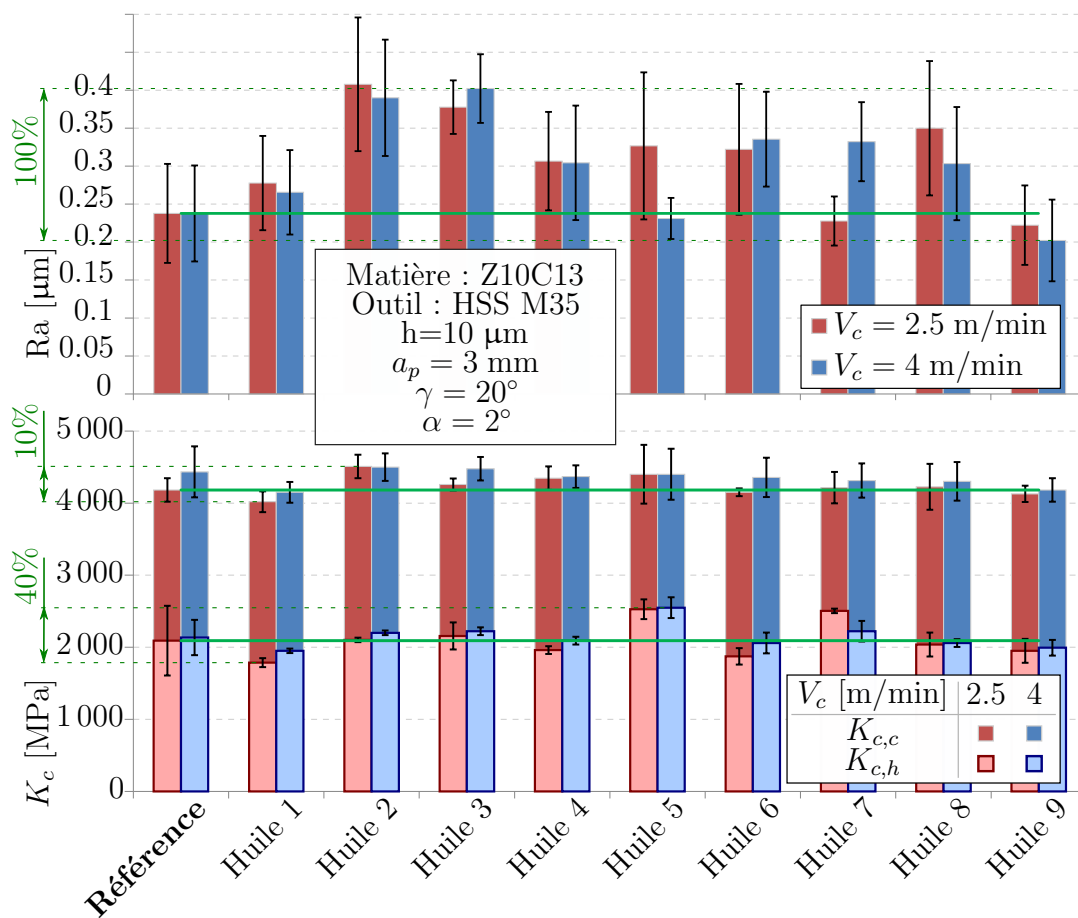


FIGURE 3.41 : Comparatif des rugosités et efforts spécifiques de coupe obtenus au moyen de différentes huiles entières

|| liées à l'huile de coupe.

3.2.6 Matériau broché

L'usineur possède dans la plupart des cas une certaine liberté liée au choix des outils de coupe, de la mise en œuvre du procédé en lui-même voire dans certains cas de la machine la plus adaptée à la réalisation de l'opération considérée. En revanche, le matériau à usiner est très souvent un paramètre d'entrée auquel il est nécessaire de s'adapter. La modification de la composition voire de l'état microstructural du matériau à brocher n'est que très rarement envisageable. L'étude présentée dans ce document ne dérogeant pas à cette règle, les conditions optimales de brochage du Z10C13 utilisé pour la réalisation des plaques entretoises ont été recherchées, et un effort particulier a été apporté à l'amélioration de la compréhension des résultats d'état de surface résultant du brochage.

L'étude du frottement présentée précédemment (section 3.2.5) a mis au jour un comportement particulier apparaissant lors du frottement d'un pion en acier rapide sur un barreau de Z10C13. En effet, le coefficient de frottement est bien plus élevé que lorsqu'un pion en carbure est impliqué, et dans certaines conditions la bande de frottement présente un aspect écaillé similaire à celui observé en brochage.

Afin de mieux appréhender la structure de ces écailles et de proposer une explication à l'écart de rugosité observé à faible vitesse ($V_c = 2.5$ m/min) pour différentes valeurs de progression, des essais avec une progression élevée de $60 \mu\text{m}$ et d'autres avec une faible progression de $10 \mu\text{m}$ ont été réalisés. Les surfaces ainsi obtenues ont ensuite été nettoyées, et revêtues Nickel par voie électrochimique avant d'être découpées, attaquées (réactif Marble) et analysées. Cette procédure est schématisée sur la figure 3.42.

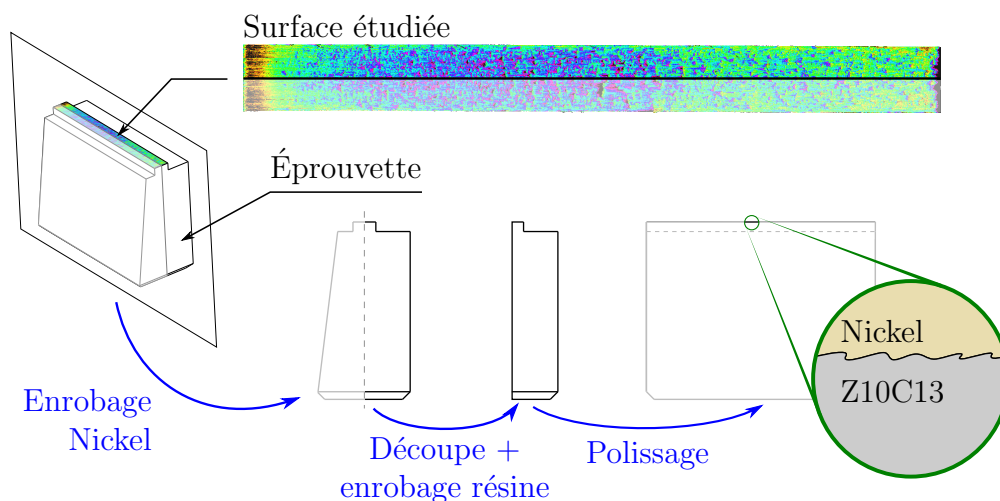


FIGURE 3.42 : Schématisation du procédé d'obtention d'une coupe transversale de la surface brochée

La figure 3.43.a présente une vue transversale de la face brochée. Les écailles évoquées jusqu'à présent sont mises en évidence, en particulier pour de fortes progressions, même si leur présence est également avérée à basse progression. On observe une forte similarité entre cet état de surface et celui issu de la formation et du détachement d'arête rapportée (Vidéo Balzers¹). On peut en déduire que cet état de surface irrégulier et écaillé provient donc bien du détachement par intermittence de cette arête rapportée. Notons que si en usinage il est courant de considérer que l'apparition d'arête rapportée n'intervient pas à basse vitesse (Tomac *et al.*, 2005), celle-ci se produit malgré tout à très basse vitesse dans le cas du brochage. Si à une vitesse de 50 m/min l'état de surface semble lisse et la rugosité est très faible, il est malgré tout très probable qu'une arête rapportée se forme comme en atteste les stries orientées dans la direction de brochage.

1. <https://www.youtube.com/watch?v=uwh3ouvzSLk>

À ce stade, deux hypothèses expliquant la formation d'arête rapportée ont été envisagées :

- Leur apparition est favorisée par la présence de deux phases aux propriétés mécaniques différentes, la martensite et la ferrite ;
- La composition chimique du matériau est responsable d'une affinité forte du Z10C13 avec l'acier rapide de l'outil, voire le revêtement TiN en dépouille.

Afin de statuer sur la première hypothèse, des tests de brochage ont été réalisés sur deux aciers inoxydables, un inox X6Cr17 purement ferritique et un inox 15-5PH purement martensitique. La composition des inox évoqués est présentée sur le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Composition des inox ferritiques et martensitiques étudiés

% max	C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
Z10C13	0.11	1.03	0.035	0.03	0.55	1.0	14.15	0.068	0.161
15-5PH	0.07	1.00	0.030	0.04	1.00	5.5	15.50	-	4.500
X6Cr17	0.08	1.00	0.030	0.04	1.00	-	18.00	-	-

Pour représenter la phase de finition d'une opération de brochage, la vitesse de coupe a été fixée à 2.5 m/min et la progression à 10 μm . La rugosité arithmétique des surfaces ainsi générées est présentée dans le tableau 3.3. Ces mesures mettent en évidence un Ra sur le Z10C13 2.5 fois supérieur à celui mesuré sur un inox purement ferritique ou purement martensitique.

Les découpes et polissages des surfaces ainsi générées ont mis en évidence la présence d'arête rapportée uniquement lors du brochage de l'inox Z10C13, le brochage des inox X6Cr17 et 15-5PH générant des surfaces à l'aspect lisse comme présenté sur la figure 3.43.b. Or, les inox X6Cr17 et 15-5PH ont été sélectionnés pour leur composition chimique assez similaire à celle du Z10C13, afin de limiter l'influence d'effets issus de l'affinité chimique entre l'inox broché et l'outil et à focaliser l'étude sur l'influence des phases.

Ni la phase de ferrite ni celle de martensite ne semble être à l'origine de l'apparition d'arête rapportée en brochage. Les inox X6Cr17 et 15-5PH possédant une composition chimique assez similaire à celle du Z10C13, l'influence de l'affinité chimique de ces inox avec l'acier rapide de l'outil peut être négligée. Il est ainsi possible de supposer que l'apparition d'arête rapportée provient de l'alternance de phases de ferrite et de martensite.

Tableau 3.3 : Rugosités obtenues après brochage ($h = 10 \mu\text{m}$, $V_c = 2.5 \text{ m/min}$), et mesures de microdureté

	Rugosités		Microdureté (HV0.1)	
	Ra [μm]	Rq [μm]	ferrite	martensite
Z10C13	0.15	0.20	216.1	213.1
	0.31	0.43	207.4	213.1
	0.29	0.36	204.6	207.4
moyenne	0.25	0.33	209.4	211.2
15-5PH	0.08	0.09		
	0.13	0.16		344.8
	0.09	0.11		
moyenne	0.10	0.12		344.8
X6Cr17	0.11	0.13		
	0.10	0.13		160.7
	0.10	0.12		
moyenne	0.10	0.13		160.7

Notons qu'afin de confirmer l'hypothèse visant à négliger l'influence de la composition chimique, divers essais de traitements thermiques ont été réalisés sur l'inox Z10C13 afin d'obtenir un inox mono-phasique. Ces traitements thermiques n'ont jamais abouti au résultat souhaité, les phases de ferrite et martensite persistant après traitement.

Un lien entre le dépôt d'arête rapportée intervenant à basse vitesse et l'étude des paramètres de rugosité effectuée dans la section 3.2.1 peut ainsi être réalisé. En effet, la topographie de surface obtenue parallèlement à la direction de coupe à basse vitesse et forte progression (présentée sur la figure 3.22.b.) est conforme à l'état de surface attendu lors du dépôt d'arête rapportée en usinage.

Pour finir, une caractérisation plus fine des phases composant le Z10C13 a été réalisée au moyen d'une machine de nano-indentation.

En effet, des mesures de microdureté des deux phases du Z10C13 présentées sur le tableau 3.3 ne permettaient pas une caractérisation suffisamment fine des propriétés des phases impliquées. Les résultats issus des mesures de nano-indentation sont présentés sur le tableau 3.4. Un exemple des indents réalisés est présenté sur la figure 3.44.

Les écarts de dureté mesurés par nano-indentation entre la phase de ferrite et de martensite sont plus importants que ceux issus de mesures de micro-dureté. Cependant, il reste difficile de mesurer la dureté uniquement de l'une des phases (ferrite ou martensite), car même si l'indentation est réalisée sur une zone purement martensitique, la ferrite située aux alentours du grain de martensite subit également une déformation. Ceci explique

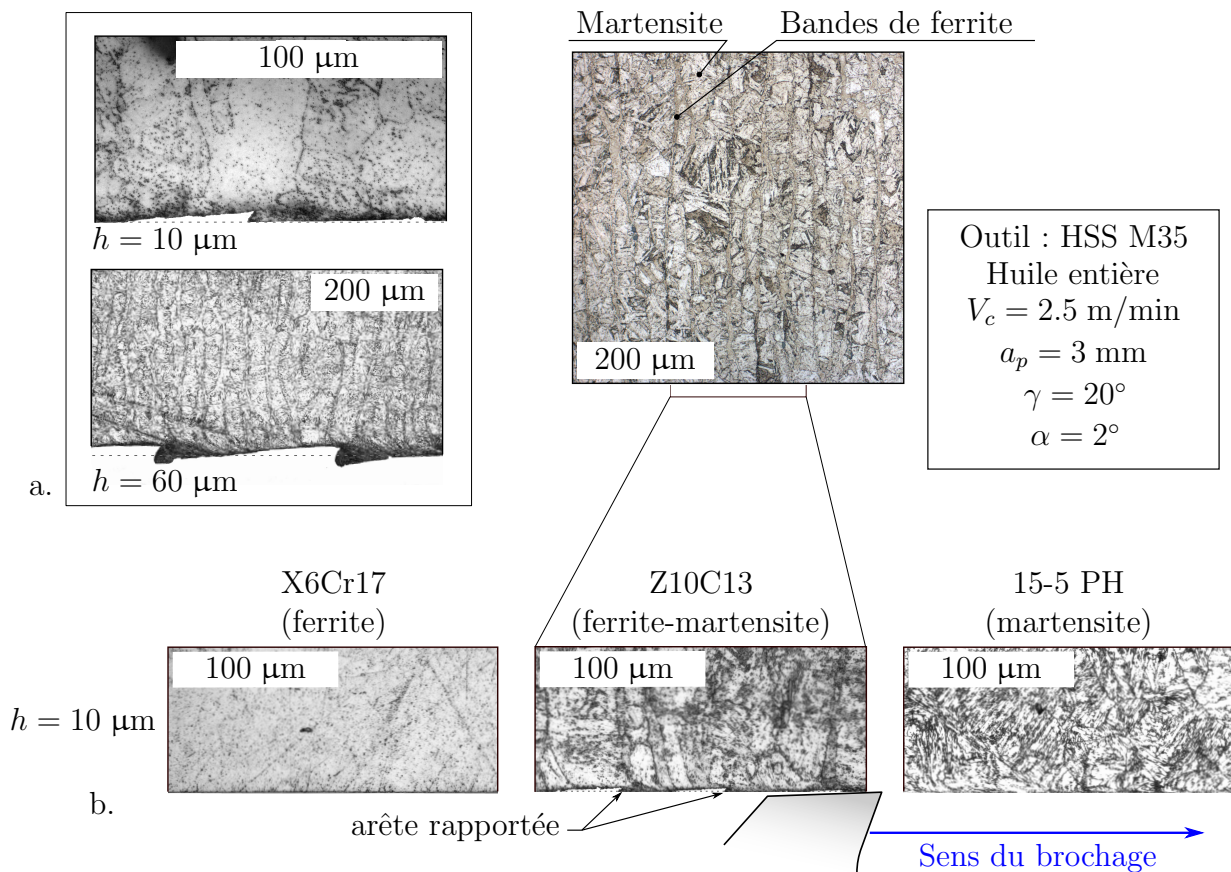


FIGURE 3.43 : Surface brochée du Z10C13 pour plusieurs progressions (a.) et de matériaux ferritiques et martensitiques (b.)

en partie l'écart de dureté observé entre les inox purement martensitiques et purement ferritiques (tableau 3.3) et les phases de ferrite et de martensite du Z10C13 (tableau 3.4). Une solution consiste à réaliser ces essais sous des charges plus faibles, c'est ce qui a été fait par Mazaheri *et al.* (2015) sur un acier ferrito-martensitique. La martensite présente alors une dureté de l'ordre de la microdureté Vickers mesurée sur le 15-5PH (entre 340 et 420 $\text{HV}_{10 \text{ mN}}$), et la ferrite une dureté légèrement supérieure à celle mesurée sur le X6Cr17 (entre 180 et 290 $\text{HV}_{10 \text{ mN}}$).

Finalement, il est raisonnable de conclure que le dépôt d'arête rapportée consécutif au brochage de l'inox Z10C13 est lié à l'alternance entre deux phases aux propriétés mécaniques différentes. Plusieurs études réalisées par Simoneau *et al.* (2006a,b) établissent un lien entre l'apparition de défauts de surface similaires, et la transition d'une phase dure vers une phase plus ductile lors d'une opération de micro-usinage, ces défauts n'étant pas observés lors de la transition inverse.

Dans notre cas d'étude, des constatations similaires peuvent être faites pour de faibles progressions de $10 \mu\text{m}$. En revanche, comme présenté sur la figure 3.43.a., le lien entre la

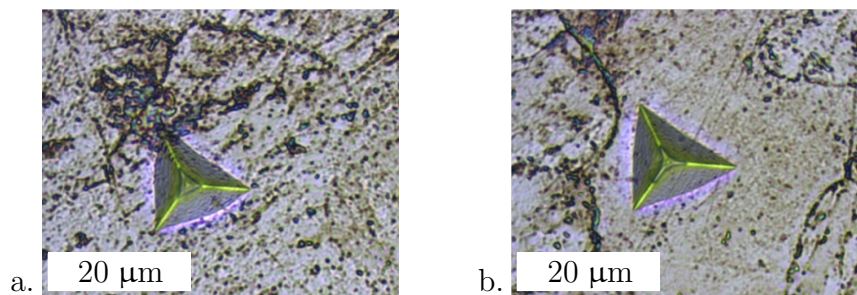


FIGURE 3.44 : Exemples d'indents issus de la nano-indentations de la martensite (a.) et de la ferrite (b.) du Z10C13 à 250 mN

Tableau 3.4 : Essais de nano-indentation du Z10C13

Effort appliqué	Ferrite		Martensite	
	HV _{IT}	E* [GPa]	HV _{IT}	E* [GPa]
250 mN	257.45	199.62	276.67	220.63
	230.78	216.14	262.67	214.61
100 mN	232.37	226.21	264.19	228.98
Moyenne	240	214	268	221

distance inter-granulaire et la fréquence d'apparition de ces dépôts n'est plus vérifiée pour une forte progression de 60 µm.

L'inox ferrito-martensitique Z10C13 est utilisé pour la réalisation de plaques entretroises car il offre un bon compromis entre propriétés mécaniques, résistance à la corrosion et coût. Si la martensite possède des propriétés mécaniques bien plus élevées que la ferrite, cette dernière permet d'éviter la ségrégation intergranulaire d'éléments comme le phosphore, l'antimoine et l'arsenic, susceptibles de diminuer la ductilité de l'alliage pendant le laminage (Baroux, 2014).

Mais l'alternance d'une phase dure (martensite) et d'une plus ductile (ferrite) provoque l'apparition de dépôts d'une arête rapportée, source d'une dégradation significative de l'état de surface. Si l'apparition de ce dépôt semble correspondre à la transition d'un grain de martensite vers un grain de ferrite à faible progression, l'espace séparant deux dépôts consécutifs est bien plus important que la distance inter-granulaire à forte progression.

Notons qu'en situation de production, l'apparition de ce phénomène d'écailles est éliminée par l'utilisation d'une progression diminuant progressivement (parfois jusqu'à 5 µm). De plus les dernières dents (dites de calibration) possèdent des dimensions identiques, ce qui permet notamment d'écrêter les éventuelles aspérités

|| issues du brochage.

3.2.7 Conclusion sur l'étude de l'état de surface

Au sein de cette section, l'influence des propriétés d'une dent élémentaire de broche sur l'état de surface a été étudiée. Dans un premier temps, quelques paramètres de rugosité ont été étudiés, dans des directions de mesures parallèles et perpendiculaires à la direction de coupe. L'influence de la variation de vitesse de coupe et de progression a ainsi pu être caractérisée. Ceci a notamment permis de mettre en évidence la formation d'aspérités dans la direction de coupe à faible vitesse et forte progression. Or les mesures de rugosité arithmétique effectuées dans cette même direction ont mis en évidence les états de surface les plus dégradés dans ces conditions de coupe. En s'appuyant sur ces constatations et sur les observations effectuées après revêtement nickel de ces surfaces, il a ainsi été possible de confirmer l'apparition et le dépôt d'une arête rapportée dans ces conditions de brochage.

Ces phénomènes d'arête rapportée n'ont pas été observés lors du brochage d'inox purement ferritiques ou martensitiques. Il en a été déduit que la formation de ces défauts provient de l'alternance de phases possédant des propriétés mécaniques très différentes.

En ce qui concerne les angles d'outil, les meilleures rugosités Ra ont été observées pour un angle de coupe élevé, la diminution d'angle de dépouille pouvant s'avérer bénéfique dans certaines conditions. L'introduction d'un angle d'inclinaison d'arête n'a en revanche pas été à l'origine de diminution de rugosité. La méthode de lubrification s'est quant à elle révélée décisive quant à l'état de surface obtenu, les meilleurs résultats ayant été obtenus sous huile entière. Des essais sur tribomètre ont par ailleurs mis en évidence l'apparition de pistes de frottement lisses et continues lorsque le bourrelet de matière adhère au pion, alors que l'état de surface généré est discontinu lorsque la matière n'adhère pas ou peu au pion. Un parallèle peut être fait avec l'apparition d'arête rapportée, une arête rapportée très solidaire de la face de coupe étant potentiellement bénéfique à l'état de surface.

Au cours des différents essais réalisés, la rigidité a plusieurs fois été incriminée pour expliquer des déviations géométriques voire d'état de surface. Cette rigidité fait l'objet d'une étude plus approfondie dans la suite de ce document.

3.3 Formation du copeau

L'aspect confiné de la coupe en brochage nécessite une prise en compte de la géométrie du copeau et notamment de son volume apparent après brochage pour le dimensionnement de la chambre à copeaux. La maîtrise de la formation du copeau est par ailleurs essentielle

en vue d'éviter les risques de blocage de ces derniers (par exemple entre les flancs de dent et le matériau broché) ou encore de faciliter leur évacuation après l'opération de coupe.

Le diamètre d'enroulement final est un indicateur a priori aisément mesurable. Celui-ci peut être utilisé afin de raffiner la méthode de dimensionnement de la chambre à copeau évoquée dans l'état de l'art et basée sur la notion de taux de remplissage. En effet, si ces méthodes de dimensionnement empiriques considèrent la progression et de façon assez qualitative, le type d'opération (brochage intérieur, extérieur, etc.) ainsi que le matériau, d'autres paramètres tels que la vitesse de coupe ne sont pas pris en compte. Or ces derniers ont une influence significative sur la géométrie finale du copeau.

À titre d'exemple, un relevé vidéo de la forme du copeau en cours du brochage a mis en évidence la sensibilité de l'enroulement du copeau à la progression ainsi qu'à la vitesse de coupe. Ces résultats sont présentés sur la figure 3.45.

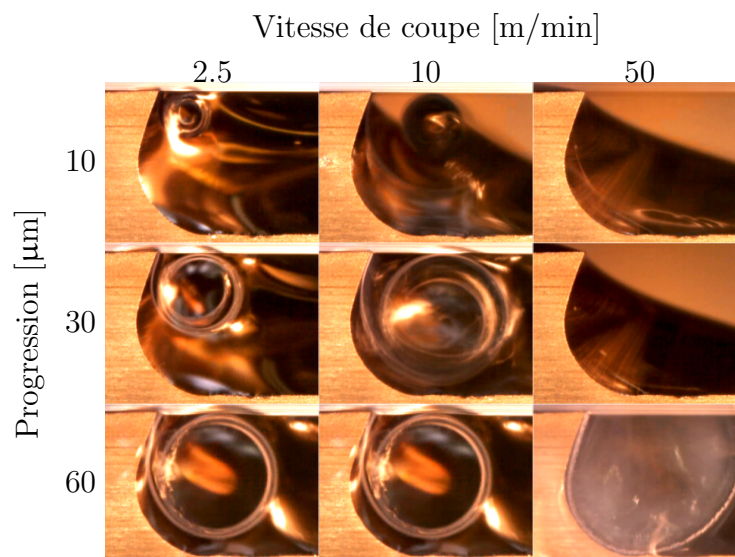


FIGURE 3.45 : Enroulement du copeau en cours de brochage pour différentes progressions et vitesses de coupe

3.3.1 Diamètre d'enroulement

Les trois phénomènes principaux influençant l'enroulement du copeau proviennent de sources différentes que sont :

- les mécanismes de séparation de la matière ;
- la contrainte imposée par la géométrie de la chambre à copeau (face de coupe + fond de chambre) ;
- la contrainte imposée par le copeau sur lui-même au cours de son enroulement.

Plusieurs méthodes de mesure du diamètre d'enroulement de copeau peuvent être envisagées, prenant en compte tout ou partie des trois phénomènes précédemment cités. La plus évidente consiste à considérer le diamètre du cercle circonscrit à ce copeau, présenté sur la figure 3.46. Dans ce cas, les trois sources d'influence de l'enroulement du copeau précédemment évoquées sont prises en compte. Or, la caractérisation de l'enroulement du copeau a pour objectif premier le dimensionnement de la chambre à copeau. Il convient ainsi de considérer un diamètre s'affranchissant de l'influence de cette chambre à copeau.

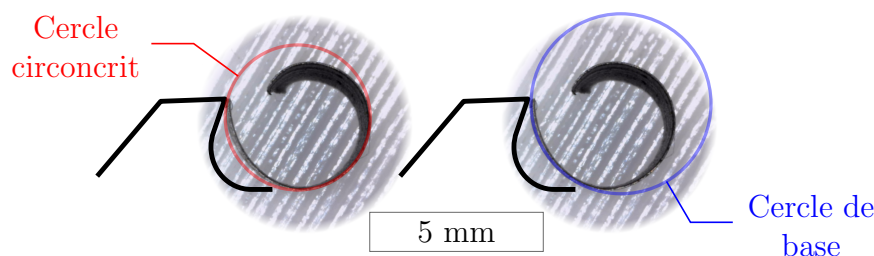


FIGURE 3.46 : Exemple de copeau de brochage et schématisation des cercles de base et circonscrit

Pour ce faire, le diamètre d'enroulement mesuré sur une zone encore peu influencée par le fond de cette chambre a été considéré. Ce diamètre présenté sur la figure 3.46 est désigné *diamètre de base*. Notons que celui-ci est similaire au diamètre circonscrit tant que ce premier n'excède pas la hauteur de la dent de brochage (soit 2.7 mm).

Pour étudier l'évolution de l'enroulement de copeau, un point de référence proche des conditions industrielles a été considéré ($V_c = 2.5$ m/min et $h = 30$ μ m). Puis la vitesse de coupe et la progression ont été modifiées tour à tour autour de ce point de référence. Ceci a été réalisé au moyen de trois outils possédant des angles de coupe respectivement de 15° , 20° et 25° .

Les résultats obtenus lors de la variation de vitesse entre 0.5 et 60 m/min sont présentés sur la figure 3.47. On peut tout d'abord observer une tendance à l'augmentation du diamètre d'enroulement du copeau avec la vitesse de coupe, quel que soit l'angle de coupe. On remarque notamment une augmentation rapide et relativement constante de ce diamètre d'enroulement jusqu'à une valeur située aux alentours de 5 mm, avant que la vitesse d'évolution ne soit réduite.

Si l'angle de coupe ne présente pas d'effet significatif sur l'enroulement du copeau à très faible vitesse ($V_c \leq 2.5$ m/min), des écarts sont clairement visibles au-delà. En effet,

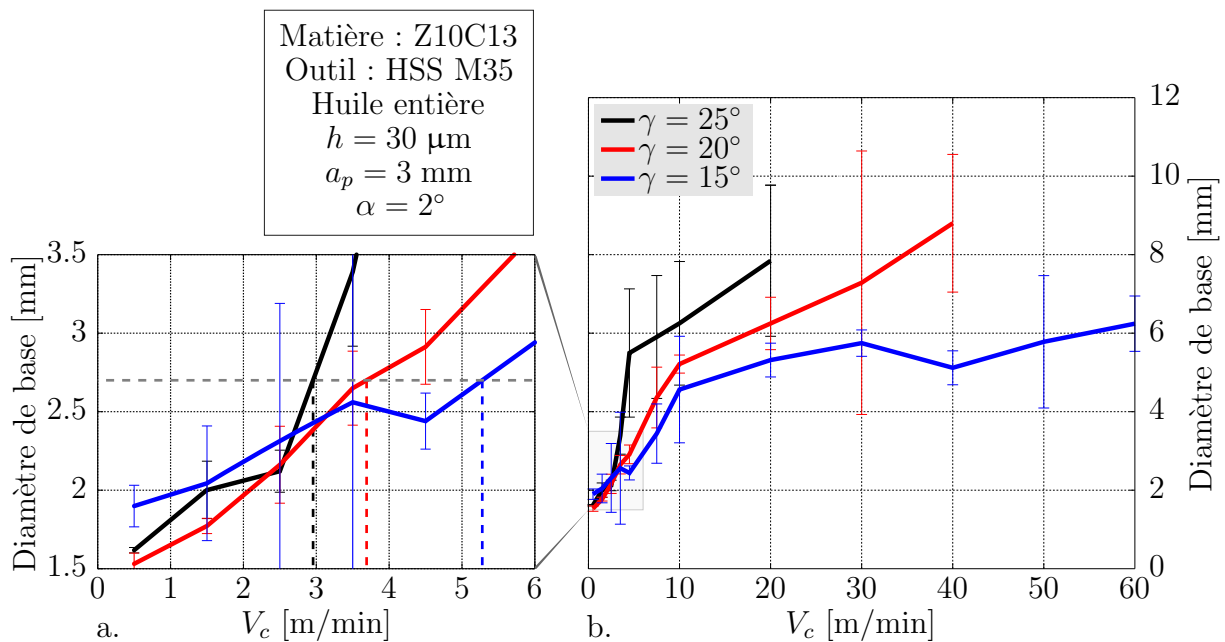


FIGURE 3.47 : Évolution du diamètre d’enroulement de copeau en fonction de la vitesse de coupe et de l’angle de coupe

le diamètre d’enroulement est d’autant plus faible que l’angle de coupe est réduit. Notons qu’au delà d’environ 8 mm de diamètre, la mesure devient trop délicate, la portion d’arc sur laquelle la mesure est réalisée devenant trop réduite par rapport au diamètre mesuré.

Sur la figure 3.47.a. est représentée en pointillés la zone de croisement entre la hauteur de dent (représentant le diamètre circonscrit admissible théoriquement de 2.7 mm) et les courbes de diamètre d’enroulement pour chacun des angles de coupe étudiés. On remarque que ce diamètre maximal sera atteint plus rapidement lorsque l’angle de coupe est élevé (≈ 3 m/min pour $\gamma = 25^\circ$) que lorsqu’il est faible (≈ 5 m/min pour $\gamma = 15^\circ$)

Afin de proposer une explication aux phénomènes observés, une modélisation rhéologique du matériau étudié est proposée. Les effets thermiques sont négligés, les vitesses de coupe impliquées en brochage étant considérées globalement faibles. Plusieurs modèles quasi-statiques permettent de décrire ce type de comportement, il s’agit dans le cas d’étude présenté de considérer aussi bien l’élasticité du matériau, que ses caractéristiques visco-plastiques.

Le modèle de Bingham généralisé permet la prise en compte de ces propriétés (Lurdos, 2008) et comporte également une notion d’écrouissage permise par l’utilisation du ressort H présenté sur la figure 3.48.b. L’analyse évoquée ici est basée sur le modèle de Bingham présenté sur la figure 3.48.a. afin de négliger les effets d’écrouissage non nécessaires à la représentation des phénomènes d’enroulement de copeau.

Ainsi, le copeau peut-être dissocié schématiquement en deux zones, une première

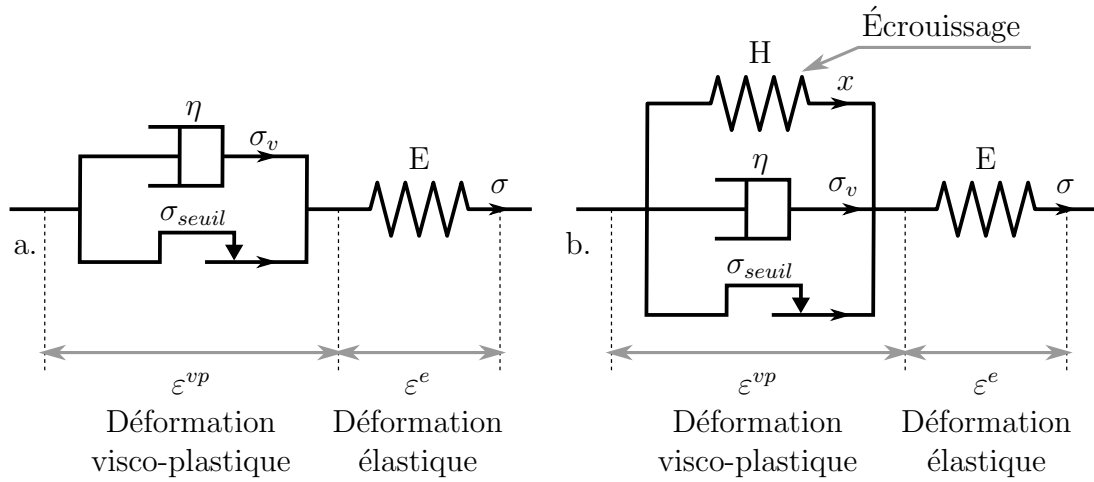


FIGURE 3.48 : Représentation schématique des modèles rhéologiques de Bingham (a.) et de Bingham généralisé (b.)

proche de l'arête de coupe au sein de laquelle la déformation est importante, et une seconde proche de la surface de la pièce usinée où la déformation sera plus faible. Étant donné l'angle de coupe très positif mis en œuvre en brochage, seul le mode I de séparation de matière évoqué par [Callister et Rethwisch \(2007\)](#) est pris en considération. Le copeau est donc supposé continu.

