

# THÈSE

*présentée à*

## L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

*par*

**Mathieu Roudgé**

*pour obtenir le grade de*

**DOCTEUR**

*Spécialité : MÉCANIQUE*

---

### MODÉLISATION EXPÉRIMENTALE PAR LES RÉSEAUX DE NEURONES DU PERÇAGE MULTI-MATERIAUX

---

*Soutenue le 8 Février 2011*

*Après avis de :*

**MM.** G. POULACHON *Professeur des Universités, AMPT Cluny*  
Y. LANDON *Maître de Conférences/HDR, Toulouse III*

*Devant la commission d'examen formée de :*

<b>MM.</b> G. POULACHON	<i>Professeur des Universités, AMPT Cluny</i>	<b>Président</b>
Y. LANDON	<i>Maître de Conférences/HDR, Toulouse III</i>	<b>Rapporteur</b>
M. DANIS	<i>Professeur des Universités, IUT Bordeaux1</i>	<b>Examineur</b>
O. CAHUC	<i>Professeur des Universités, Bordeaux1</i>	<b>Examineur</b>
S. GARNIER	<i>Maître de Conférences, IUT Nantes</i>	<b>Examineur</b>
M. CHERIF	<i>Maître de Conférences, IUT Bordeaux1</i>	<b>Examineur</b>
P. DARNIS	<i>Maître de Conférences, IUT Bordeaux1</i>	<b>Membre invité</b>
R. PIQUET	<i>Maître de Conférences, Toulouse III</i>	<b>Membre invité</b>

---

---

---

## Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de génie mécanique et matériaux ainsi qu'au laboratoire de mécanique physique de l'Université Bordeaux I.

Je tiens à remercier Monsieur Didier Desjardins et Monsieur Michel Danis pour m'avoir accueilli au sein de leur laboratoire.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Messieurs Gérard Poulachon et Yann Landon pour avoir examiné mon travail avec une grande efficacité et une grande rapidité.

Une thèse est un projet long et personnel, pendant lequel les moments de doute et de découragement sont légions. Je tiens à remercier ceux sans qui je n'aurais pu mener ce travail à bout, tous à leur manière, dans l'ordre alphabétique, Olivier Cahuc, Mehdi Chérif et Philippe Darnis. Je n'ai pas été l'étudiant modèle qu'ils espéraient sans doute mais ils ont su me comprendre et me motiver pendant toute la durée de ces travaux.

Merci à tout le personnel du LGM2B, thésards et permanents, je ne citerai aucun nom pour ne pas en oublier, mais ils m'ont tous aidé à un moment et je les en remercie.

Merci aussi à tous ceux qui ont amélioré mon quotidien, que cela soit au boulot ou en dehors. Dans le désordre, ceux qui ont réussi à "bosser" à mes côtés : Fred, Gaétan, Chan, Champilippe et Marwann (toute ressemblance avec des personnes existantes ou ayant existé ne saurait être que fortuite), ceux qui ont réussi à "dormir" à mes côtés : Kevin, Manu, Marianne, Marie, Lolo et bien sûr Pierre mon acolyte, artiste fantaisiste et docteur depuis peu, enfin ceux qui m'ont empêché de dormir et bosser : mathieu, romandine, miko, windguru et les Girondins.

Enfin ceux que je ne remercierai jamais assez, on a vécu des moments très difficiles et je n'aurais pu les traverser sans eux, je pense bien sûr à ma famille qu'elle soit de Biganos, du Gers ou du reste de la France : mon idole de père, mon amour de sœur, Isa, le futur génie de la famille mon frère Olivier, les Capde, mes grands-parents, oncles et tantes, parrain et marraine, mes superstars de cousins sans oublier celle qui en fera j'espère bientôt parti (il va falloir qu'elle me supporte encore quelques temps) ma princesse Pauline.

Tous ces travaux, je tiens à les dédier, à celle qui est partie trop tôt et que j'aurais aimé avoir à nos côtés plus longtemps :

Maman

---

---

---

## Introduction générale

Les contraintes technico-économiques actuelles ont conduit les constructeurs aéronautiques à introduire de nouveaux matériaux lors de la conception des futurs avions. La part croissante des matériaux composites engendre un gain de masse permettant de diminuer les coûts d'exploitation des compagnies aériennes. Ces matériaux sont utilisés en conjonction avec d'autres matériaux tels que l'aluminium ou le titane pour former des structures élémentaires hybrides. Celles-ci sont ensuite assemblées entre elles par l'intermédiaire de nombreux rivets. On compte de 1,5 à 3 millions de rivets de fixations et donc au moins autant de perçages sur les avions civils. La maîtrise de ce procédé constitue par conséquent un enjeu technico-économique essentiel.

L'opération de perçage, positionnée dans la gamme de fabrication juste avant l'assemblage final, est une opération stratégique. En effet, les pièces à percer ont déjà une forte valeur ajoutée. Ce mémoire traite du perçage d'un empilement multi-matériaux CFRP/Al (Carbon-Fiber-Reinforced Plastic/Aluminium). Un certain nombre de défauts peuvent apparaître au cours du perçage de ce type d'empilement, nécessitant de recourir à des opérations correctives coûteuses. L'intérêt de pouvoir prédire le moment où la qualité d'un perçage sort des spécifications prend alors tout son sens. Il est dès lors possible d'optimiser le triptyque qualité-coût-délais en limitant ou supprimant les opérations supplémentaires et en sécurisant également l'opération de perçage.

L'objectif de cette étude est donc, de mettre en place une méthode permettant de prédire la qualité d'un perçage multi-matériaux pour une séquence d'empilement et un outil donné. Une analyse exhaustive des contraintes et des objectifs nous oriente vers le type de modélisation à envisager. Le procédé de perçage pose des difficultés importantes quant à sa modélisation thermomécanique. Le confinement de l'outil, la variation le long des arêtes des différents angles de coupe, l'important gradient de vitesse de coupe le long de l'arête principale, sont autant de verrous scientifiques qui vont compliquer la mise en place d'un modèle thermomécanique fiable. Pour s'affranchir de la complexité des modèles physiques, le choix a été fait d'opter pour une *modélisation expérimentale* de type "boîte noire" par les réseaux de neurones. Les propriétés parcimonieuses confèrent à ce type de modèle l'avantage de conserver une excellente précision de prédiction pour un échantillon d'apprentissage réduit.

Le chapitre I de ce mémoire établit la problématique globale du perçage multi-matériaux. En s'appuyant sur une recherche bibliographique, une présentation exhaustive d'un point de vue qualitatif du procédé est réalisée pour chacun des matériaux constituant l'empilement. Les différents défauts rencontrés lors du perçage de ces matériaux sont présentés séparément et leurs causes identifiées. Les spécificités du perçage multi-matériaux

---

sont abordées. L'influence de la séquence d'empilement et les phénomènes survenant aux interfaces sont présentés.

Le chapitre II introduit de façon détaillée l'outil réseau de neurones et sa mise en œuvre. Le choix de cet outil est guidé par la décision d'utiliser un *modèle expérimental* de type "boîte noire" du processus de perçage. Après avoir détaillé l'architecture d'un réseau de neurones, la démarche d'apprentissage et les algorithmes d'entraînement sont présentés. Une analyse est ensuite menée pour identifier le couple algorithme/architecture le plus performant en termes de précision de prédiction. En conservant cette configuration, le choix de la méthode réseau de neurones est validé en comparant les performances de celle-ci avec une méthode de type plan d'expériences.

Le chapitre III présente la démarche expérimentale mise en place pour constituer la base de données nécessaire à l'apprentissage des réseaux de neurones. Une approche qualitative du procédé de perçage est menée pour différentes conditions de coupe, outils et éprouvettes (matériaux, épaisseurs). Ces dernières peuvent être constituées d'un seul matériau ou d'un empilement des deux matériaux testés (CFRP, Al). Différents outils ont été utilisés en faisant varier leur géométrie et leur revêtement. Les actions mécaniques de coupe ont été mesurées au cours de la campagne d'essais pas le biais de deux outils : une platine dynamométrique à six composantes et l'oscilloscope de la commande numérique. Les procédés de quantification des indicateurs de qualité sont exposés. L'analyse des mesures de ces indicateurs a permis d'en identifier les paramètres influents. Ces derniers sont les entrées du modèle expérimental multi-matériaux présenté au chapitre suivant.

Le chapitre IV propose la mise en place du modèle expérimental de la qualité d'un perçage multi-matériaux. L'architecture modulaire du modèle est dans un premier temps détaillée. De par sa structure, elle est capable de s'adapter à toutes les séquences d'empilement. La précision de prédiction du défaut dimensionnel est analysée dans différentes configurations d'usinage. À partir des mesures d'efforts, un modèle phénoménologique multi-matériaux, liant les actions mécaniques de coupe à la qualité du perçage, est mis en place. La bonne précision en sortie de ce modèle a conduit à s'interroger sur la possibilité de son adaptation industrielle. Deux systèmes de surveillance hors usinage du procédé sont finalement proposés permettant d'observer la dérive des indicateurs de qualité et d'anticiper ainsi un éventuel dépassement des tolérances fixées.

---

<b>I.</b>	<b>PROBLÉMATIQUE DU PERÇAGE MULTI-MATÉRIAUX .....</b>	<b>11</b>
I.1.	GÉNÉRALITÉS.....	13
I.2.	PERÇAGE DES MATÉRIAUX CONSTITUANT L'EMPILEMENT.....	14
I.2.1.	<i>Perçage d'un composite carbone / époxy</i> .....	14
I.2.1.1.	Défauts dimensionnels et géométriques.....	15
I.2.1.2.	Délaminage en sortie de perçage .....	19
I.2.1.3.	Rugosité.....	27
I.2.1.4.	Dégradations thermiques .....	29
I.2.2.	<i>Perçage de l'aluminium</i> .....	32
I.2.2.1.	Défauts dimensionnels et géométriques.....	37
I.2.2.2.	Bavure en sortie de perçage .....	38
I.2.2.3.	Rugosité.....	40
I.3.	ÉTUDE DU PERÇAGE D'UN MULTI-MATÉRIAUX .....	40
I.3.1.	<i>Empilement CFRP / Aluminium</i> .....	45
I.3.2.	<i>Critères de qualité d'un perçage multi-matériaux</i> .....	46
I.3.2.1.	Critères de qualité aux interfaces .....	46
I.3.2.2.	Critères de qualité sur la paroi .....	47
I.4.	CONCLUSIONS .....	48
<b>II.</b>	<b>PRÉSENTATION ET MISE EN ŒUVRE DES RÉSEAUX DE NEURONES .....</b>	<b>51</b>
II.1.	PRÉSENTATION DU MODÈLE .....	55
II.1.1.	<i>Modélisation du perçage</i> .....	55
II.1.2.	<i>Méthode de modélisation</i> .....	55
II.1.3.	<i>Modèle multi-matériaux</i> .....	57
II.1.4.	<i>Choix des paramètres du modèle</i> .....	58
II.2.	RÉSEAUX DE NEURONES.....	60
II.2.1.	<i>Introduction</i> .....	60
II.2.2.	<i>Le cerveau humain</i> .....	61
II.2.2.1.	En quelques chiffres .....	62
II.2.3.	<i>Applications</i> .....	62
II.2.3.1.	Composition d'un neurone .....	63
II.2.3.2.	Architecture d'un réseau .....	65
II.2.3.3.	L'apprentissage .....	68
II.2.3.4.	Les algorithmes .....	69
II.3.	LE CHOIX DU RÉSEAU .....	71
II.3.1.	<i>Analyse bibliographique</i> .....	71
II.3.2.	<i>Analyse expérimentale</i> .....	73
II.3.2.1.	Réseaux de neurones à une couche cachée et une sortie.....	76
II.4.	JUSTIFICATION DE L'UTILISATION DES RÉSEAUX DE NEURONES .....	86
II.4.1.	<i>Modélisation par les plans d'expériences</i> .....	87
II.4.1.1.	Objectif des plans d'expériences .....	87
II.4.1.2.	Mise en place du modèle .....	89