Comme présenté sur la figure 3.48, la déformation totale est divisée en deux composantes, la première représentant un comportement purement élastique et la seconde une déformation visco-plastique. En considérant le cas où la contrainte seuil σ_{seuil} est atteinte, on remarque que la vitesse de déformation influence la déformation plastique subie par le matériau. En effet, la contrainte exercée sur le matériau est absorbée en partie par le patin symbolisant la plasticité du matériau (σ_{seuil}), et en partie par l'amortisseur symbolisant sa viscosité comme évoqué par l'équation 3.4, la contrainte absorbée par l'amortisseur étant liée à la vitesse de déformation.

$$\sigma < \sigma_{seuil} \Rightarrow \sigma = E\varepsilon \quad (3.3)$$

$$\sigma \geq \sigma_{seuil} \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{vp} \\ \sigma = E\varepsilon^e = \sigma_{seuil} + \eta\dot{\varepsilon}^{vp} \end{cases} \quad (3.4)$$

Dans le cas de l'usinage, il est possible de considérer que la déformation totale ε du matériau est imposée par l'outil de coupe, et ne dépend pas de la vitesse de coupe. Ainsi,

l'équation 3.5 peut être déduite de l'équation 3.4.

$$\begin{aligned}
 E\varepsilon^e &= \sigma_{seuil} + \eta\dot{\varepsilon}^{vp} \\
 E(\varepsilon - \varepsilon^{vp}) &= \sigma_{seuil} + \eta\dot{\varepsilon}^{vp} \\
 \varepsilon^{vp} &= \varepsilon - \frac{\sigma_{seuil}}{E} - \frac{\eta}{E}\dot{\varepsilon}^{vp}
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

En se basant sur le résultat de cette équation 3.5, il apparaît qu'une vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}^{vp}$ élevée aura pour effet de diminuer la déformation visco-plastique ε^{vp} . En d'autres termes une vitesse de coupe élevée entraînera une diminution de la déformation plastique subie par le matériau, jusqu'à la faire tendre vers 0 dans le cas d'une vitesse et d'une viscosité élevées, ceci étant illustré sur la figure 3.49.b.

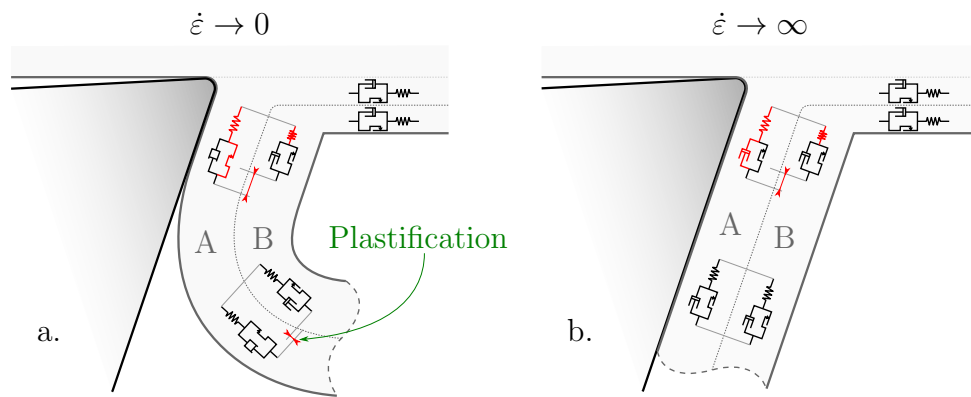


FIGURE 3.49 : Représentation schématique de la formation du copeau à faible vitesse de coupe (a.) et haute vitesse de coupe (b.)

Finalemnt, augmenter la vitesse de coupe tend à augmenter le diamètre d'enroulement du copeau, ce qui peut être expliqué par des effets visqueux. D'un point de vue industriel, le cas idéal consiste à obtenir un diamètre d'enroulement de copeau inférieur à la hauteur de denture, afin de limiter les risques de blocage. Il convient ainsi de conserver une vitesse de coupe inférieure à environ 3 m/min dans les conditions de coupe testées dans cette section.

L'angle de coupe a également une influence significative sur le diamètre d'enroulement, le copeau est d'autant plus enroulé que l'angle de coupe est faible. Ces constatations ne sont toutefois avérées qu'à partir d'une vitesse de coupe de l'ordre de 3 m/min.

La progression a également une influence sur l'enroulement du copeau. Ceci a notamment été mis en évidence par [Schulze et al. \(2012a\)](#), une augmentation de progression

résultant en une augmentation du diamètre d'enroulement. Un constat similaire est fait dans ce travail comme présenté sur la figure 3.50.

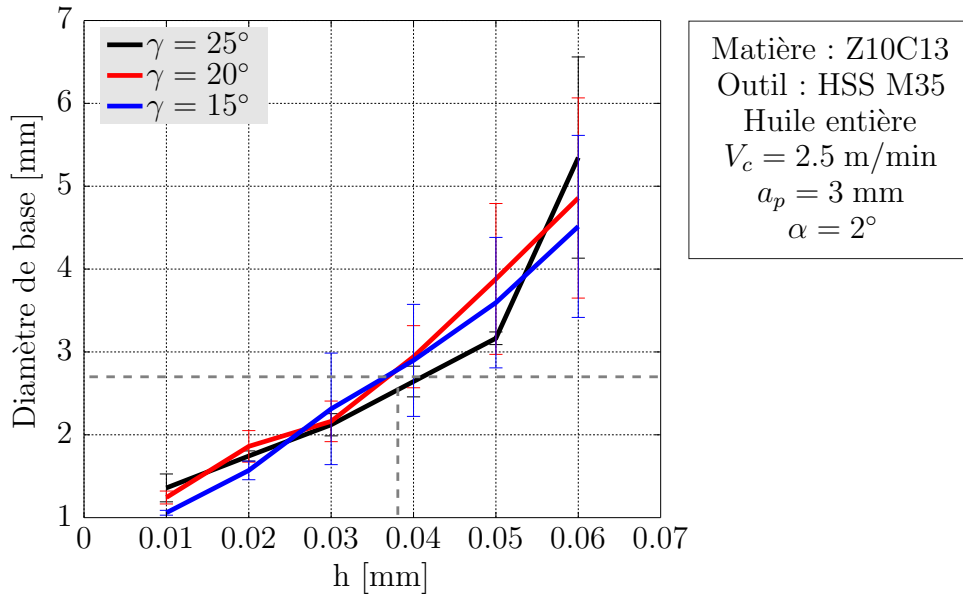


FIGURE 3.50 : Évolution du diamètre d'enroulement en fonction de la progression et de l'angle de coupe à basse vitesse de coupe

Les essais présentés sur la figure 3.50 ayant été réalisés à basse vitesse, aucune influence significative de l'angle de coupe sur le diamètre d'enroulement ne peut être mise en évidence, comme ce fut le cas précédemment.

La déformation imposée par l'outil de coupe entraîne un gradient de plastification à l'origine d'un moment assimilable à un moment de flexion. Ainsi, en assimilant le copeau non déformé à une poutre rectangulaire de hauteur h et de largeur a_p sa flèche théorique peut être déduite de l'équation 3.6.

$$y'' = \frac{M_{fx}}{E \cdot I_{Gz}} = \frac{M_{fx}}{E \cdot \frac{a_p \cdot h^3}{12}} \quad (3.6)$$

On remarque ainsi que cette flèche est très sensible à la hauteur du copeau, correspondant à la progression. Une augmentation de progression h entraîne une diminution de flèche, et donc une augmentation du diamètre d'enroulement. L'absence d'influence de l'angle de coupe dans ces conditions peut de nouveau être attribuée à des propriétés de viscosité de notre matériau.

La variation du diamètre d'enroulement avec la progression a été démontrée, une progression maximale de l'ordre de $37 \mu\text{m}$ permettant de générer des copeaux de diamètre inférieur à 2.7 mm.

La faible influence de l'angle de coupe à basse vitesse de coupe a été confirmée par ces essais.

3.3.2 Taux de compression de copeau

Si l'étude du diamètre d'enroulement permet la maîtrise de l'espace optimal nécessaire à la formation du copeau, la compréhension des mécanismes à l'origine même de la formation du copeau peut être affinée par la considération du taux de compression de copeau, schématisé sur la figure 3.51.

En effet la diminution de ce taux de compression est signe d'une meilleure efficacité énergétique du procédé (Todd *et al.*, 1994), et donc potentiellement de coefficients de frottement réduits et de conditions d'usinage optimisées.

Les effets d'écrasement latéral du copeau sont négligés. Le taux de compression de copeau TCC est alors défini comme le rapport entre l'épaisseur du copeau déformé h' et non déformé h .

$$TCC = \frac{h'}{h} = \frac{L_U}{L'_U} \quad (3.7)$$

Dans le cas d'étude évoqué, le rapport entre la longueur brochée L_U , et la longueur du copeau L'_U illustré sur la figure 3.51.b. et formulé par l'équation 3.7 a été privilégié. Il s'agit alors d'un taux de compression moyen au cours d'une opération de brochage.

La figure 3.52 présente la variation de taux de compression observée lors de la variation de vitesse et d'angle de coupe. Deux régimes de fonctionnement peuvent être identifiés pour un angle de coupe supérieur ou égal à 20° . Le premier intervient pour une vitesse de coupe inférieure à 3.5 m/min. Une augmentation du taux de compression avec l'augmentation de vitesse est alors visible. Puis à partir de 3.5 m/min, celui-ci se stabilise. La même tendance a été observée sur la pression spécifique de coupe $K_{c,c}$, ce qui confirme le lien entre taux de compression et efficacité énergétique.

Il est ainsi possible d'en déduire que l'énergie spécifique de coupe (J/m^3) – homogène à l'effort spécifique $K_{c,c}$ – présente les résultats les plus favorables à très faible vitesse (0.5 m/min), une constatation similaire pouvant être faite grâce à l'observation du taux de compression de copeau.

Une explication de ce phénomène se trouve probablement dans l'évolution du coefficient de frottement. En effet, une première zone de forte augmentation de ce coefficient avait été observée entre 0.5 et 5 m/min, avant une diminution progressive mais à des niveaux toujours très élevés de frottement.

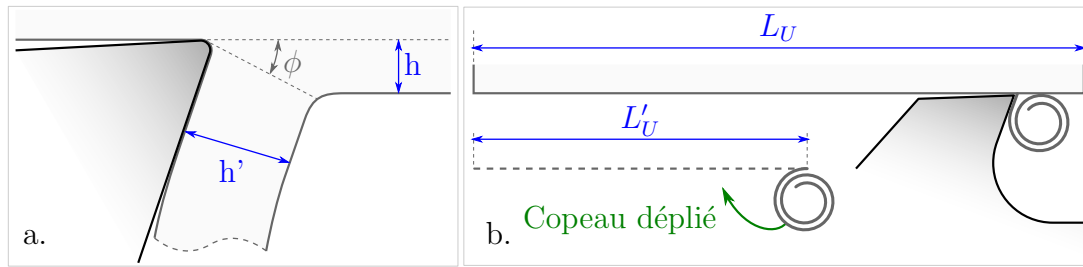


FIGURE 3.51 : Calcul du taux de compression de copeau TCC, méthode conventionnelle (a.) et méthode utilisée dans l'étude (b.)

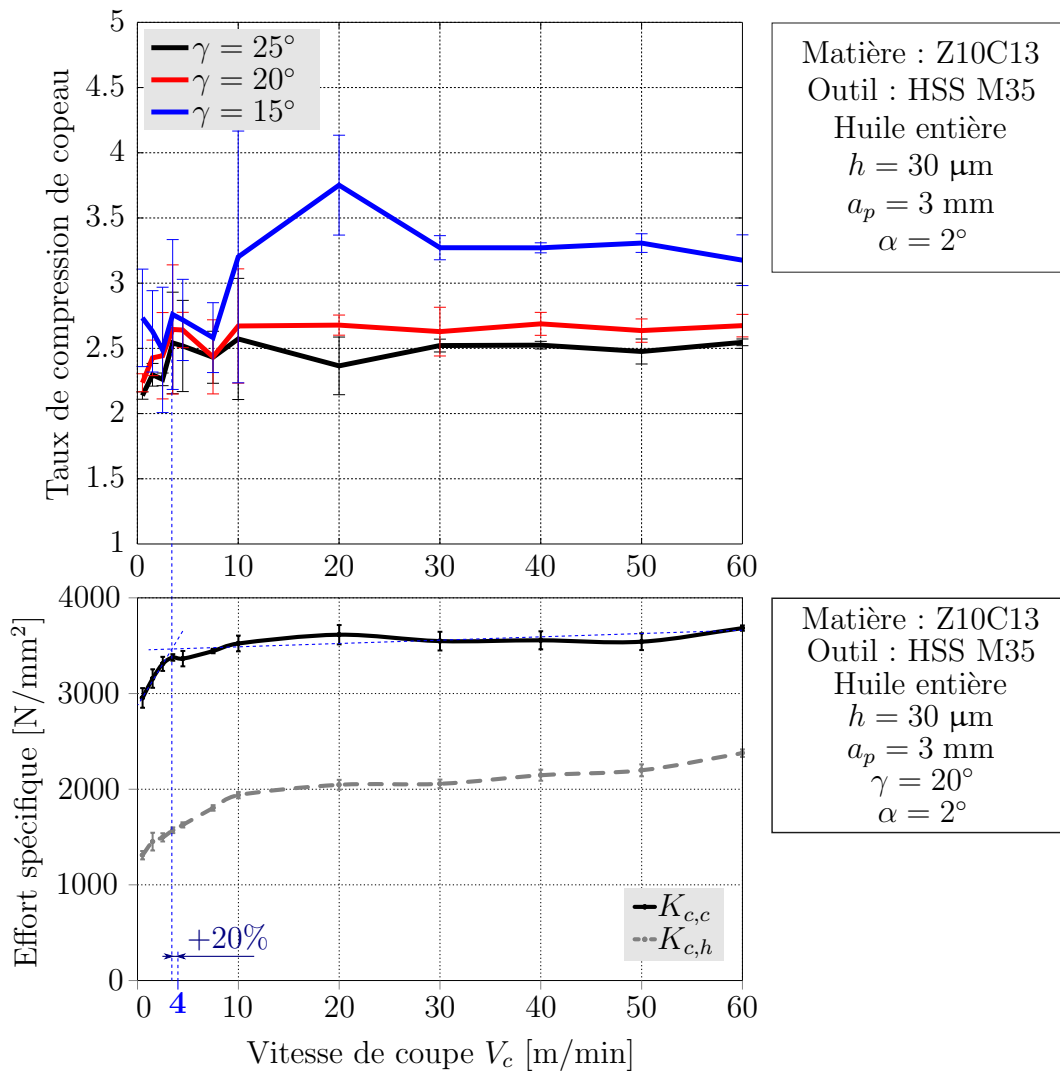


FIGURE 3.52 : Évolution du taux de compression de copeau et de l'effort spécifique de coupe en fonction de la vitesse de coupe et de l'angle de coupe

Si les résultats obtenus pour un angle de coupe de 20 et 25° présentent des tendances similaires, l'angle de coupe de 15° est source d'une variabilité de mesure bien plus importante, signe d'une longueur de copeau pouvant varier entre plusieurs essais réalisés dans des conditions similaires.

Il est également possible de mettre en évidence une diminution significative de taux de compression de copeau avec l'augmentation d'angle de coupe, et cela quelle que soit la vitesse de coupe. Augmenter l'angle de coupe permet d'optimiser l'efficacité énergétique de la coupe, ceci est particulièrement visible lors du passage de 15 à 20° à vitesse élevée sur la figure 3.52.

Pour conclure, les essais réalisés mettent au jour une efficacité de coupe optimale à très basse vitesse (le cas le plus favorable ayant été observé à 0.5 m/min), avec un angle de coupe important de 25°. La dépendance forte de l'énergie spécifique de coupe au coefficient de frottement présentée dans le chapitre 3.2.5 permet de supposer que le coefficient de frottement influence significativement le taux de compression de copeau et donc l'efficacité du procédé.

Par ailleurs, les résultats obtenus avec un faible angle de coupe de 15° présentent une forte variabilité, signe d'un manque de répétabilité et d'une coupe moins stable et maîtrisable. Il est donc raisonnable de proscrire un angle de coupe inférieur à 15° dans les conditions étudiées.

L'étude du taux de compression de copeau a été poursuivie avec la variation de progression. La vitesse de coupe est alors fixée à 2.5 m/min, ce qui correspond aux conditions utilisées en production.

La constatation précédente faisant état d'une dégradation d'efficacité de coupe avec la diminution d'angle de coupe se confirme au travers de la figure 3.53. En effet, le taux de compression est d'autant plus faible que cet angle est élevé. Par ailleurs lorsque cet angle est très faible (15°), une forte augmentation du taux de compression apparaît consécutivement à l'augmentation de progression jusqu'à atteindre une valeur supérieure à 4 pour une progression de 90 μm .

Quel que soit l'angle de coupe, une valeur de taux de compression de copeau minimale dépendant de la progression peut être identifiée, celle-ci se situe aux alentours de 36 μm dans le cas d'un outil possédant un angle de coupe de 20° (cf. figure 3.53). De nouveau, le lien peut-être fait avec la méthode classique du couple outil matière, la progression minimale ainsi obtenue étant similaire à celle observée avec le taux de compression comme en atteste la figure 3.54.

Notons également que cette valeur optimale de progression est similaire à la progression

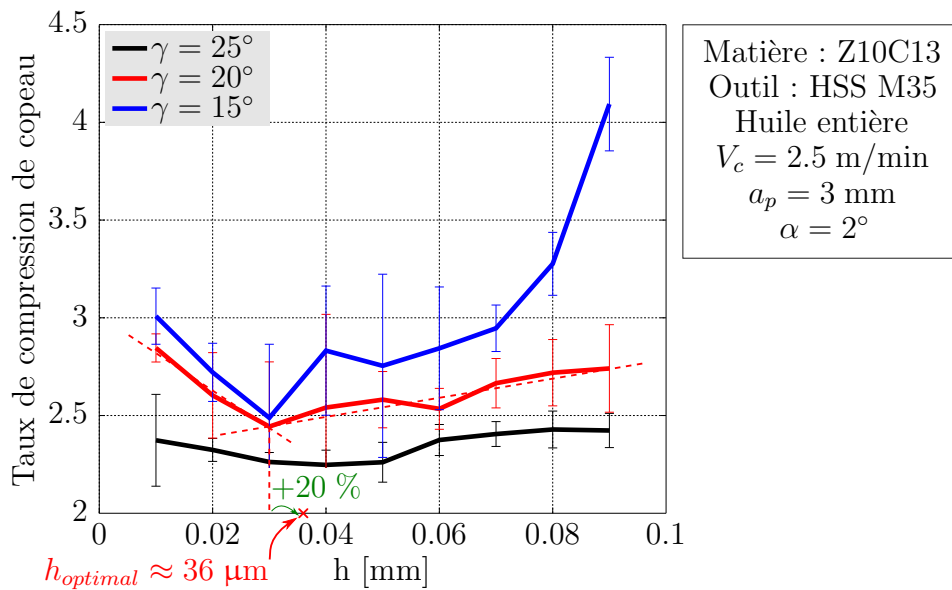


FIGURE 3.53 : Évolution du taux de compression de copeau en fonction de la progression et de l'angle de coupe

à partir de laquelle l'enroulement de copeau est suffisant pour que ce dernier soit en contact avec l'intégralité du fond de la chambre à copeau, comme évoqué par la figure 3.50.

L'influence positive d'un angle de coupe important sur l'efficacité énergétique de la coupe a été mise en évidence. Ceci permet par ailleurs d'augmenter la plage de progressions admissibles, comparativement à celle obtenue avec un faible angle de coupe.

Un lien fort entre les résultats issus des mesures d'efforts spécifiques de coupe et de taux de compression a également été établi, mettant au jour des valeurs minimales de vitesses et progressions similaires. Il est ainsi possible d'envisager d'utiliser l'étude du taux de compression de copeau comme une méthode alternative aux méthodes de couple outil/matière conventionnelles. En effet, cette méthode ne nécessite pas d'instrumentation particulière et permet de mettre en évidence des progressions et vitesses limites similaires à celles issues de la méthode du couple outil/matière définie par la norme NF66-520.

3.3.3 Formation du copeau et efforts de coupe

Une interdépendance significative des efforts de coupe et de la forme du copeau a ainsi été mise en évidence. Une attention particulière a donc été portée au lien entre le tracé

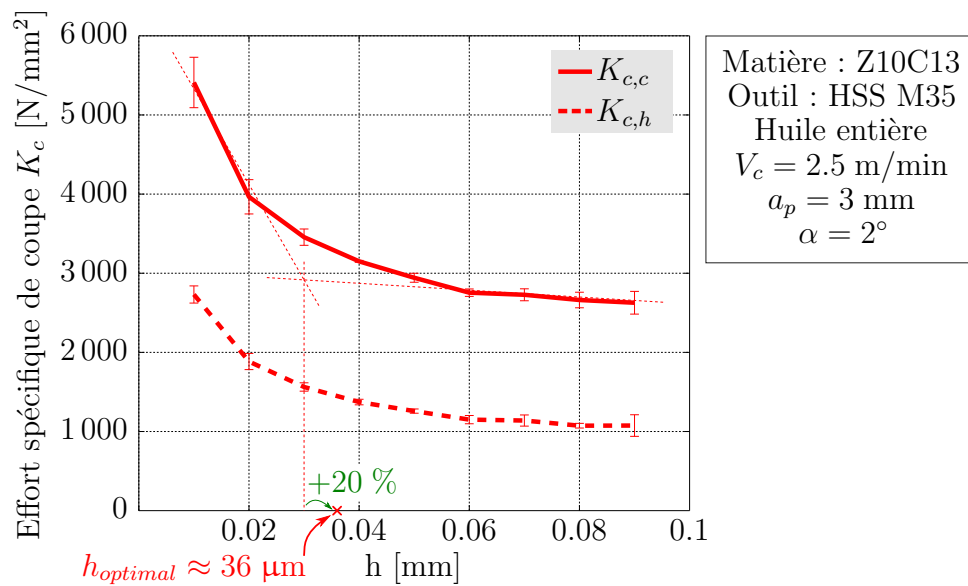


FIGURE 3.54 : Évolution de l'effort spécifique de coupe en fonction de la progression

d'effort obtenu, et la géométrie de copeau.

Sur les figures 3.55.a. et b., les courbes d'effort de coupe et de pénétration obtenues au cours d'une opération de brochage sont présentées respectivement. On remarque tout d'abord que les courbes d'effort de pénétration présentent une sensibilité plus importante à la vitesse de coupe.

Lors de la réalisation de ces essais de coupe, une caméra a été positionnée en direction de la zone de coupe afin de permettre un suivi de la formation du copeau. Si l'utilisation d'une caméra rapide aurait été pertinente, le seul matériel à disposition au moment des essais était une caméra classique.

Pour cette raison, la vitesse de coupe la plus réduite de 0.5 m/min a été utilisée comme référence, présentant par ailleurs une grande diversité de régimes de formation de copeau.

Plusieurs étapes de formation du copeau peuvent être mises en évidence en s'appuyant sur les observations issues des vidéos de brochage ainsi réalisées :

- $t_0 \rightarrow t_1$: Initialisation de la formation de copeau. À ce stade, la matière est plus re-foulée que proprement coupée. Zanger *et al.* (2014) évoque ce temps d'initialisation nécessaire à la stabilisation de la coupe et de l'angle de cisaillement.
- $t_1 \rightarrow t_2$: Le copeau commence à se former, ce dernier décrit une rotation horaire jusqu'à se stabiliser contre la face de coupe. Cette rotation est probablement concomitante à l'augmentation d'angle de cisaillement, ce qui explique la diminution d'effort de pénétration.
- $t_2 \rightarrow t_3$: Sur cette période, la longueur de contact est croissante ce qui explique l'augmentation d'effort. Par ailleurs, entre le début du brochage et la période t_3

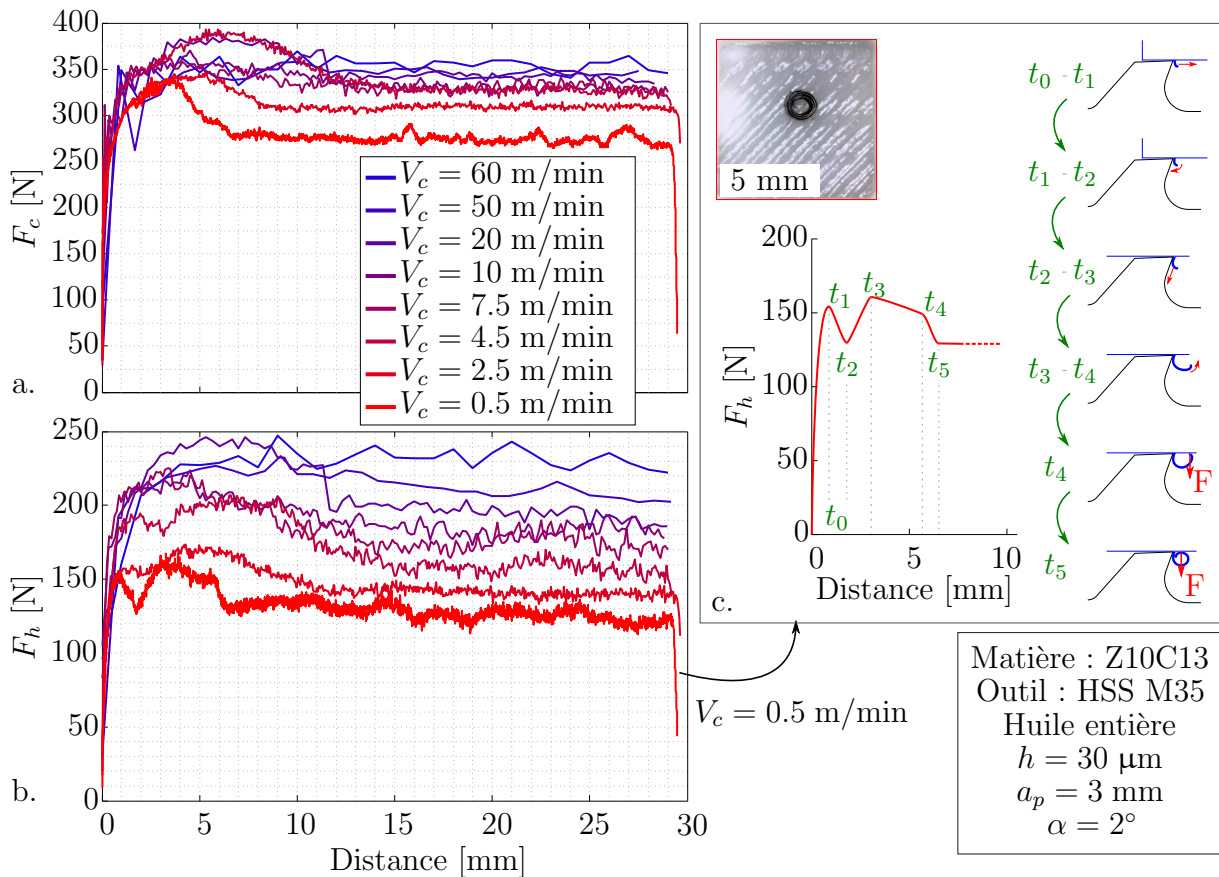


FIGURE 3.55 : Effort de coupe F_c (a.), de pénétration F_h (b.) et étapes de formation du copeau (c.)

le manque de rigidité du montage provoque une plongée de l'outil dans la matière (Zanger *et al.*, 2014), à l'origine d'un frottement supérieur en dépouille et donc de valeurs d'effort globalement supérieures sur cette période.

- $t_3 \rightarrow t_4$: À partir du point t_3 la coupe se stabilise, les effets de la rigidité du montage deviennent négligeables. Le frottement en dépouille diminue progressivement et le copeau observe une rotation anti-horaire autour de sa racine.
- t_4 : Au temps t_4 , le copeau entre en contact avec la surface de la pièce. Ceci résulte en une augmentation de l'angle de cisaillement, entraînant une diminution d'effort de pénétration. Par ailleurs, la force appliquée par l'intermédiaire de ce contact tend à favoriser l'écoulement du copeau.
- t_5 : Une fois le temps t_5 atteint, le copeau a effectué un premier tour d'enroulement, permettant une stabilisation de la coupe et des efforts en jeu.

Lors du brochage à haute vitesse, la plupart de ces effets ne sont plus visibles sur les courbes d'effort, ce qui provient essentiellement d'un diamètre d'enroulement de copeau bien plus important. Les effets de rigidité évoqués précédemment sont en revanche

toujours visibles avec une première zone affichant des efforts plus importants, avant une stabilisation à des niveaux d'effort inférieurs.

L'étude de la variation de progression sur les efforts de coupe est présentée sur la figure 3.56. On remarque tout d'abord les effets de la rigidité, présents sur chacune des courbes d'effort. Ceci se traduit par la présence d'un effort supérieur en début de brochage, qui se réduit et se stabilise par la suite.

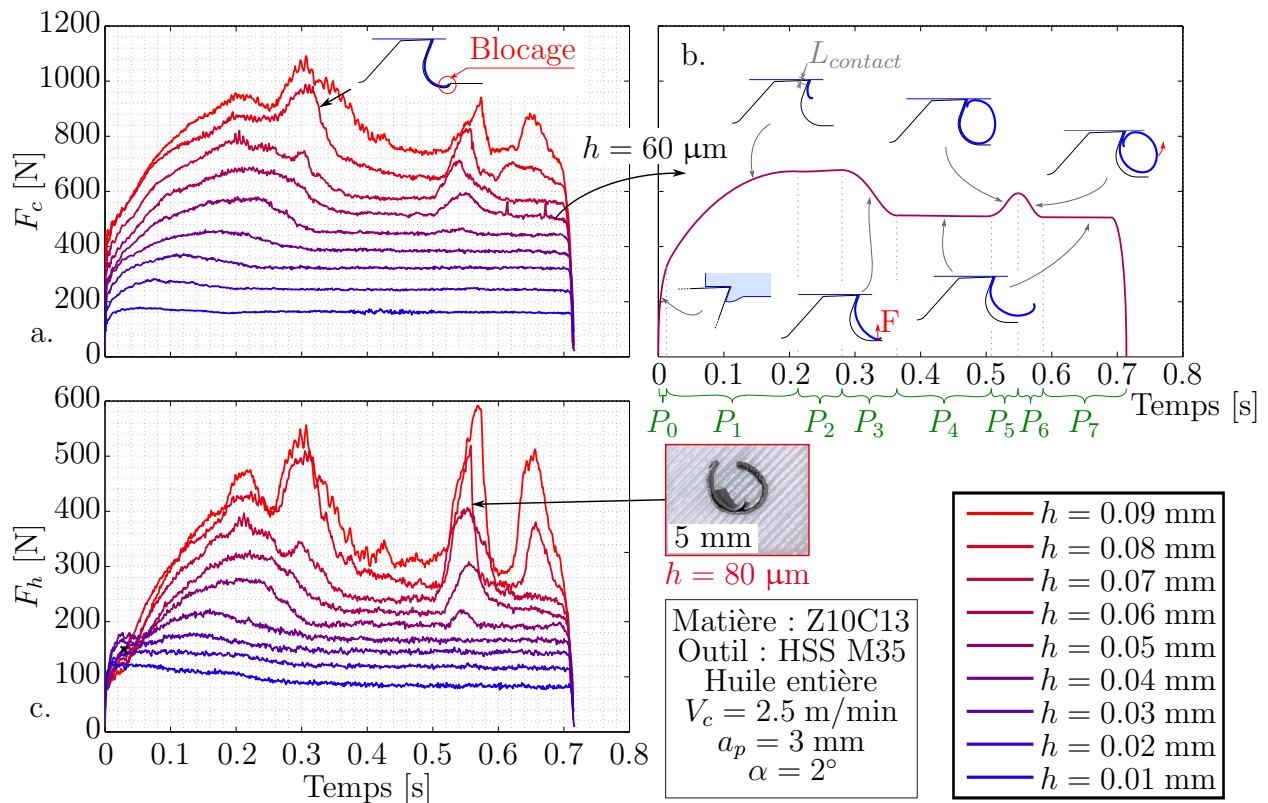


FIGURE 3.56 : Effort de coupe F_c (a.), de pénétration F_h (b.) et étapes de formation du copeau (c.)

De nouveau, l'observation de la formation de copeaux réalisée au moyen de vidéos de brochage a permis de dissocier plusieurs périodes, présentées sur la figure 3.56.b., mettant en œuvre des mécanismes de formation de copeau différents :

- P_0 : Il s'agit d'une phase d'initialisation similaire à celle décrite entre les temps t_0 et t_1 évoqués sur la figure 3.55.
- P_1 : Si les effets de rigidité apparaissent au cours de cette période, on remarque également une augmentation de la longueur de contact, expliquant partiellement l'augmentation d'effort de coupe.
- P_2 : La longueur de contact est stable, de même que la coupe.
- P_3 : À ce stade, le copeau entre en contact avec le fond de la chambre à copeau. Ceci a pour effet de plaquer le copeau sur la face de coupe, augmentant ainsi l'angle

de cisaillement, ce qui permet une diminution d'effort de coupe. Notons que pour une forte progression, un second pic peut être observé. Ceci peut être attribué à un mauvais affûtage de la face de coupe entraînant un blocage de copeau (mécanismes décrits dans le chapitre 1.3.3, notamment sur la figure 1.23).

- P_4 : Le copeau se forme librement
- P_5 : Une fois enroulé, le copeau entre en contact avec la matière non brochée. Si la progression est suffisante, ce dernier est sur-contraint entre la chambre à copeaux et la face non brochée, sa formation est alors bloquée et l'effort de coupe croît.
- P_6 : À partir d'un certain stade, les efforts exercés sur le copeau sont suffisants pour lui permettre une rotation autour de sa racine et donc son déblocage, les efforts reviennent donc au niveau nominal. Lorsque la progression est importante, le copeau ne parvient pas à se débloquent de lui-même, les efforts exercés entraînent donc une casse de ce copeau, comme ce qui peut être observé pour $h = 0.08$ mm.
- P_7 : Le copeau se forme de nouveau librement, comme en P_4 . Pour de fortes progressions, un nouveau pic peut être observé. En effet, lorsque le copeau s'est bloqué puis cassé, le nouveau front avant du copeau ainsi créé se retrouve de nouveau en contact avec la surface non brochée, les mécanismes de formation présentés en P_5 et P_6 sont de nouveau sollicités.

Par l'intermédiaire de cette approche, plusieurs phénomènes ont été mis au jour. En début de brochage, une phase d'initialisation au cours de laquelle le matériau n'est pas coupé mais davantage repoussé peut être identifiée. De nouveau, un lien entre enroulement, angle de cisaillement et efforts a été mis en évidence. De plus, le contact du copeau avec l'environnement (chambre à copeau, surface non brochée ou dos du copeau lui-même) entraîne une variation d'effort. Globalement, il semble qu'un copeau très enroulé soit à l'origine d'une réduction d'effort, ceci s'expliquant par une augmentation d'angle de cisaillement.

Les problèmes d'affûtage (tels qu'une plongée trop importante de meule d'affûtage sur la face de coupe) sont visibles au travers de pics importants au niveau de la période P_3 sur les efforts de pénétration en particulier, mais également les efforts de coupe. Les effets néfastes d'un enroulement de copeau trop faible sous forte progression ont également été mis en évidence, pouvant même provoquer un blocage et une rupture du copeau.

Ainsi, un copeau fortement enroulé semble être favorable à une diminution d'effort de coupe. Afin de confirmer cette observation, les efforts spécifiques de coupe ont été étudiés,

et mis en relation avec l'enroulement de copeau.

La figure 3.57 présente ainsi les efforts spécifiques de coupe obtenus pour différents angles de coupe. Une attention particulière a été portée aux résultats obtenus pour une vitesse de coupe de 10 m/min. En effet, pour une progression de 0.03 ou 0.06 mm l'effort spécifique est plus faible pour un angle de coupe de 20° que pour 15°. Cette tendance s'inverse pour une faible progression de 0.01 mm, l'effort est alors plus faible pour un angle de coupe de 15°.

L'observation qualitative de la forme des copeaux met en évidence un enroulement de copeau similaire quelles que soient les conditions présentées sur la figure 3.57.b., sauf pour $\gamma = 15^\circ$ et $h = 0.01$ mm.

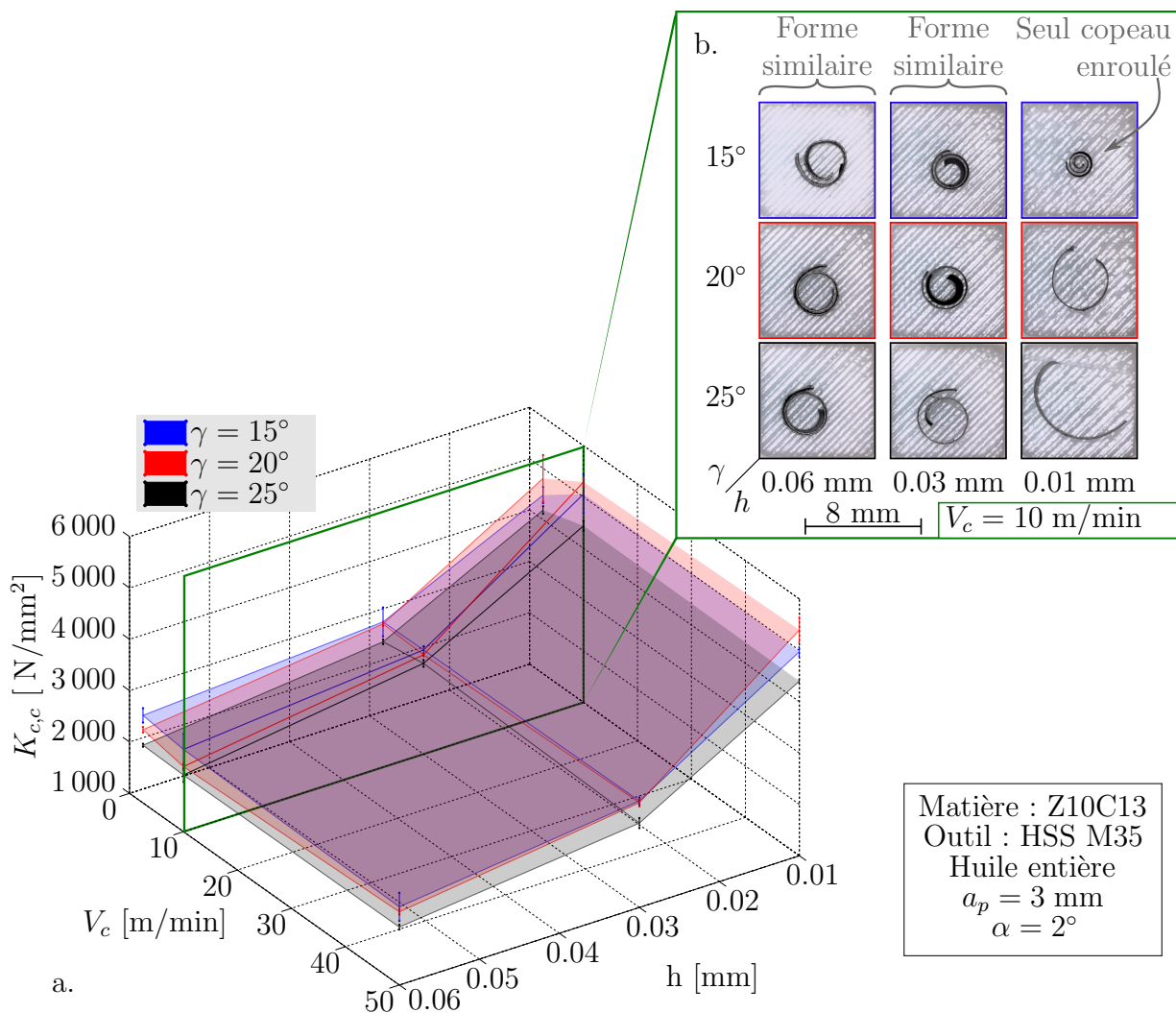


FIGURE 3.57 : Effort spécifique de coupe et enroulement de copeau en fonction des angles de coupe

L'effet positif de l'enroulement de copeau sur l'effort spécifique de coupe est donc confirmé, ce qui affecte également l'efficacité énergétique du procédé. Le contact entre

le copeau et la surface non brochée est à l'origine d'un effort sur le copeau entraînant l'apparition d'un moment au niveau de la racine de ce dernier. Ceci tend à augmenter l'angle de cisaillement, facilitant la formation du copeau.

3.3.4 Conclusion sur l'étude de la formation du copeau

Dans cette sous-section, les effets positifs d'un enroulement de copeau très important ont été démontrés. Un copeau très enroulé est en effet bénéfique d'un point de vue énergétique, cela permettant également d'éviter les risques de blocage pouvant entraîner des efforts de coupe et de pénétration excessifs, et potentiellement une dégradation de la surface brochée. Dans cette sous-section, les effets positifs d'un enroulement de copeau très important ont été démontrés. Un copeau très enroulé est en effet bénéfique d'un point de vue énergétique, cela permettant également d'éviter les risques de blocage pouvant entraîner des efforts de coupe et de pénétration excessifs, et potentiellement une dégradation de la surface brochée.

Plusieurs éléments influencent cet enroulement. Afin de réduire au maximum cet enroulement, il est préférable d'utiliser des vitesses et progressions aussi faibles que possibles, l'angle de coupe n'ayant pas d'influence sur cet enroulement à basse vitesse.

En ce qui concerne l'efficacité énergétique du procédé, la considération du taux de compression de copeau global (rapport des longueurs de copeau et de brochage) a permis de mettre en évidence des limites de vitesse de coupe et de progression similaires à celles identifiées par la méthode du couple outil/matière. Ainsi, une progression optimale de l'ordre de $36 \mu\text{m}$ a été identifiée, la réduction de vitesse résultant quant à elle en une meilleure efficacité énergétique.

3.4 Conclusion

Pour conclure, quatre facteurs semblent influencer de manière privilégiée les résultats d'état de surface en brochage ; la progression, la vitesse de coupe, l'angle de coupe et l'angle de dépouille. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour de faibles progressions et des vitesses de coupe élevées. C'est également dans ces conditions que le copeau se trouve le plus enroulé, signe d'un procédé efficace d'un point de vue énergétique. Un angle de coupe élevé permet également une amélioration d'état de surface, et la diminution d'angle de dépouille peut s'avérer bénéfique dans certaines conditions.

Dans les conditions de coupe les plus défavorables (faibles vitesses de coupe et fortes progressions), des écailles importantes ont été mises en évidence sur la surface, issues du détachement d'arête rapportée adhérent à l'arête de coupe. Dans les conditions de coupes plus favorables (faibles progressions), ce phénomène est également présent, mais dans

des proportions bien moins importantes. L'apparition de ce phénomène présente un lien fort avec la structure du matériau broché, possédant une alternance entre phases dures (martensite) et plus tendres (ferrite).

Dans ce chapitre, un lien étroit entre enroulement du copeau et état de surface a pu être identifié. Le copeau peut alors être utilisé comme un indicateur du déroulement d'une opération de brochage. En effet, l'obtention d'un copeau long et fortement enroulé est signe d'un procédé efficace d'un point de vue énergétique, et d'un état de surface de bonne qualité. En revanche, un copeau court et de diamètre important est révélateur d'une opération peu efficace et mal maîtrisée. Ces conditions sont donc à proscrire.

Si la forme finale du copeau est donc un indicateur efficace, il convient toutefois de s'assurer que sa formation se déroule correctement, et qu'aucun blocage de celui-ci au niveau de la chambre à copeau n'intervient. Pour ce faire, les courbes d'effort peuvent être utilisées, celles-ci mettant alors en évidence un pic d'effort. Un blocage trop prononcé pouvant également entraîner la casse du copeau, à l'origine de variations d'effort de pénétration qui – associées à une rigidité limitée – peuvent engendrer des dégradations d'état de surface. Un problème d'affûtage de la face de coupe peut également être détecté dans certaines conditions sur les courbes d'effort.

Pour résumer, le travail élémentaire d'une dent de brochage a été étudié, une attention particulière ayant été apportée aux résultats observés sur l'état de surface et l'enroulement du copeau. Ceci permet d'améliorer la compréhension des mécanismes en jeu lors du travail d'une dent isolée. Or en situation de production, la géométrie complexe et le travail simultané de plusieurs dents doit être pris en compte. Le chapitre suivant traite de la compréhension et de l'amélioration du fonctionnement global d'un outil de brochage utilisé par la société AREVA.

Chapitre 4

Application industrielle

Sommaire

4.1	Introduction	156
4.2	Prédiction et surveillance des efforts de coupe	156
4.2.1	Structure d'une courbe d'effort de brochage	157
4.2.2	Détermination de l'évolution de l'aire de coupe A_c	160
4.2.3	Détermination de l'effort spécifique de coupe	163
4.2.4	Comparaison des efforts théoriques et expérimentaux	164
4.3	Stratégie de disposition des brise-copeaux	167
4.3.1	Présentation de la démarche	168
4.3.2	Modélisation du copeau	170
4.3.3	Centre de gravité de la section	170
4.3.4	Calcul du moment quadratique	172
4.3.5	Résultats sur broche de production	174
4.4	Conclusion	176

4.1 Introduction

La réalisation des études présentées au cours du chapitre précédent visait à améliorer la compréhension fondamentale d'une opération de brochage. En parallèle à cela, un certain nombre de modifications et améliorations du processus de brochage ont été réalisées au sein de l'usine, s'appuyant sur les résultats issus des travaux de cette thèse ainsi que sur ceux du service Recherche et Développement de l'usine de Saint-Marcel, lui même soutenu par le Centre Technique du Creusot.

Le travail réalisé en vue d'assurer un alignement optimal des broches peut par exemple être cité. En effet, un défaut d'alignement trop important (comme représenté schématiquement sur la figure 4.1.b.) est susceptible d'entraîner un effort radial au niveau de la broche, pouvant être à l'origine de défauts géométriques, d'état de surface voire de flexion et rupture de broches.

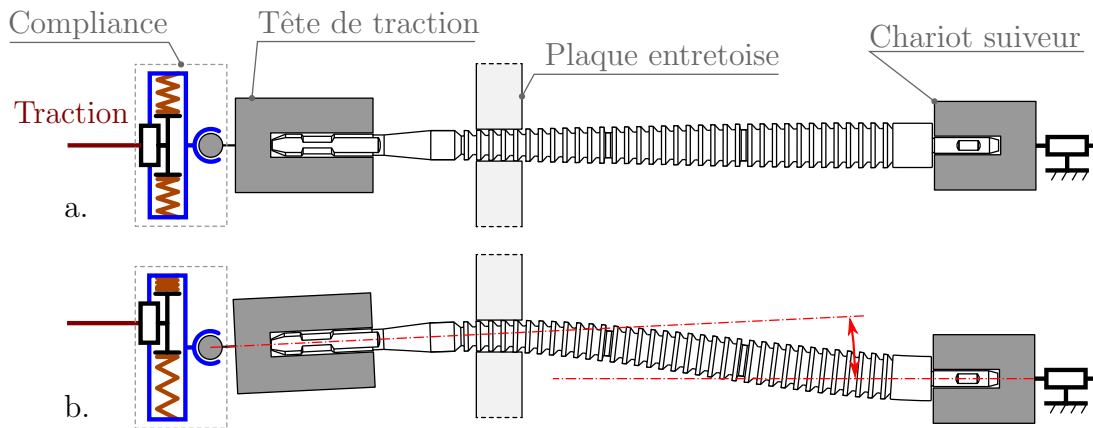


FIGURE 4.1 : Schématisation d'une machine de brochage correctement alignée (a.) et présentant un sévère défaut d'alignement (b.)

Un travail important a également été réalisé en collaboration entre le service méthodes d'AREVA Saint-Marcel, le service de Gestion des Outils Coupants et les fournisseurs de broches en vue de stabiliser la qualité des outils réalisés, de réduire les délais de livraison, et d'assurer un suivi optimal de l'évolution de la structure des outils au cours des différents cycles d'affûtage.

Ce chapitre présente quelques-uns des aspects essentiels de la contribution de ce travail de thèse sur l'amélioration de la surveillance du brochage et de la conception des broches.

4.2 Prédiction et surveillance des efforts de coupe

Chaque station de brochage peut entraîner jusqu'à 3 broches, chacune d'entre elles étant instrumentées en effort au moyen de platines de mesure d'effort Kistler. Cette mesure

est utilisée en situation de production afin de détecter le dépassement d'un seuil maximal d'effort de coupe. Si cela permet de détecter un défaut de fonctionnement important, la surveillance de l'effort de coupe peut être améliorée grâce à une compréhension plus poussée de la réponse obtenue en effort. Notons qu'un décalage est présent entre les 3 broches d'un même poste comme représenté sur la figure 4.2 afin d'éviter une entrée et sortie simultanée des dents de ces broches dans la matière. Ceci permet de limiter les phénomènes vibratoires, et les variations brusques et importantes d'effort sur la machine.

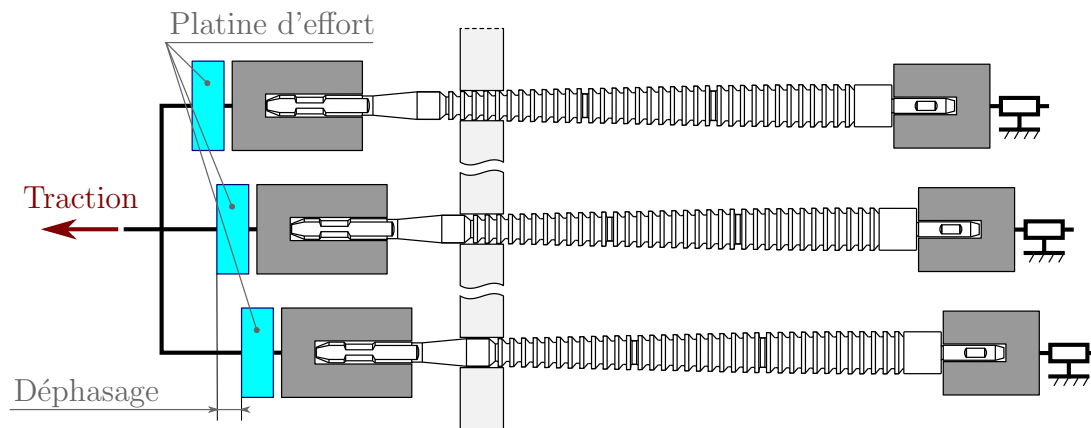


FIGURE 4.2 : Schématisation de l'emplacement des platines d'effort et du décalage entre les 3 broches d'un poste

4.2.1 Structure d'une courbe d'effort de brochage

La figure 4.3 présente une courbe d'effort théorique issue du brochage d'un profil quadri-folié, au moyen d'une broche dont le plan se trouve en annexe B.

Plusieurs zones peuvent ainsi être identifiées, et corrélées à la géométrie de broche.

- Une première zone Z_1 correspond à l'entrée successive des premières dents, jusqu'à ce que la première dent ressorte de la zone de brochage ;
- La zone Z_2 est constituée de dents de type 1 (cf. figure 3.6), permettant d'agrandir le diamètre du trou de perçage. La progression est alors de 0.022 mm ;
- L'entrée dans la zone Z_3 marque le début de l'usinage du méplat de la portée de tube, par l'intermédiaire de dents de type 2. Cette zone particulièrement sensible est réalisée au moyen d'une progression de 0.02 mm ;
- Au début de la zone Z_4 , les dernières dents réalisant la portée de tube sont encore en prise, les nouvelles dents entrant dans la zone de brochage sont des dents de calibration possédant une progression nulle ;
- Une fois la portée de tube terminée, le brochage des feuillures commence au moyen de dents de type 3. À ce stade, l'état de surface est moins critique qu'au niveau

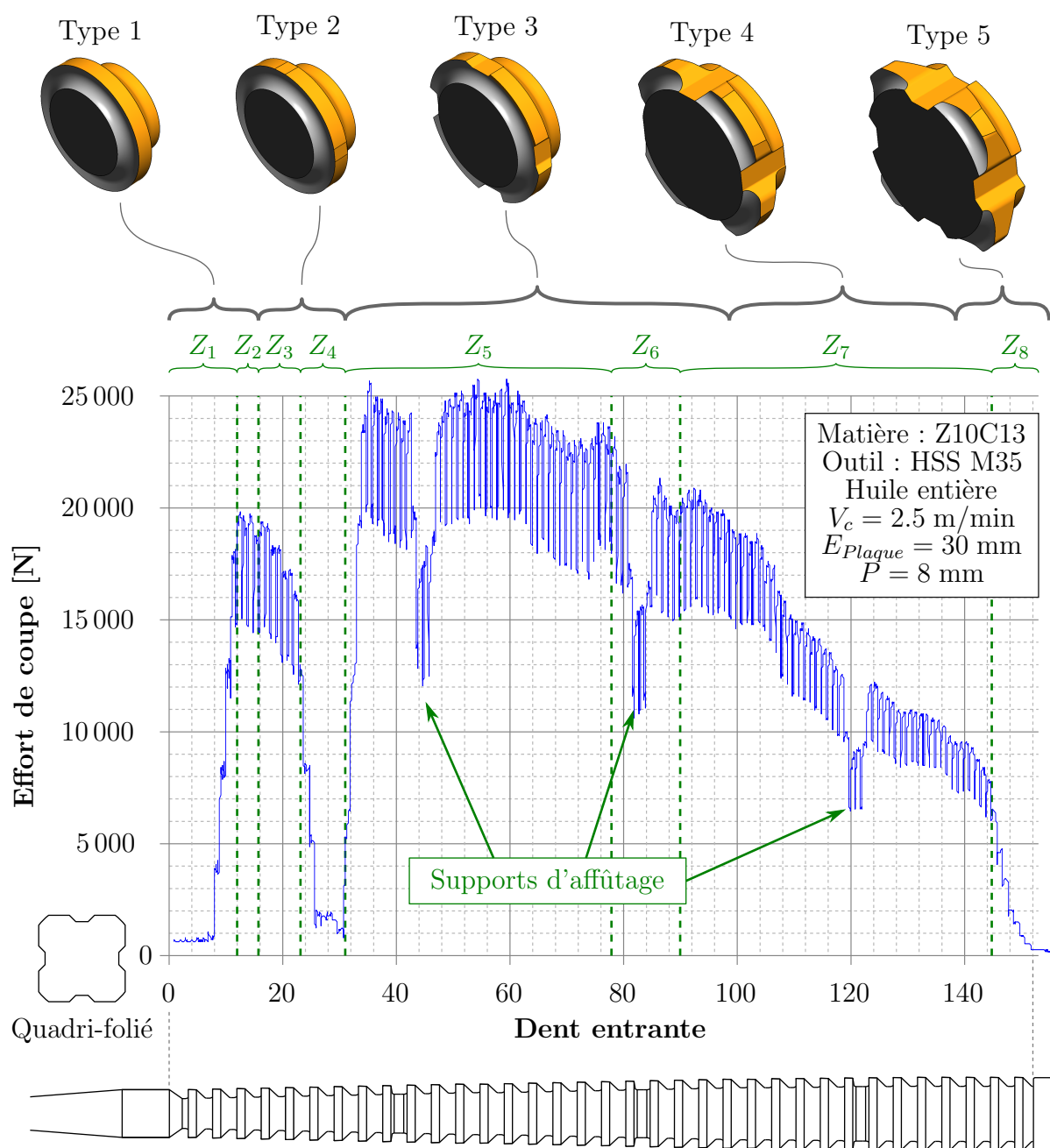


FIGURE 4.3 : Courbe d'effort mesurée lors d'une opération de brochage au moyen d'une broche neuve quadri-foliée et zones spécifiques associées

de la portée de tube, d'où l'utilisation d'une progression de 0.04 mm. La légère décroissance observée en début de zone Z_5 est due à la présence d'un rayon de raccordement entre la portée de tube et le début de la feuillure ;

- De même, la progressive diminution d'effort observée dans la zone Z_6 est provoquée par le rayon de raccordement entre le début de la feuillure et la feuillure latérale, la progression est toujours de 0.04 mm ;
- En fin de brochage, l'effort de coupe diminue progressivement jusqu'à la fin de la zone Z_7 , la progression utilisée sur les dents de type 4 est toujours de 0.04 mm ;
- Pour finir, une phase spécifique de finition, suivie de dents de réserve possédant une progression négative est réalisée. Dans cette zone la progression passe donc à 0.01 puis 0.005 mm avant de devenir négative.

3 zones présentant une diminution d'effort sont également mises au jour sur cette courbe d'effort. Celles-ci correspondent à la présence de supports d'affûtage en fond de chambre à copeau. En effet, la progression de la dent située directement après ce support d'affûtage est nulle, entraînant une diminution d'effort. On remarque également que le nombre de dents en prise varie systématiquement entre 3 et 4. Ceci est dû à l'association d'un pas de denture de 8 mm et d'une épaisseur de plaque de 30 mm.

Au vu de la structure typique d'une courbe d'effort de brochage, l'utilisation d'un simple seuil d'effort maximal s'avère peu efficace, bien qu'il permette malgré tout d'alerter l'opérateur lorsqu'un défaut de brochage critique survient. En s'appuyant sur ces observations, une nouvelle méthode de surveillance des efforts a été proposée, la chronologie adoptée est présentée ci-après :

1. Identification d'une courbe d'effort théorique, associée à une conception de broche spécifique ;
2. Réalisation d'une opération de brochage et relevé d'une courbe d'effort « signature » de la broche considérée ;
3. Comparaison des deux courbes précédentes, et identification d'un éventuel défaut de conception de broche. Rebut de broche le cas échéant ;
4. Suivi des efforts de brochage en production, et comparaison en temps réel avec la courbe d'effort « signature ». Alerte en cas de déviation critique de la courbe d'effort (signe d'usure, rupture de dent, etc.).

L'apport essentiel de ce travail de thèse se situe au niveau de la première étape de prédiction de l'effort de coupe théorique. Pour ce faire, une méthode analytique basée sur le produit entre aire de coupe A_c et effort spécifique de coupe $K_{c,c}$ a été utilisée. Il s'agit dans un premier temps de déterminer l'évolution de l'aire de coupe au cours du brochage.

4.2.2 Détermination de l'évolution de l'aire de coupe A_c

En s'appuyant sur les données fournies par le plan des broches en annexe B, une première méthode de calcul a été proposée. Pour ce faire, l'aire totale à brocher a été dissociée en plusieurs sections (S_1, S_2, S_3, S_4 sur la figure 4.4), sur lesquelles des calculs spécifiques d'aire de coupe sont appliqués. Ceci a été automatisé au moyen du logiciel Matlab®, les rayons de raccordement entre les différentes surfaces (portée, feuillure, fond de feuillure) ont été négligés pour simplifier le calcul.

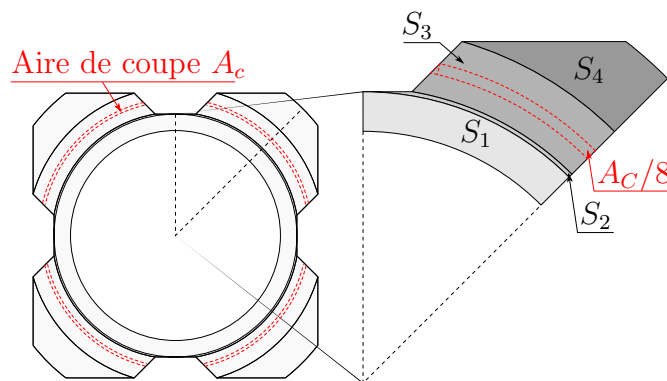


FIGURE 4.4 : Modélisation des aires de coupe, dissociation par zones

Une impression d'écran de l'interface utilisateur développée pour l'utilisation de cet utilitaire de calcul est présentée sur la figure 4.5.

Cette méthode très efficace en termes de temps de calcul présentait toutefois certains défauts. Le fait de négliger les rayons de raccordement entraînait en effet quelques approximations. Par ailleurs l'adaptation de cette méthode à de nouvelles géométries de trou (par exemple tri-foliés) nécessitait une reformulation complète. Ainsi, une nouvelle méthode de calcul a été développée, se déroulant en 3 étapes fondamentales, illustrées sur la figure 4.6 :

- Étape 1 : Relevé de la valeur de progression pour la dent considérée et discrétisation de ce pas en 3 ;
- Étape 2 : Pour chacun de ces pas discrétisés, identification des 4 points d'intersection avec le profil du trou broché. Notons que seul 1/8 de ce profil a été étudié au vu de sa géométrie symétrique ;
- Étape 3 : Pour chacun des pas discrétisés, réalisation d'une somme/soustraction de résultats de calculs intégraux, permettant d'obtenir l'aire de coupe A_{ci} associée à chacun de ces pas discrétisés, l'aire de coupe totale A_c correspondant à la somme de ces sous-aires.

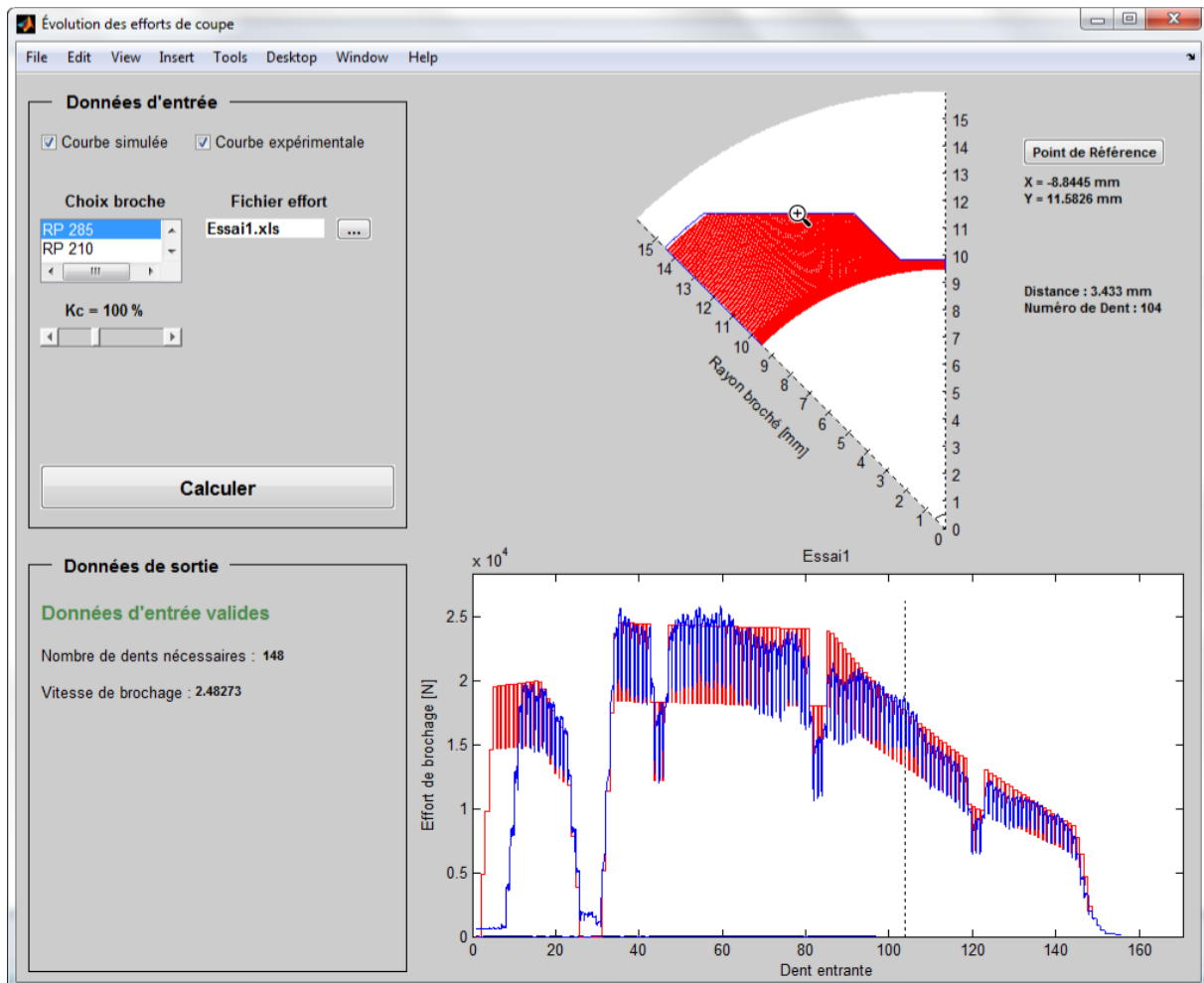


FIGURE 4.5 : Impression d'écran de l'utilitaire de calcul des efforts de coupe et de la position des dents de broche

Si les temps de calcul associés à l'utilisation de cette méthode sont légèrement plus importants (de l'ordre de 2 min), la prise en compte d'un profil complexe (avec rayons de raccordement, etc.) est rendue possible. Cela permet en outre d'adapter aisément la méthode de calcul à des profils de type tri-folié.

Ainsi, l'automatisation de cette méthode permet d'obtenir aisément l'aire de coupe en fonction de la dent de brochage. Or, le pas de denture P étant inférieur à l'épaisseur de la plaque E_{Plaque} plusieurs dents peuvent être en prise simultanément, comme schématisé sur la figure 4.7. Il était alors nécessaire de considérer cette somme d'aires de coupe au travers des entrées/sorties de dents dans la plaque entretoise à brocher. Une fois l'évolution de l'aire totale de coupe caractérisée en fonction des dents entrant dans la matière, il restait à déterminer les valeurs d'effort spécifique de coupe.

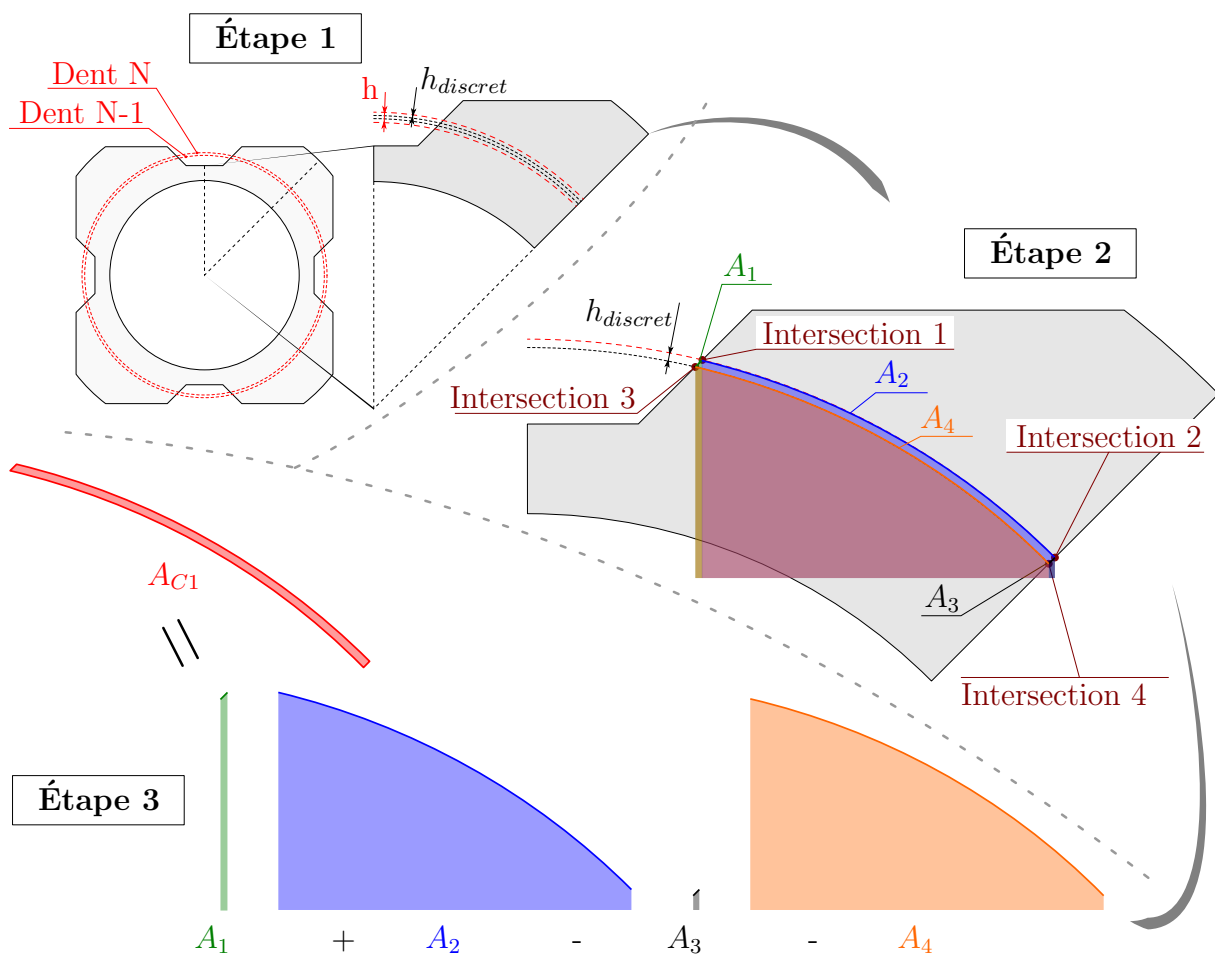


FIGURE 4.6 : Modélisation des aires de coupe, discrétisation et calcul intégral

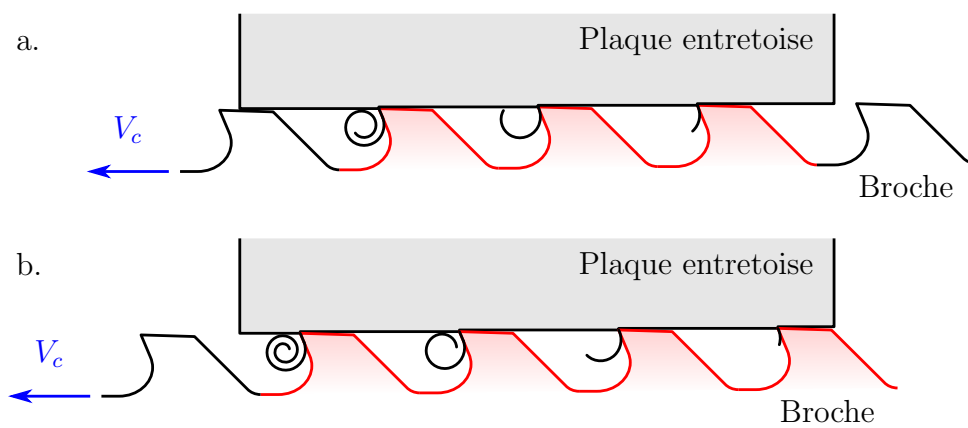
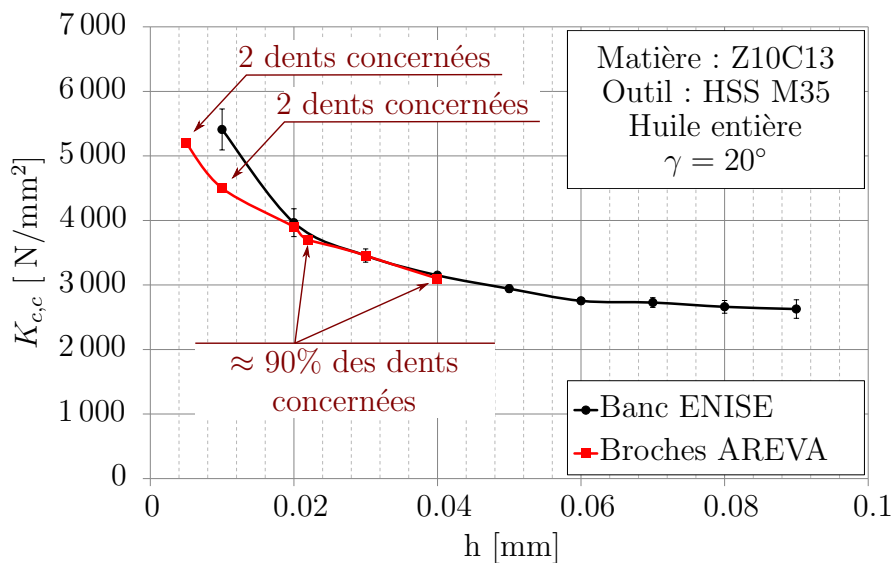


FIGURE 4.7 : Exemple d'alternance entre 3 dents (a.) et 4 dents (b.) en prise

4.2.3 Détermination de l'effort spécifique de coupe

L'aire de coupe en fonction des dents de broche concernées est à ce stade identifiée. Il s'agit alors de faire le lien entre l'effort de coupe et l'aire de coupe. Ce lien a donc été fait par l'intermédiaire d'une courbe d'effort spécifique de coupe en fonction de la progression. Pour ce faire, deux techniques d'identification ont été envisagées.