---

---

II.4.2.	<i>Comparaison avec la méthode “réseaux de neurones”</i> .....	91
II.4.2.1.	Précision des modèles dans le domaine expérimental .....	91
II.4.2.2.	Précision des modèles hors du domaine expérimental .....	93
II.4.2.3.	Comparaison par rapport au temps de mise en place du modèle .....	95
II.5.	CONCLUSIONS .....	97
<b>III.</b>	<b>DÉMARCHES EXPÉRIMENTALES</b> .....	<b>99</b>
III.1.	INTRODUCTION .....	101
III.2.	PRÉSENTATION DES ESSAIS .....	102
III.2.1.	<i>Dispositif expérimental</i> .....	103
III.2.1.1.	Porte pièce .....	105
III.2.1.2.	Éprouvettes .....	106
III.2.2.	<i>Outils</i> .....	108
III.3.	ANALYSE DES SIGNAUX D’EFFORTS .....	110
III.3.1.	<i>Signaux issus de la platine dynamométrique</i> .....	111
III.3.1.1.	Analyse des signaux des efforts $F_z$ et $M_z$ .....	113
III.3.1.2.	Identification de la signature comportementale des forets .....	119
III.3.1.3.	Identification des paramètres influents.....	121
III.3.2.	<i>Signaux issus de l’oscilloscope de la commande numérique.</i> .....	123
III.3.2.1.	Grandeurs mesurables par l’oscilloscope .....	125
III.3.2.2.	Paramètres d’acquisition .....	126
III.3.2.3.	Corrélation des signaux issus du dynamomètre et de l’oscilloscope .....	128
III.4.	QUANTIFICATION DES PARAMÈTRES D’ENTRÉE/SORTIE.....	133
III.4.1.	<i>Dé laminage en entrée et sortie du perçage</i> .....	133
III.4.2.	<i>Bavure en sortie de perçage.</i> .....	138
III.4.2.1.	Processus de quantification.....	138
III.4.2.2.	Validation des mesures réalisées.....	139
III.4.3.	<i>Mesures dimensionnelles et géométriques</i> .....	141
III.4.3.1.	Configurations des mesures .....	141
III.4.3.2.	Analyse dimensionnelle .....	142
III.4.3.3.	Mesure du défaut de circularité.....	143
III.4.3.4.	Mesure du défaut de cylindricité.....	143
III.4.4.	<i>Mesure de l’usure de l’outil</i> .....	144
III.4.4.1.	Caractérisation de l’usure du foret .....	144
III.4.4.2.	Processus de quantification.....	146
III.4.4.3.	Analyse des résultats.....	148
III.4.4.4.	Amélioration de la méthode.....	148
III.5.	CONCLUSIONS .....	149
<b>IV.</b>	<b>MODÉLISATION DU PERÇAGE MULTI-MATÉRIAUX</b> .....	<b>153</b>
IV.1.	INTRODUCTION .....	157
IV.2.	MISE EN PLACE DU MODÈLE GLOBAL .....	157
IV.2.1.	<i>Les modèles mono-matériaux</i> .....	158

---

## Sommaire

---

IV.2.1.1.	Défauts dimensionnels et géométriques.....	159
IV.2.1.2.	Prédiction du délaminage en entrée et sortie.....	162
IV.2.1.3.	Prédiction de la hauteur de bavure.....	165
IV.2.1.4.	Prédiction de l'usure.....	166
IV.2.2.	<i>Le modèle global</i> .....	167
IV.3.	MODÈLE PHÉNOMÉNOLOGIQUE.....	171
IV.3.1.	<i>Modèles phénoménologiques matériaux</i> .....	172
IV.3.2.	<i>Modèle phénoménologique multi-matériaux</i> .....	174
IV.4.	MISE EN PLACE DE LA SURVEILLANCE D'UN PERÇAGE MULTI-MATÉRIAUX.....	176
IV.4.1.	<i>Mise en place d'une surveillance hors usinage</i> .....	177
IV.4.1.1.	Méthode générale.....	178
IV.4.1.2.	Méthode spécifique.....	182
IV.4.1.3.	Comparaison des deux méthodes.....	183
IV.4.2.	<i>Mise en place d'une surveillance pendant l'usinage</i> .....	184
IV.5.	CONCLUSIONS.....	184
<b>V.</b>	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....	<b>187</b>
V.1.	CONCLUSIONS.....	189
V.1.1.	<i>Démarches expérimentales</i> .....	189
V.1.2.	<i>Modèle global</i> .....	190
V.1.3.	<i>Système de surveillance</i> .....	191
V.2.	PERSPECTIVES.....	192
V.2.1.	<i>Démarches expérimentales</i> .....	192
V.2.2.	<i>Modèle global</i> .....	193
V.2.3.	<i>Système de surveillance</i> .....	194

---

---

I. Problématique du perçage multi-matériaux



## I.1. Généralités

Les nouvelles avancées dans le domaine de la science des matériaux sous l'impulsion notamment des industries aéronautiques, aérospatiales, navales et automobiles ont entraîné l'utilisation croissante des matériaux composites tels que les composites à fibres de carbone (cf. Figure I-1). Dans certaines applications pour lesquelles des matériaux comme l'acier ou le titane étaient jusqu'à présent utilisés, apparaissent maintenant des matériaux hybrides tel que le matériau sandwich composite / aluminium. Ce dernier allie les performances associées à l'alliage d'aluminium et un gain de masse permis par l'utilisation des composites. Ces nouveaux matériaux entraînent l'apparition de nouvelles problématiques notamment concernant leurs perçages.

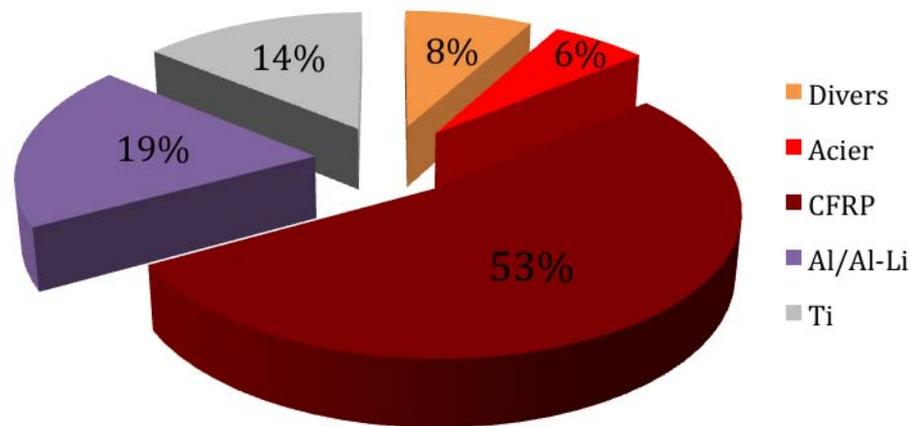


Figure I-1 : Matériaux de l'A350 XWB [Air 10].

Le perçage est l'opération d'usinage la plus couramment utilisée dans le domaine de l'industrie aéronautique : entre 400000 et environ 3 millions de perçages sont nécessaires à la pose de boulons ou rivets pour un avion moderne. Pour éviter tout problème de mise en position d'un matériau par rapport à l'autre, ils ne peuvent être percés indépendamment. Cette contrainte a pour effet d'engendrer l'apparition de problématiques spécifiques au perçage multi-matériaux s'ajoutant à celles déjà rencontrées lors du perçage de chacun des matériaux pris séparément.

Cette première partie va donc s'attacher à présenter, en premier lieu l'état de l'art concernant le perçage des composites carbone / époxy (CFRP) et de l'aluminium. Après avoir mis en relief les spécificités de cette opération, l'étude s'intéressera au perçage des multi-matériaux.

## I.2. Perçage des matériaux constituant l'empilement

### I.2.1. Perçage d'un composite carbone / époxy

Des matériaux constituant l'empilement CFRP/Al, le composite carbone/époxy en est, de par son hétérogénéité, certainement le plus délicat en terme de perçage. D'après la norme AFNOR NF T50-100, les matériaux composites sont définis comme un produit solide comportant au moins deux phases physiques distinctes, composées d'un matériau de liaison (matrice) et d'un matériau sous forme granulée, fibreuse, ou lamellaire (renfort). Concernant cette étude, le choix a été fait d'opter pour une matrice en résine époxy et des fibres de carbone correspondant aux matériaux du secteur aéronautique.

L'utilisation des matériaux composites dans l'industrie aéronautique remonte aux années 1940 avec l'utilisation de composites à fibres de chanvre et matrice en résine phénolique sur l'avion de combat britannique Spitfire. L'utilisation des CFRP sur des pièces de structure remonte quant à elle aux années 1970 [Gay 05].

Il faut attendre la fin des années 1980 pour voir apparaître les premiers travaux de recherche concernant leurs perçages. Avec notamment les travaux de W. König [Köni 89] et P. Guegan [Gueg 94], dans lesquels des études exhaustives des défauts rencontrés lors du perçage d'un matériau composite sont réalisées. Les relations entre l'apparition de ces défauts et la géométrie de l'outil, les conditions de coupe et la structure du matériau commencent à être formalisées. Les défauts concernés sont les suivants (cf. Figure I-2):

- ◆ le délaminage en entrée et sortie d'une petite quantité de plis (1 ou 2) également appelé écaillage,
- ◆ le délaminage interne,
- ◆ les défauts dimensionnels et géométriques (circularité, cylindricité),
- ◆ l'altération de la paroi du perçage (rugosité, arrachement de fibres, dégradation thermique).

Ces défauts font l'objet de nombreux travaux, notamment le délaminage en sortie de perçage. La suite de l'étude s'attachera à présenter successivement chacun de ces défauts.

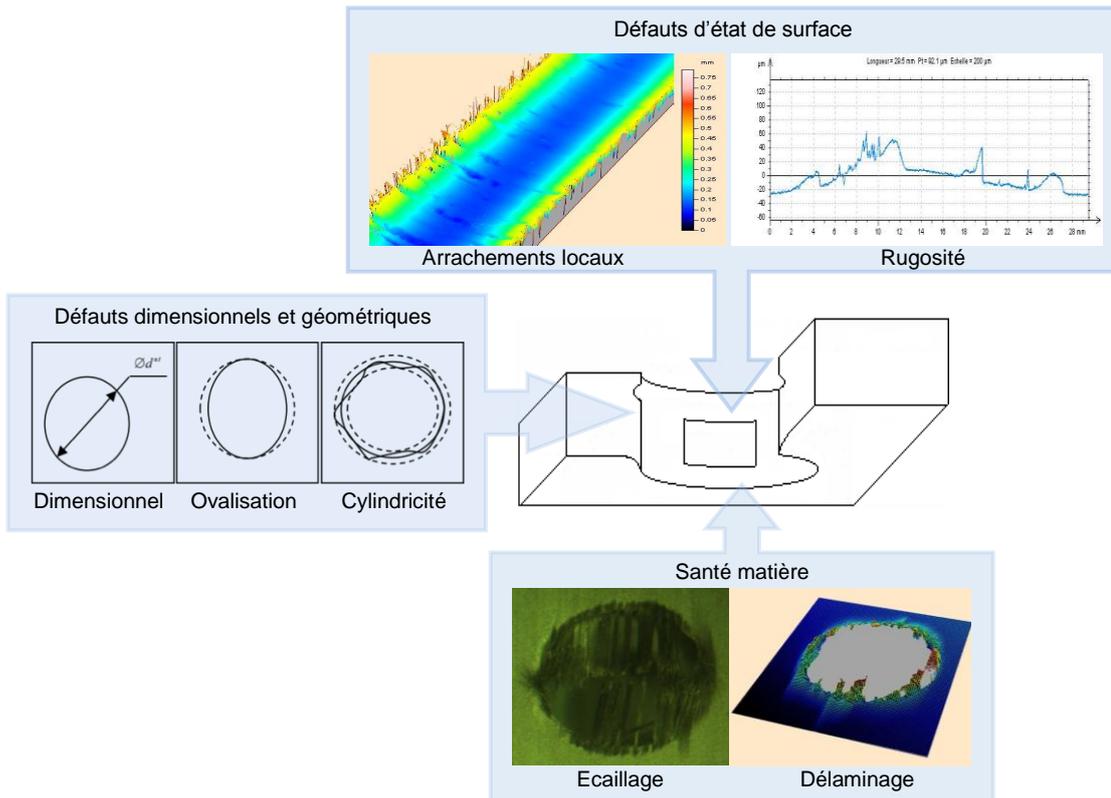


Figure I-2 : Critères de qualité du perçage des matériaux composites.

### I.2.1.1. Défauts dimensionnels et géométriques

Bien que le délaminage soit le critère le plus étudié dans la littérature, le respect des tolérances dimensionnelles et géométriques revêt un aspect qualitatif prépondérant dans l'application industrielle du procédé. L'association de ces deux critères assure une qualification morphologique représentative de la qualité du trou.

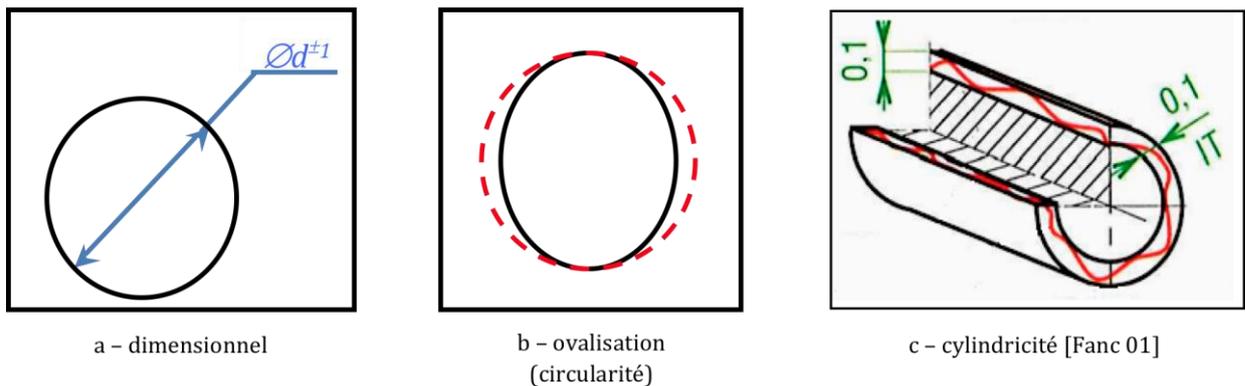


Figure I-3 : Défauts dimensionnels et géométriques du perçage d'un CFRP.

En ce qui concerne les dispersions géométriques, celles-ci peuvent être engendrées par plusieurs phénomènes. Aux phénomènes habituellement observables lors du perçage des matériaux métalliques tels que le défaut de coaxialité du foret vis à vis de l'axe de rotation de la broche (faux-rond), viennent se rajouter des éléments propres aux matériaux composites.

L'anisotropie, induite par l'empilement de couches de fibres unidirectionnelles ainsi que la nature fibreuse du matériau, engendre des phénomènes spécifiques au perçage composite.

Lors de l'usinage des matériaux composites tels que les composites Carbone / Epoxy, un effet de resserrement des fibres sur l'outil peut avoir lieu [Gueg 94] [Piqu 99]. Celui-ci est attribuable au comportement des fibres au cours de l'usinage. Sous l'action de l'arête de coupe, on observe un phénomène de flexion des fibres lors du passage de l'outil. Au retrait de l'outil, le retour en position de ces dernières peut engendrer une diminution du diamètre percé (cf. Figure I-3-b).

Cette flexion dépend principalement de deux facteurs :

- ◆ l'acuité d'arête de l'outil,
- ◆ la nature des fibres.

L'acuité d'arête influe sur la capacité de l'outil à couper les fibres. Elle est caractérisée par la valeur du rayon d'acuité de l'arête de coupe principale.

Une des particularités du perçage composite est la forte abrasion engendrée par les fibres de carbone sur l'outil. Lorsque l'on observe l'arête de coupe d'un outil ayant percé un matériau composite carbone/époxy, on peut très nettement constater un émoussement prononcé de celle-ci (cf. Figure I-4).

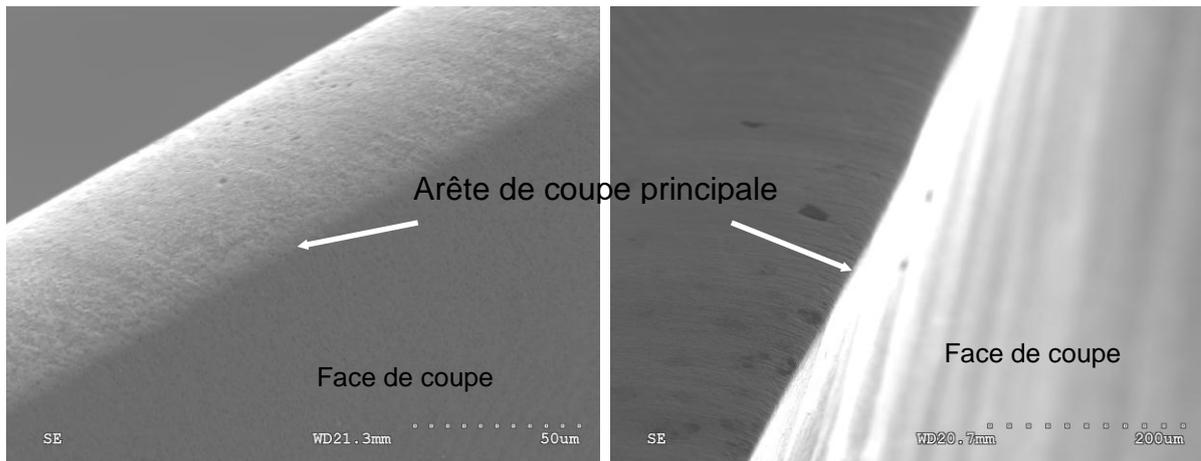


Figure I-4 : Image MEB de l'émoussement de l'arête de coupe consécutif à l'usinage d'un composite carbone/époxy.

Cet émoussement se caractérise par une perte d'acuité d'arête de l'outil et va engendrer pour l'outil considéré une perte de sa capacité à couper la matière. Les travaux réalisés par Faraz et al [Fara 09] sur ce phénomène, corroborent les précédentes observations. L'évolution du rayon d'acuité est mesurée lors d'une série de perçage d'un CFRP. Les résultats ont montré l'augmentation du rayon d'acuité de l'arête de coupe au cours de la campagne. Celle-ci a également été corrélée avec l'augmentation de l'effort de poussée  $F_z$ .

Une arête émoussée qui, par conséquent, aura un rayon d'acuité important, ne coupera pas les fibres mais les pliera, engendrant le resserrement de celles-ci après le passage de l'outil (cf. Figure I-5).

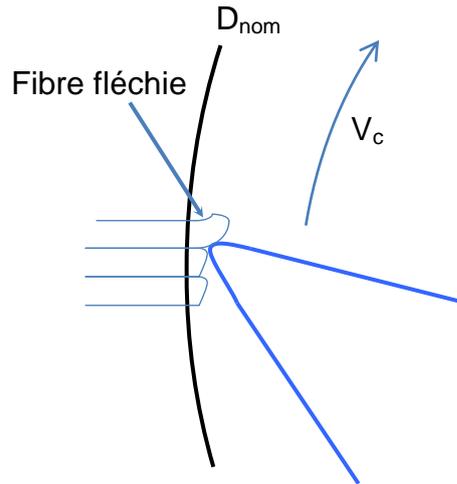


Figure I-5 : Phénomène de flexion des fibres.

Ce phénomène a plusieurs conséquences sur l'outil et la qualité du perçage réalisé. En premier lieu, le resserrement des fibres intensifie le frottement entre la paroi du perçage et le listel de l'outil, provoquant la création de chaleur par friction. Cette élévation de la température dans l'enceinte du perçage peut engendrer une usure prématurée du foret, notamment sur son flan (cf. Figure I-6). Une dégradation thermique de la matrice peut également survenir. Ces éléments combinés peuvent mener à des écarts dimensionnels et des défauts géométriques hors tolérances.

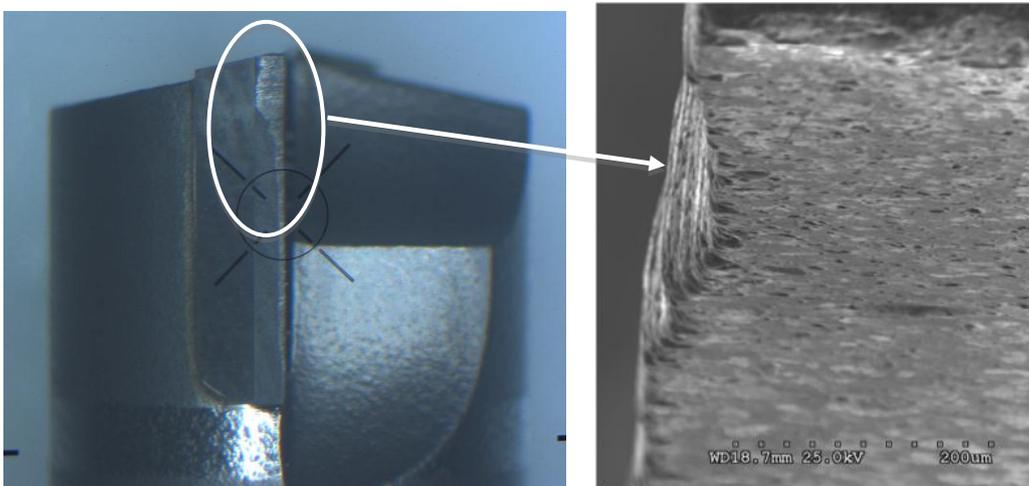


Figure I-6 : Usure par abrasion du flan de l'outil.

Dès lors, un certain nombre d'études ont été entreprises pour déterminer les matériaux d'outils compatibles avec des critères de durée de vie habituellement utilisés dans l'industrie. Deux grandes familles de matériaux ont été particulièrement étudiées, les carbures [Lin 95], [Chen 96], [Durā 05], [Piq 99] et les diamants polycristallins [Gueg 94], [Ston 95].

Ces travaux ont montré que les outils en diamant polycristallin ont, non seulement une durée de vie plus importante mais permettent également de réaliser des perçages de meilleure qualité dimensionnelle que ceux réalisés par des outils carbures. Ces résultats peuvent s'expliquer par différentes propriétés de cette famille de matériaux.

En premier lieu les diamants polycristallins ont une dureté superficielle bien supérieure aux outils carbures (1500 à 2000 Hv pour les carbures, 5000 à 8000 pour les diamants polycristallins [Bagu 99]), ce qui leur confère une meilleure résistance à l'abrasion provoquée par les fibres de carbone. Le rayon d'acuité d'arête obtenu sur des outils PCD est également inférieur à celui des outils carbures (7-12  $\mu\text{m}$  pour les outils PCD contre 10-20  $\mu\text{m}$  pour les outils carbure [Gueg 94]). L'arête de coupe est donc plus coupante et s'émousse moins rapidement, permettant à l'outil de respecter les tolérances géométriques sur une plus grande quantité de perçages. Cependant, quelques éléments ne jouent pas en leur faveur :

- ◆ le coût, supérieur aux outils carbures,
- ◆ la fragilité souvent associée à une grande dureté,
- ◆ leur affinité chimique avec certains matériaux (titane).

Le deuxième facteur influant sur la flexion des fibres est la nature de ces dernières qui conditionne leur comportement lors de la coupe ainsi que leurs modes de rupture.

D'autre part, l'importance de ce phénomène est étroitement liée à la direction relative de celles-ci par rapport à la face de coupe de l'outil (cf. Figure I-7).

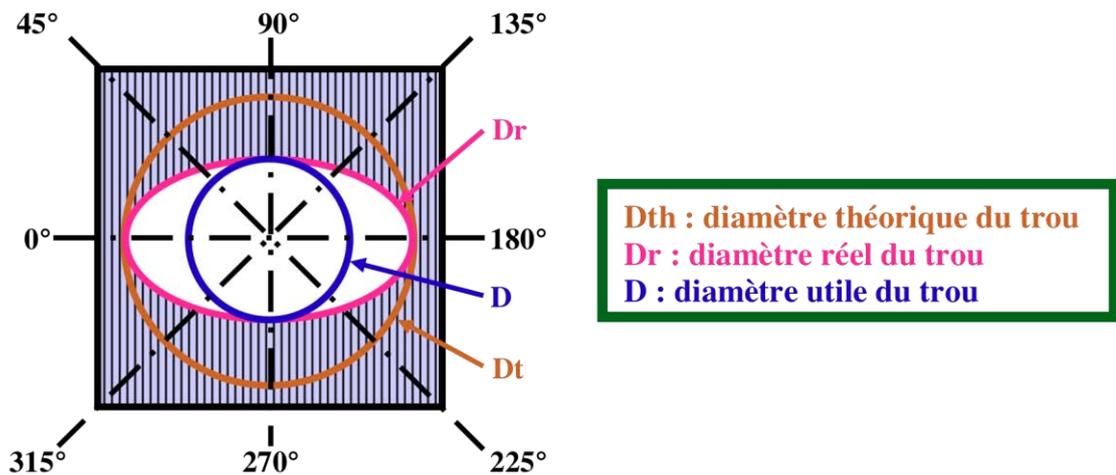


Figure I-7 : Ovalisation des perçages selon l'orientation des fibres. [Surc 05]

L'anisotropie de chaque couche du matériau composite influe sur le comportement de l'outil pendant la coupe. Afin d'en observer l'influence, des analyses du comportement d'une couche UD Carbone / Époxy sur une révolution d'outil, ont été réalisées [Gueg 94] [Piqu 99] [Surc 05]. La périphérie de la partie active de l'outil découpe le matériau dans l'axe des fibres (0°) puis suivant un angle croissant jusqu'à 90° avant de recommencer le cycle. Selon l'orientation angulaire de l'arête de coupe par rapport à la direction des fibres, celles-ci sont soumises à des sollicitations différentes (compression, traction et flexion).

Une étude approfondie menée par R. Zitoun [Zito 04] présente les phénomènes de coupe des matériaux composites en fonction de l'orientation relative entre la direction de coupe et la direction des fibres de carbone. Il a pour cela procédé à des coupes orthogonales sur des éprouvettes CFRP pour différentes directions relatives fibres/face de coupe. Ces

travaux confirment les résultats précédents en ajoutant des informations sur la formation des copeaux.

Pour diminuer ce phénomène, nous avons vu précédemment que l'acuité est directement liée au matériau de l'arête de coupe et dans ce domaine les outils en diamant polycristallin sont préconisés pour leur faible rayon d'acuité, tout en conservant une bonne tenue à l'usure. Ils sont donc particulièrement indiqués dans ce type de situation.

La qualification géométrique du perçage est également caractérisée par le défaut de cylindricité (cf. Figure I-3-c). Celui-ci est mesuré par l'intermédiaire d'un contrôle métrologique réalisé à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). Ce moyen sera également utilisé dans notre étude pour quantifier les défauts géométriques sur les perçages réalisés.