La première, initiée avant la mise en service du banc de brochage, a consisté en l'utilisation d'une méthode inverse pour identifier cet effort spécifique de coupe $K_{c,c}$ directement sur brocheuses de production, en s'appuyant sur l'équation présentée sur la figure 4.8. D'après le plan de broche, cette dernière est pourvue de différentes progressions en fonction des zones de denture concernées. Ainsi, pour chaque groupe de dents de même progression, l'aire de coupe calculée est multipliée par un effort spécifique de coupe $K_{c,c}$, ceci résulte en un effort de coupe théorique. Puis, la pression de coupe $K_{c,c}$ est variée jusqu'à obtenir une corrélation entre l'effort théorique et l'effort de production. Cette méthodologie est répétée pour plusieurs valeurs de progression, jusqu'à obtenir la courbe en rouge sur la figure 4.8.



$$K_{c,c} = \frac{F_c}{h \times a_p}$$

FIGURE 4.8 : Identification de l'effort spécifique de coupe par méthode inverse sur broches AREVA, et identification directe sur banc ENISE

Notons que près de 90% des dents possèdent une progression de 0.022 ou 0.04 mm, permettant une précision accrue de l'effort spécifique identifié par méthode inverse sur ces zones. En revanche, seulement 2 dents ont une progression de 0.005 mm et 0.01 mm, l'identification du $K_{c,c}$ correspondant étant alors plus délicate, d'autant que 3 à 4 dents sont en prise simultanément.

Par la suite, la courbe d'effort spécifique ainsi obtenue a été comparée à une courbe

similaire, identifiée cette fois sur le banc de brochage développé à l'ENISE. Ceci a permis de valider cette courbe d'effort spécifique. La comparaison de ces deux méthodes d'identification de l'effort spécifique est présentée sur la figure 4.8.

Ainsi, en considérant l'effort spécifique issu du banc de brochage (très similaire à celui issu de l'identification sur machines de production), une confrontation des courbes d'effort théoriques et expérimentales a été rendue possible.

4.2.4 Comparaison des efforts théoriques et expérimentaux

L'effort de coupe peut à ce stade être calculé théoriquement. Une courbe caractéristique théorique de ce dernier est présentée sur la figure 4.9. Dans un premier temps, une comparaison de la courbe théorique et de celle issue du brochage au moyen d'un outil neuf a été réalisée. Celle-ci est présentée sur la figure 4.9.

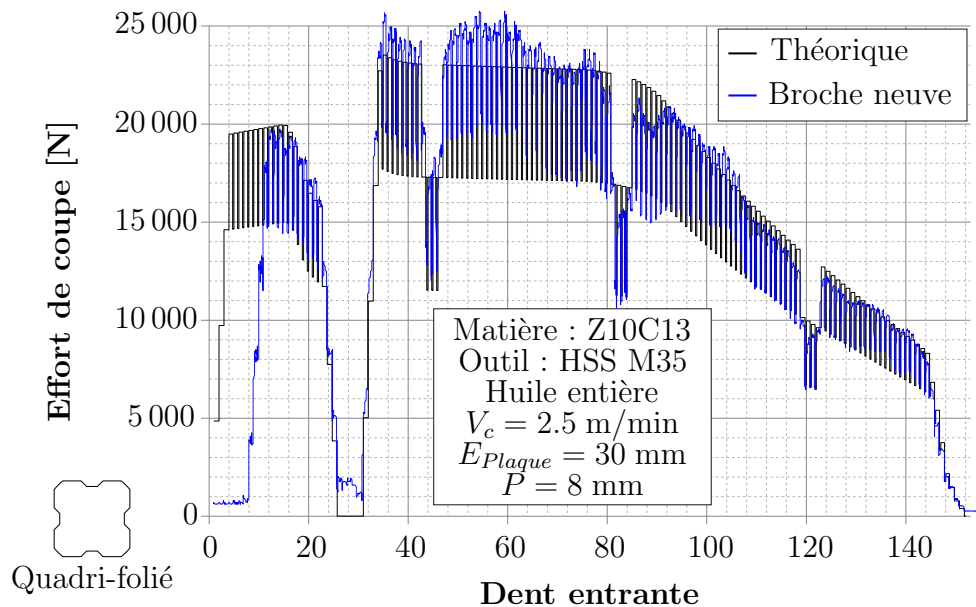


FIGURE 4.9 : Comparaison effort théorique et broche neuve

Il apparaît que le brochage ne commence en réalité qu'à partir de la 8^{ème} dent, même si un léger effort de coupe est initié dès la dent 7. Ceci peut être corrélé avec le diamètre de perçage des trous à 19.27 mm, le diamètre de la dent 7 étant théoriquement de 19.284 mm et celui de la dent 8 de 19.328 mm. Il est également possible de voir que l'effort mesuré n'est jamais nul, y compris lorsqu'aucune dent ne broche. Ceci provient essentiellement d'un faible effort de retenue exercé par le chariot suiveur, ainsi que du frottement des différentes zones de guidage des broches.

Des essais ont ensuite été réalisés sur une broche ayant été réformée et dont le nombre de cycles maximal admissible avait été atteint. Celle-ci n'était donc pas à l'origine de

défauts localisés, mais davantage d'un état de surface globalement dégradé. Ainsi, en comparant cette courbe d'effort à la courbe théorique (figure 4.10), un niveau globalement supérieur d'effort apparaît à partir de la zone Z_5 . Ceci peut être imputé à une usure d'arête de coupe plus importante. Cependant, jusqu'à la zone Z_3 les niveaux d'effort sont très similaires à ceux observés sur broche neuve. Ceci laisse supposer que l'usure des dents de brochage est d'autant plus rapide que la progression est élevée, celle-ci étant près de 2 fois inférieure dans la zone Z_3 par rapport à la zone Z_5 .

Il est également possible d'observer un décalage au niveau des zones Z_4 et Z_8 sur la broche usée, attribuable aux différents réaffûtages subis par cette broche. En effet, les dents de réserve dont la progression est initialement nulle sont amenées à travailler lorsque les dents précédentes sont réaffûtées, et leur diamètre ainsi réduit.

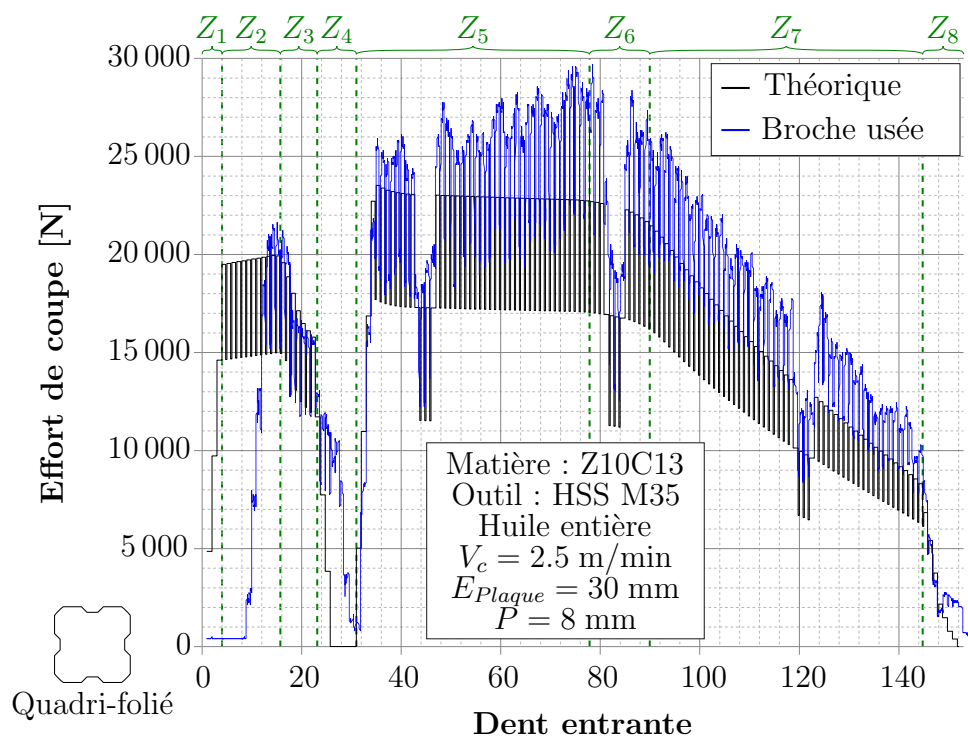


FIGURE 4.10 : Comparaison effort théorique et broche usée

Les courbes d'effort théoriques identifiées aussi bien pour les broches quadri-foliées que tri-foliées (figure 4.11) ont ainsi été utilisées afin d'affiner la méthode de détection des défauts critiques, et d'usure avancée de broche en s'appuyant sur la méthode de surveillance évoquée précédemment. De plus, une meilleure maîtrise de l'effort de coupe a été permise par l'élaboration de ce modèle. En effet, une compréhension poussée du travail de l'outil était nécessaire à son élaboration, ce qui s'est également avéré utile à l'amélioration du design des outils. Ainsi, l'évolution des progressions a par exemple été ajustée afin d'obtenir des niveaux d'effort similaires entre les zones Z_2 , Z_3 et Z_5 .

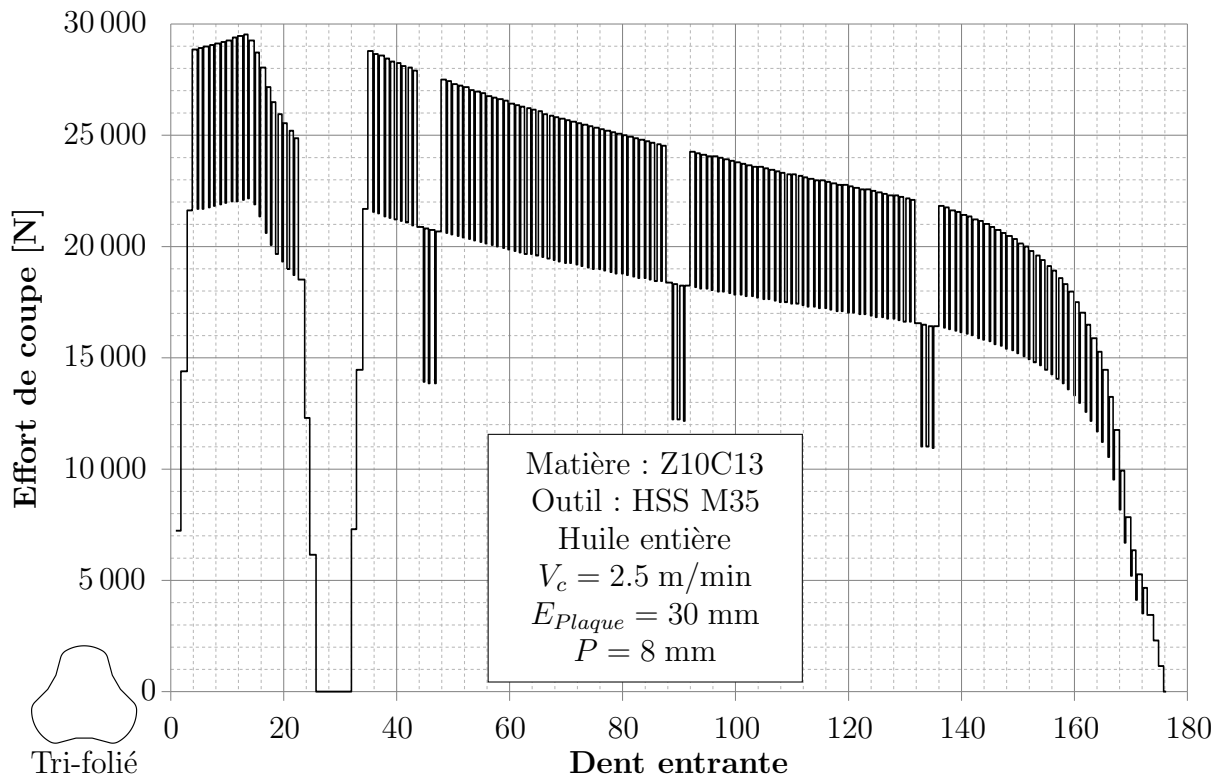


FIGURE 4.11 : Courbe d'effort caractéristique d'une opération de brochage tri-folié

La fiabilité et la précision de cette démarche de prédiction des efforts de coupe ayant été démontrées, un exécutable portable a été réalisé en vue de son implantation et utilisation au sein de l'atelier. Plusieurs versions ont été proposées, la version retenue consistant simplement en un fichier exécutable utilisant des informations présentes dans un fichier Excel® d'entrée, et générant un fichier Excel® de sortie ainsi qu'un fichier PDF.

Le fichier d'entrée récapitule les informations relatives à la broche (progressions par dents, diamètre de la première dent), au trou à brocher (tri ou quadri-folié et paramétrage des côtes caractéristiques du trou considéré, épaisseur de plaque) ainsi que la courbe d'effort spécifique.

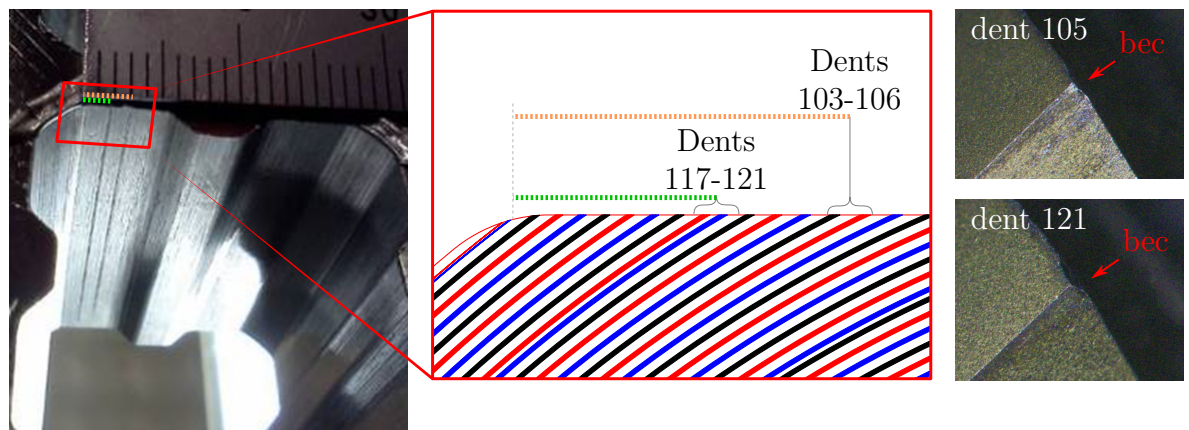
Ainsi à l'exécution de l'utilitaire, une interface permet de sélectionner les éléments de l'étude (broche, trou, etc.) et deux fichiers de sortie sont générés.

Le fichier Excel® de sortie trace l'évolution d'effort de coupe en fonction du numéro de dent, et récapitule également les coordonnées des points d'intersection entre profil broché et diamètre de dent et le rayon d'arc de cercle. Ce dernier point sera utilisé lors du dimensionnement des brise-copeaux présenté dans la section suivante.

Le document PDF généré est un abaque retraçant le profil final broché, par dessus lequel sont superposés les rayons des dents. Deux abaques types obtenus pour des trous tri-foliés et quadri-foliés sont présentés en annexe E. Un élément surprenant mis au jour

par l'intermédiaire de cet abaque est le fait que la dernière dent théorique ne semble pas brocher le fond de feuillure. Ceci est dû au fait que les progressions référencées dans les plans de broches ne prennent pas en compte la progression nulle située au niveau des supports d'affûtage. Ainsi, l'écart entre le diamètre du fond de feuillure et le diamètre théorique de la dernière dent est de 3×0.04 mm. En réalité, cette différence est compensée progressivement sur les dents des zones Z_5 à Z_7 afin de respecter les spécifications géométriques finales.

Ces abaques ont pour vocation d'être affichés au niveau des zones de contrôle des broches et plaques entretoises, afin de faire le lien rapidement entre un défaut observé sur un trou et la dent responsable de ce défaut. Un exemple de la démarche utilisée pour l'identification de ce type de défaut est présenté sur la figure 4.12.



1. Identification et localisation d'un défaut

2. Dents correspondantes sur l'abaque

3. Observation de défauts sur broches

FIGURE 4.12 : Identification de dents de broche défectueuses par l'intermédiaire de l'abaque de positionnement des dents

Sur cet exemple, des rayures sont apparues au niveau des feuillures, l'abaque d'identification des dents a permis de déterminer des plages de dents potentiellement défectueuses, et ainsi de remonter à des défauts de bec au niveau des dents 105 et 121 (usure excessive, issue d'une concentration de contraintes excessive).

4.3 Stratégie de disposition des brise-copeaux

Dans l'étude précédente, l'influence des brise-copeaux sur les efforts de coupe n'a pas été évoquée, leurs nombre et position n'ont pas été pris en compte. L'influence de ces derniers sur les efforts mesurés a en effet été négligée, la diminution d'effort engendrée par la présence d'un brise-copeau étant globalement compensée par la progression localement

supérieure issue de la sur-épaisseur laissée par le brise-copeau de la dent précédente.

En revanche, si la présence de brise-copeaux est nécessaire afin de permettre la formation et l'évacuation des copeaux, elle engendre également une multiplication des becs d'outils entre l'arête de coupe principale, et l'arête secondaire située sur le flanc du brise-copeau. Or comme représenté sur la figure 4.12, la présence de ces becs est favorable à une apparition de concentration excessive de contraintes et par conséquent à une usure prématurée source de défauts de brochage.

Il convient donc d'en limiter le nombre. Comme il l'a déjà été évoqué dans ces travaux, les fabricants de broche fixent généralement une largeur de copeau admissible de 5 mm, cette valeur étant basée sur leur retour d'expérience. Les travaux détaillés dans cette section visent à mettre en place une méthode de détermination du nombre de brise-copeaux basée sur des contraintes physiques de formation et évacuation du copeau.

4.3.1 Présentation de la démarche

Dans un premier temps, la structure et en particulier la section d'un copeau a été caractérisée. Quelle que soit la dent considérée, la section du copeau peut être assimilée à une arche, pourvue ou non d'une nervure issue du brise-copeaux de la dent précédente. Le mécanisme responsable de l'apparition de cette nervure est schématisé sur la figure 4.13. Si sur cette figure un seul brise copeau est représenté, une dent peut en comporter plusieurs. La structure générale sera néanmoins toujours celle décrite précédemment, sauf dans les zones dépourvues de brise-copeaux, il s'agira alors d'une arche simple.

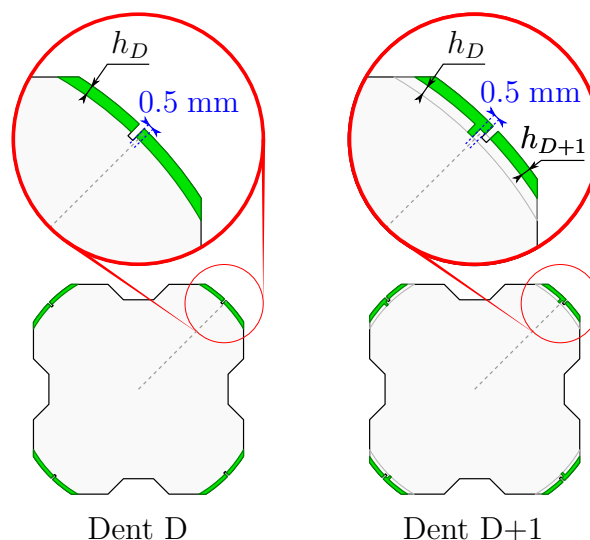


FIGURE 4.13 : Exemple de formation d'une nervure sur copeau issue du brise-copeaux précédent

Le positionnement de ce brise-copeaux sur l'arête de coupe a tout d'abord été étudié.

En effet, la position de ces derniers est généralement très variable, ceux-ci étant parfois positionnés bien trop proches de l'extrémité de l'arête de coupe, comme présenté sur la figure 4.14. Dans l'idéal, celui-ci devrait partager l'arête en portions égales. lorsqu'un seul brise-copeaux est nécessaire il doit alors se trouver au centre de l'arête. Ceci permet de s'assurer d'obtenir un copeau d'une largeur aussi réduite que possible. Mais il est nécessaire de positionner ces brise-copeaux en quinconce afin d'éviter la formation d'une nervure sur la face brochée. La largeur des brise-copeaux étant généralement de l'ordre de 0.5 mm, cette distance est utilisée comme référence pour l'espacement entre deux brise-copeaux consécutifs, comme évoqué sur la figure 4.13.

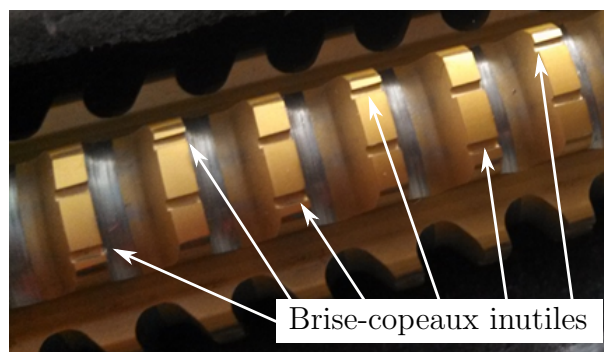


FIGURE 4.14 : Mauvais positionnement des brise-copeaux sur broche de production

Une règle de positionnement des brise-copeaux ayant ainsi été établie, il s'agissait alors d'identifier une méthode permettant de prendre en compte la propension d'un copeau à résister à l'enroulement, ce critère étant fondamental quant au choix du nombre de brise-copeaux. Lorsque la formation du copeau est initiée, le copeau et son enroulement sont assimilables à une poutre soumise à de la flexion. Or, la flèche décrite par cette poutre est contrainte par la géométrie de la face de coupe. Ainsi, le moment de flexion nécessaire à l'enroulement du copeau est directement lié au moment quadratique de la section considérée, comme le présente l'équation 4.1 de la dérivée seconde de la déformée d'une poutre, s'appuyant sur le paramétrage de la figure 4.15.

$$M_{fx} = \underbrace{E}_{\text{fixe}} \times I_{Gx} \times \underbrace{y''}_{\text{fixe}} \quad (4.1)$$

En se basant sur ces observations, le moment quadratique est considéré comme un critère pertinent pour évaluer la résistance à l'enroulement d'un copeau. Ce critère permet en effet de faire le lien entre la géométrie de copeau (et donc sa largeur en lien avec la présence de brise-copeaux) et sa résistance à l'enroulement.

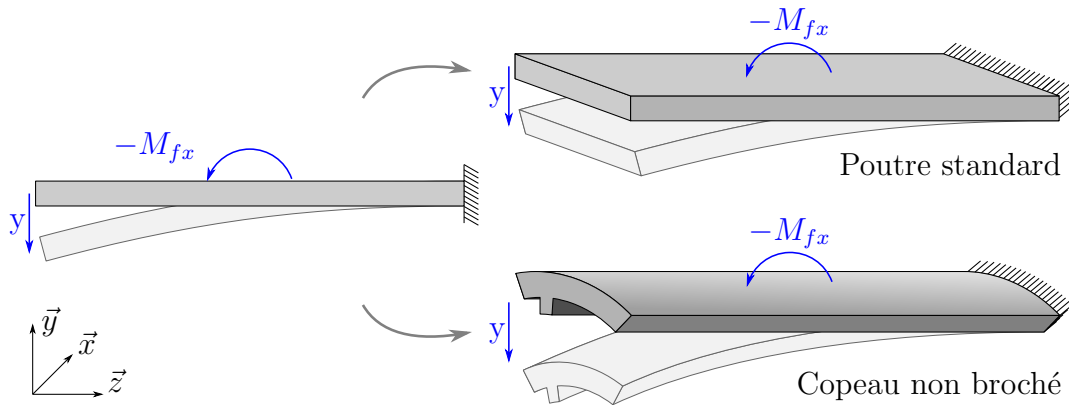


FIGURE 4.15 : Modélisation du copeau

4.3.2 Modélisation du copeau

L'objectif est ainsi de calculer le moment quadratique d'un copeau. Deux cas de figures peuvent être dissociés, le premier correspondant à un copeau sans nervure en l'absence de brise-copeaux sur la dent précédente (figure 4.16.a.), et le second à un copeau avec nervure (figure 4.16.b.).

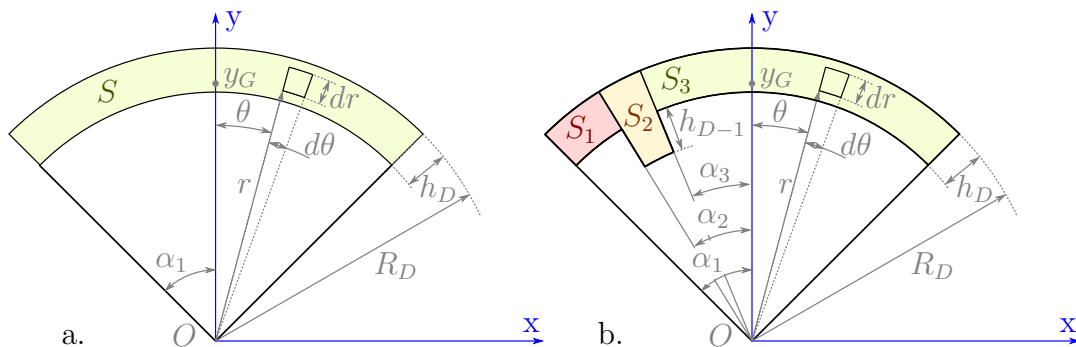


FIGURE 4.16 : Modélisation d'une section de copeau sans nervure (a.) et avec nervure (b.)

Le moment quadratique de ce copeau autour de l'axe x , passant par le centre de gravité de la section doit alors être déterminé. En effet, lors de son enroulement la courbure de l'arche formée par le copeau est inversée comme représenté sur la figure 4.17, passant de concave à convexe, c'est pourquoi le moment quadratique ainsi défini est considéré.

4.3.3 Centre de gravité de la section

Dans le cas d'un copeau sans nervure, la coordonnée y_G est définie par l'équation 4.2. Sachant que $dS = r dr d\theta$ et $y = r \cos \theta$, il en découle :

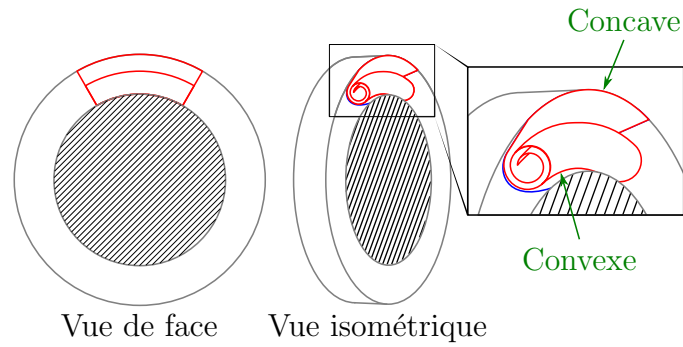


FIGURE 4.17 : Schématisation de l'inversion de courbure du copeau

$$\begin{aligned}
 y_G &= \frac{\int_S y \, dS}{S} = \frac{A}{S} \\
 A &= \int_S y \, dS = \int_0^{\alpha_1} \int_{R_D-h}^{R_D} r^2 \times \cos \theta \, dr d\theta \\
 &= \frac{R_D^3 - (R_D - h)^3}{3} \times (\sin \alpha_1 - \underbrace{\sin 0}_0) \\
 S &= (\pi R_D^2 - \pi(R_D - h)^2) \times \frac{\alpha_1}{360}
 \end{aligned}$$

Finalement, sans considérer la nervure :

$$y_G = \frac{R_D^3 - (R_D - h)^3}{R_D^2 - (R_D - h)^2} \times \frac{120 \sin \alpha_1}{\alpha_1 \pi} \quad (4.2)$$

La formulation décrite par l'équation 4.3 prenant en compte la nervure peut maintenant être établie .

$$\begin{aligned}
 y_G &= \frac{\int_S y \, dS}{S} = \frac{\int_{S_1} y \, dS + \int_{S_2} y \, dS + \int_{S_3} y \, dS}{S_1 + S_2 + S_3} \\
 y_G &= \frac{A + B + C}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \int_{S_1} y \, dS = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \int_{R_D - h_D}^{R_D} r^2 \times \cos \theta \, dr d\theta \\ \quad = \frac{R_D^3 - (R_D - h_D)^3}{3} \times (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) \\ B = \int_{S_2} y \, dS = \int_{\alpha_2}^{\alpha_3} \int_{R_D - h_D - h_{D-1}}^{R_D} r^2 \times \cos \theta \, dr d\theta \\ \quad = \frac{R_D^3 - (R_D - h_D - h_{D-1})^3}{3} \times (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_3) \\ C = \int_{S_3} y \, dS = \int_{\alpha_3}^{-\alpha_1} \int_{R_D - h_D}^{R_D} r^2 \times \cos \theta \, dr d\theta \\ \quad = \frac{R_D^3 - (R_D - h_D)^3}{3} \times (\sin \alpha_3 + \sin \alpha_1) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1 = (\pi R_D^2 - \pi(R_D - h_D)^2) \times \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2\pi} \\ S_2 = (\pi R_D^2 - \pi(R_D - h_D - h_{D-1})^2) \times \frac{\alpha_2 - \alpha_3}{2\pi} \\ S_3 = (\pi R_D^2 - \pi(R_D - h_D)^2) \times \frac{\alpha_3 + \alpha_1}{2\pi} \end{array} \right.$$

4.3.4 Calcul du moment quadratique

Les coordonnées des centres de gravité des sections de copeau ayant ainsi été identifiées, les équations du moment quadratique du copeau dans les deux cas de figure (avec et sans nervure) peuvent être formulées. Pour ce faire, le moment quadratique passant par O (I_{Ox}) est identifié dans un premier temps, avant d'être déplacé en G pour obtenir I_{Gx} . Le problème traitant du copeau sans nervure a dans un premier temps été considéré.

$$\begin{aligned} I_{Ox} &= \int_S y^2 \, dS = \int_{-\alpha_1}^{\alpha_1} \int_{R_D - h}^{R_D} r^3 \cos^2 \theta \, dr d\theta \\ &= \frac{R_D^4 - (R_D - h)^4}{4} \times \int_{-\alpha_1}^{\alpha_1} \cos^2 \theta \, d\theta \\ &= \frac{R_D^4 - (R_D - h)^4}{4} \times \int_{-\alpha_1}^{\alpha_1} \frac{1 + \cos(2\theta)}{2} \, d\theta \\ &= \frac{R_D^4 - (R_D - h)^4}{8} \times \left[2\alpha_1 + \int_{-\alpha_1}^{\alpha_1} \cos(2\theta) \, d\theta \right] \\ &= \frac{R_D^4 - (R_D - h)^4}{8} \times [2\alpha_1 + \sin(2\alpha_1)] \end{aligned}$$

L'équation 4.4 peut être formulée à partir du théorème de Huyguens, :

$$\begin{aligned} I_{Gx} &= I_{Ox} - S \times d^2 \\ I_{Gx} &= \frac{R_D^4 - (R_D - h)^4}{8} \times [2\alpha_1 + \sin(2\alpha_1)] - S \times y_G^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Dans le cas du copeau nervuré, le moment quadratique peut être défini comme suit :

$$I_{Ox} = \int_{S_1} y^2 dS + \int_{S_2} y^2 dS + \int_{S_3} y^2 dS = I_{Ox1} + I_{Ox2} + I_{Ox3}$$

$$\begin{aligned} I_{Ox1} &= \int_{S1} y^2 dS = \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \int_{R_D - h_D}^{R_D} r^3 \cos^2 \theta dr d\theta \\ &= \frac{R_D^4 - (R_D - h_D)^4}{4} \times \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \cos^2 \theta d\theta \\ &= \frac{R_D^4 - (R_D - h_D)^4}{4} \times \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \frac{1 + \cos(2\theta)}{2} d\theta \\ &= \frac{R_D^4 - (R_D - h_D)^4}{8} \times \left[(\alpha_1 - \alpha_2) + \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \cos(2\theta) d\theta \right] \\ &= \frac{R_D^4 - (R_D - h_D)^4}{8} \times \left[(\alpha_1 - \alpha_2) + \frac{\sin(2\alpha_1) - \sin(2\alpha_2)}{2} \right] \end{aligned}$$

Appliquons cette démarche aux différentes sections :

$$\left\{ \begin{aligned} I_{Ox1} &= \frac{R_D^4 - (R_D - h_D)^4}{8} \times \left[(\alpha_1 - \alpha_2) + \frac{\sin(2\alpha_1) - \sin(2\alpha_2)}{2} \right] \\ I_{Ox2} &= \frac{R_D^4 - (R_D - h_D - h_{D-1})^4}{8} \times \left[(\alpha_2 - \alpha_3) + \frac{\sin(2\alpha_2) - \sin(2\alpha_3)}{2} \right] \\ I_{Ox3} &= \frac{R_D^4 - (R_D - h_D)^4}{8} \times \left[(\alpha_3 + \alpha_1) + \frac{\sin(2\alpha_3) + \sin(2\alpha_1)}{2} \right] \end{aligned} \right.$$

Finalement :

$$\begin{aligned} I_{Ox} &= \frac{R_D^4 - (R_D - h_D)^4}{8} \times \left[2\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 + \frac{2 \sin(2\alpha_1) - \sin(2\alpha_2) + \sin(2\alpha_3)}{2} \right] \\ &\quad + \frac{R_D^4 - (R_D - h_D - h_{D-1})^4}{8} \times \left[\alpha_2 - \alpha_3 + \frac{\sin(2\alpha_2) - \sin(2\alpha_3)}{2} \right] \end{aligned}$$

En s'appuyant sur ce dernier résultat, le moment quadratique au niveau du centre de gravité détaillé par l'équation 4.5 peut être déterminé, par application du théorème de

Huyguens.

$$I_{Gx} = I_{Ox} - (S_1 + S_2 + S_3) \times y_G^2 \quad (4.5)$$

4.3.5 Résultats sur broche de production

Ainsi, une méthode de calcul du moment quadratique a été déterminée, celle-ci étant un indicateur efficace de la propension d'un copeau à s'enrouler. L'objectif est maintenant d'utiliser cette stratégie de calcul afin de déterminer le nombre optimal de brise-copeaux. Il s'agit de déterminer une limite admissible de moment quadratique, et d'automatiser le calcul de ce moment quadratique.