#### I.2.1.2. Délaminage en sortie de perçage

Ce défaut apparaît dans la quasi-totalité des études concernant le perçage des matériaux composites. Cette prédominance s'explique d'une part, par la relative facilité pour quantifier son étendue comparée à un délaminage survenu au cœur du matériau et d'autre part, par la place qu'il occupe au sein des grandes problématiques industrielles concernant les matériaux composites [Köni 89], [Cap 93], [Gue 94], [Che 90]. Cette importance se justifie par l'influence du délaminage sur la robustesse de l'assemblage et par conséquent la tenue en service [Piqu 99]. L'apparition de celui-ci s'accompagne d'une diminution sensible de la qualité de l'assemblage et par conséquent de toute la structure. Industriellement, la fixation par rivetage des panneaux de multi-matériaux est réalisée sur des surfaces saines, ne présentant pas de délaminages ou écaillage, l'assemblage étant d'autant plus résistant que l'étendue du délaminage est faible.

Dans le répertoire des défauts types d'usinage des composites polymérisés, l'écaillage est défini comme une décohésion fibre/ matrice ne touchant que la surface de la pièce sur un ou quelques plis. Il peut s'agir de décollement avec ou sans rupture de fibres. Ces défauts sont quantifiés en mesurant la dimension du défaut le plus important du bord du trou à son extrémité (cf. Figure I-8).

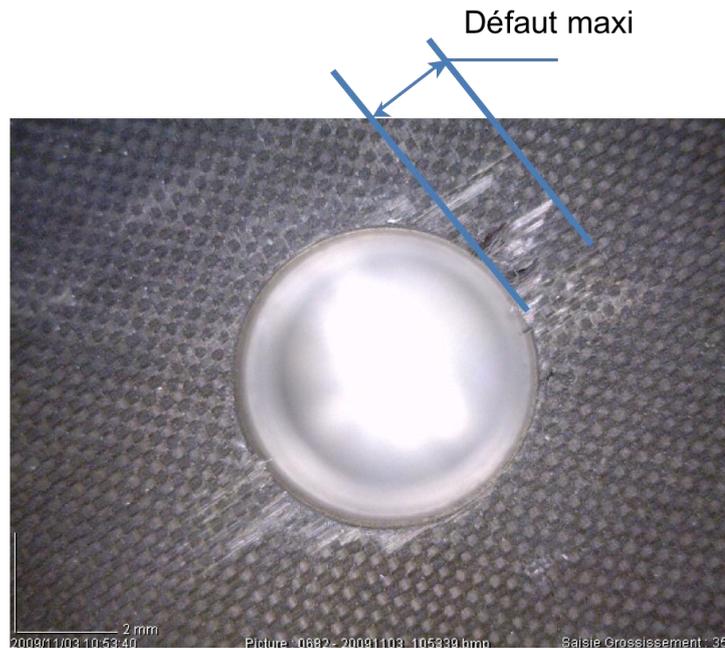


Figure I-8 : Quantification de l'écaillage en sortie de délamination.

D'autres critères sont également utilisés pour quantifier ce défaut comme le facteur de délamination (cf. Figure I-9) [Chen 96] [Abrã 07] [Tsao 04] [Karn 08] [Fara 09].

Ce facteur noté  $F_D$  s'exprime par le rapport :

$$F_D = \frac{D_{\max}}{D_{\text{nom}}} \quad (I.1)$$

avec  $D_{\max}$  le diamètre du cercle, caractérisé par le centre du perçage et le point extrême de la zone délaminée, et  $D_{\text{nom}}$  le diamètre nominal du perçage.

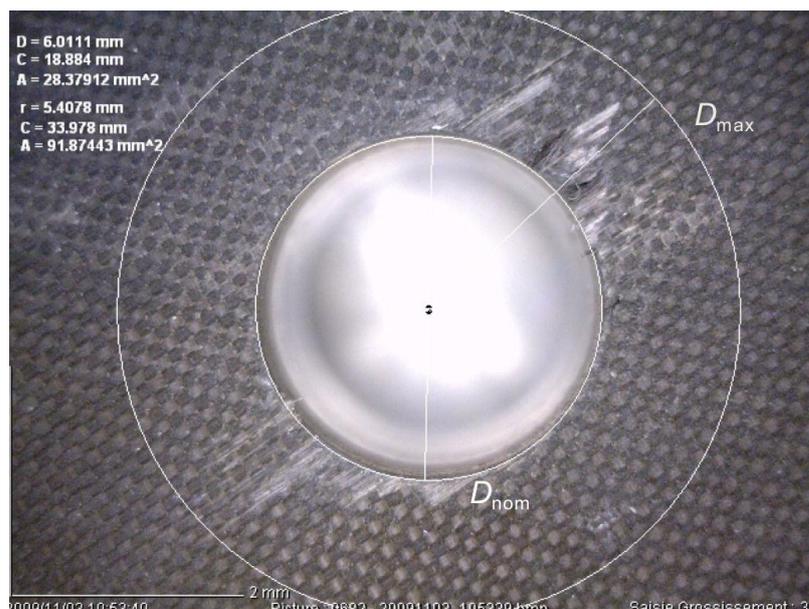


Figure I-9 : Quantification de l'écaillage en sortie de perçage (facteur de délamination).

De la même manière, le facteur de délaminage peut être déterminé à l'aide d'un rugosimètre 3D [Roud 06]. Celui-ci va permettre d'effectuer un relevé topographique très précis (précision de mesure en  $z$  de  $0,3 \mu\text{m}$ ) de l'échantillon par l'intermédiaire de prises de profils successives sur la surface extérieure de l'échantillon (cf. Annexe). Un logiciel de traitement d'images permet ensuite de déterminer le diamètre du cercle englobant la zone délaminée (cf. Figure I-10).

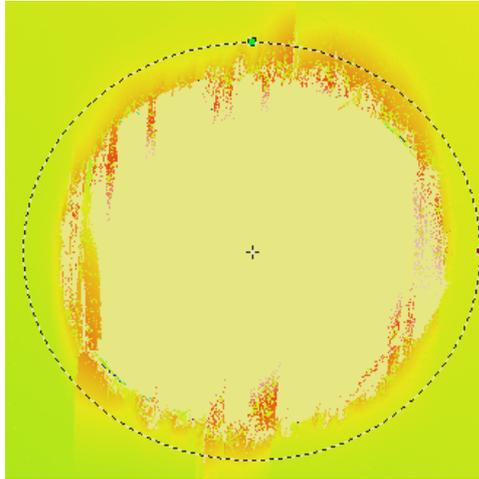


Figure I-10 : Détermination du diamètre du cercle englobant les délaminages en sortie de trou. [Roud 06]

Différentes études ont été entreprises pour analyser ce phénomène :

- ◆ L'analyse des paramètres géométriques et d'usure de l'outil,
- ◆ La prédiction des efforts responsables du délaminage en sortie,
- ◆ L'analyse du processus de fabrication (conditions de coupe).

La problématique la plus étudiée en ce qui concerne le délaminage en sortie s'intéresse à la mise au point d'une géométrie de foret permettant de limiter ou d'éliminer la présence de ce défaut. Les études réalisées par W. König [Köni 89] et P. Guegan [Gueg 94] proposent une modélisation de l'effort de poussée  $F_z$  sous la forme :

$$F_z = k \times K_f \times f \times d \quad (1.2)$$

avec  $k$  terme correctif en fonction de la géométrie de l'âme et  $K_f$  la pression spécifique de coupe,  $f$  l'avance par tour et  $d$  le diamètre du foret.

Les résultats de ces études ont montré que moins l'effort de pénétration est important, moins le délaminage en sortie est étendu. En effet, l'outil agit comme un poinçon sur les derniers plis du composite percé. Ce phénomène s'explique par le profil décroissant de vitesse de coupe  $V_c$  le long de l'arête de coupe. Au niveau de l'âme du foret,  $V_c$  est nulle. La matière n'est alors plus coupée mais repoussée (cf. Figure I-11). Durant le perçage, l'effort engendré par l'outil est absorbé par les plis, reposant les uns sur les autres. A mesure que le foret approche de la sortie du perçage le nombre de plis tend à diminuer et avec lui la raideur

apportée par l'empilement des fibres. Lorsque le seuil critique de délaminage est atteint, un décollement ou délaminage de ces derniers se produit [Piqu 99].

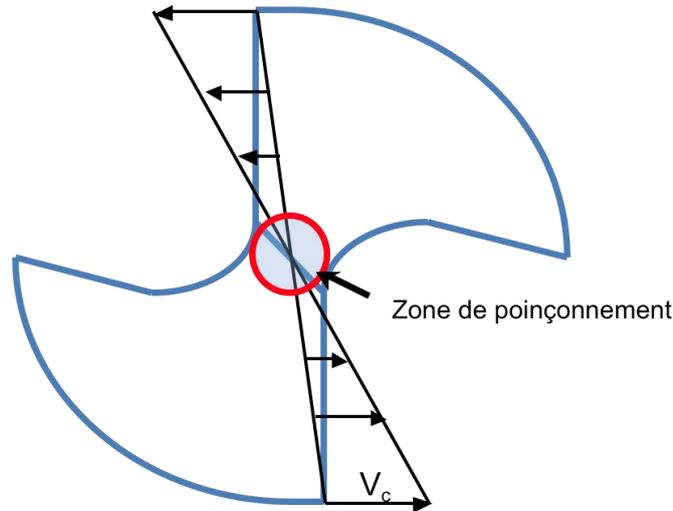


Figure I-11 : Profil de vitesse de coupe  $V_c$  sur la partie active du foret.

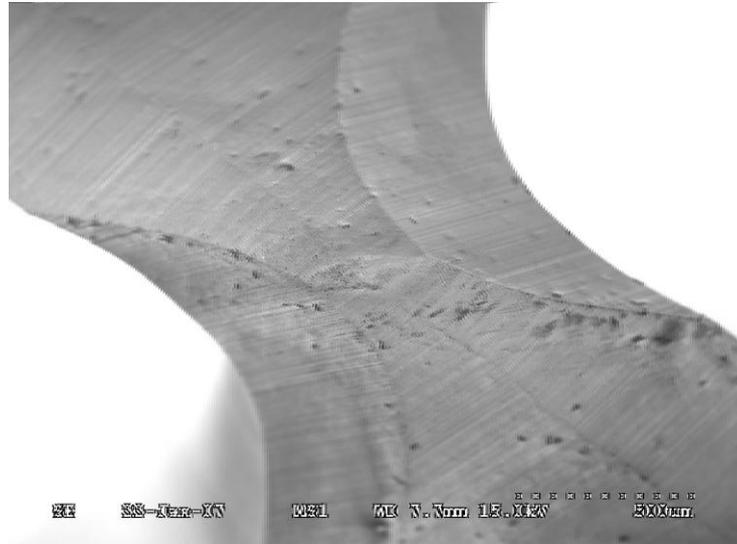
A partir des remarques précédentes, de nombreux travaux ont été menés avec pour objectif de déterminer une géométrie de foret permettant de diminuer l'effort de pénétration  $F_z$ . Les travaux de P. Guegan [Gueg 94] ont mis en avant un certain nombre de géométries et de matériaux d'outils utilisables pour le perçage des composites. Deux familles d'outils se distinguent :

- ◆ Forets utilisés pour le perçage des matériaux métalliques,
- ◆ Forets à géométries spécifiquement conçues pour les composites.

La première démarche a été de réaliser des perçages à l'aide de forets utilisés traditionnellement pour l'usinage des métaux. Cependant, nous avons vu précédemment (cf. I.2.1.1) que la forte abrasion engendrée par les fibres de carbone sur l'outil contribuait à émousser l'arête de coupe principale de l'outil. Pour limiter ce phénomène, l'utilisation de matériau tel que le PCD ou l'ajout d'un revêtement (PVD ou CVD) sur l'outil accroît sa dureté superficielle. L'arête de coupe s'émousse alors moins rapidement, augmentant ainsi la durée de vie du foret.

Cette première démarche d'optimisation de l'outil de coupe a été de conserver une géométrie traditionnellement préconisée pour le perçage des matériaux métalliques, en adaptant le matériau ou le revêtement à une application composite. Mais cette démarche se heurte à un problème abordé précédemment : l'importance de l'âme du foret. En effet, la spécificité du perçage composite et notamment les contraintes impliquées par le délaminage des derniers plis, ont engendré un nombre important de travaux sur les améliorations géométriques à apporter aux forets [Piqu 99], [Tsao 03], [Chen 96] et [Capr 94]. Comme nous l'avons vu précédemment, le foret agit comme un poinçon en son centre (vitesse de coupe très faible ou nulle) qui selon l'effort de pénétration, peut engendrer le délaminage du ou des derniers plis. Pour remédier à ce problème, une préparation spécifique de l'âme est

nécessaire (cf. Figure I-12). Les travaux de recherche ont montré l'influence de la longueur de l'âme sur l'effort de pénétration. Plus celle-ci est petite, meilleure sera la pénétration de l'outil dans le matériau, et par conséquent plus l'étendue du délaminage sera limitée.