Le seuil admissible de moment quadratique a été mis en évidence par le service Développement des Procédés et Industrialisation de l'usine AREVA de Saint-Marcel. En effet, différents essais et observations ont permis d'établir que la présence de brise-copeaux n'est plus nécessaire à partir de la dent 120. Le rayon d'enroulement de copeau obtenu à partir de cette dent est notamment suffisamment réduit même sans brise-copeaux, signe d'une formation optimale du copeau comme il l'a été évoqué dans le chapitre 3. Le moment quadratique de 0.00361 mm^4 obtenu sur l'une des dents de cette section a donc été utilisé comme référence.

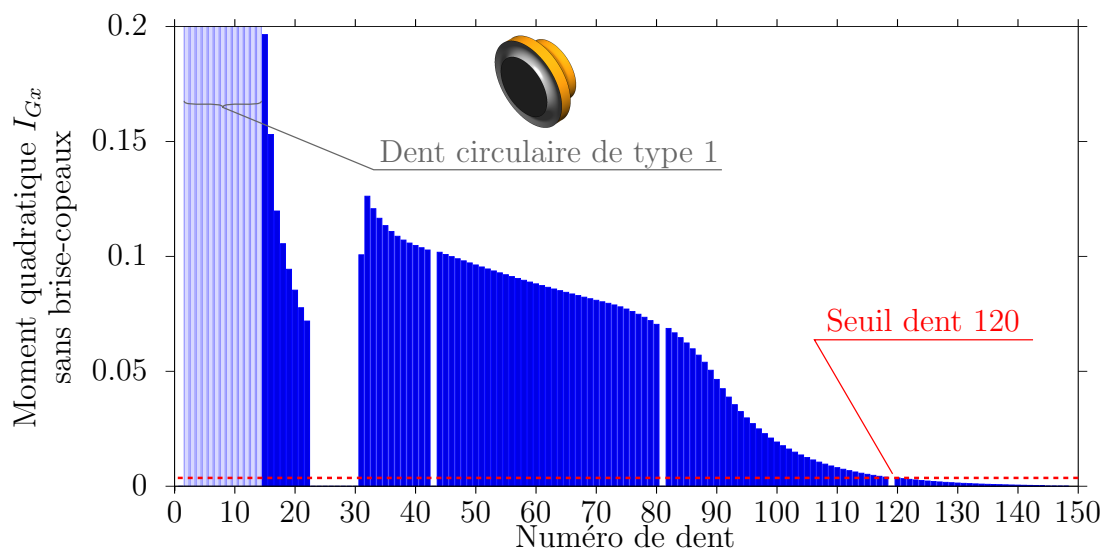


FIGURE 4.18 : Moments quadratiques par section de coupe sur une broche dépourvue de brise-copeaux

Une fois ce seuil établi, l'automatisation du calcul de moment quadratique (défini par les équations 4.4 et 4.5) en fonction de la section considérée et du nombre de brise-copeaux a été initiée. Ceci a de nouveau été rendu possible par l'utilisation du logiciel Matlab®. Cette automatisation nécessite 2 données d'entrée essentielles ; la progression

au niveau des dents d'une broche ainsi que l'angle α_i pour chacune de ces dents. Les progressions sont obtenues directement à partir du plan, l'angle α_i est quant à lui calculé par l'intermédiaire de l'utilitaire de calcul d'effort présenté dans la section précédente.

Le tracé issu du calcul des moments quadratiques sans la prise en compte des brise-copeaux est présenté sur la figure 4.18.

On remarque tout d'abord que le seuil de moment quadratique établi précédemment est très bas par rapport à celui observé globalement sur l'ensemble de la broche. Notons que n'ayant pas considéré la présence de brise-copeaux, le copeau issu des premières dents forme théoriquement un anneau continu. Ainsi, le moment quadratique obtenu par la formulation précédente n'a pas réellement de sens physique à cet endroit pour cette première itération.

Un calcul itératif automatisé a ainsi consisté à ajouter progressivement un brise-copeau et à observer le moment quadratique résultant. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que le moment quadratique obtenu soit inférieur au seuil. Notons que la position exacte de la nervure issue du brise-copeaux précédent (définie par les angles α_2 et α_3) est variable et délicate à considérer. Un second niveau d'itération a donc été inséré, permettant de positionner cette nervure au niveau de la zone la plus défavorable en terme de moment quadratique, cette dernière est alors parfois considérée au centre ou à l'extrémité du copeau.

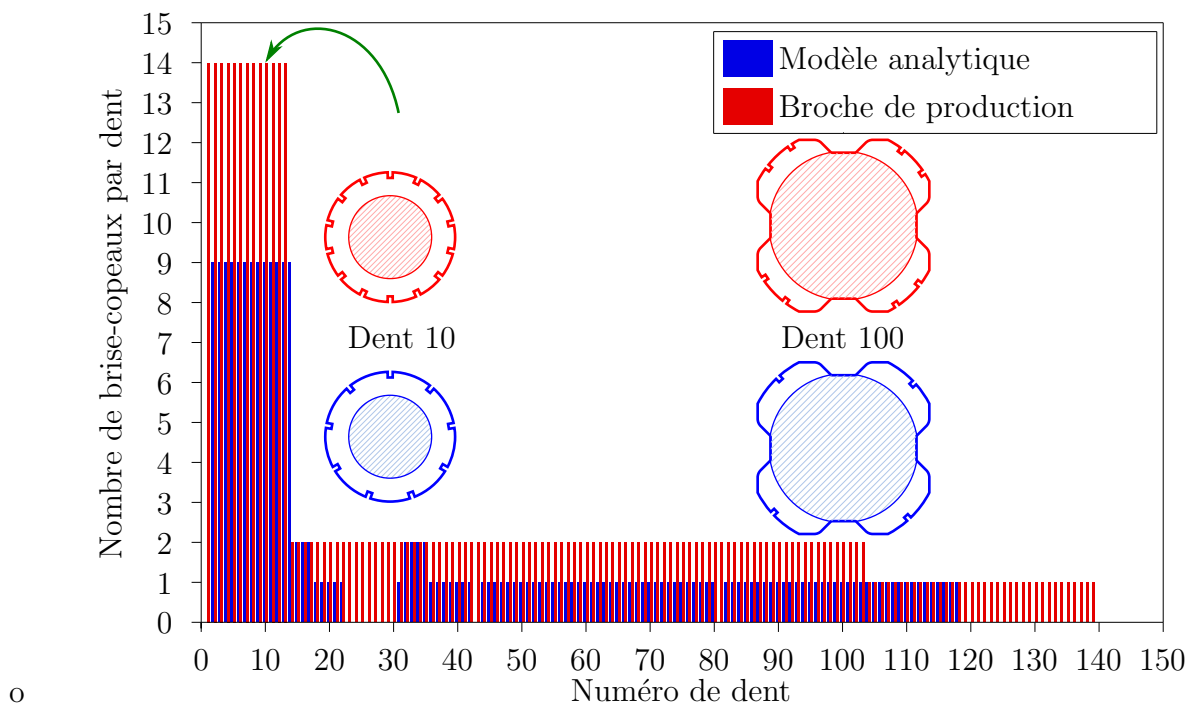


FIGURE 4.19 : Nombre de brise-copeaux optimal et réalisé sur broche de production

Ainsi, le dénombrement des brise-copeaux défini par cette méthode a été comparé aux

observations réalisées sur broches de production. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4.19.

Sur cette dernière, il apparaît que le nombre de brise-copeaux par dent sur la broche de production étudiée est théoriquement trop important au début de la broche, celle-ci en compte 14 alors que seulement 9 sont suffisants. Le reste de la broche est muni de 2 brise-copeaux par dent, alors que dans la plupart des cas un seul serait suffisant. Notons qu'il est ici question du nombre de brise-copeaux sur une dent, dans le cas d'une broche quadri-foliée on dénombre 4 dents par section de coupe.

À titre d'information, la figure 4.20 présente les moments quadratiques des copeaux critiques, obtenus après l'optimisation du nombre de brise-copeaux.

Ainsi, une méthode de dimensionnement du nombre de brise-copeaux optimal a été mise au point. Celle-ci s'appuie sur un calcul prenant en compte la géométrie du copeau considéré au travers du moment quadratique de sa section. La possibilité de diminuer le nombre de brise copeaux de 14 à 9 sur les premières dents (de type 1) a ainsi été mise en évidence. Si les autres dents sont pourvues de 2 brise-copeaux, la plupart d'entre-elles pourraient n'en contenir qu'un, tout en conservant des mécanismes d'enroulement et d'évacuation du copeau convenables.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre sont présentées quelques études réalisées en collaboration entre l'entreprise AREVA et le laboratoire LTDS visant à améliorer la surveillance et le déroulement d'une opération de brochage.

Une nouvelle méthode de surveillance de l'effort de coupe a dans un premier temps été présentée. Grâce à cette étude, la structure générale des courbes d'effort de coupe a pu être mieux maîtrisée, ce qui a également permis de mieux appréhender l'influence de la conception des broches sur les efforts de coupe. À l'issue de cette étude, un utilitaire de prédiction des efforts de coupe a été créé, pouvant être utilisé directement par les concepteurs de broche pour notamment obtenir une courbe d'effort théorique idéale utilisable comme référence.

Une méthode innovante de détermination du nombre et de l'emplacement des brise-copeaux de brochage a également été mise au jour. Celle-ci permet de limiter le nombre de brise-copeaux au minimum nécessaire, afin de limiter les risques d'usure prématurée ou de fragilisation d'arête inhérents à l'utilisation de brise-copeaux, tout en limitant la largeur des copeaux pour faciliter leurs formation et évacuation.

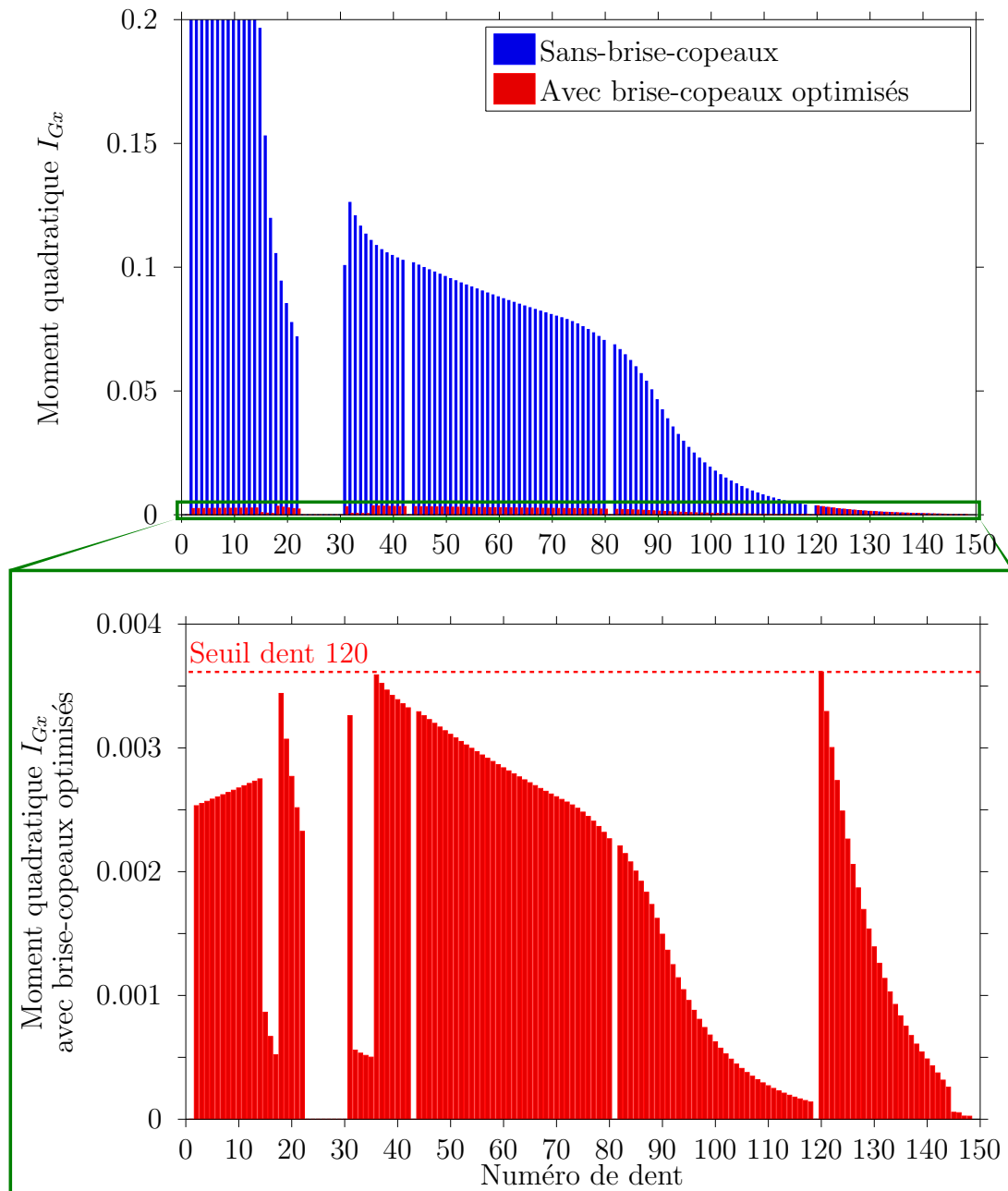


FIGURE 4.20 : Moments quadratiques par section de coupe après optimisation analytique du nombre de brise-copeaux

Parallèlement aux différents travaux présentés au cours des chapitres précédents, plusieurs modèles de simulation numérique ont été utilisés. Ceux-ci consistaient d'une part en la caractérisation des effets de la rigidité d'une dent de coupe et de la structure de la plaque entretoise sur la progression réelle, et d'autre part en la mise en place d'une méthode de simulation numérique efficace de l'enroulement de copeau. Cette étude est présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Simulation numérique

Sommaire

5.1	Introduction	180
5.2	Rigidité de la coupe en brochage de production	180
5.2.1	Rigidité d'une dent de broche	181
5.2.2	Déformation des ligaments au cours du brochage	186
5.3	Simulation de l'enroulement du copeau	190
5.3.1	Modélisation élémentaire	190
5.3.2	Simulation aux temps longs	193
a.	Principe général	193
b.	Principaux verrous	194
5.3.3	Validation du modèle	196
a.	Efforts de coupe	196
b.	Enroulement de copeau	198
c.	Température	199
d.	Temps de calcul	200
5.4	Conclusion sur la simulation du brochage	200

5.1 Introduction

Au cours des différentes investigations menées tout au long des précédents chapitres, l'influence de la rigidité du système sur les résultats de brochage a pu être observée. La rigidité de la machine utilisée pour la réalisation des essais en laboratoire a été caractérisée, celle-ci représente probablement une part significative de la rigidité totale du système. Pourtant, une part non négligeable de cette dernière peut également provenir de la géométrie d'une dent de brochage, ou encore de la structure alvéolaire de la plaque entretoise brochée. Or, la caractérisation de la déformation de ces éléments induite par le procédé de coupe est délicate expérimentalement, c'est pourquoi des modèles de simulation numérique ont été utilisés.

Ainsi, la première partie de ce chapitre traite de la caractérisation des déformations et écarts locaux de progression issus de l'influence d'une dent de broche d'une part, et de la déformation élastique d'une plaque entretoise au cours du brochage d'autre part.

La seconde partie se focalise sur la simulation numérique de la coupe en brochage. La démarche adoptée pour la création d'un modèle de simulation numérique dédié à la représentation de l'enroulement du copeau en brochage est ainsi présentée. En effet, l'état de l'art aussi bien que les différentes études expérimentales présentées dans ce mémoire montrent que l'enroulement du copeau est une donnée essentielle qu'il convient de maîtriser. Or, si les études présentées précédemment permettent d'obtenir des tendances d'évolution de cet enroulement, les mécanismes à l'origine de cet enroulement restent néanmoins toujours mal maîtrisés. La simulation numérique est ainsi mise en œuvre afin d'être en mesure de caractériser les champs physiques (contraintes, déformations, températures, etc.) induits par l'opération de coupe. Ceci pourrait apporter des explications quant aux mécanismes physiques à l'origine de cet enroulement.

5.2 Rigidité de la coupe en brochage de production

En brochage comme dans tout procédé d'usinage, la rigidité de la machine est un critère essentiel de fonctionnement de l'opération de coupe. C'est pour cela que des études traitent de la caractérisation de la rigidité de ces machines de production, et de leur influence sur la qualité dimensionnelle, et d'état de surface. L'étude de [Schulze *et al.* \(2013\)](#) peut par exemple être évoquée dans la mesure où les différentes sources de déformation essentielles de la machine ont été représentées par un système ressort amortisseur, comme présenté sur la figure 5.1.

Pourtant, dans le cas spécifique du brochage intérieur mis en œuvre par AREVA, l'influence de la rigidité de la machine est limitée. En effet, l'outil possède une géométrie

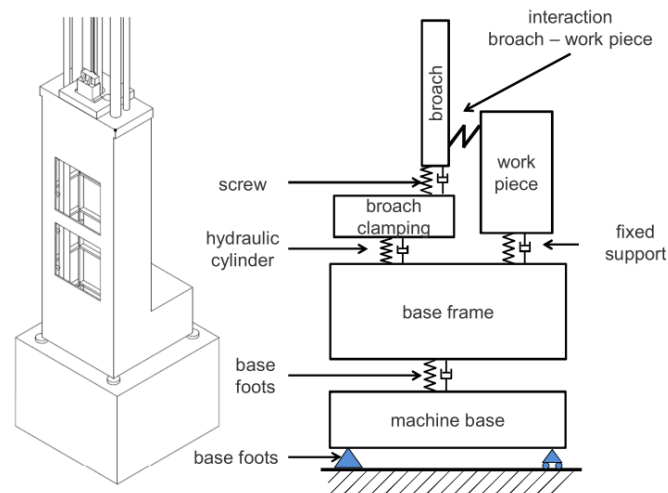


FIGURE 5.1 : Représentation de la rigidité d'une machine de brochage (Schulze *et al.*, 2013)

axiale et la pièce est massivement maintenue. Ainsi, l'une des sources essentielles de rigidité est la zone de coupe, avec notamment la dent de broche en elle-même, et la structure de la pièce brochée. C'est ainsi la rigidité de l'interface outil/matière dans le cas du brochage intérieur des plaques entretoises qui est étudiée dans la suite de cette section.

5.2.1 Rigidité d'une dent de broche

Dans les différentes études présentées au cours de cette section, la notion de rigidité s'est plusieurs fois révélée être à l'origine de variations d'état de surface. Ce terme générique est en réalité utilisé pour désigner une accumulation de phénomènes de natures différentes, à l'origine d'une position relative de l'arête de coupe pouvant varier par rapport à la surface théorique, en fonction des efforts appliqués. La structure de la machine joue évidemment un rôle majeur dans la détermination de cette rigidité, que ce soit au travers de sa disposition géométrique (structure en « U » ou en « O »), des matériaux utilisés (acier, fonte, béton...) ou encore des ajustements et méthodes d'assemblage. Mais les écarts de position relative entre l'arête et la surface à brocher peuvent également provenir de la déformation même de la partie coupante de l'outil.

Dans le cas du brochage, la hauteur de dent est couramment de l'ordre de 3 mm, l'angle de coupe très positif associé à une largeur de dent limitée donnant à cette dent une géométrie assez creuse et donc potentiellement assez souple. La mesure expérimentale de la flexibilité de cette dent est délicate vis-à-vis de la difficulté que représente l'isolement des effets issus seulement de cette dent par rapport à la déformation du montage total. Afin d'obtenir un ordre de grandeur de l'écart dimensionnel issu de la mise en charge de

cette dent au cours de l'usinage, un modèle de simulation numérique ALE basé sur les travaux de [Bonnet *et al.* \(2008\)](#) a été mis en place.

Deux pièces sont représentées par ce modèle. La dent de broche est représentée de sa racine, jusqu'à l'arête de coupe afin de représenter les phénomènes d'élasticité issus de sa géométrie particulière. La seconde pièce est la matière brochée. La spécificité de ce type de modèle réside essentiellement dans le type de maillage utilisé pour représenter la matière usinée. En effet, celle-ci est représentée par un maillage déformable, la surface inférieure étant encastrée, la représentation de l'écoulement de la matière est rendue possible par la création de surfaces eulériennes en amont et en aval de la zone de coupe, de même qu'au niveau de l'extrémité du copeau. Ce modèle ALE est présenté plus en détail ultérieurement dans ce chapitre. Il est en effet très similaire au modèle ALE utilisé pour la validation du modèle lagrangien de simulation de l'enroulement du copeau.

Le modèle ALE ainsi réalisé consiste en la représentation d'une dent de brochage en deux dimensions, et à la simulation d'une opération de coupe de l'inox Z10C13 (figure 5.2). Puis les coordonnées du nœud situé à la distance maximale de la racine de la dent sont enregistrées.

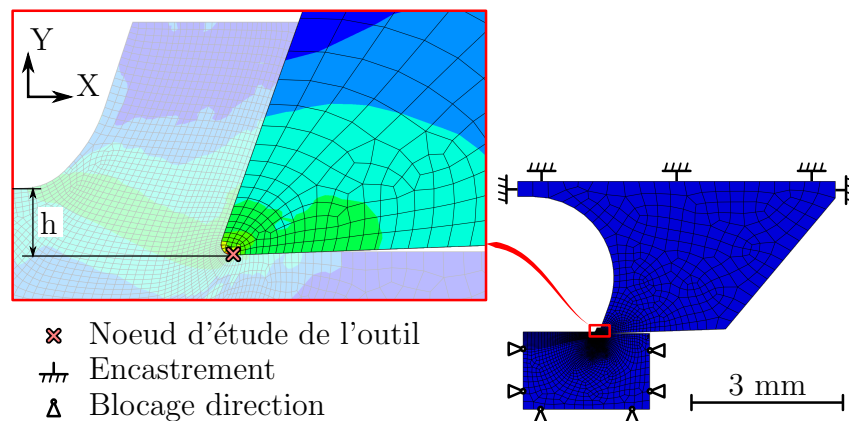


FIGURE 5.2 : Simulation de la déformation d'une dent

Les propriétés matériaux du Z10C13 utilisées dans cette simulation sont pour la plupart issues d'une étude réalisée par le CIRTES pour le compte d'AREVA et sont présentées dans le tableau 5.1, alors que les propriétés de l'acier rapide M35 sont issues de la documentation [Taylor Special Steels Std.](#)¹. Notons que ces dernières sont thermodépendantes bien que les essais de simulation aient été menés à 20 °C, et qu'aucune élévation significative de température ne soit observée.

Pour mener cette étude, la vitesse de coupe a été fixée à 50 m/min en vue de limiter le temps de calcul. L'impact de trois progressions différentes (10, 30 et 60 μm) a été testé. Sur

1. <http://www.taylorspecialsteels.co.uk/pdfdownload/m35.pdf>

Tableau 5.1 : Propriétés matériaux utilisées pour la représentation de la flexibilité d'une dent de brochage

		Z10C13	M35		
			20 °C	400 °C	600 °C
Densité, ρ [kg/m ³]		7 800	8 150	8 050	7 990
Élasticité	Module d'Young, E [GPa]	200	230	205	184
	Coefficient de poisson	0.3	0.3		
Chaleur spécifique, C_P [$\frac{J}{kg^\circ C}$]		460	420	510	600
Conductivité thermique, λ [$\frac{W}{m^\circ C}$]		24.9	24	28	27
Coefficient de dilatation thermique, α_d [/ $^\circ C$]		9e-6	0	1.16e-5	1.19e-5
Paramètres du modèle de Johnson & Cook	A [MPa]	236	-		
	B [MPa]	690	-		
	C	0.06	-		
	n	0.141	-		
	m	0.95	-		
	Température de fusion [°C]	1505	-		
	Température de transition [°C]	20	-		
	$\dot{\epsilon}_0$ [s ⁻¹]	0.001	-		

chacune des courbes présentées sur la figure 5.3, on remarque que le nœud étudié subit tout d'abord un recul dans le sens de la vitesse de coupe -X. Il subit également un déplacement dans la direction de la progression -Y, la progression réelle induite simplement par cet effet étant par conséquent supérieure de quelques microns à la progression théorique.

Ce modèle de simulation numérique permet ainsi d'obtenir un ordre de grandeur de l'écart de progression induit par la déformation de la dent. Ainsi une progression théorique de 30 μm induit l'apparition d'une « sur-progression » d'une valeur maximale de plus de 2 μm issue de la déformation de la dent de brochage, soit 7% supplémentaires. Par ailleurs, lorsque la coupe est stabilisée, cette valeur de « sur-progression » varie constamment entre 0.9 et 2.1 μm .

Afin d'obtenir une notion de la rigidité seule de cette dent de brochage, les rapports entre effort de coupe, et déplacement suivant X dans un premier temps, et effort de

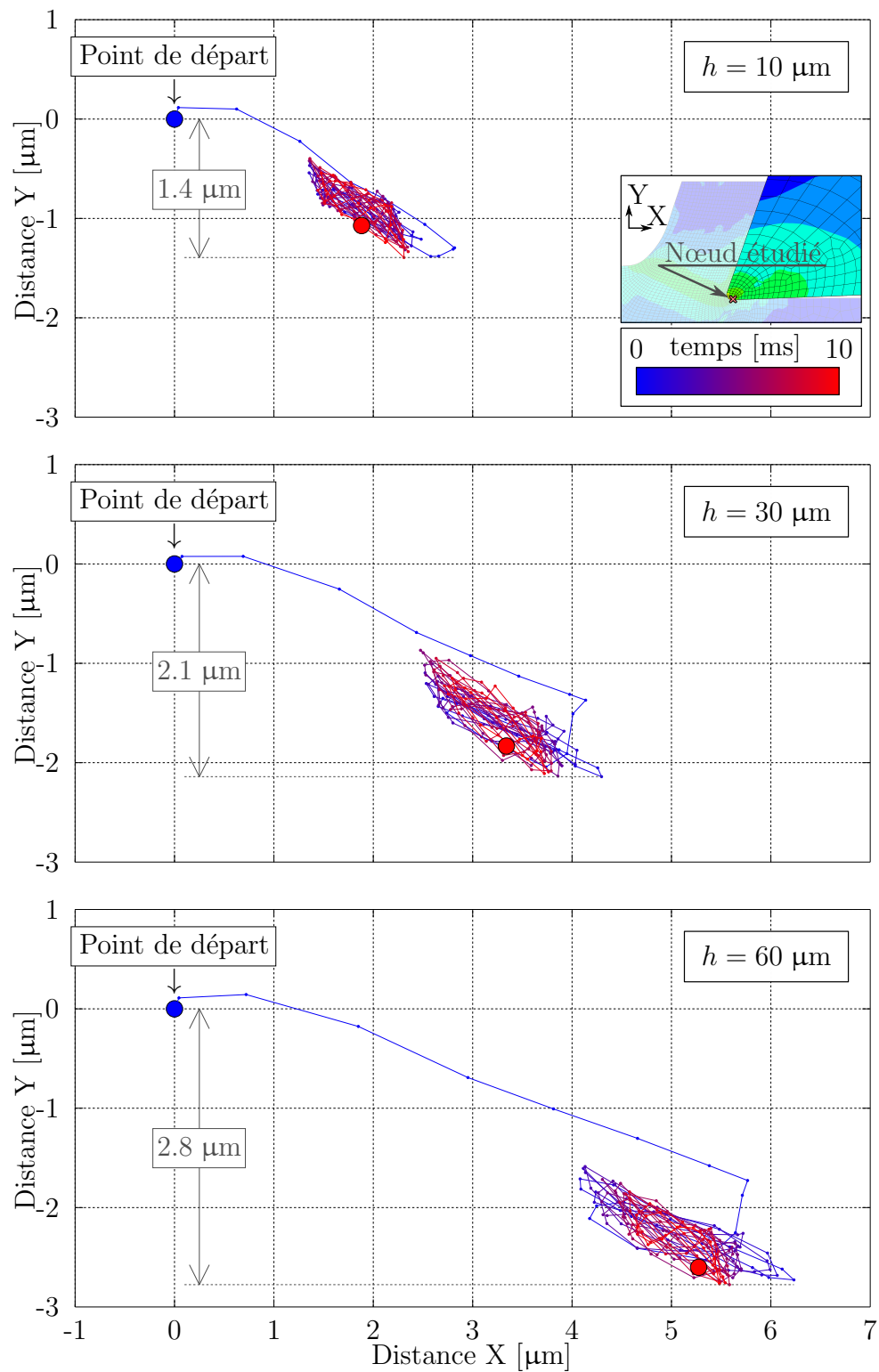


FIGURE 5.3 : Simulation de la déformation d'une dent

pénétration et déplacement suivant Y ont été obtenus pour les différentes progressions étudiées. Ces résultats sont présentés sur la figure 5.4. Les résultats obtenus dans la direction Y sont directement liés à la valeur de progression finale réelle. Les valeurs de rigidité d'une dent de broche obtenues dans cette direction apparaissent ainsi inférieures à $60 \text{ N}/\mu\text{m}$. Or, il a été déjà évoqué dans ce document que la rigidité d'un système d'usinage complet est supposée suffisante à partir de $20 \text{ N}/\mu\text{m}$, et très importante au-delà de $400 \text{ N}/\mu\text{m}$.

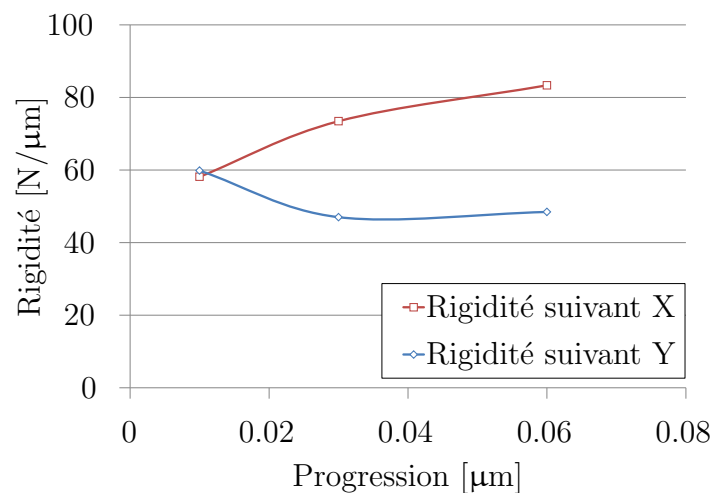


FIGURE 5.4 : Rigidités d'une dent de broche obtenues numériquement pour différentes progressions

La simulation ALE d'une dent de brochage permet de caractériser la déformation subie par cette dent au cours d'une opération de coupe. Il apparaît ainsi que la seule déformation de cette dent peut entraîner une augmentation de progression non négligeable (jusqu'à plus de $2 \mu\text{m}$ pour une progression de $30 \mu\text{m}$ soit 7%).

Ainsi, la déformation de la dent de broche apparaît significative et peut participer à l'apparition d'une instabilité des mécanismes de coupe. Ceci laisse supposer que le déplacement réel (voire les vibrations) subi par l'arête de coupe est bien plus important, les déformations issues de la machine et du montage étant probablement bien supérieures à celle de la dent.

Notons que la modélisation mise en œuvre dans cette section consistait en une dent de broche plate, ces dernières étant circulaires dans le cas de broches de production. En revanche, dès lors que les feuillures commencent à être usinées chaque dent n'usine qu'une portion de cercle de quelques degrés, l'approximation induite par cette méthode de modélisation est alors réduite, et le modèle très représentatif de la réalité.

5.2.2 Déformation des ligaments au cours du brochage

L'influence de la géométrie d'une dent de broche sur la progression réelle en cours de brochage a ainsi été caractérisée. Or si la déformation de la dent influence la progression réelle, la déformation de la pièce brochée au cours du brochage (induite par les efforts de pénétration) peut également influencer la progression finale, et donc les dimensions brochées.

Sur le plan de broche présenté en annexe B, on remarque que la progression en fin de broche diminue progressivement, jusqu'à atteindre $5\ \mu\text{m}$ à la dent 148 (les valeurs indiquées sont des progressions au diamètre i , ce qui correspond au double de la progression à la dent h). À partir de la dent 149, des progressions négatives de l'ordre de $-2.5\ \mu\text{m}$ sont utilisées.

Les fabricants de broches justifient ce choix surprenant au premier abord par une nécessité de compenser les déformations élastiques des ligaments induites par l'effort de pénétration, ligaments dont l'épaisseur est par ailleurs la plus fine en fin de brochage des feuillures. En effet, sans la présence de ces dents de progression légèrement négative en fin de broche, un rayon de fond de feuillure inférieur d'environ $30\ \mu\text{m}$ au rayon théorique décrit au plan a été identifié par retour d'expérience. Ce phénomène est présenté sur la figure 5.5.

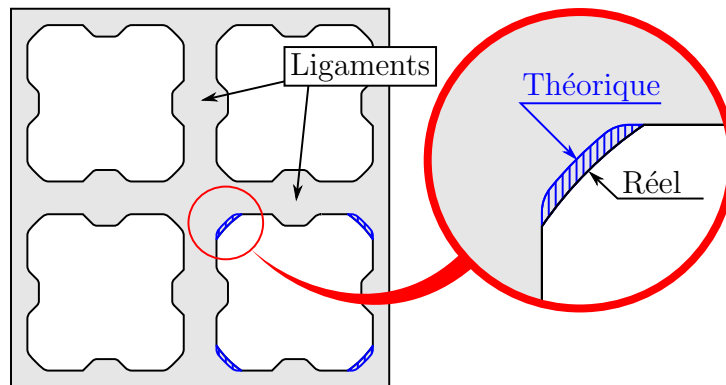


FIGURE 5.5 : Schématisation de l'écart dimensionnel provoqué par l'élasticité du ligament

Afin de valider l'hypothèse de la déformation des ligaments au cours du brochage, et de la caractériser plus finement le cas échéant, un modèle de simulation numérique a été utilisé. Celui-ci consistait en la simulation de l'effort de pénétration exercé par une broche de production au niveau du fond d'une feuillure. Un certain nombre d'hypothèses ont été émises afin de mener à bien ces essais de simulation. Ainsi, le cas le plus critique (où les déformations sont les plus importantes) a été étudié, à savoir lorsque la cellule brochée et les cellules alentour sont les moins rigides. Ceci correspond à une situation dans laquelle

l'ensemble des cellules ont été brochées, possédant un profil quadri-folié final.