*Figure I-12 : Image MEB de l'amincissement de l'âme d'un foret*

Outre l'optimisation au niveau de l'âme du foret, des investigations ont porté sur la globalité de la géométrie de l'outil de coupe. En partant du postulat que les CFRP sont des matériaux fibreux fortement hétérogènes, l'utilisation d'outils destinés à la coupe du bois n'est pas dénuée de fondement. Précédemment, différentes études sur les matériaux fibreux, comme l'aramide, avaient déjà porté sur des géométries de forets inspirées de celles utilisées pour le perçage du bois. Un certain nombre de recherches se sont focalisées sur l'utilisation de ces géométries [Hoch 03] [Hoch 06] [Durã 05] [Tsao 05] [Lin 95].

Ces géométries d'outils présentent la particularité d'avoir des facultés de coupe accrues en cisaillement au niveau des extrémités des arêtes de coupe principales. L'effort de pénétration est donc réparti sur la périphérie de l'outil ainsi qu'au centre de l'outil avec un angle de pointe inférieur à 90° (cf. Figure I-13, Figure I-14-a). Ces outils permettent de diminuer l'effet « poinçon » de l'outil en limitant les zones non coupantes de l'arête de coupe et d'augmenter la qualité de coupe du composite sur la périphérie de l'outil.

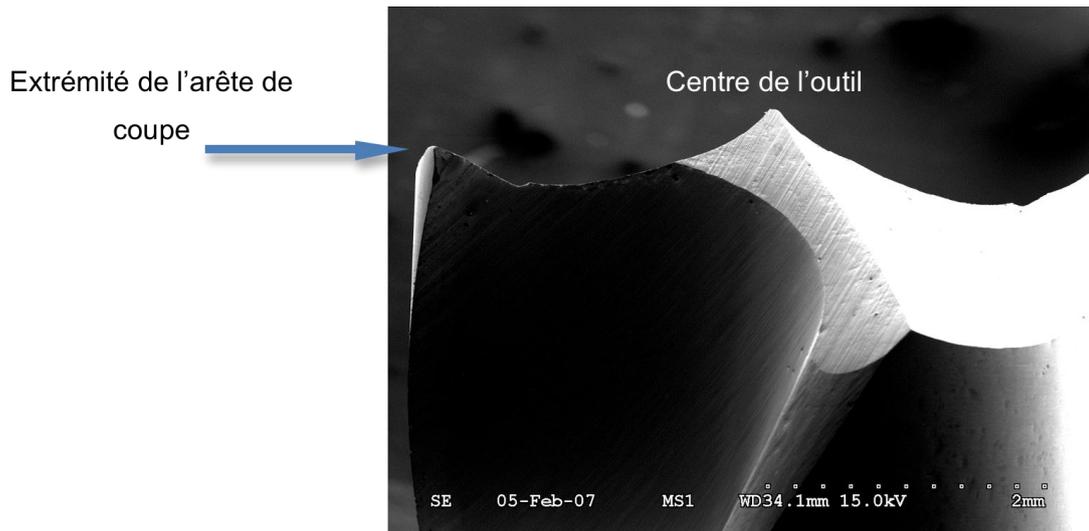


Figure I-13 : Détails d'un foret destiné au perçage de l'aramide

Enfin, plusieurs études ont été menées sur des géométries d'outils spécifiques à la coupe des composites [Piqu 99] [Ramu 99] [Fern 05]. Malgré des différences notables, ces outils, appelés "dagger", ont tous en commun d'avoir une géométrie étagée constituée de 3 niveaux (cf. Figure I-14-b).

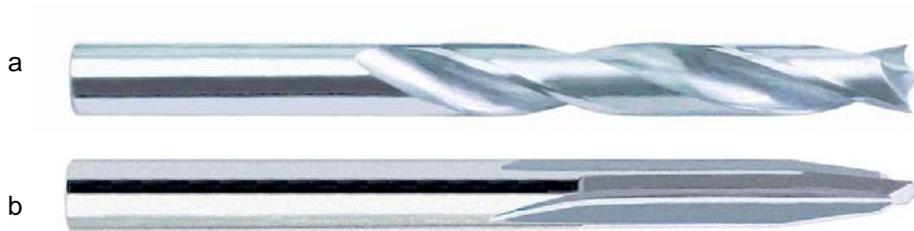


Figure I-14 : Différents forets destinés au perçage des matériaux composites (catalogue sterlingcarbide [ster 10])

Chacun de ces niveaux à sa spécificité :

- ◆ la première partie de l'outil s'apparente à la pointe d'un foret de faible diamètre (3 à 4 mm) et de géométrie "conventionnelle" à laquelle on a ajouté un amincissement de l'âme. Cette partie va influencer sur la qualité de la débouchure du perçage notamment en diminuant la partie non coupante de l'âme du foret,
- ◆ dans la deuxième partie, le diamètre de l'outil croît du diamètre de la pointe vers le diamètre nominal du trou, permettant d'engager le dernier étage du foret. L'angle de coupe dans cette partie est négatif pour limiter tout risque de décollement du ou des premiers plis (délaminage en entrée de perçage). Un angle de coupe important aurait provoqué un effet de pelage à la périphérie des arêtes principales du foret [Gueg 94]. Le copeau en formation tend à remonter le long de la face de coupe et l'effort résultant tend à décoller le pli supérieur du composite (cf. Figure I-15).

- ◆ La troisième partie s'apparente à un alésoir permettant d'obtenir la qualité dimensionnelle et géométrique souhaitée. L'angle d'hélice nul permet une évacuation rapide des copeaux [Fern 05].

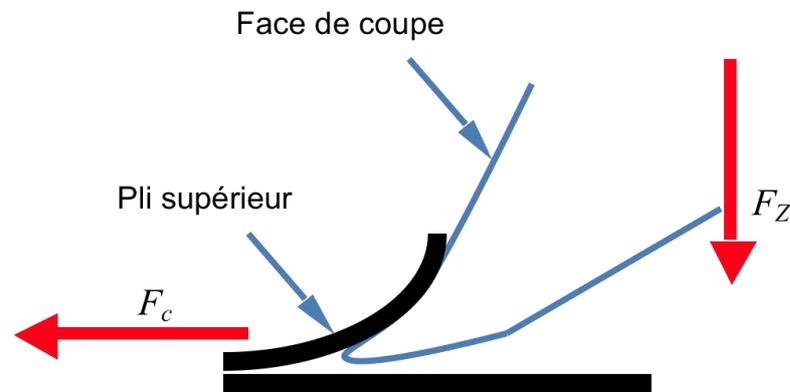


Figure I-15 : Délaminage en entrée de perçage

Enfin, il est possible d'ajouter une dernière famille à cette analyse : les forets étagés. Ces derniers ont fait l'objet de plusieurs études et sont également issus des connaissances acquises en perçage des matériaux métalliques [Hoch 03] [Lapo 05] [Tsao1 08] [Tsao2 08]. Ils présentent l'avantage de permettre l'obtention de la débouchure du perçage en deux phases et par conséquent de diminuer la flexion engendrée sur les derniers plis.

Une toute autre démarche a été entreprise dans un certain nombre d'études, visant non pas à intervenir au niveau de la géométrie du foret mais, au niveau du processus de perçage. En partant de l'hypothèse que le paramètre principal responsable du délaminage en sortie était l'effort de poussée  $F_z$ , des travaux ont été engagés pour déterminer l'influence des paramètres de coupe sur les actions mécaniques en perçage.

Pour cela trois directions d'études ont été envisagées :

- ◆ la méthode expérimentale,
- ◆ les méthodes analytique et/ou numérique.

La première est souvent basée sur les plans d'expériences pouvant être complets [Lin 95], [Chen 96] ou réduits, avec la méthode Taguchi, pour réduire la campagne d'essais [Piqu 99] [Tsao 04] [Tsao1 08] [Tsao2 08]. Elle permet d'établir principalement une corrélation entre les actions mécaniques exercées par l'outil sur le matériau et les conditions de coupe. Celles-ci sont mesurées par l'intermédiaire de platines dynamométriques reliées à un logiciel d'acquisition.

Les résultats de ces études ont confirmé la corrélation entre l'avance  $f$  et l'effort de poussée  $F_z$  (équation (1.2)), ainsi que l'augmentation de l'effort au fur et à mesure de la détérioration de l'outil [Abrã 07] [Chér 08] [Karn 08]. Elles ont également permis de vérifier l'influence de  $F_z$  sur le facteur de délaminage en sortie. Enfin, une partie de ces études consiste à déterminer un effort  $F_z$  critique mais également des plages de conditions de coupe ( $f$ ,  $V_c$ ) à partir desquelles le délaminage devient systématique pour un outil donné.

Dans la même optique, différents types de modélisation ont été associées au procédé de perçage composite pour établir des modèles prédictifs du délaminage en sortie. La majorité de ces études ont opté pour une modélisation analytique dont le paramètre d'entrée du problème est un chargement en  $z$  simulant l'effort de poussée  $F_z$  et différentes combinaisons de paramètres géométriques [Hoch 06] [Lang 05] [Tsao 07].

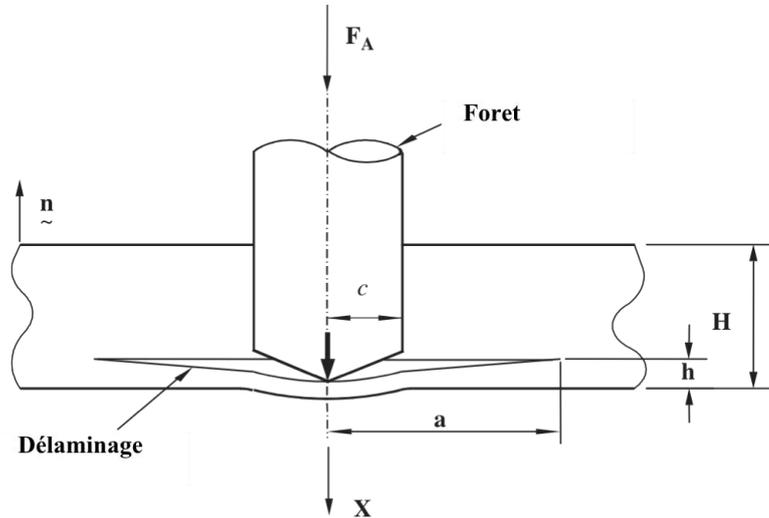


Figure I-16 : Modélisation du perçage des derniers plis d'un matériau composite. [Tsao 07]

Dans la figure I-16, une plaque d'épaisseur  $H$ , est sollicitée par un effort  $F_A$ , exercé par un foret de rayon  $c$ . Le chargement engendre un délaminage circulaire, sur le ou les derniers plis d'épaisseur  $h$  et de rayon  $a$ .

Des outils numériques (éléments finis) ont également été utilisés pour simuler l'action du foret sur les derniers plis et ainsi quantifier le délaminage [Durã 05] [Guil 05] [Sing 07] [Zito 04].

Enfin, quelques études ont été orientées sur l'analyse du processus et notamment le maintien de l'éprouvette par un support pour limiter les risques de flexion et par conséquent le délaminage en sortie [Piqu 99] [Tsao 05]. E. Capello [Cape 02] va plus loin en remettant en question l'existence d'un effort de poussée  $F_z$  critique responsable du délaminage. Il en impute la responsabilité à une flexion excessive de l'éprouvette pendant le perçage engendrant la rupture des derniers plis. En effet, le perçage sur les structures aéronautiques est souvent réalisé sur site à l'aide d'unités de perçage automatisé (UPA). Ces unités portatives permettent à l'opérateur, une meilleure accessibilité des zones de perçage. Les panneaux sont donc percés sans que la sortie du perçage ne soit rigidifiée par un dispositif de soutien. Lors de la débouchure en fin de perçage, la flexion du composite engendrée par l'effort de poussée vient brusquement s'annuler pouvant provoquer le délaminage des derniers plis lors du retour rapide en position initiale de la pièce.

Pour remédier à ce défaut, l'auteur préconise l'ajout d'un vérin, placé sur les UPA, faisant office d'amortisseur hydraulique, limitant la vitesse de retour de l'éprouvette en fin de perçage.

### I.2.1.3. Rugosité

D'après le répertoire des défauts types d'usinage des composites polymérisés, la rugosité est un indicateur de la qualité de l'état de surface de la paroi du trou. L'indicateur de rugosité usuellement utilisé pour caractériser la qualité d'un perçage dans l'industrie aéronautique est la rugosité arithmétique ( $R_a$ ). Celle-ci est mesurée à l'aide d'un rugosimètre en effectuant l'écart moyen arithmétique du profil de rugosité.

Ce critère est très utilisé dans l'usinage des matériaux métalliques mais plus complexe à interpréter dans le domaine des composites par la nature même de ces matériaux.

A l'image de la cylindricité, la rugosité de la paroi intérieure du trou est fortement influencée par l'orientation des fibres. D'après les travaux de W. König [Köni 89], la direction relative entre l'arête de coupe et la direction des fibres la plus défavorable concernant la rugosité, se situe entre 20 et 45° (Cf. Figure I-18). Les fibres se trouvant dans cette zone subissent une compression additionnée à l'action de cisaillement de l'arête de coupe. Ces résultats montrent également que la rugosité est minimale dans les zones où les fibres sont inclinées à 0° ou à 90°. La rugosité peut également être altérée selon certaines orientations, par des arrachements locaux de fibres engendrés lors de l'usure de l'outil (cf. Figure I-17 et Figure I-18).

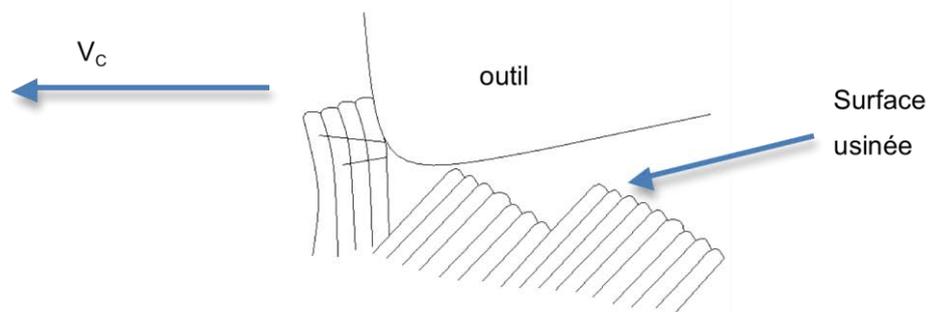


Figure I-17 : Arrachement des fibres.

Un composite étant un empilement de couches successives, il est légitime de penser que la rugosité sera différente à chaque position angulaire balayée par le palpeur mécanique.

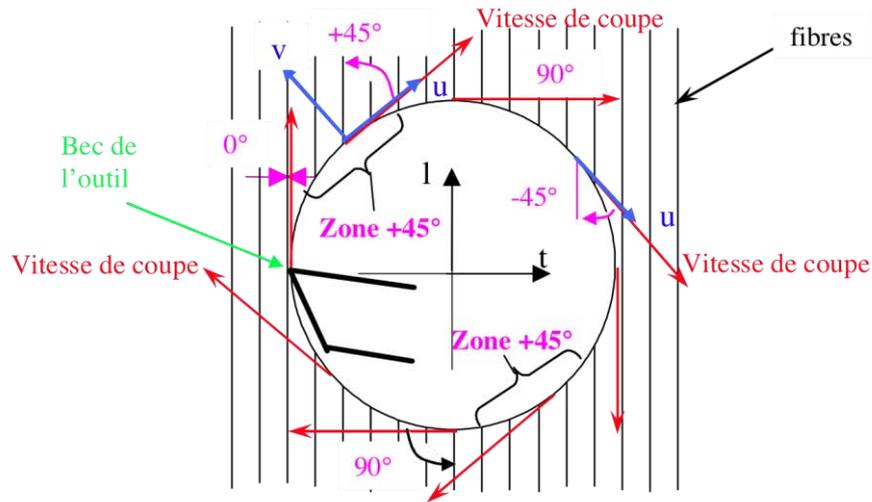


Figure I-18 : Désignation des zones présentant des défauts. [Surc 05]

Pour observer ce phénomène, une autre solution consiste à utiliser un rugosimètre 3D [Roud 06] (cf. Figure I-19). Cette méthode présente l'inconvénient d'être destructive, l'échantillon devant être au préalable découpé dans sa longueur pour être analysé. Mais elle permet d'obtenir une cartographie générale de l'état de surface de la paroi du perçage et non une quantité très limitée de profils. Concernant les arrachements locaux, elle permet également de mieux comprendre le phénomène en autorisant l'observation des arrachements selon des directions de fibres privilégiées.

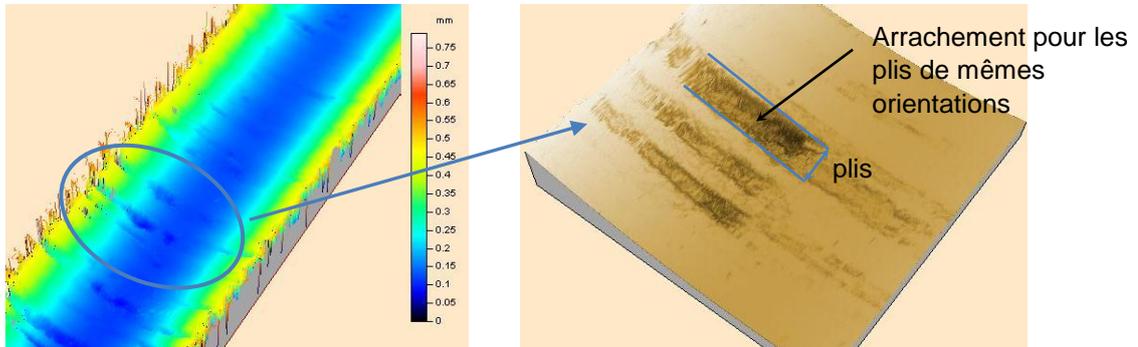


Figure I-19 : Images prises au rugosimètre 3D d'arrachements locaux selon certaines orientations [Roud 06].

Il est possible d'observer ce phénomène de manière plus fine par l'intermédiaire d'un MEB (cf. Figure I-20). Cependant, de la même manière que pour le rugosimètre 3D, ce procédé est destructif. L'image réalisée montre que les plis concernés par une rupture de fibres ont des orientations similaires, confirmant ainsi les résultats précédents.

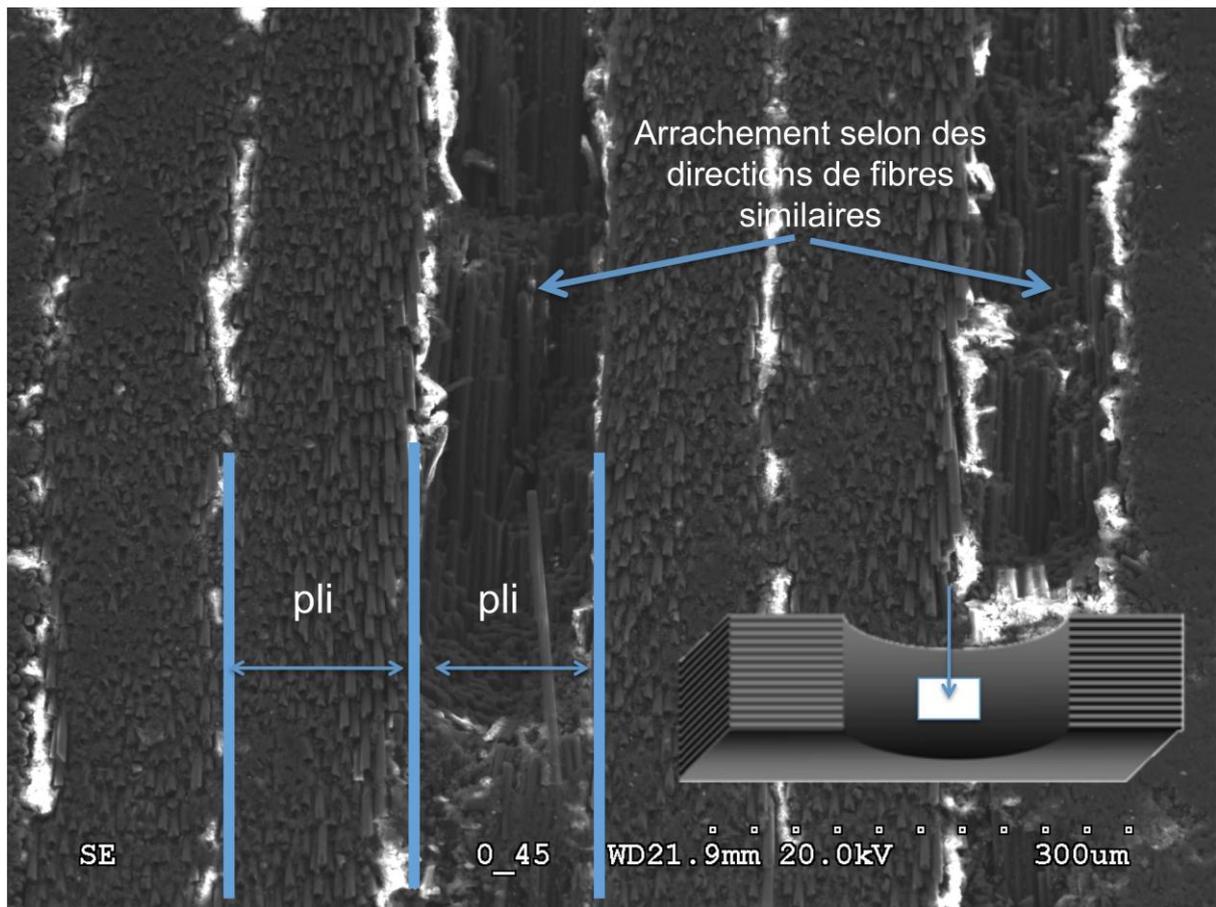


Figure I-20 : Image MEB d'arrachements locaux dans une séquence d'empilement (-45°,0°,+45°,90°).

#### I.2.1.4. Dégradations thermiques

Ce défaut résulte de la détérioration localisée de la matrice en résine époxy thermodurcissable (TD), consécutive à une augmentation locale de la température engendrée par le frottement entre l'outil et la surface usinée. Le critère de qualité est binaire [Gueg 94] :

- ◆ présence d'une dégradation,
- ◆ absence de dégradation.

Lors de la présence d'une dégradation thermique consécutive au perçage d'un composite carbone / époxy (thermodurcissable), un brunissement de la paroi intérieure du perçage apparaît. Cette coloration peut s'expliquer par la disparition locale de la matrice sur une faible épaisseur pouvant mettre à nu les fibres de carbone.

Une analyse à l'aide d'une caméra infrarouge peut être menée en parallèle pour observer la température de la paroi du trou lors du dégagement de l'outil, ou pendant le perçage [Roud 06]. La chaleur générée pendant la coupe des composites est principalement produite par les frottements intenses entre le listel et la surface usinée [Piqu 99].

La combinaison d'une étude énergétique et d'une étude expérimentale, a permis d'isoler les facteurs influant sur ce phénomène tels que :

- ◆ la nature et le pourcentage de fibres,
- ◆ le matériau et la géométrie du foret,
- ◆ les conditions de coupe (vitesse de coupe et d'avance).

L'augmentation du pourcentage de fibres a deux effets antagonistes quant aux phénomènes thermiques de la coupe des matériaux composites carbone/époxy. Plus le taux de fibres est important, plus les frottements entre l'outil et la paroi du trou seront importants, engendrant une augmentation de la production de chaleur. Cependant, l'augmentation du taux de fibres accroît la conductivité thermique globale du CFRP, le carbone étant meilleur conducteur que la résine ( $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour le carbone et  $0.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour la résine époxy), homogénéisant la température dans la structure par diffusion de la chaleur à travers les fibres.

Pour les mêmes raisons, le matériau de l'outil influence les dégradations thermiques sur la paroi du trou. On observe une grande disparité des valeurs de conductivité thermique des matériaux d'outils (cf. Figure I-21).

Matériaux	Conductivité thermique à 20 C ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Aciers rapides	19
Carbures métalliques	35 à 80
Céramiques	15 à 30
Cermets	18
Diamant polycristallin (PCD)	500 à 600
Nitride de bore cubique (CBN)	5

Figure I-21 : Conductivité thermique pour différents matériaux d'outils [Bagu 99].

La chaleur est donc évacuée par les outils, les fibres et les copeaux. Ces résultats sont confirmés par R. Piquet [Piqu 99] en s'appuyant sur l'étude de perçages d'un composite carbone/époxy avec des outils en carbure de tungstène. Dans un premier temps, à partir de la formule de Springer [Spri 90], la conductivité thermique transverse d'un CFRP a été déterminée. En comparant la valeur obtenue avec celle de la conductivité thermique du carbure de tungstène de l'outil, il a pu établir que la chaleur était principalement évacuée par l'outil.

Dans une démarche d'optimisation, le matériau d'outil permettant d'évacuer au mieux la chaleur et par conséquent limitant les dégradations thermiques, est celui dont la conductivité thermique sera la plus importante. Pour cette raison, les outils PCD sont donc encore une fois les mieux adaptés à la coupe des matériaux composites.

En ce qui concerne la géométrie de l'outil, deux paramètres jouent un rôle prépondérant dans l'apparition d'une dégradation thermique :

- ◆ le rayon d'acuité d'arête,
- ◆ la largeur du listel.

Comme nous l'avons vu précédemment, le rayon d'acuité d'arête favorise une bonne découpe des fibres limitant l'effet de resserrement sur l'outil et diminuant la quantité de chaleur produite par les frottements outil/paroi du perçage.

Le listel (cf. figure I-22) est la périphérie la plus saillante d'un foret, fixant le diamètre extérieur de l'outil. Il contribue à guider et renforcer le foret. Lors de sa fabrication, une dépouille, également appelée détalonnage, est créée le long du foret de manière à contrôler la friction et, par conséquent, l'échauffement. Un compromis doit être établi pour déterminer la largeur optimale de celui-ci.