En ce qui concerne les conditions aux limites, la déformation obtenue sur un seul quart de cellule a été observée, en s'appuyant sur une hypothèse de symétrie parfaite de la déformation des lobes brochés (figure 5.6).

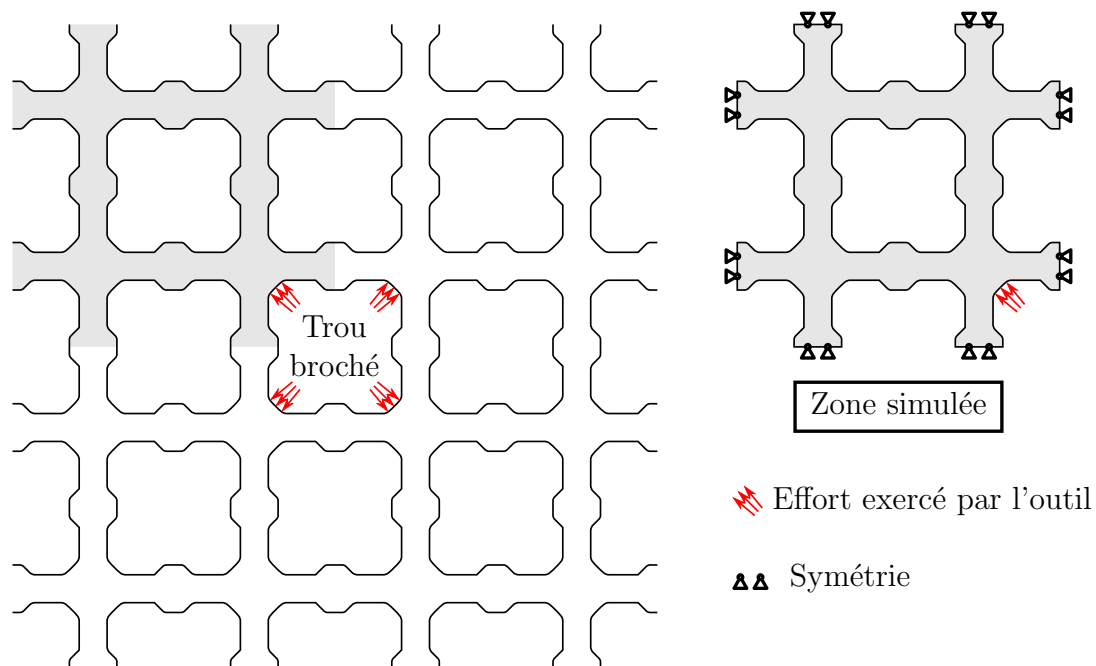


FIGURE 5.6 : Condition aux limites de la modélisation de déformation des ligaments en brochage

Ainsi, ce modèle a été développé en plusieurs étapes, comme illustré sur la figure 5.7. D'abord en deux dimensions, en ne prenant en considération que quelques ligaments, puis avec des ligaments supplémentaires afin de considérer l'influence d'un nombre plus important de ligaments. Dans ces deux premiers cas, l'utilisation d'un modèle 2-dimensions entraînait une répartition homogène de l'effort de pénétration sur la surface ce qui s'avérait peu réaliste. Afin de représenter plus fidèlement l'effort exercé par les dents de la broche sur la surface brochée, le modèle a ensuite été réalisé en 3-dimensions. C'est cette dernière représentation qui est présentée dans la suite de cette sous-section.

Notons que ce modèle a été réalisé grâce au logiciel Abaqus Explicit®, des éléments prismatiques de type C3D8R ont été utilisés pour représenter la pièce et l'outil. Afin de représenter l'effort de pénétration exercé par l'outil (considéré rigide) sur la cellule brochée, aucun déplacement dans le sens de la coupe n'est appliqué sur l'outil. Seul un effort de pénétration est simulé. Afin de représenter plus fidèlement le comportement à proximité des dents de broche, le maillage des plaques entretoises a été raffiné dans cette zone jusqu'à $5\ \mu\text{m}$, comme présenté sur la figure 5.8.a.

L'outil a initialement été représenté par une dent de broche dont la géométrie était

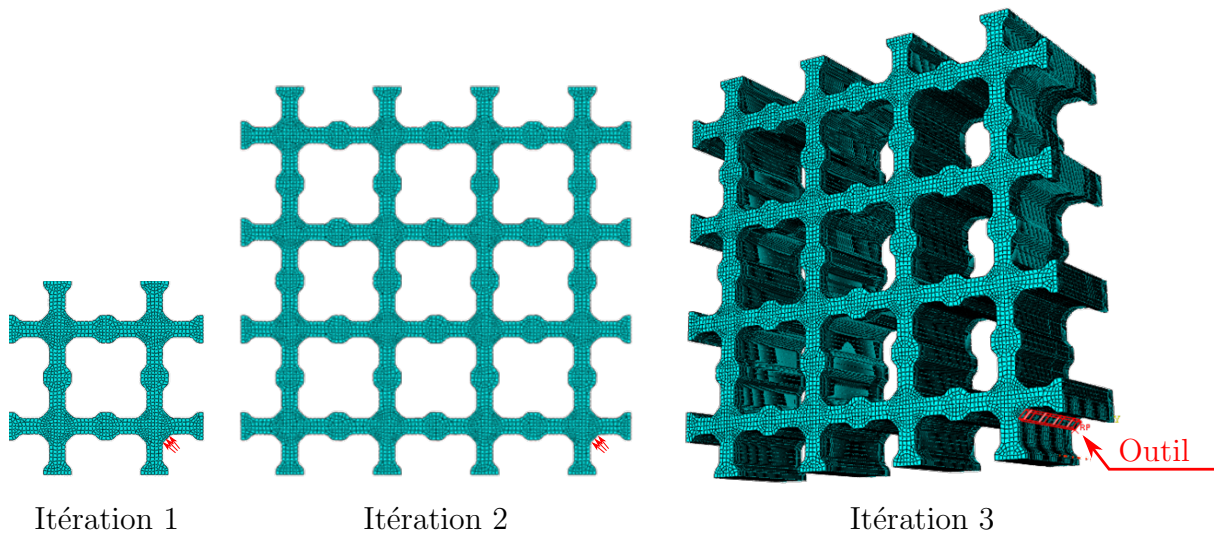
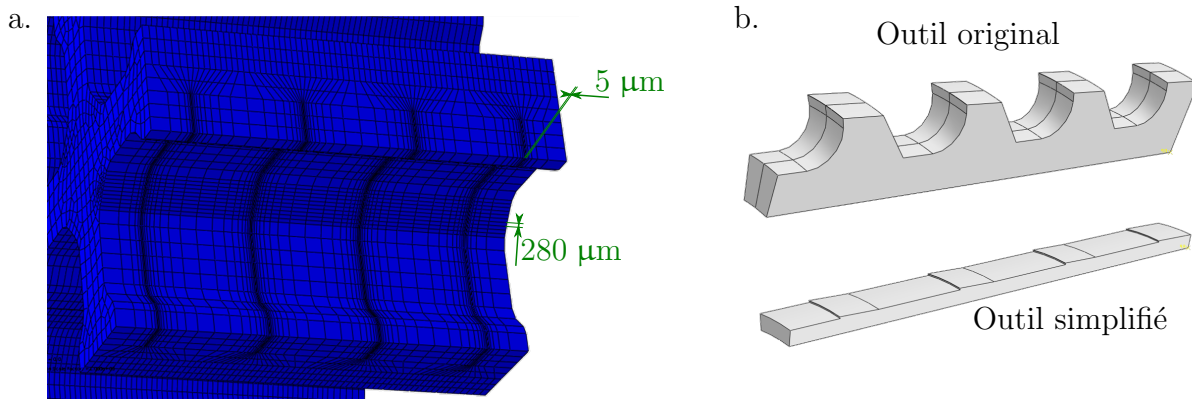


FIGURE 5.7 : Schématisation des itérations de développement du modèle de simulation de déformation des ligaments

très similaire à celle des outils de production. Une simplification de ce dernier a ensuite été réalisée afin de limiter le nombre d'éléments. Seule la face de dépouille a été conservée, cette dernière pouvant entrer en contact avec la plaque entretoise. Ceci est présenté sur la figure 5.8.b.



Feuillure en contact avec l'outil

FIGURE 5.8 : Zone de la cellule en contact avec l'outil, et taille de maille associée (a.) et géométrie de l'outil utilisé (b.)

Une valeur d'effort de pénétration représentative devait également être identifiée. En fixant la vitesse de coupe à 2.5 m/min, une formulation de l'effort de coupe dépendant de la progression h et de la profondeur de passe a_P a été identifiée, présentant un coefficient de corrélation linéaire R^2 supérieur à 0.997 par rapport aux résultats expérimentaux obtenus

sur banc de brochage. Cette formulation est présentée sur l'équation 5.1.

$$F_h = (850h + 21) \times a_P \quad (5.1)$$

En appliquant cette formulation au cas d'application traité dans cette étude ($h = 5 \mu\text{m}$, $a_P = 2.8 \text{ mm}$, et 4 dents considérées), l'effort de pénétration total sur l'outil défini par l'équation 5.2 peut être calculé.

$$\begin{aligned} F_{h,\text{outil}} &= ((850 \times 0.005 + 21) \times 2.8) \times 4 \\ F_{h,\text{outil}} &= 283 \text{ N} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Ainsi, le déplacement des nœuds présents à l'interface entre l'outil et la plaque a été observé. Dans les conditions évoquées précédemment, le déplacement maximal observé est inférieur au micron, comme présenté sur la figure 5.9.

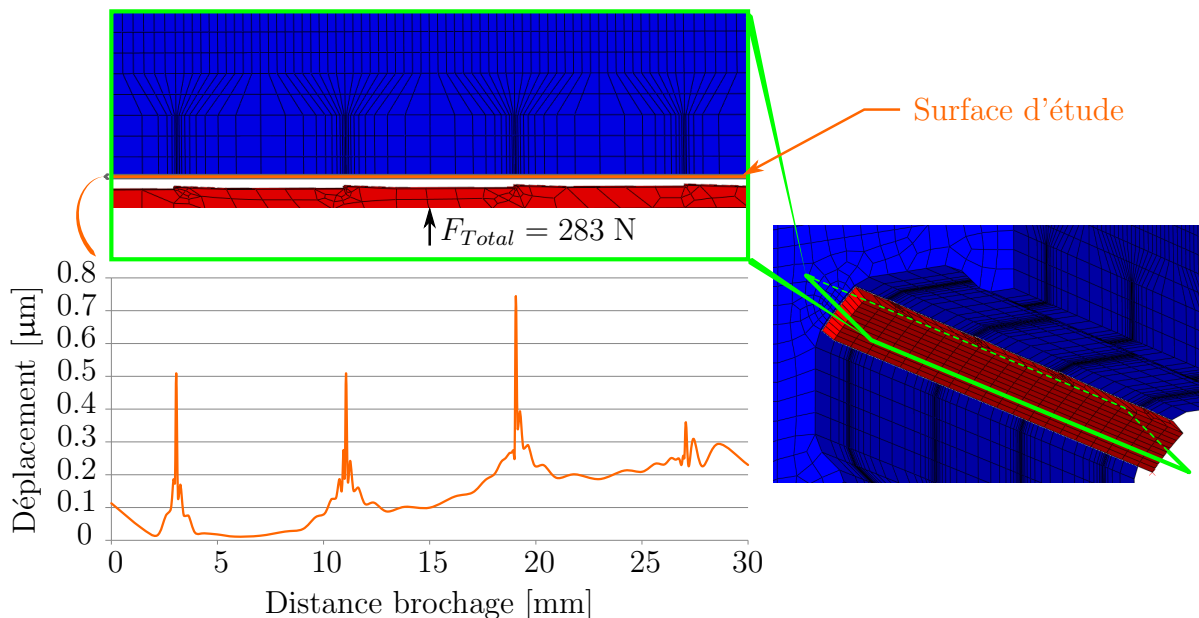


FIGURE 5.9 : Relevé des déformations de la plaque entretoise au cours du brochage

L'effort de pénétration n'est ainsi responsable que d'un très faible déplacement des nœuds situés à l'interface, non comparable à l'écart de $30 \mu\text{m}$ observé par retour d'expérience.

Cette étude visait à caractériser l'écart de progression induit par l'effort de pénétration des dernières dents de broche. En effet, des écarts dimensionnels de quelques dizaines de microns après brochage ont été mis en évidence par retour d'expérience. Cet écart n'est pas lié à la déformation des ligaments de la plaque entretoise d'après les résultats mis en évidence dans ces travaux.

Une hypothèse permettant d'expliquer cet écart concerne la précision des procédés de fabrication mis en œuvre. Historiquement, des précisions de l'ordre du micromètre étaient recherchées au moyen de machines conventionnelles. Ceci pouvait expliquer ces écarts. Mais les efforts notamment des fabricants de broches apportés dans l'amélioration constante du procédé ont permis d'obtenir une précision de fabrication et une répétabilité bien plus importantes.

Il serait intéressant de pousser cette étude au moyen d'essais expérimentaux, afin de caractériser précisément l'écart dimensionnel entre la dernière dent de broche et le trou broché, en l'absence de dents de réserve (ou de calibrage) afin de valider cette hypothèse.

5.3 Simulation de l'enroulement du copeau

Pour simuler les mécanismes de formation du copeau, la méthode lagrangienne est couramment employée, comme c'est par exemple le cas dans les travaux de [Mabrouki et al. \(2008\)](#). Dans ce travail, l'auteur simule une opération de coupe réalisée à vitesse élevée (entre 200 et 800 m/min), permettant ainsi de simuler une longueur de coupe de l'ordre de 10 mm, le temps simulé étant réduit (770 μ s dans le cas présenté sur la figure 5.10).

Dans le cas du brochage, la difficulté essentielle réside dans la simulation d'un procédé mettant en œuvre des vitesses de coupe extrêmement faibles, typiquement de 2.5 m/min, sur des longueurs de coupe importantes de 30 mm. Pour ce faire, une adaptation de ce modèle a été nécessaire en vue de mener à bien cette étude au moyen de simulations nécessitant des temps de calcul limités à seulement quelques dizaines d'heures, voire quelques jours. Ainsi, cette section traite du développement d'un modèle de simulation numérique lagrangienne aux temps longs, visant notamment à simuler l'enroulement du copeau.

5.3.1 Modélisation élémentaire

Le modèle élémentaire à la base du développement présenté dans cette section s'appuie donc sur les travaux de [Mabrouki et al. \(2008\)](#). Ainsi, cette modélisation consiste en un modèle Lagrangien de coupe orthogonale en 2 dimensions, réalisé sous le logiciel de simulation numérique par éléments finis Abaqus/Explicit®. Dans ce modèle, l'outil est représenté par une seule pièce rigide, le matériau broché est quant à lui divisé en 3 sous parties ; le massif, la zone de passage de l'arête de coupe et le copeau. Contrairement à

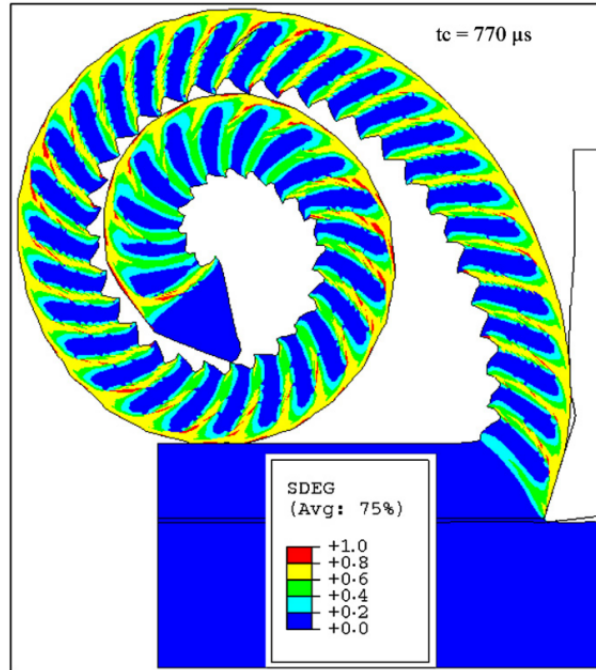


FIGURE 5.10 : Simulation Lagrangienne de la coupe pour une vitesse de coupe de 800 m/min et une avance de 0.4 mm (Mabrouki *et al.*, 2008)

la plupart des travaux mettant en œuvre ce type de modèle de simulation, le festonnage du copeau a été négligé par l'utilisation d'éléments non endommageables au niveau du copeau. En effet, les copeaux obtenus expérimentalement dans des conditions de brochage conventionnelles sont continus et non festonnés. Ainsi, seuls les éléments situés dans la zone de passage sont endommageables afin de permettre le détachement du copeau.

Le modèle utilisé se compose d'éléments quadrilatéraux en déformation plane, couplés température-déplacement (CPE4RT), la zone de passage est munie d'éléments dont la taille est de l'ordre de $1 \mu m$ verticalement. La figure 5.11 présente les conditions aux limites utilisées au sein de ce modèle de coupe.

Pour mener à bien cette étude, la simulation de l'usinage d'un acier C45 a été privilégiée. Sa caractérisation a en effet fait l'objet de nombreuses études (Jaspers et Dautzenberg, 2002; Chen *et al.*, 2008; Courbon, 2011; Duan *et al.*, 2011), et la modélisation de son comportement a été éprouvée. Les propriétés d'un acier rapide M35 ont quant à elles été utilisées pour la représentation du comportement de l'outil. Le coefficient de Quinney-Taylor (η) représentant la fraction du travail plastique convertie en chaleur) considéré dans notre cas est de 0.85, la formulation de ce coefficient est présentée de manière détaillée dans les travaux de Courbon (2011).

Le tableau 5.3 propose un récapitulatif des propriétés thermo-mécaniques des aciers utilisés dans cette étude. Le comportement plastique de l'acier C45 est représenté par une

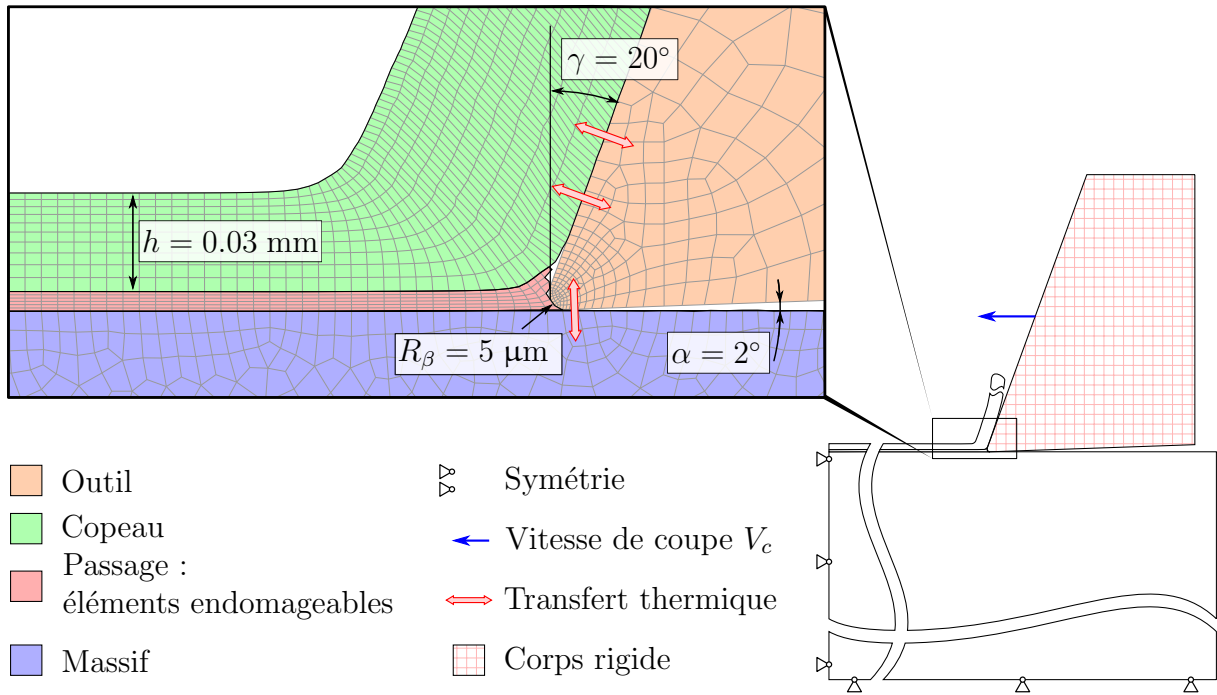


FIGURE 5.11 : Conditions aux limites du modèle Lagrangien élémentaire de l'étude

loi de Johnson & Cook, dont la formulation est présentée par l'équation 5.3, les paramètres correspondants sont référencés dans le tableau 5.2.

$$\sigma_Y = \underbrace{[A + B(\varepsilon_P)^n]}_{\text{plasticité}} \underbrace{\left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_P}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]}_{\text{viscosité}} \underbrace{\left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right)^m\right]}_{\text{adoucissement thermique}} \quad (5.3)$$

Tableau 5.2 : Paramètres de Johnson & Cook de l'acier C45 (Jaspers et Dautzenberg, 2002)

A [MPa]	B [MPa]	n	C	$\dot{\varepsilon}_0$ [s ⁻¹]	m	T_f [°C]	T_0 [°C]
553.1	600.8	0.234	0.134	1	1	1460	25

En se basant sur les travaux de Mabrouki *et al.* (2008), l'évolution de l'endommagement de la zone de passage est représentée au moyen d'une loi d'endommagement de Johnson & Cook décrite par l'équation 5.4. Les paramètres de cette loi identifiés par Duan *et al.* (2011) sont présentés dans le tableau 5.4.

$$\bar{\varepsilon}_{0i} = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{P}{\bar{\sigma}} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right) \right] \quad (5.4)$$

Tableau 5.3 : Propriétés thermo-mécaniques des aciers utilisés (Courbon, 2011; Taylor Special Steels, 2014)

Propriété	Pièce (C45)	Outil (HSS M35)
Masse volumique, ρ [kg/m ³]	7 844	8 000
Module d'élasticité, E [GPa]	207	$-0.0775T + 232.7$
Coefficient de Poisson, ν	0.3	0.3
Chaleur spécifique, C_P [$\frac{J}{kg \times ^\circ C}$]	$0.504T + 420$	$0.3T + 408$
Conductivité thermique, λ [$\frac{W}{m \times ^\circ C}$]	$-0.0258T + 51$	$-0.0105T + 23.8$
Dilatation thermique, α_d [/ $^\circ C$]	$2 \cdot 10^{-8}T + 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-8}T - 6 \cdot 10^{-7}$
Dureté Vickers [HV _{0.3}]	210	840

Tableau 5.4 : Paramètres de la loi de Johnson & Cook d'endommagement de l'acier C45 (Duan *et al.*, 2011)

D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
0.06	3.31	-1.96	0.0018	0.58

Le coefficient de frottement a été initialement fixé à 0.6 pour les phases de développement du modèle. Ce dernier concerne aussi bien le frottement dans la zone outil/copeau (face de coupe + chambre à copeaux), que outil/pièce et même définissant le contact éventuel du copeau sur lui-même. Notons que l'utilisation de coefficients plus faibles est à l'origine d'instabilités notamment au niveau des éléments de la zone de passage. Ceci devra faire l'objet d'études dédiées afin de palier ces défauts de modélisation.

5.3.2 Simulation aux temps longs

La formulation lagrangienne décrite précédemment est une méthode efficace permettant de représenter la formation du copeau. Cependant, il s'agit d'être en mesure de représenter la formation d'un copeau long de plusieurs dizaines de millimètres. Pour ce faire, le nombre d'éléments nécessaire en formulation lagrangienne standard serait conséquent, entraînant des temps de calculs excessifs.

a. Principe général

Afin de réduire le temps de calcul nécessaire tout en conservant la formation du copeau, une nouvelle méthode de simulation a été développée. Le principe de fonctionnement de

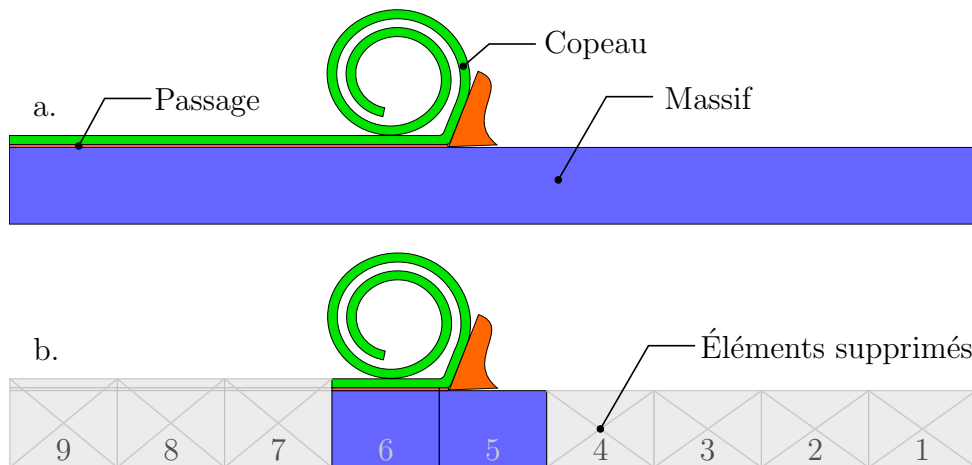


FIGURE 5.12 : Simulation lagrangienne standard (a.) et simulation lagrangienne aux temps longs (b.)

base de cette méthode schématisé sur la figure 5.12 consiste en l'élimination des éléments du massif pas ou peu affectés par les sollicitations thermomécaniques de la coupe. Une petite portion de massif est initialement considérée, puis une fois que l'outil s'est déplacé d'une certaine distance, les éléments du massif situés à l'arrière de la zone de coupe sont supprimés. Simultanément, des éléments sont ajoutés devant la zone de coupe avant de continuer la simulation.

La mise en application de cette méthode a nécessité la possibilité de générer automatiquement la mise en données, ainsi que le lancement de simulations numériques via le logiciel Abaqus/Explicit®. L'alternance entre les différentes itérations de simulation devait être gérée automatiquement. Pour ce faire, le logiciel Matlab® a été utilisé, le lancement de simulations étant réalisé par l'intermédiaire de scripts Python® à même de communiquer avec l'interface d'Abaqus®.

b. Principaux verrous

Afin de permettre la mise en œuvre de cette méthode de simulation, deux verrous devaient être levés. Le premier concerne la suppression et l'ajout d'éléments au cours d'une simulation, le second concerne la continuité des paramètres physiques au cours des différentes phases de simulation.

En ce qui concerne ce premier verrou, la solution privilégiée consiste à discrétiser la pièce usinée en différents sous-éléments. Ainsi, au cours de la première itération de simulation, seuls les sous-éléments 1 et 2 sont considérés. Une fois terminée, les mailles du sous-élément 2 (massif, zone de passage et copeau) sont réinjectées dans une nouvelle simulation, et le sous-élément 3 est ajouté devant la zone de coupe, la seconde itération est alors simulée.

Le second verrou lié à la continuité des phénomènes physiques a été levé par le transfert non seulement des géométries et maillages, mais également des champs de grandeurs physiques suivantes entre les différentes itérations de calcul :

- vitesses (V)
- températures (NT11)
- contraintes (S)
- déformations plastiques équivalentes (PEEQ)

Sans ce transfert, l'historique de chargement au niveau des éléments réinjectés serait perdu. Ceci aurait une influence significative aussi bien sur la stabilité de l'opération (phase de stabilisation entre chaque itération, etc.) que sur la pertinence même des résultats.

Cette nouvelle stratégie de simulation dénommée ILaM (*Iterative Lagrangian Methodology*) est présentée sur la figure 5.13. Cette dernière a fait l'objet d'une présentation à la conférence ESAFORM 2016 (Fabre *et al.*, 2016).

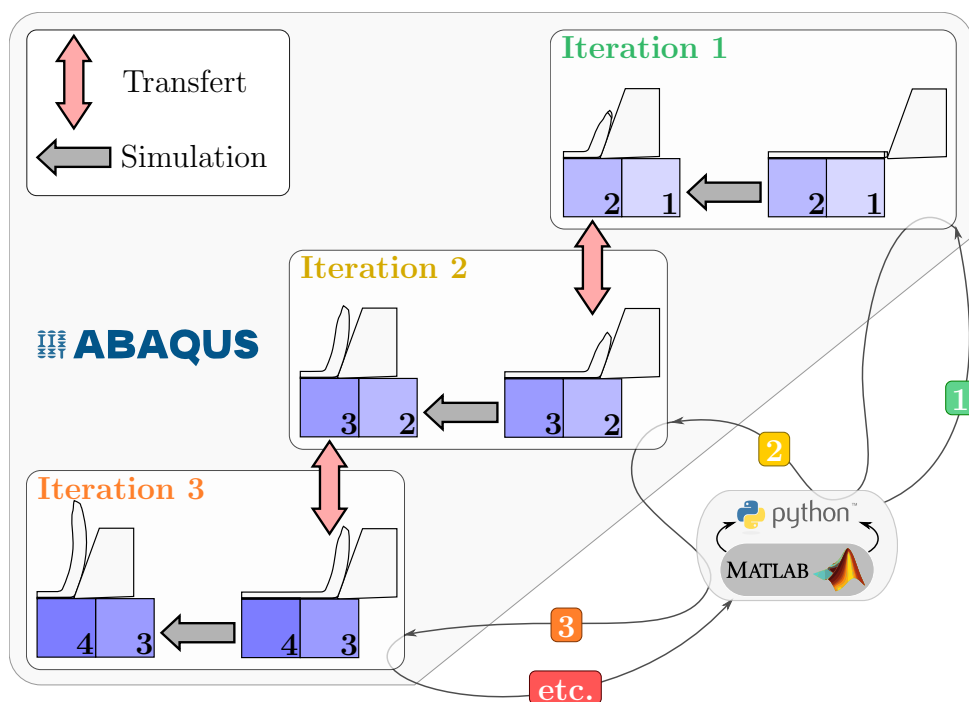


FIGURE 5.13 : Principe de fonctionnement du modèle itératif ILaM

Notons que la liaison entre les sous-ensembles successifs (copeau 1 et copeau 2 par exemple) a dans un premier temps été assurée par un lien de type « Tie » dans Abaqus®. Cela étant à l'origine d'instabilités, les différents sous-éléments de copeaux ont finalement été fusionnés au début de chaque itération afin d'obtenir un copeau unique et non plus le « collage » de sous-copeaux successifs. Pour ce faire, une étape intermédiaire a lieu

entre deux itérations. Dans un premier temps les mailles de la simulation précédente sont importées et les nouvelles mailles créées. Puis ces dernières sont de nouveau importées dans une nouvelle simulation sous la forme d'« orphan mesh » avant d'être fusionnées, et que les champs de grandeurs physiques évoqués précédemment ne soient transférés à partir de l'itération de calcul précédente.

Ainsi, ce transfert a lieu nœud par nœud et élément par élément. En effet, dans la mesure où leur référence est perdue lors de l'importation et fusion, il est nécessaire de balayer l'ensemble des nœuds et éléments, d'en relever la position et d'identifier le nœud ou l'élément correspondant dans l'itération précédente.

5.3.3 Validation du modèle

Une fois ce modèle développé et fonctionnel, des essais expérimentaux de brochage sous huile entière ont été réalisés sur un acier C45 au moyen d'outils en acier rapide M35 non revêtus en face de coupe, et revêtus TiN en dépouille. Ces essais ont été réalisés sur le banc de brochage présenté précédemment.

a. Efforts de coupe

Pour mener à bien la validation de ce modèle de simulation, un point central avec une progression de 30 μm et une vitesse de coupe de 10 m/min a été défini. Puis 2 autres progressions ont été testées à vitesse de coupe fixe (10 m/min), de même que 2 autres vitesses de coupe à progression fixe (30 μm). Les résultats d'effort de ces simulations sont présentés sur la figure 5.14.

Ainsi, on remarque une bonne corrélation entre les efforts de coupe simulés par la méthode ILaM et les efforts expérimentaux lorsque la vitesse de coupe est fixée à 10 m/min (cf. figure 5.14.a.). En revanche comme on peut le voir sur la figure 5.14.b., les résultats obtenus lors de la diminution de vitesse de coupe sont différents expérimentalement et numériquement. En effet, alors qu'expérimentalement les efforts tendent à décroître lorsque la vitesse de coupe passe de 10 à 2.5 m/min, ceux-ci décrivent une forte augmentation numériquement. Cet écart peut être imputable au manque de précision du coefficient de frottement utilisé, ou encore à une précision réduite des propriétés matériaux dans ces conditions de très basses vitesses.

Ce même écart de tendance est également visible sur l'effort de pénétration F_h . De plus, les valeurs d'effort de pénétration issues de la simulation sont très différentes de celles mesurées expérimentalement, y compris lorsque la vitesse de coupe est fixée à 10 m/min.

Sur la figure 5.14, les résultats d'essais de simulation numérique au moyen d'un modèle ALE (*Arbitrary Lagrangian Eulerian*) dans des conditions de coupe similaires

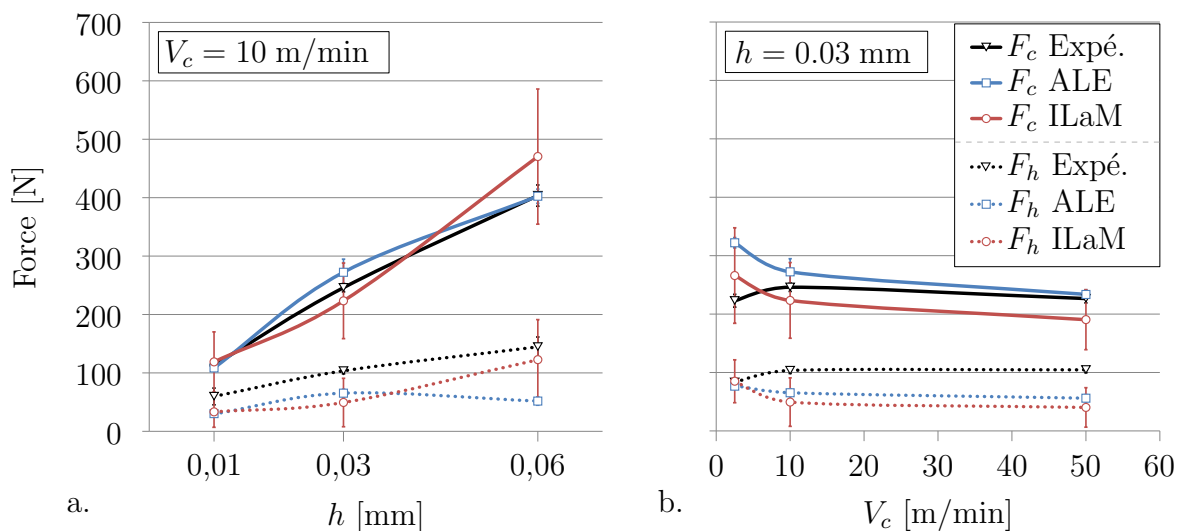


FIGURE 5.14 : Comparaison des efforts expérimentaux et numériques

sont également présentés. La méthode ALE a été sélectionnée car elle permet une représentation précise des phénomènes en jeu au niveau de l'arête de coupe, le maillage de la matière s'adaptant à la géométrie de l'outil dans cette zone (Bonnet *et al.*, 2008; Courbon *et al.*, 2013). Ceci permet notamment de représenter plus précisément les contraintes mécaniques et thermiques au niveau de cette arête, et donc de mesurer des efforts de coupe et de pénétration plus précis que ceux issus d'une simulation lagrangienne, généralement peu précis suite à la perte de matière dans la zone de détachement de copeau.

Les conditions aux limites de ce modèle ALE sont présentées sur la figure 5.15, une taille de maille de $1 \mu\text{m}$ a été appliquée sur la pièce au niveau de la zone de coupe. Si l'enroulement du copeau ne peut pas être obtenu par cette méthode, il reste toutefois possible de comparer les résultats d'efforts, et de températures. De nouveau, des éléments couplés température-déplacement ont été utilisés (CPE4RT).

Ainsi, on remarque une très bonne corrélation entre les tendances d'effort issues des simulations ALE et ILaM. Un écart de tendance avec les résultats expérimentaux est de nouveau observé à très basse vitesse, au même titre que pour les essais ILaM, ce qui tend à confirmer les hypothèses d'une caractérisation peu précise de l'interface outil copeau (notamment du frottement) ou encore des propriétés matériaux dans ces conditions.

Au vu des résultats précédents, la méthode ILaM a mis en évidence des efforts de coupe similaires à ceux observés grâce à la méthode ALE et également proches de ceux observés expérimentalement. Ceci permet de valider la fiabilité de cette méthode pour la simulation des efforts de coupe.

Les différences de tendances par rapport aux essais expérimentaux observées

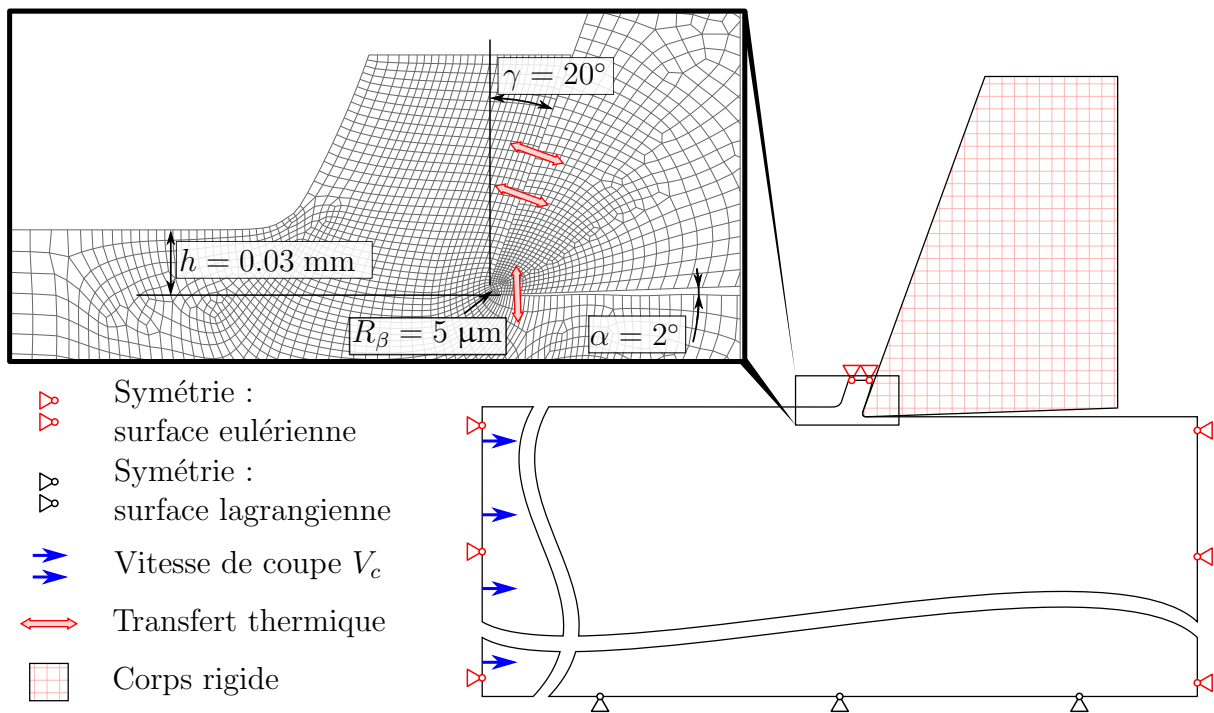


FIGURE 5.15 : Conditions aux limites du modèle ALE

notamment à basse vitesse de coupe au moyen de la méthode ILaM apparaissent également en simulation ALE. Ces écarts ne sont donc pas imputables à la méthode même de simulation, mais probablement davantage à l'utilisation de données imprécises pour la caractérisation de l'interface outil/matière, ou pour le comportement des matériaux en jeu à basse vitesse notamment.

b. Enroulement de copeau

L'objectif essentiel de cette nouvelle méthode de simulation numérique réside dans la prédiction de la formation du copeau et de son enroulement. Ainsi, les copeaux obtenus expérimentalement et numériquement ont été comparés. La figure 5.16 présente la superposition de photographies des copeaux obtenus expérimentalement, et de la position des nœuds de la surface inférieure du copeau simulé (zone en contact avec la zone de passage, en rouge sur la figure 5.16). La distance de brochage simulée a été limitée à 5 mm, ce qui permet d'obtenir une longueur de copeau significative en seulement quelques heures de calcul. Notons par ailleurs qu'à une vitesse de coupe de 2.5 m/min, cela correspond à une durée simulée déjà considérable de 120 ms.

On observe que la forme du copeau simulé est très peu sensible à la variation de vitesse de coupe contrairement aux copeaux obtenus expérimentalement. En re-

vanche, les copeaux obtenus pour une même vitesse de coupe présentent une tendance d'évolution en fonction de la progression proche de celle obtenue expérimentalement. Les résultats les mieux corrélés aux résultats expérimentaux sont observés à haute vitesse de coupe (50 m/min), notamment pour l'essai réalisé avec une progression intermédiaire de 0.03 mm.

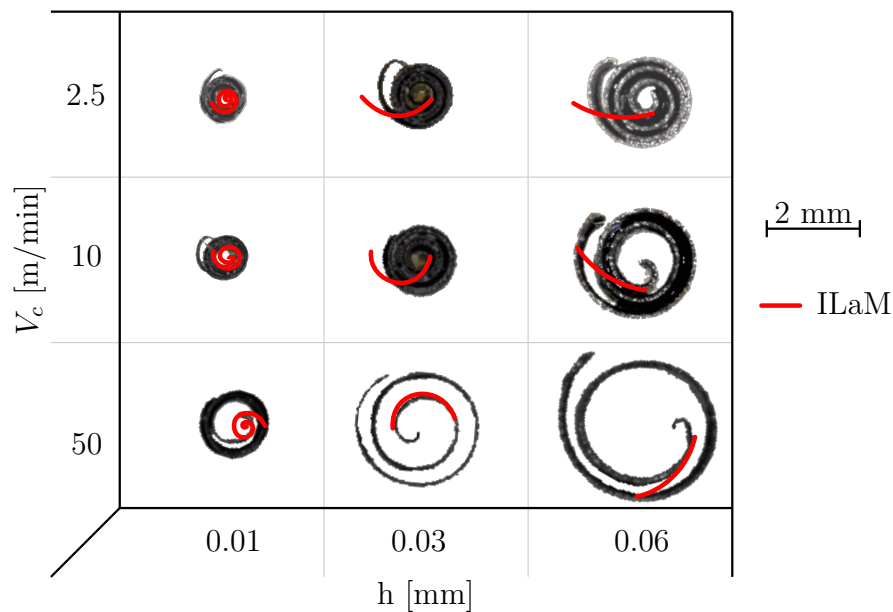


FIGURE 5.16 : Comparaison des copeaux expérimentaux et issus de la simulation ILaM

Pour conclure, la sensibilité de l'enroulement du copeau à la variation de progression est bien représentée par la simulation ILaM. En revanche, la variation numérique de vitesse de coupe n'entraîne pas de variation significative d'enroulement du copeau, contrairement aux observations issues des essais expérimentaux. De nouveau les propriétés matériaux ou de caractérisation des interfaces peuvent être incriminées.

c. Température

La température maximale obtenue aux nœuds de l'outil a également été relevée lors d'une simulation réalisée à une vitesse de coupe de 50 m/min et une progression de 0.03 mm. Ce relevé est présenté sur la figure 5.17, et met en évidence la continuité des paramètres physiques entre les différentes itérations. En effet sans la phase de transfert évoquée précédemment, aucune stabilisation thermique ne serait possible, entraînant une chute de température systématique entre les différentes itérations.

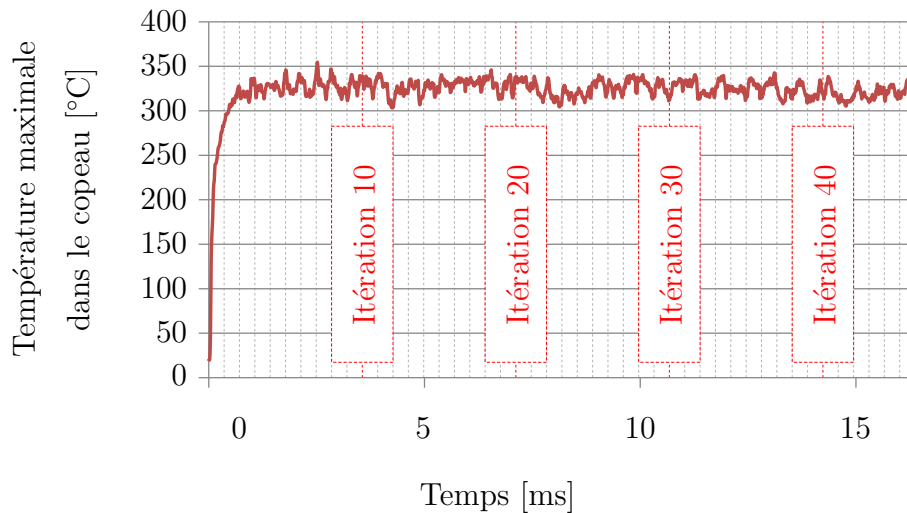


FIGURE 5.17 : Température maximale du copeau calculée lors d’une simulation ILaM à $V_c = 50$ m/min et $h = 0.03$ mm

d. Temps de calcul

Pour finir, les temps de calcul nécessaires pour simuler 1 ms de coupe issus des simulations Lagrangiennes standard et ILaM ont été comparés. Les calculs ont été réalisés au moyen d’un processeur Intel Core i7-3740QM (2.7GHz). Les valeurs présentées correspondent au temps de calcul moyen nécessaire à la simulation d’une longueur de 13.6 mm. Afin d’être en mesure de qualifier l’efficacité de calcul du modèle ILaM, un indicateur basé sur le ratio entre le temps de calcul et le temps de coupe simulé est utilisé. Il s’agit du temps de calcul nécessaire à la simulation de 1 ms de coupe. Ainsi alors que la simulation Lagrangienne standard nécessite environ 709 min/ms, la méthode ILaM nécessite 219 min/ms. La méthode ILaM permet donc de diviser le temps de calcul par un facteur supérieur à 3 par rapport à celui issu d’une simulation lagrangienne standard.

La figure 5.18 présente ainsi la géométrie obtenue après la simulation d’une opération de coupe de 13.6 mm, modélisée par la méthode ILaM pour une vitesse de brochage de 50 m/min et une progression de 30 μm .

5.4 Conclusion sur la simulation du brochage

Dans ce chapitre, plusieurs méthodes de simulation numérique ont été mises en œuvre afin d’apporter des éléments d’explication à des phénomènes physiques observés par retour d’expérience. Ainsi, une première étude traite de la caractérisation de la rigidité d’une dent de broche, et de son influence sur la progression réelle de l’outil. Un écart de plusieurs microns a ainsi pu être observé, seulement provoqué par la déformation de la dent de

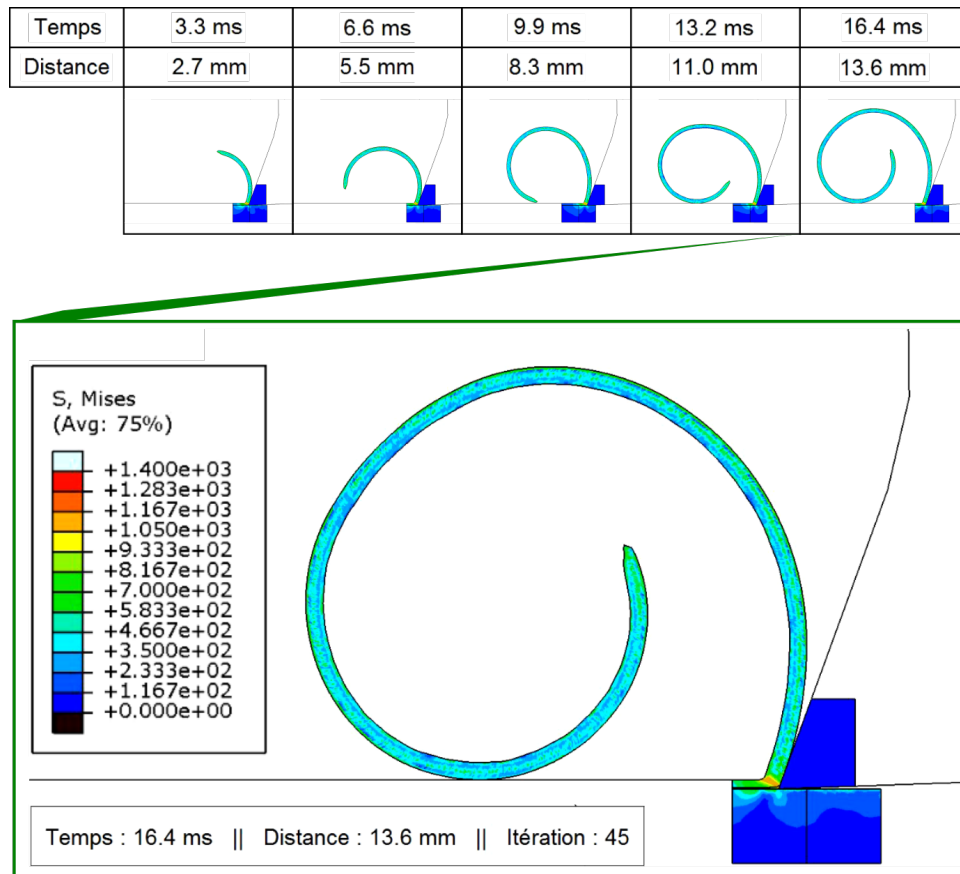


FIGURE 5.18 : Exemple de simulation par la méthode ILaM ($V_c = 50$ m/min et $h = 0.03$ mm)

coupe. À cela peut également s'ajouter la déformation de la plaque entretoise. Cette dernière s'est avérée relativement faible dans les conditions étudiées. La rigidité seule de la zone de coupe peut ainsi être à l'origine de déviations dimensionnelles ou d'état de surface. De façon générale, cette déformation peut être limitée par l'utilisation d'une progression limitée. En d'autres termes, les conditions de finition sont à l'origine de déformations très limitées de la plaque entretoise et de la dent de broche. Les écarts de rayon de fond de feuillures observés industriellement ne semblent donc pas imputables à ces phénomènes de déformation de dent, ou des ligaments de plaque entretoise.

La seconde section de ce chapitre traite du développement d'une nouvelle méthode de simulation de la formation du copeau en brochage. Celle-ci permet de générer un copeau long en un temps plus de 3 fois inférieur à celui nécessaire en simulation Lagrangienne standard. Les sensibilités des efforts de coupe et de l'enroulement de copeau ont été étudiés lors de la variation de progression et vitesse de coupe. Si à vitesse élevée les tendances d'évolution des efforts et de l'enroulement de copeau sont similaires à celles observées expérimentalement, des écarts importants ont été identifiés entre les résultats numériques

(ILaM et ALE) et expérimentaux à basse vitesse. Cependant, les tendances issues des simulations ILaM et ALE étant identiques, ces écarts sont davantage imputables à un manque de précision des propriétés utilisées au sein de ces modèles, qu'il s'agisse de la définition du contact outil/copeau ou des propriétés matériaux par exemple.

Seul le développement du modèle de coupe a été présenté. Pourtant, une adaptation de ce dernier aux conditions de brochage industrielles d'AREVA, et notamment à l'inox Z10C13 broché en production a été initiée. Ainsi, des études de sensibilité aux coefficients D1, D2 et D3 régissant les propriétés d'endommagement de la zone de passage, ou encore de la définition du contact (coefficient de frottement) ont été engagées sans parvenir à des résultats satisfaisants dans le temps imparti.

Finalement, les délais n'ont pas permis d'approfondir l'utilisation de ce modèle. Ce dernier n'a donc pas contribué à l'heure actuelle à l'amélioration de la compréhension du procédé de brochage. En revanche, il a permis de mettre en évidence des corrélations ainsi que des différences de comportement (notamment à basse vitesse de coupe) dont l'étude devra être poursuivie, l'explication de ces écarts pouvant permettre d'identifier des mécanismes physiques particuliers en brochage dans ces conditions de coupe.

Si ce travail contribue au développement d'un modèle de simulation du procédé de brochage, de nombreuses perspectives peuvent être envisagées afin d'améliorer la compréhension fondamentale de la coupe en brochage, ainsi que pour répondre à d'autres problématiques industrielles.

De façon générale, plusieurs niveaux de simulation doivent être considérés afin d'être en mesure de représenter précisément toutes les conséquences d'une opération de brochage. Un premier niveau concerne la prise en compte de la rigidité des différents éléments de la machine, ainsi que de l'élasticité de la zone de coupe. Cela se poursuit par une considération efficace des propriétés physiques des matériaux impliqués (globales voire à l'échelle du grain). Notons que des études numériques ont été initiées afin de représenter les effets de la présence de deux phases aux propriétés différentes notamment sur la formation du copeau.

Pour affiner ces résultats, les phénomènes en jeu à l'interface outil/matière doivent être maîtrisés à différentes échelles (mésoscopique pour caractériser le frottement, ou tribochimique pour affiner la compréhension de la formation d'arête rapportée). Pour finir, l'historique thermomécanique de la pièce brochée devra être pris en compte, ce dernier pouvant influencer l'enroulement de copeau, et l'intégrité de la surface obtenue. La maîtrise des contraintes résiduelles constitue en effet à l'heure actuelle un enjeu majeur, notamment dans l'industrie aéronautique. Le procédé de brochage est notamment mis en œuvre pour la réalisation de logements de pales de turbines, soumis à des sollicitations thermomécaniques extrêmes et dont la tenue en fatigue est essentielle.

Conclusion

La réalisation de l'opération de brochage sur les plaques entretoises de générateurs de vapeur est critique, celle-ci nécessitant un temps de réalisation important, et une qualité irréprochable. Or au lancement de ce travail, la qualité des trous brochés était mal maîtrisée, entraînant de nombreuses reprises et rebuts nécessaires au maintien du niveau de qualité demandé.

Afin de mieux maîtriser cette opération dans son ensemble, plusieurs études ont été menées. Le premier apport de ce travail réside dans la rédaction d'un document synthétique et archivé sur l'état de l'art technologique ainsi que sur les publications scientifiques en brochage. Ce document est essentiellement destiné à l'entreprise AREVA et a également pour vocation de pouvoir être utilisé par d'autres sociétés mettant en application le procédé de brochage.

Ainsi, la littérature traitant du brochage a été parcourue, et les pratiques technologiques couramment mises en œuvre industriellement ont été balayées. Ceci a permis d'apporter une première brique de compréhension des choix techniques effectués notamment lors de la conception des broches utilisées dans l'usine AREVA. Les règles courantes de conception d'une dent de brochage ainsi que de la structure d'une broche ont ainsi été parcourues. Ceci s'est poursuivi par une présentation des méthodes de fabrication des outils de brochage, avant d'évoquer les pratiques de mise en œuvre du procédé. L'étude se termine par un récapitulatif des technologies utilisées pour la conception de machines de brochage.

La maîtrise des pratiques technologiques est fondamentale pour utiliser efficacement le procédé de brochage. Pourtant, la compréhension des phénomènes physiques à l'origine de ces choix techniques est essentielle en vue d'améliorer les résultats de brochage, comme la qualité d'état de surface à l'origine de ces travaux de thèse. Ainsi, l'état de l'art technologique s'est poursuivi par une présentation des études scientifiques traitant du procédé de brochage. Les moyens d'études courants de ce procédé ont dans un premier temps été balayés, puis la sensibilité des résultats d'une opération de brochage aux différents paramètres modifiables a été présentée.

Parmi les résultats remarquables mis en évidence par cet état de l'art, les bénéfices issus

de l'augmentation d'angle de coupe et de vitesse de coupe sur l'état de surface peuvent être signalés. Le copeau est quant à lui d'autant plus enroulé que la progression et la vitesse de coupe sont faibles. Pour finir, une forte dépendance des résultats de brochage au matériau broché a pu être observée.

Afin de mieux comprendre les résultats de brochage observés dans les conditions spécifiques de mise en œuvre AREVA, la coupe à l'échelle mésoscopique a été étudiée sur banc d'essai, en s'appuyant sur les résultats mis en évidence par l'état de l'art. Pour ce faire, un banc de brochage original a été conçu et adapté sur un centre d'usinage avant d'être qualifié.

L'influence d'un grand nombre de paramètres sur l'état de surface et l'enroulement de copeau a ainsi pu être déterminée, de même que le lien entre cet enroulement et la qualité de l'état de surface. Ainsi, quatre paramètres clés influençant l'état de surface ont été identifiés, la vitesse de coupe, la progression ainsi que les angles de coupe et de dépouille. Les résultats les plus favorables ont été obtenus pour une vitesse élevée, une progression faible, ainsi qu'un angle de coupe important et un angle de dépouille réduit. L'étude de la forme du copeau a permis de démontrer la forte sensibilité de ce paramètre à la qualité de l'opération d'usinage. Ainsi, un copeau long et très enroulé doit être favorisé, celui-ci étant le signe d'une opération de coupe efficace et à l'origine d'une très bonne qualité d'état de surface. L'étude du taux de compression de copeau par une méthode simple et peu onéreuse présente par ailleurs des résultats similaires à ceux obtenus par la méthode du couple outil/matière.

Ces observations se sont poursuivies par une étude plus globale de l'outil de brochage, avec notamment le développement d'une méthode de prédiction des efforts de coupe. Ce travail a permis la création d'un utilitaire applicable industriellement afin de détecter des défauts de brochage, ou encore à identifier aisément et rapidement une dent de broche défaillante. Dans ce chapitre, une nouvelle méthode de positionnement et de dénombrement des brise-copeaux de brochage a été développée, permettant de palier les défauts de prise en compte de mécanismes physiques inhérents à la considération d'une simple largeur maximale de copeau.

Pour finir, plusieurs méthodes de simulation numérique ont été mises en œuvre. Dans un premier temps, celles-ci ont permis d'obtenir des informations quant à l'influence de la coupe sur la déformation à la fois de la dent de broche, et de la plaque entretoise. Par ailleurs, un nouveau modèle de simulation numérique de la coupe a été développé, permettant la simulation aux temps longs d'une opération de brochage avec formation du copeau. L'efficacité de calcul a pu être multipliée par plus de 3 par rapport aux méthodes Lagrangiennes conventionnelles.

Finalement, la prise en compte de ces observations associée à une amélioration en

continu de l'opération au sein même de l'usine de production a permis à l'usine d'AREVA de stabiliser le procédé de brochage des plaques entretoises. Ceci est notamment visible au travers de l'évolution des cycles de brochage réalisés par broche. En effet, alors qu'avant la réalisation de ces travaux près de 50% des broches n'étaient pas en mesure de réaliser 2000 cycles par affûtages, un suivi réalisé en août 2015 a démontré que seulement 15% des broches ne dépassent plus les 2000 cycles. Il a même été mis en évidence que près de 70% des broches parviennent à effectuer entre 2000 et 3000 cycles par affûtage.

Pourtant, plusieurs pistes d'amélioration pourraient permettre d'obtenir des gains en qualité ou productivité, qu'il s'agisse de l'augmentation de vitesse de coupe, de l'augmentation d'angle de coupe, de la diminution d'angle de dépouille ou encore d'une gestion adéquate des brise-copeaux. La prise en compte des problématiques d'usinabilité dans la sélection du matériau des plaques entretoises pourrait également améliorer considérablement les résultats de brochage.

Le modèle de simulation numérique développé dans cette étude peut être adapté à un cas industriel, il pourrait alors permettre de mieux appréhender les phénomènes survenant à basse vitesse de coupe par exemple, ceux-ci restant à l'heure actuelle mal expliqués. De nombreuses pistes d'amélioration de la simulation du brochage peuvent être envisagées, qu'il s'agisse de la discrimination des propriétés de grains de nature différente, ou de l'étude de l'influence sur l'intégrité de surface d'une opération de brochage.

Annexes

Annexe A : Inclinaison de meule d'affûtage

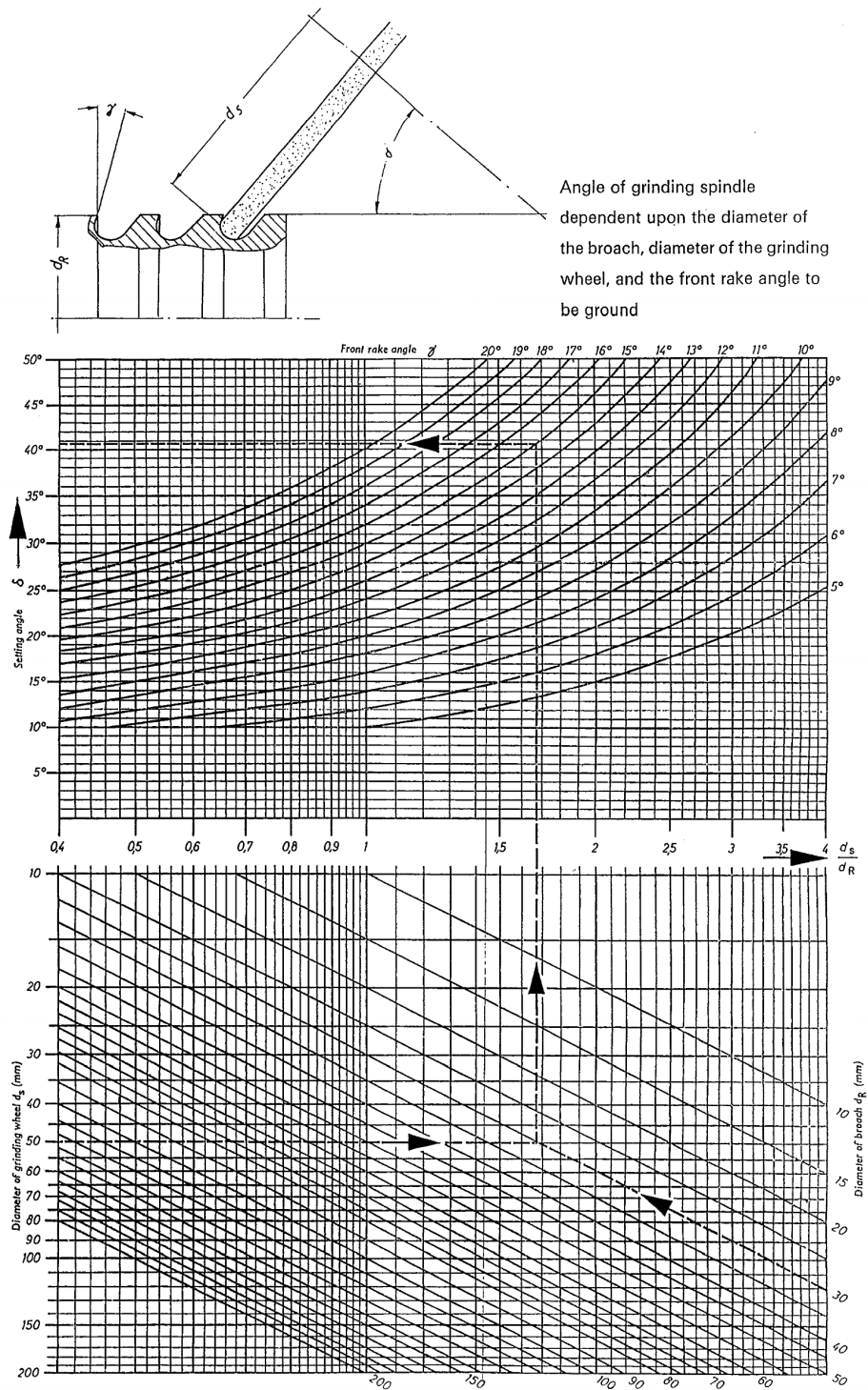


FIGURE A.1 : Abaque de détermination de l'angle de coupe pour une broche circulaire (Document VEBRO)

L’abaque de la figure A.1 est utilisé industriellement pour obtenir un angle de coupe déterminé en fonction du diamètre de broche et de la meule d’affûtage, ainsi que de l’angle d’inclinaison de meule. Cependant, d’autres paramètres ont potentiellement une influence sur l’angle de coupe, tels que la hauteur de dent ou l’épaisseur de la meule. Afin de caractériser l’influence de l’ensemble de ces paramètres, et de confirmer les résultats issus de cet abaque, une méthode analytique de détermination de l’angle de coupe a été définie. La modélisation du problème est présentée sur la figure A.2.

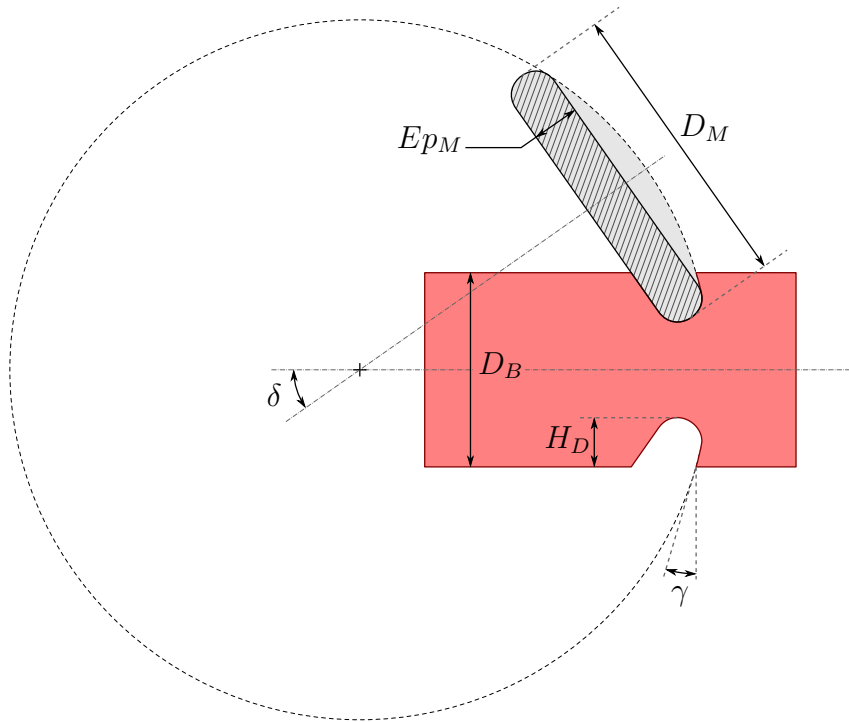


FIGURE A.2 : Modélisation des paramètres d’affûtage de la face de coupe pour une broche circulaire

En s’appuyant sur cette modélisation, une formulation analytique de l’angle de coupe γ présentée sur l’équation A.1 a été mise en évidence. Quelques exemples de valeurs issues de ce modèle sont présentées dans le tableau A.1.

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{D_B}{\sqrt{\left(\frac{D_B + E p_M + (D_M - E p_M) \cos \delta - 2 H_D}{\sin \delta} \right)^2 + (D_M - E p_M)^2 + E p_M}} \right) \quad (\text{A.1})$$

Comme on peut le voir dans le tableau A.1, une variation d’angle de coupe de plusieurs degrés peut être observée pour une épaisseur de meule différente. Or ce paramètre n’est pas pris en compte par l’abaque utilisé industriellement. Une comparaison des résultats obtenus au moyen de cet abaque, et de ceux présentés dans le tableau précédent est

Tableau A.1 : Exemples de valeurs issues du modèle analytique ($\delta = 20^\circ, H_D = 2.8 \text{ mm}, D_B = 20 \text{ mm}$)

Modèle analytique	γ [°]		E_{pM} [mm]					
			1	2	3	4	5	6
	D_M [mm]	5	20.5	20.1	19.7	19.3	18.9	18.5
10		16.3	16.0	15.8	15.6	15.3	15.1	
20		11.5	11.4	11.3	11.2	11.1	11.0	
30		8.9	8.9	8.8	8.7	8.7	8.6	
40		7.3	7.2	7.2	7.1	7.1	7.1	
50		6.1	6.1	6.1	6.0	6.0	6.0	
60		5.3	5.3	5.3	5.2	5.2	5.2	

proposée dans le tableau A.2. On observe ainsi un écart de plusieurs millimètres entre ces deux méthodes de calcul.

Tableau A.2 : Comparaison modèle analytique / Abaque

			γ [°]	Écart angulaire [°]	
				min	max
Abaque	D_M [mm]	5	-	-	-
		10	13.3	-1.8	-3.0
		20	10.0	-1.0	-1.5
		30	8.0	-0.6	-0.9
		40	6.6	-0.5	-0.7
		50	5.7	-0.3	-0.4
		60	5.0	-0.2	-0.3

Une nouvelle méthode de détermination de l'angle de coupe permettant la prise en compte d'une quantité plus importante de paramètres d'affûtage a été mise en évidence. Cette méthode de caractérisation a été validée par comparaison aux valeurs issues d'une modélisation sous le logiciel de CAO Catia. Si cette méthode permet une caractérisation plus précise de l'angle de coupe, elle s'avère également très pratique à automatiser. En effet, l'utilisation d'abaques ne permet pas un calcul automatisé des divers paramètres d'affûtage.

Nous pouvons donc envisager d'utiliser cette formule directement dans les commandes numériques des machines d'affûtage afin d'ajuster en temps réel les paramètres d'affûtage en fonction des caractéristiques spécifiques des dents considérées.

Annexe C : Rigidité du banc de brochage

Afin de déterminer la rigidité au niveau de la zone de coupe sur le banc de brochage développé à l'ENISE, des essais au moyen d'un palpeur, associé à un système de ressort ont été effectués. La mesure a été réalisée au niveau de deux zones différentes, sur le nez de l'électro-broche et à l'extrémité du support d'échantillon. Le palpeur Mitutoyo 543-553 utilisé possède une précision à $3 \mu\text{m}$. Une photo de ce dispositif est présentée sur la figure C.1.