La réduction de la largeur peut avoir deux effets opposés :

- ◆ une diminution de la chaleur générée par frottements,
- ◆ une diminution de la chaleur dissipée par le foret due à la réduction du contact outil/CFRP.

Pour optimiser le rapport production/dissipation de chaleur, le foret doit par conséquent avoir un rayon d'acuité d'arête faible, sans toutefois diminuer la tenue de l'outil, ainsi qu'une largeur de listel réduite.

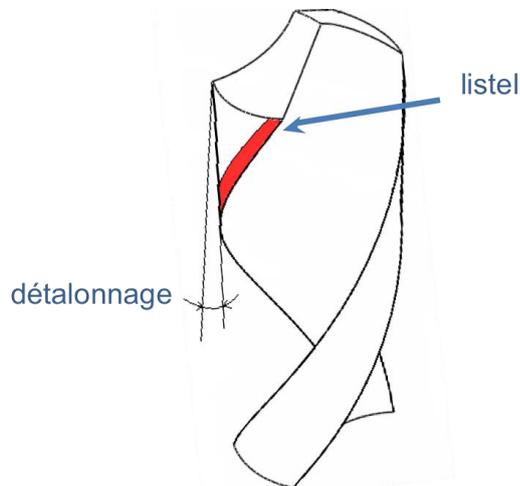


Figure I-22 : Listel d'un foret.

Les conditions de coupe, l'avance  $f$  et la vitesse de rotation  $N$  de l'outil, influencent également les dégradations thermiques. Ces deux paramètres de coupe permettent de définir le temps de perçage et en particulier le temps de contact outil/paroi. Des études réalisées sur le sujet, montrent que dans une certaine limite, l'augmentation de l'avance diminue la production de chaleur [Gueg 94]. De la même manière, la vitesse de rotation devra être réduite pour limiter l'intensité des frottements. Afin d'optimiser le cycle de perçage, la longueur de dégagement sous pièce devra être diminuée au maximum et la vitesse de remontée de l'outil augmentée, de manière à limiter la restitution dans le matériau de la chaleur emmagasinée par l'outil pendant le perçage.

L'aspect thermique a également été abordé par R. Zitoun [Zito 04]. Dans ces travaux, des essais ont été réalisés à l'aide d'une caméra infrarouge filmant l'usinage d'un composite en coupe orthogonale. Une nouvelle campagne d'essais a été réalisée ensuite à l'aide d'un thermocouple placé dans l'outil destiné à mesurer au plus près la température de celui-ci pendant la formation du copeau. Les résultats obtenus ont montré des élévations de température assez faible, 20°C environ, dans les cas les plus défavorables. Ils ont également

---

mis en évidence l'influence de la profondeur de passe (avance par tour dans le cas du perçage) ainsi que la direction des fibres sur la production de chaleur.

### I.2.2. Perçage de l'aluminium

Le perçage d'un matériau métallique comme l'aluminium présente bien moins de difficultés qu'un matériau hétérogène comme les composites carbone / époxy. Cependant les problématiques actuelles, notamment celles imposées par l'industrie aéronautique, ont engendré un certain nombre d'études sur ce matériau. Les principaux axes de recherche portant sur le perçage des alliages d'aluminium sont :

- ◆ le perçage à sec des alliages d'aluminium,
- ◆ le collage du copeau,
- ◆ la formation de la bavure,
- ◆ la micro lubrification.

Dans la conjoncture environnementale actuelle, les problèmes écologiques touchent de plus en plus de secteurs industriels et en particulier le domaine de la coupe. En effet, les fluides de coupe ou lubrifiants, utilisés lors des opérations d'usinage, sont difficilement recyclables et contiennent des hydrocarbures toxiques pour l'environnement. Aux préoccupations environnementales s'ajoutent bien évidemment les enjeux industriels. Le coût de la lubrification peut représenter jusqu'à 20% du coût de l'usinage [Noua 03]. Malgré tout, la suppression de celle-ci n'est pas chose aisée compte tenu du réel avantage en terme de qualité d'usinage ou de durée de vie des outils de coupe. C'est d'autant plus valable dans le cas du perçage, où l'enlèvement de matière se déroule dans un espace confiné. En résumé, la lubrification permet de :

- ◆ réduire le frottement outil/copeau,
- ◆ évacuer les copeaux de la zone de coupe,
- ◆ augmenter la durée de vie de l'outil et la qualité du trou, en évacuant la chaleur de l'outil et par conséquent limiter son usure (adhésion, abrasion, diffusion chimique).

L'absence de fluide de coupe peut être palliée par l'utilisation d'outils revêtus. Un certain nombre d'études sur le perçage à sec [Giro 02] [Noua 03], ont porté sur les différents types de revêtements. Ces derniers permettent de limiter les préjudices causés par l'absence de fluide en diminuant les frottements outil/copeau. Dans des conditions d'usinage difficiles, notamment des températures élevées, la très bonne résistance à la diffusion chimique ainsi que la dureté élevée conférées à l'outil, augmentent sa durée de vie.

Il existe principalement deux méthodes de dépose des revêtements sur les outils :

- ◆ la méthode PVD (Physical Vapor Deposition),
- ◆ la méthode CVD (Chemical Vapor Deposition).

La méthode PVD (cf. Figure I-23) consiste à déposer une couche mince obtenue par des plasmas formés à partir d'un processus mettant en jeu des phénomènes physiques [Corn 98]. Ces phénomènes peuvent être de trois types :

- ◆ une évaporation,
- ◆ une pulvérisation,
- ◆ un dépôt ionique.

La méthode par évaporation consiste à chauffer sous vide le matériau que l'on veut déposer. Les atomes du matériau à évaporer reçoivent de l'énergie calorifique, c'est-à-dire que leur énergie vibratoire dépasse l'énergie de liaison et provoque l'évaporation. Le matériau évaporé est alors recueilli par condensation sur le substrat à recouvrir. Les principales techniques se différencient par le mode de chauffage du matériau. Il existe un certain nombre de méthodes d'évaporation telles que :

- ◆ par bombardement d'électrons,
- ◆ par effet joule,
- ◆ par arc électrique,
- ◆ par induction,
- ◆ assistée par faisceau d'ions.

La méthode par pulvérisation, quant à elle, consiste à éjecter des particules de la surface d'un solide par le bombardement de cette surface avec des particules énergétiques, en général des ions argon [Rech 02].

Enfin, la méthode par dépôt ionique est une technique hybride entre l'évaporation et la pulvérisation. Elle consiste à évaporer le matériau dans une enceinte dans laquelle on entretient une pression résiduelle de 13 à 1,3 Pa en introduisant de l'argon par exemple. Pendant le dépôt, on provoque et on entretient une décharge électrique luminescente de manière à créer un plasma. Cette décharge est obtenue généralement en appliquant une tension négative de quelques kV au porte-substrats, ce qui a pour effet d'attirer les ions sur ce dernier.

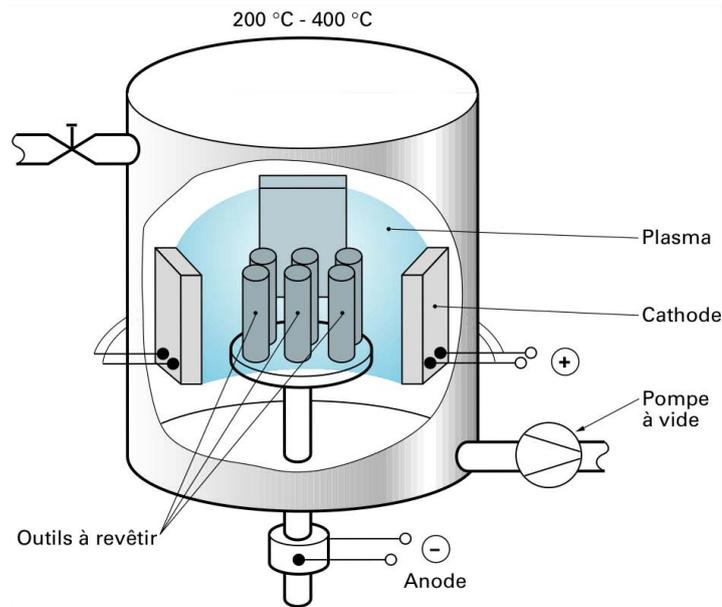


Figure I-23 : Procédé PVD [Bagu 99].

Contrairement à la méthode PVD, la méthode CVD (cf. Figure I-24) n'implique pas de phénomènes physiques mais une série de réactions chimiques dans une enceinte placée à haute température (950°C à 1000°C). Les fortes températures mises en jeu lors de la dépose peuvent entraîner un revenu des aciers rapides, impliquant des pertes de propriétés mécaniques de ces derniers. Ce procédé est donc essentiellement utilisé pour le revêtement des outils carbures.

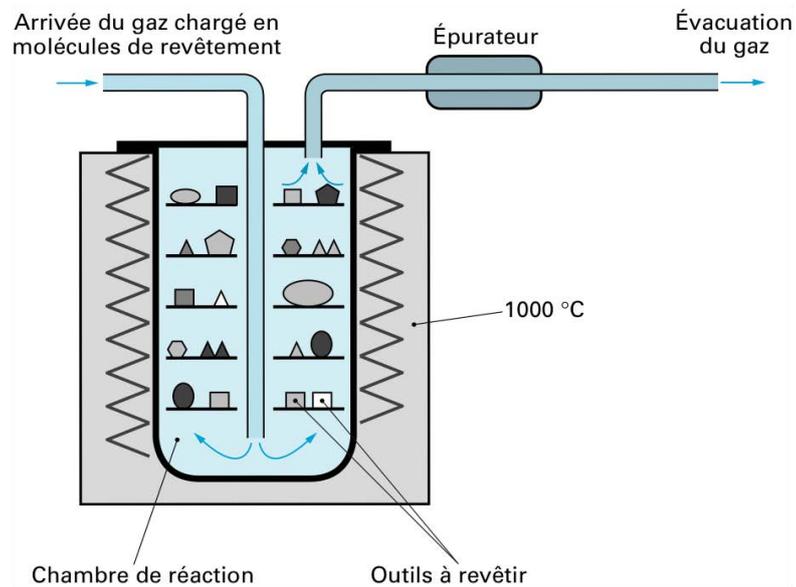


Figure I-24 : Procédé CVD [Bagu 99].

Il existe un certain nombre de différences quant aux caractéristiques des revêtements obtenus par ces deux méthodes (cf. Figure I-25). Celles-ci s'opèrent notamment au niveau de l'épaisseur des couches déposées : puisque la méthode CVD permet la dépose de couches de 5 à 12  $\mu\text{m}$  d'épaisseur alors qu'elle n'excède pas 6  $\mu\text{m}$  pour le procédé PVD. Cela implique

des répercussions sur les acuités d'arêtes obtenues après dépôt, pouvant favoriser dans certaines applications la méthode PVD.

	Avantages	Inconvénients
PVD	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Investissement limité</li> <li>◆ Faible température de dépôt</li> <li>◆ Bonne adhérence de dépôt</li> <li>◆ Nombreuses possibilités de dépôt</li> <li>◆ Bonne acuité d'arête des outils</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Vitesse de dépôt faible</li> <li>◆ Dépôts non uniformes</li> <li>◆ Difficultés pour revêtir des outils à géométrie complexe</li> </ul>
CVD	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Grande pureté des dépôts</li> <li>◆ Grande variété de composition</li> <li>◆ Possibilité de dépôt sur des pièces complexes</li> <li>◆ Bonne adhérence sur substrat carbure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Température de dépôt élevée</li> <li>◆ Investissement élevé</li> <li>◆ Temps de cycle long</li> <li>◆ Mauvaise acuité d'arête de coupe</li> </ul>

Figure I-25 : Propriétés des modes de déposes PVD et CVD [Rech 02].

Une des principales raisons expliquant cette différence est que les revêtements déposés par la méthode CVD sont constitués de plusieurs couches pour en améliorer les propriétés (cf. Figure I-26). Cette méthode présente l'avantage de pouvoir modifier dans le temps la nature des couches déposées.