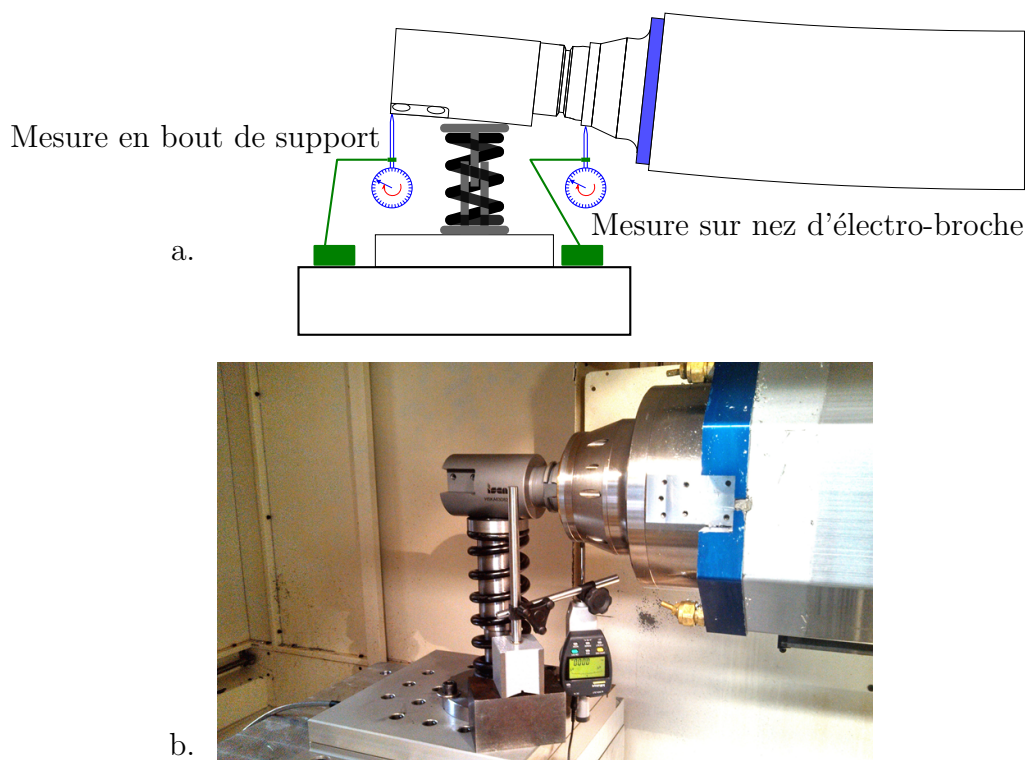


FIGURE C.1 : Schéma (a.) et photo (b.) d'une mesure de rigidité au niveau du nez d'électro-broche

Une première phase de validation de l'asservissement a permis de déterminer les écarts observés entre le déplacement machine théorique, et l'observation effectuée sur le palpeur. Puis deux séries d'essais sous chargement ont été effectuées. L'objectif consiste à obtenir un tracé de l'évolution de la position réelle de l'outil, en fonction d'un effort variable obtenu par déformation d'un ressort. Le tracé de la différence entre le déplacement mesuré au palpeur et la commande indiquée sur la CN est proposé sur la figure C.2. On peut tout d'abord observer un tracé sans chargement, l'électrobroche est alors déplacée à vide sans que le ressort ne soit en position. Puis on effectue la même opération en positionnant le ressort. Enfin, une correction appliquée à cette dernière courbe permet d'obtenir l'écart

de déplacement réel en prenant en considération les défauts de déplacement mesurés à vide.

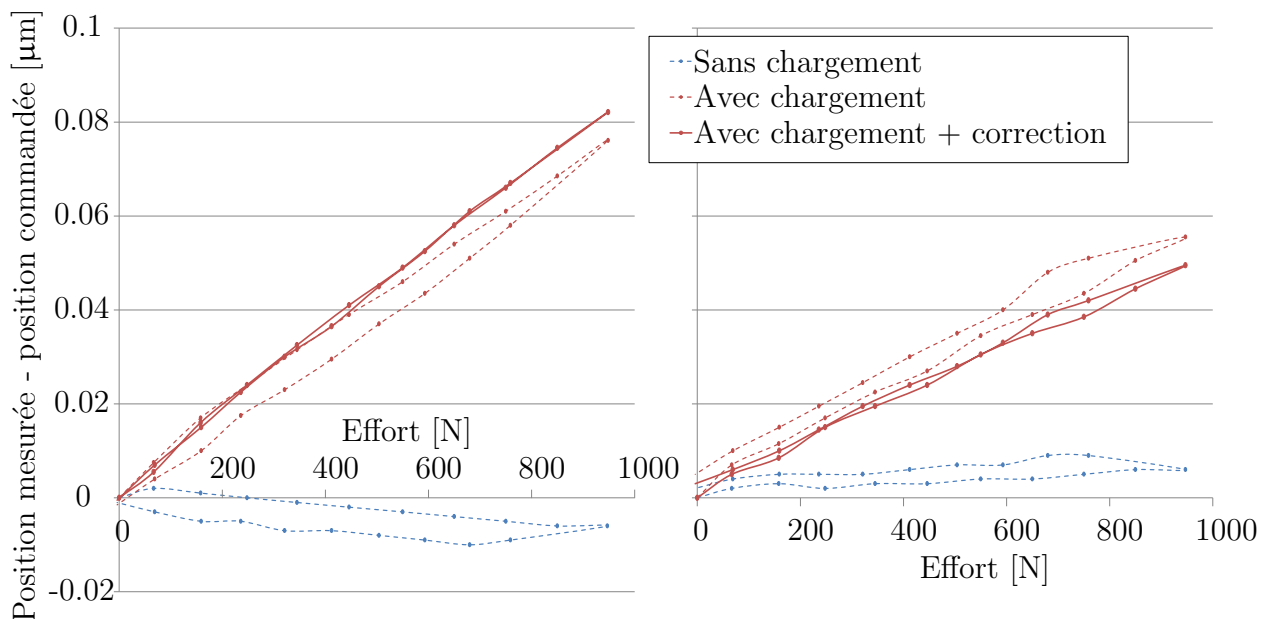


FIGURE C.2 : Écarts entre mesure au palpeur et contrôle CN en bout de support d'échantillon (gauche) et sur nez d'électro-broche (droite)

Finalement, la rigidité du système s'avère relativement constante quel que soit l'effort appliqué (jusqu'à 1000 N), et située entre 11 et 18 N/μm en moyenne, respectivement au nez de l'électro-broche et en bout de support d'échantillon. Ces résultats sont présentés sur la figure C.3.

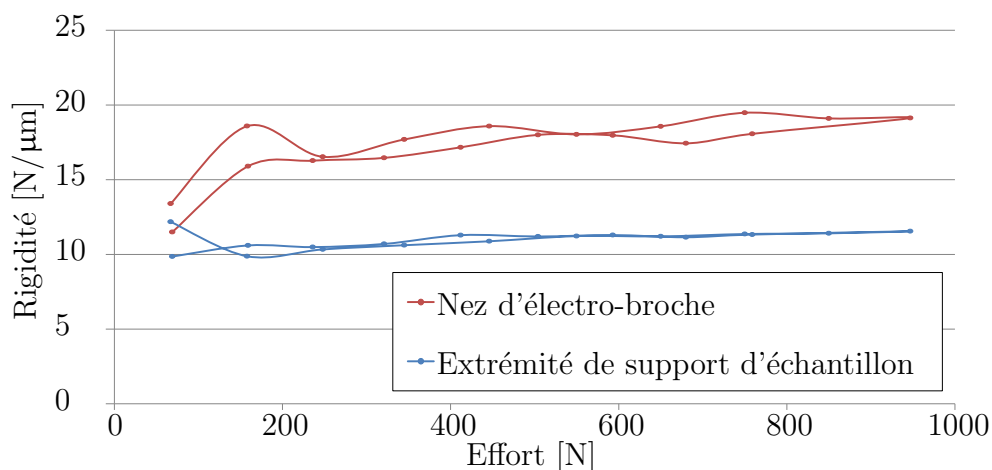


FIGURE C.3 : Rigidité observée sur banc de brochage

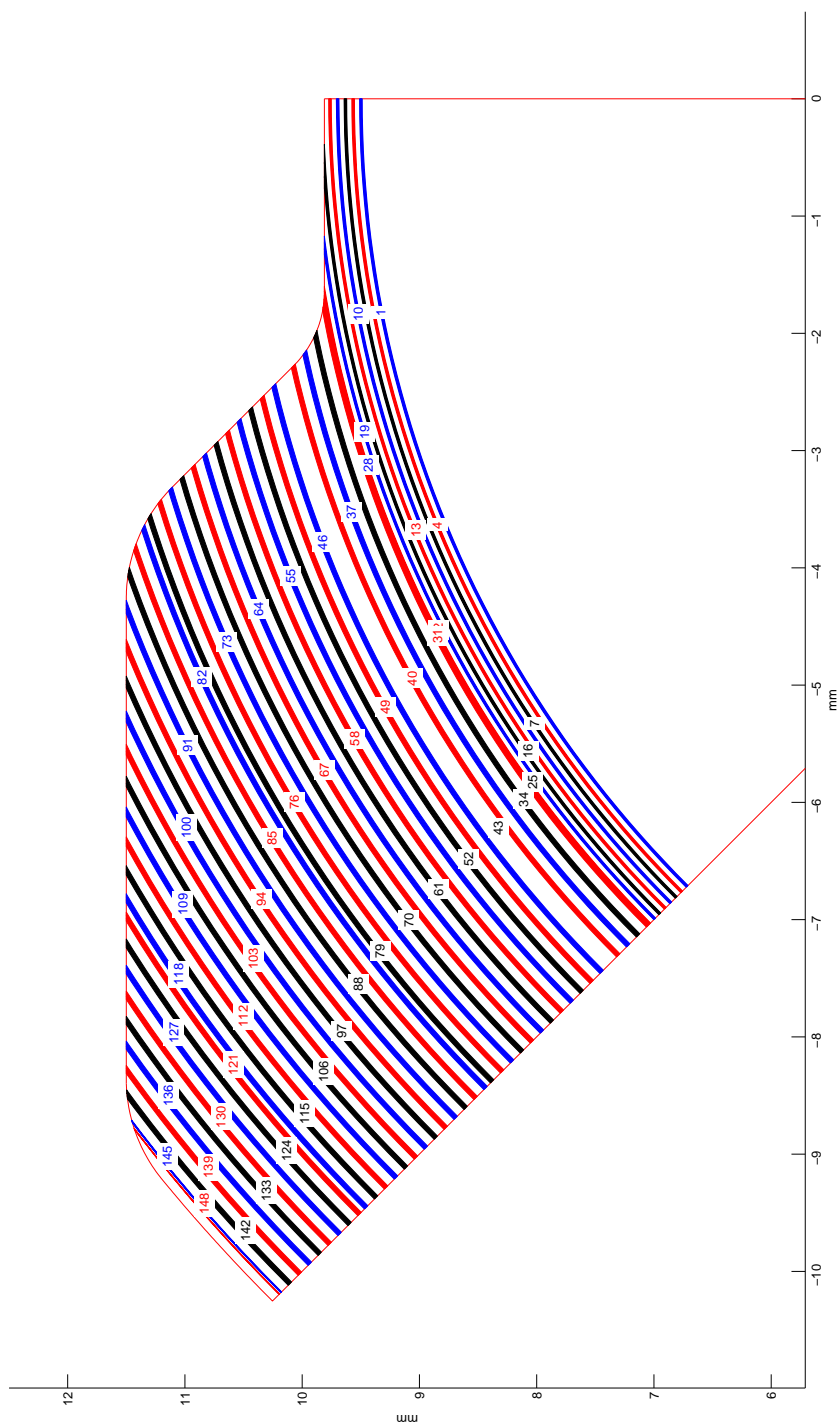
Annexe D : Analyse de l'huile Houghton Cutmax 1529 FR4

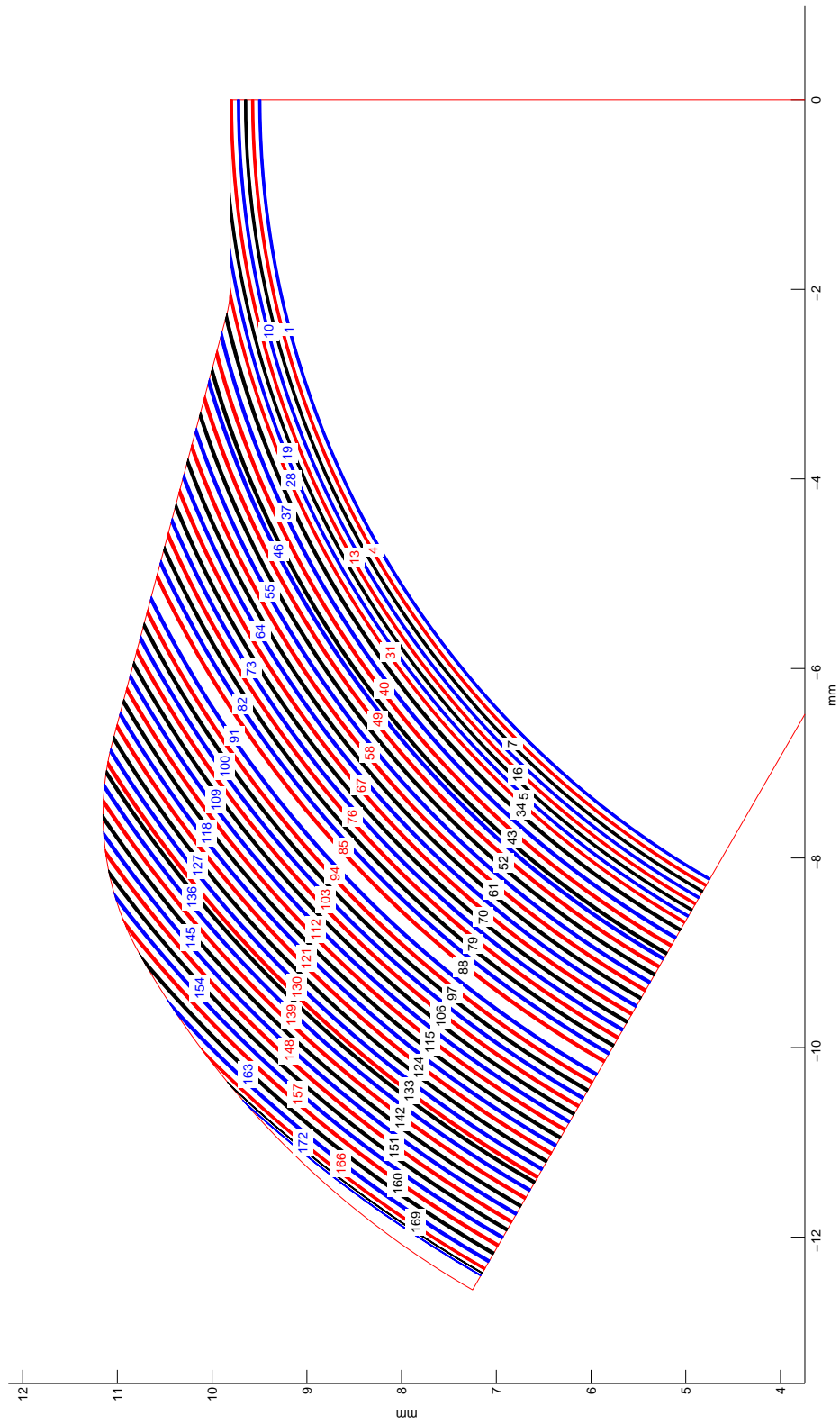
Une analyse de l'huile entière de référence (Houghton Cutmax 1529 FR4) a été réalisée. Les résultats sont présentés dans le tableau D.1.

Tableau D.1 : Analyse Huile Houghton Cutmax 1529 FR4

Aspect	:	Clair
Couleur ASTM	:	3.5 (selon ISO 2049)
Viscosité à 40°	:	30 mm ² /s selon DIN 51562
Point éclair	:	159 °C selon DIN ISO 2592
Pressions superficielle spécifique selon Reichert	:	3.3 mm ² 9.090 N/cm ²
Pressions superficielle spécifique selon Brugger	:	167 N/mm ² selon DIN 51347/2
Teneur en soufre	:	2.874% selon ASTM D 6481-99
Teneur en chlore	:	<0.0002% selon ASTM D 6481-99
Teneur en phosphore	:	0.2065% selon ASTM D 6481-99
Teneur en calcium	:	0.895% selon ASTM D 6481-99
Test de la lame de cuivre	:	3a 100 A3 selon DIN EN ISO 2160

Annexe E : Abaque trou quadri-folié et tri-folié, dents et profil broché





Bibliographie

- ASTAKHOV, V. P. et XIAO, X. (2008). A methodology for practical cutting force evaluation based on the energy spent in the cutting system. *Machining Science and Technology*, 12(3):107–110.
- AXINTE, D. A. (2006). Approach into the use of probabilistic neural networks for automated classification of tool malfunctions in broaching. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13):1445–1448.
- AXINTE, D. a. (2007). An experimental analysis of damped coupled vibrations in broaching. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(14):2182–2188.
- AXINTE, D. A., BOUD, F., PENNY, J. et GINDY, N. (2005). Broaching of Ti-6-4 - Detection of workpiece surface anomalies on dovetail slots through process monitoring. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54:87–90.
- AXINTE, D. A. et GINDY, N. (2003). Tool condition monitoring in broaching. *Wear*, 254(3-4):370–382.
- BAROUX, B. (2014). *La corrosion des métaux, passivité et corrosion localisée*, chapitre 12. Les aciers inoxydables, page 170. DUNOD.
- BAYER, A. M., BECHERER, B. A. et VASCO, T. (1989). High-speed tool steels. *ASM Handbook*, 16 : Machining:51–59.
- BEJNOUD, F., ZANGER, F. et SCHULZE, V. (2015). Component distortion due to a broaching process. In *Progress in Production Engineering*, volume 794 de *Applied Mechanics and Materials*, pages 239–246. Trans Tech Publications.
- BELLAIS, C. (1997). Outils coupants brochage. *Techniques de l'ingénieur - Outillage et machine-outil pour le travail des matériaux*, base documentaire : TIB511DUO.(ref. article : b7087).
- BELLAIS, C. (1998). Brocheuses. *Techniques de l'ingénieur - Outillage et machine-outil pour le travail des matériaux*, base documentaire : TIB511DUO.(ref. article : bm7170).
- BELOV, V. (1976). Disturbances caused by the cutting force in broaching. *Stanki — Instrument.*, 47(2):18–19. UDC.621.919.1.014.5.

- BEN ABDELALI, H., COURBON, C., RECH, J., BEN SALEM, W., DOGUI, A. et KAPSA, P. (2011). Identification of a Friction Model at the Tool-Chip-Workpiece Interface in Dry Machining of a AISI 1045 Steel With a TiN Coated Carbide Tool. *Journal of Tribology*, 133.
- BERTIN, J. (1975). Usinage par outils à arêtes coupantes multiples : Brochage. *Techniques de l'ingénieur - Archives - Travail des métaux - Assemblage*, base documentaire(ref. article : b1647).
- BIČEK, M., DUMONT, F., COURBON, C., PUŠAVEC, F., RECH, J. et KOPAČ, J. (2012). Cryogenic machining as an alternative turning process of normalized and hardened AISI 52100 bearing steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(12):2609 – 2618.
- BONNET, C., VALIORGUE, F., RECH, J. et HAMDI, H. (2008). Improvement of the numerical modeling in orthogonal dry cutting of an AISI 316l stainless steel by the introduction of a new friction model. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(2):114 – 118. High Performance Cutting.
- BYERS, J. P. (2006). *Metalworking fluids*. CRC/ Taylor & Francis.
- CALLISTER, W. D. et RETHWISCH, D. G. (2007). *Materials Science and Engineering : An Introduction 8th Edition*, page 241. John Wiley & Sons, Inc.
- CETIM et ZANI, M.-L. (2000). Conjuguez l'émission acoustique et la vibration. *Mesures*, 725.
- CHEN, X. W., CHEN, G. et ZHANG, F. J. (2008). Deformation and failure modes of soft steel projectiles impacting harder steel targets at increasing velocity. *Experimental Mechanics*, 48(3):335–354.
- CLAUDIN, C., MONDELIN, A., RECH, J. et FROMENTIN, G. (2010). Effects of a straight oil on friction at the tool–workmaterial interface in machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50:681–688.
- COURBON, C. (2011). *Vers une modélisation physique de la coupe des aciers spéciaux : intégration du comportement métallurgique et des phénomènes tribologiques et thermiques aux interfaces*. Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon.
- COURBON, C., MABROUKI, T., RECH, J., MAZUYER, D. et D'ERAMO, E. (2013). On the existence of a thermal contact resistance at the tool-chip interface in dry cutting of AISI 1045 : Formation mechanisms and influence on the cutting process. *Applied Thermal Engineering*, 50(1):1311 – 1325.

- CUBBERLY, W. H. et BAKERJIAN, R. (1989). *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*. Society of Manufacturing ; Desk edition (January 1989).
- DEBONGNIE, J.-F. (2006). *Usinage*. Liège (Belgique), Céfal, impr. 2006, Liège (Belgique).
- DEGARMO, E. P., BLACK, J. T. et KOHSER, R. A. (1988). *Materials and processes in manufacturing, seventh edition*. Macmillan Publishing Company.
- DUAN, C., DOU, T., CAI, Y. et LI, Y. (2011). Finite element simulation and experiment of chip formation process during high speed machining of AISI 1045 hardened steel. *AMAE International Journal on Production and Industrial Engineering*, 2(1).
- DUAN, C. et ZHANG, L. (2012). Adiabatic shear banding in AISI 1045 steel during high speed machining : Mechanisms of microstructural evolution. *Materials Science and Engineering : A*, 532:111 – 119.
- DUCOBU, F., RIVIÈRE-LORPHÈVRE, E. et FILIPPI, E. (2016). Material constitutive model and chip separation criterion influence on the modeling of ti6al4v machining with experimental validation in strictly orthogonal cutting condition. *International Journal of Mechanical Sciences*, 107:136 – 149.
- FABRE, D., BONNET, C., RECH, J. et MABROUKI, T. (2016). Iterative lagrangian model of broaching to study cutting forces, temperatures and chip formation. *ESAFORM Conference - Nantes*.
- FELDER, E. (2006). Modélisation de la coupe des métaux. *Techniques de l'ingénieur - Mise en forme des matériaux par usinage*, base documentaire : TIB510DUO.(ref. article : bm7041).
- FORST, O., HOLSTEIN, H., MELCHER, R., STAMM, F. et VOIGT, D. (2000). *Manuel Forst*. Forst.
- GILORMINI, P., FELDER, E., FRANCE, E., TRONCHET, L., CFAS, F. L., FRANCE, D. et LE MAITRE, F. (1984). A Comparative Analysis of three Machining Processes : Broaching , Tapping and Slotting. *Annals of the CIRP*, 33(1):19–22.
- JASPERS, S. et DAUTZENBERG, J. (2002). Material behaviour in conditions similar to metal cutting : flow stress in the primary shear zone. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(2–3):322 – 330.
- KISHAWY, H. a., HOSSEINI, A., MOETAKEF-IMANI, B. et ASTAKHOV, V. P. (2012). An energy based analysis of broaching operation : Cutting forces and resultant surface integrity. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1):107–110.

- KLOCKE, F., GIERLINGS, S., BROCKMANN, M. et VESELOVAC, D. (2011). Influence of Temperature on Surface Integrity for Typical Machining Processes in Aero Engine Manufacture. *Procedia Engineering*, 19:203–208.
- KLOCKE, F., GIERLINGS, S., BROCKMANN, M. et VESELOVAC, D. (2014). Force-based temperature modeling for surface integrity prediction in broaching nickel-based alloys. *Procedia CIRP : 2nd Conference on Surface Integrity (CSI)*, 13:314 – 319.
- KOMANDURI, R. et HOU, Z. B. (2000). Thermal modeling of the metal cutting process – part i : temperature rise distribution due to shear plane heat source. *International Journal of Mechanical Sciences*, 42(9):1715 – 1752.
- KOMANDURI, R. et HOU, Z. B. (2001a). Thermal modeling of the metal cutting process – part ii : temperature rise distribution due to frictional heat source at the tool–chip interface. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(1):57 – 88.
- KOMANDURI, R. et HOU, Z. B. (2001b). Thermal modeling of the metal cutting process – part iii : temperature rise distribution due to the combined effects of shear plane heat source and the tool–chip interface frictional heat source. *International Journal of Mechanical Sciences*, 43(1):89 – 107.
- KONG, X., LI, B., JIN, Z. et GENG, W. (2011). Broaching Performance of Superalloy GH4169 Based on FEM. *Journal of Materials Science & Technology*, 27(12):1178–1184.
- KULJANIĆ, E. (1975). Cutting forces and surface roughness in broaching. *Annals of the CIRP*, 24(1).
- LALANNE, M. et FERRARIS, G. (1998). *Rotordynamics Prediction in Engineering*, 2nd Edition. Wiley.
- LAPOINTE, F. J. (1914). Cutter-bar and bushing therefor. US Patent 1,088,828.
- LAPOINTE, F. J. (1920). Cutter-bar and bushing therefor. US Patent 1,339,656.
- LOIZOU, J., TIAN, W., ROBERTSON, J. et CAMELIO, J. (2015). Automated wear characterization for broaching tools based on machine vision systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, Part 2:558 – 563.
- LURDOS, O. (2008). *Lois de comportement et recristallisation dynamique : approches empirique et physique*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.

- MABROUKI, T., GIRARDIN, F., ASAD, M. et RIGAL, J.-F. (2008). Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (a2024-t351). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(11):1187 – 1197.
- MAKAROV, V. (2008). High speed broaching of hard machining materials. *ESAFORM Conference 2008*.
- MALEKIAN, M., MOSTOFA, M., PARK, S. et JUN, M. (2012). Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(3):553 – 559. Micro-Manufacturing Processes.
- MANDRILE, S., DESSEIN, G., DENAPE, J., PARIS, J.-Y., CAZENAVE-LAROCHE, G. et VERNAULT, C. (2012). Identification and modelization of cutting phenomena in broaching to understand tool wear. *MUGV 2012*.
- MASSEGLIA, M. (2009). *Usinage par brochage*. Michel MASSEGLIA. <http://mla.masseglia.free.fr/>.
- MAZAHERI, Y., KERMANPUR, A. et NAJAFIZADEH, A. (2015). Nanoindentation study of ferrite–martensite dual phase steels developed by a new thermomechanical processing. *Materials Science and Engineering : A*, 639:8 – 14.
- MEIER, H., NINOMIYA, K., DORNFELD, D. et SCHULZE, V. (2014). Hard broaching of case hardened sae5120. *Procedia CIRP : 6th International Conference on High Performance Cutting (HPC2014)*, 14:60 – 65.
- MERCHANT, M. (1945). Mechanics of the metal cutting process. i. orthogonal cutting and a type 2 chip. *Journal of Applied Physics*, 16(5):267–275.
- MO, S., AXINTE, D., HYDE, T. et GINDY, N. (2005). An example of selection of the cutting conditions in broaching of heat-resistant alloys based on cutting forces, surface roughness and tool wear. *Journal of Materials Processing Technology*, 160(3):382–389.
- MOFFATT, V. et PRAKASH, A. (1971). Internal broaching : the influence of pilot hole characteristics upon finished contour. *International Journal of Production Research*, 9(2):287–296.
- MURRY, G. (2016). Traitements thermiques dans la masse des aciers. partie 1. *Techniques de l'ingénieur - Traitements thermiques des aciers, des alliages et des fontes*, base documentaire : TIB364DUO.(ref. article : m1126).
- OZLU, E., ENGIN, S., COOK, C., EL-WARDANY, T. et BUDAK, E. (2010). Simulation of broaching operation for tool design optimization. *N.C.*

- RECH, J., ARRAZOLA, P.-J., CLAUDIN, C., COURBON, C., PUSAVEC, F. et KOPAC, J. (2013). Characterisation of friction and heat partition coefficients at the tool-work material interface in cutting. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(1):79 – 82.
- SCHROETER, R., BASTOS, C. et CRICHIGNO FILHO, J. (2007). Simulation of the main cutting force in Crankshaft turn broaching. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(12-13):1884–1892.
- SCHULZE, V., BOEV, N. et ZANGER, F. (2012a). Numerical Investigation of the Changing Cutting Force Caused by the Effects of Process Machine Interaction While Broaching. *Procedia CIRP*, 4:140–145.
- SCHULZE, V., BOEV, N. et ZANGER, F. (2012b). Simulation of Metal Cutting Process with Variable Cutting Thickness During Broaching. *Procedia CIRP*, 1:437–442.
- SCHULZE, V., MEIER, H., STRAUSS, T. et GIBMEIER, J. (2012c). High Speed Broaching of Case Hardening Steel SAE 5120. *Procedia CIRP*, 1:431–436.
- SCHULZE, V., OSTERRIED, J., MEIER, H. et ZANGER, F. (2011). Simulation of multiple chip formation when broaching SAE 5120 low alloy steel. *Advanced Materials Research*, 223:37–45.
- SCHULZE, V., PABST, R. et MEIER, H. (2010). Influence of broaching for evaluation of process chains . *Graduate School 1483 - Process Chains in Production : Interaction, Modelling and Assessment of Process Zones*, 25.
- SCHULZE, V., ZANGER, F., KRAUSS E, M. et BOEV, N. (2013). Simulation Approach for the Prediction of Surface Deviations Caused by Process-Machine-Interaction During Broaching. *Procedia CIRP*, 8:252–257.
- SHI, D. et GINDY, N. N. (2007). Tool wear predictive model based on least squares support vector machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(4):1799 – 1814.
- SIMONEAU, A., NG, E. et ELBESTAWI, M. (2006a). The effect of microstructure on chip formation and surface defects in microscale, mesoscale, and macroscale cutting of steel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1):97 – 102.
- SIMONEAU, A., NG, E. et ELBESTAWI, M. (2006b). Surface defects during microcutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12–13):1378 – 1387.
- STEPHENS, A. (1873). Improvement in broaching-machines. US Patent 141,091.

- SURM, H. (2011). Identifikation der verzugsbetimmenden einflussgrößen beim austenitisieren am beispiel von ringen aus dem wälzlagerstahl 100cr6. *Dissertation*.
- SUTHURLAND, J., SALISBURY, E. et HOGE, F. (1997). A model for the cutting force system in the gear broaching process. *International journal of machining and tools manufacturing*, 37(10):1409–1421.
- TAYLOR SPECIAL STEELS (2014). *M35 datasheet*. Taylor Special Steels.
- TODD, R. H., ALLEN, D. K. et ALTING, L. (1994). *Fundamental principles of manufacturing processes*, page 25. Industrial Press, Inc.
- TOENSHOFF, H. K. et DENKENA, B. (2013). *Basics of cutting and abrasive processes*. Springer Science & Business Media.
- TOMAC, N., TØNNESEN, K., RASCH, F. O. et MIKAC, T. (2005). *A Study of Factors That Affect the Build-Up Material Formation*, pages 183–192. Springer Vienna, Vienna.
- TROMBERT, C. (1998). Usinabilité des aciers inoxydables. *Techniques de l'ingénieur - Mise en forme des aciers, aluminium, autres métaux et alliages*, base documentaire : TIB356DUO.(ref. article : m726).
- VOGTEL, P., KLOCKE, F., LUNG, D. et TERZI, S. (2015). Automatic broaching tool design by technological and geometrical optimization. *Procedia CIRP : 9th Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME '14)*, 33:496 – 501.
- VOGTEL, P., KLOCKE, F., PULS, H., BUCHKREMER, S. et LUNG, D. (2013). Modelling of Process Forces in Broaching Inconel 718. *Procedia CIRP*, 8:409–414.
- WEULE, H., FLEISCHER, J., SCHMIDT, J. et LANG, H. (2005). High performance broaching. *Production Engineering*, XII/I.
- XI, Y., BERMINGHAM, M., WANG, G. et DARGUSCH, M. (2014). Sph/fe modeling of cutting force and chip formation during thermally assisted machining of ti6al4v alloy. *Computational Materials Science*, 84:188 – 197.
- YEN, Y.-C., SÖHNER, J., LILLY, B. et ALTAN, T. (2004). Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 146(1):82 – 91. Containing research papers on Sheet Forming, Machining and Tube Hydroforming.
- YOKOI, H., HIRAOKA, H., MENDES, H., MISUMI, I. et UEHARA, K. (1987). Development of a Laminated Broaching Tool Manufactured by Wire EDM. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 36(1):127–130.

- ZANGER, F., BOEV, N. et SCHULZE, V. (2014). Surface quality after broaching with variable cutting thickness. *Procedia CIRP : 2nd Conference on Surface Integrity (CSI)*, 13:114 – 119.

École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne
École Centrale de Lyon

N° OF ORDER NNT : 2016LYSEE002

AUTHOR : Dorian FABRE

DISSERTATION TITLE :

Cutting mechanisms induced by the broaching of a martensitic-ferritic stainless steel, application to the tube support plates of steam generators

SPECIALITY : Mechanic and Engineering

KEYWORDS : Broaching, Machining, Surface Quality, Chip Morphology

ABSTRACT :

This document presents the results of a PhD work initialized to improve the understanding of physical phenomena occurring in broaching process. To this end, an extensive State of the Art dealing with technological and scientific issues is presented. This thesis report continues with a presentation of an elementary study of the cutting in broaching. In this section, many parameters were varied on a wide range, focusing in one hand on the surface quality, and on another hand on the chip morphology. The next section deals with the setup of industrial applications resulting of this PhD work. A force prediction method as well as an innovative chip-breaker enumeration strategy is for example presented. This document ends with several numerical studies, dealing with the influence of the tooth or workpiece stiffness, or aiming to improve the understanding of the chip formation mechanisms. About this last point, a new numerical simulation method of cutting based on an iterative strategy has been set-up, allowing a substantial decreasing in CPU Times.

École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne
École Centrale de Lyon

N° D'ORDRE NNT : 2016LYSEE002

AUTEUR : Dorian FABRE

TITRE DE LA THÈSE :

Mécanismes de coupe induits par le brochage d'un acier inoxydable ferrito-martensitique, application aux plaques entretoises de générateurs de vapeur

SPÉCIALITÉ : Mécanique et Ingénierie

MOTS-CLEFS : Brochage, Usinage, État de surface, Morphologie du copeau

RÉSUMÉ :

Ce document présente les résultats issus de travaux de thèse initiés en vue de l'amélioration de la compréhension des phénomènes physiques induits par une opération de brochage. Dans ce but, un État de l'Art étendu présentant les pratiques technologiques, ainsi que les études scientifiques du brochage est présenté. Ce mémoire de thèse se poursuit par une présentation de l'étude élémentaire de la coupe en brochage. Dans cette section, un grand nombre de paramètres ont été variés sur une large plage de mesure, en se focalisant dans un premier temps sur l'étude de l'état de surface, puis sur la morphologie du copeau. La section suivante traite de la mise en place d'applications industrielles issues des résultats de ces travaux de thèse. Il y est par exemple question de la prédiction des efforts de brochage, ou d'une méthode innovante de dénombrement des brise-copeaux. Ce document se clos par plusieurs études numériques, traitant de l'influence de la rigidité de la dent et de la pièce brochée, ou visant à comprendre les mécanismes d'enroulement du copeau. En ce qui concerne ce dernier point, une nouvelle méthode de simulation numérique itérative de la coupe a été mise en place, à l'origine d'une diminution substantielle des temps de calcul.