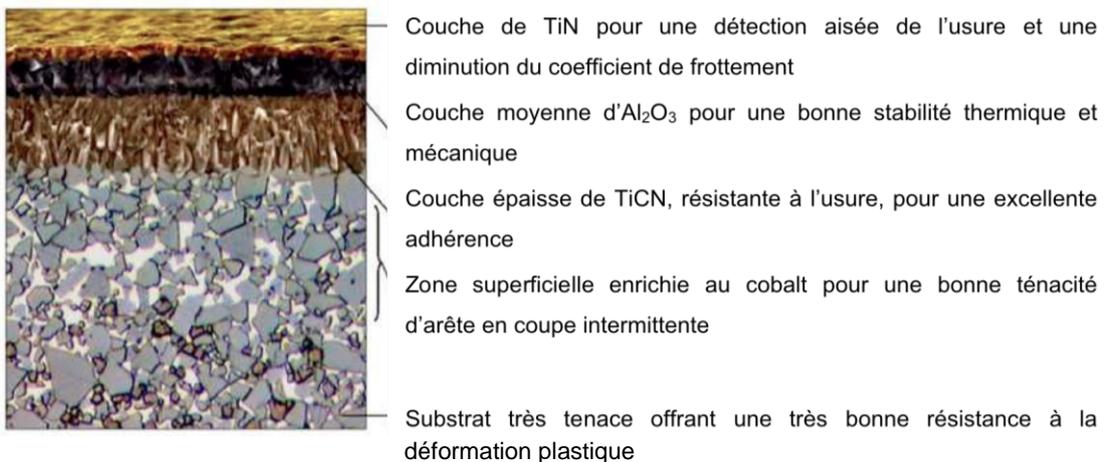
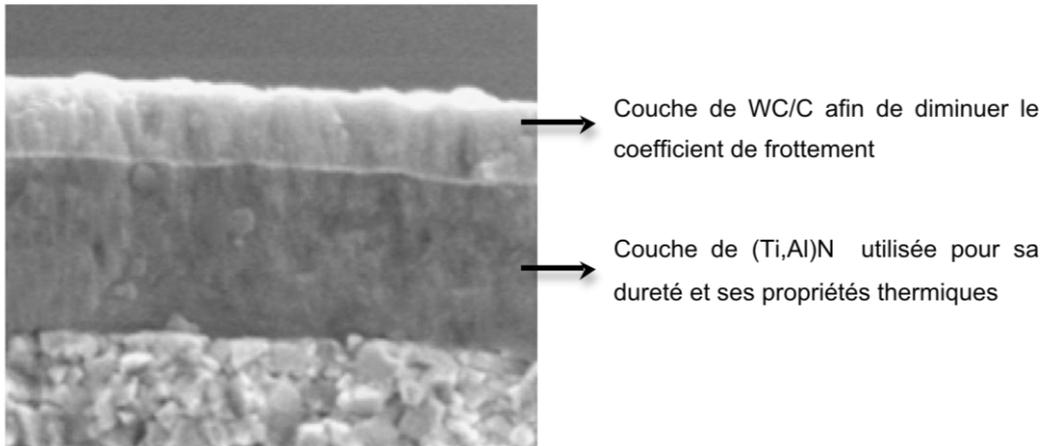


Figure I-26 : Exemple de couches déposées par CVD sur un substrat [Rech 02].

La figure I-27 montre un exemple de dépose d'un revêtement multicouche. Chaque couche a des propriétés spécifiques, l'objectif étant d'associer des revêtements aux caractéristiques différentes pour en cumuler les avantages.

Ces derniers ont fait l'objet de différentes études, notamment le revêtement Hardlube<sup>®</sup> ((Ti,Al)N + WC/C), qui associe un revêtement dur à un revêtement de dureté inférieure mais au coefficient de frottement faible, permettant de palier l'absence de lubrification et de diminuer les efforts de coupe [Giro 02] [Noua 05]. Le revêtement (Ti,Al)N, déposé par PVD, est utilisé pour son importante dureté (3300 HV contre 1000HV pour le revêtement WC/C) et comme barrière thermique entre le copeau et l'outil, permettant à la chaleur d'être en grande

partie évacuée par le copeau. Le revêtement WC/C quant à lui est considéré comme un revêtement lubrifiant grâce à un faible coefficient de frottement.



Fi

gure I-27 : Image MEB d'un revêtement Hardlube®. [Balz 10]

Le domaine des revêtements est en constante évolution. Aux revêtements monocouches et composites précédemment présentés, il est possible d'ajouter à cette liste les revêtements "superlattice", "nano" ou auto-adaptatifs.

Les revêtements "superlattice" sont composés d'une centaine de couches de quelques nanomètres. Le revêtement WC/C fait partie de cette famille et est composé d'un empilement de couches de carbure de tungstène et de carbone.

Les revêtements "nano" sont des revêtements dont la taille des grains est à l'échelle nanométrique. Ces revêtements présentent une meilleure dureté, ainsi qu'une meilleure ténacité [Vepr 99].

Enfin, les revêtements auto-adaptatifs ont la capacité de modifier leurs structures ou leurs compositions dans leurs environnements de travail : formation d'une couche d'oxyde protectrice par exemple.

Un certain nombre d'études ont cherché à comparer ces différentes familles de revêtements [Giro 02] [Noua 03]. Celles-ci soulignent les bons résultats obtenus par les revêtements Hardlube® mais également par les revêtements diamants. Ces derniers ont été fréquemment comparés avec différents revêtements dans des applications de perçage à sec de l'aluminium [Durv 02] [Hany 05]. Ils ont également fait l'objet d'études comparatives selon leurs procédés de dépose [Dasc 06], qui peut être comme on l'a vu précédemment CVD ou PVD, voire les deux dans le cas du revêtement DLC (diamond-like carbon). Ce dernier présente des propriétés extrêmement intéressantes compte tenu de sa dureté importante (>10000 HV) et de son coefficient de frottement faible obtenu par dépose CVD.

Concernant les conditions de coupe ( $f$  et  $V_c$ ), pour les mêmes raisons que pour les matériaux composites, celles-ci devront être ajustées pour limiter l'élévation de température liée aux phénomènes de friction de l'outil en perçage. Une quantité de chaleur trop importante est préjudiciable à la durée de vie de l'outil ainsi qu'à la stabilité dimensionnelle du perçage réalisé. En se combinant aux propriétés adhérentes de l'aluminium, elle favorise également le

risque de formation d'une arête rapportée sur l'arête de coupe du foret. Celle-ci peut détériorer la qualité de surface de la paroi percée mais également engendrer des vibrations altérant les qualités dimensionnelles du perçage en modifiant la micro géométrie de l'arête de coupe.

Une alternative moins radicale au perçage à sec est la micro lubrification ou MQL (minimum quantity lubrication). Celle-ci consiste à lubrifier la zone de coupe soit par lubrification externe soit par l'intérieur de l'outil en mélangeant de l'huile et de l'air sous pression formant un brouillard d'huile (cf. Figure I-28). Ce procédé présente bien évidemment un intérêt économique et écologique par rapport à une lubrification classique, compte tenu de la diminution de la quantité de fluide de coupe utilisée. Toutefois il engendre un surcoût car il nécessite l'utilisation d'un système de lubrification ainsi qu'un outillage adapté (notamment dans le cas d'une lubrification par le centre).

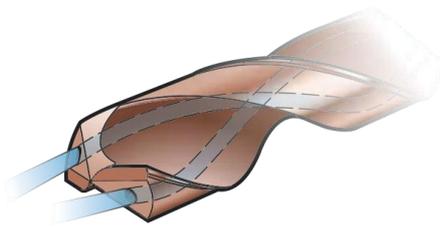


Figure I-28 : Foret avec microlubrification par le centre [Sand 10].

Les études menées sur le procédé se sont attachées dans un premier temps à justifier l'utilisation d'un tel procédé par rapport à une lubrification traditionnelle. Dans ce but, une analyse comparative de la qualité des perçages réalisés par ces deux types de lubrification (traditionnelle et MQL), pour des conditions de coupe similaires, a été réalisée [Durv 02] [Kell 01]. Des études ont ensuite affiné les connaissances de ce nouveau procédé en déterminant les conditions de coupe ainsi que les revêtements les mieux adaptés [Arup 08] [Hany 05] [Durv 02].

En amont de ces études, une analyse préalable des critères de qualité et de leur quantification a été réalisée. La suite de l'étude va s'attacher à présenter les différents critères recensés dans la littérature.

#### 1.2.2.1. Défauts dimensionnels et géométriques

Bien que la hauteur de bavure soit le critère de qualité en perçage de l'aluminium principalement étudié dans la littérature, il n'en demeure pas le seul. Dans le cadre d'assemblage d'éléments aéronautiques, la qualité dimensionnelle des perçages intervient directement dans la tenue et la certification de l'opération de rivetage. Le jeu fonctionnel entre l'alésage et le rivet doit par conséquent répondre aux exigences de la qualité de l'assemblage souhaitée. Pour cela trois critères permettent d'encadrer les qualités dimensionnelles et géométriques d'un perçage :

- ◆ le diamètre moyen du perçage,

- ◆ la cylindricité,
- ◆ la circularité (ovalisation).

Ces trois critères sont quantifiés par l'intermédiaire d'un contrôle métrologique réalisé à l'aide d'une MMT.

Plusieurs éléments peuvent influencer sur ces critères de qualité tels que la géométrie de l'outil (arête et angle de coupe), sa rigidité (vibrations) et son usure. Comme nous l'avons vu précédemment pour le perçage des CFRP (cf. I.2.1.1), le défaut de coaxialité du foret vis à vis de l'axe de rotation de la broche (faux-rond) peut conduire à un surdimensionnement du perçage.

Lors du perçage de l'aluminium, les phénomènes d'arêtes rapportées engendrés par les propriétés collantes du matériau, vont altérer significativement l'acuité de l'arête. La capacité de l'outil à couper le matériau est alors diminuée. De la même manière que le faux-rond de l'outil, l'apparition de ce phénomène engendre une augmentation des dimensions du perçage réalisé ainsi qu'une altération significative de l'état de surface de la paroi du trou.

#### I.2.2.2. Bavure en sortie de perçage

Ce critère de qualité est celui principalement utilisé en ce qui concerne l'aluminium car la présence de bavures engendre un surcoût de production dû aux opérations d'ébavurage. Elle s'explique par le fait que lorsque l'outil est proche de la sortie du perçage, la température dans l'enceinte du trou peut engendrer une augmentation de la ductilité du matériau au voisinage de la débouchure. Ce phénomène combiné à une usure de l'outil caractérisée par une perte d'acuité d'arête, fait que le matériau n'est alors plus parfaitement coupé mais repoussé partiellement pour former une bavure (cf. Figure I-29).

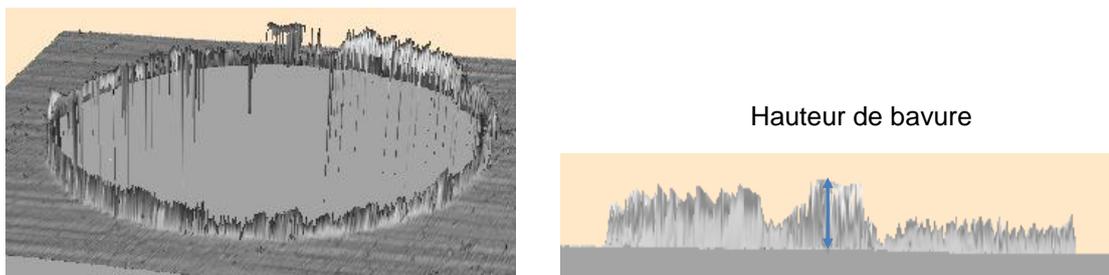


Figure I-29 : Mesure de la hauteur de bavure réalisée avec un rugosimètre 3D.

A l'instar du délaminage en sortie dans les composites carbone/époxy, les travaux de recherche concernant l'apparition de bavures en sortie de perçage de l'aluminium ont pour objectifs l'analyse du phénomène, la modélisation (modèle prédictif) de celui-ci et les méthodes pour le limiter voire l'éliminer.

La majorité de ces travaux s'orientent vers la prédiction de leur(s) apparition(s). Là encore, plusieurs méthodes ont été utilisées comme les cartes de contrôle permettant d'affecter à des intervalles de conditions de coupe (avance  $f$  et vitesse de coupe  $V_c$ ), un type de bavure (cf. Figure I-30) et sa dimension [Sang 01] [Jins 00] [Lee 05].

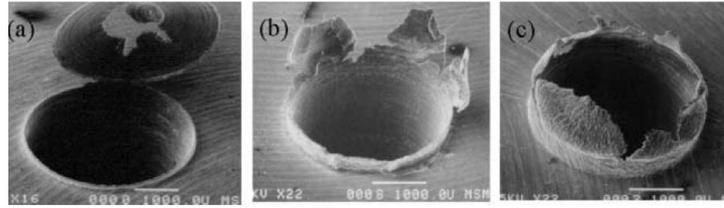


Figure I-30 : Trois formes de bavures réalisées en sortie de perçage aluminium : (a) bavure uniforme, (b) bavure transitoire et (c) bavure en couronne [Sang 01].

Avec les mêmes objectifs mais cette fois-ci sur site et en cours d'usinage, la mise en place d'un monitoring permet de prédire l'apparition d'une bavure pendant le perçage. En intégrant le signal de l'intensité du courant de broche en temps réel dans un algorithme, le modèle proposé par B. Peña permet d'estimer la hauteur de bavure [Begõ 05]. Les paramètres de l'algorithme ont été déterminés au préalable à l'aide d'une campagne d'essais encadrant le domaine d'étude.

De manière analogue aux matériaux composites, des modèles numériques ont également été développés. Dans ses travaux, L. Ken Lauderbauh [Ken 02] a, dans un premier temps, mis en place un modèle éléments finis prédisant la forme de la bavure en fonction des paramètres d'usinage. Il entreprend ensuite de combiner un modèle analytique et une étude statistique (ANOVA) [Ken 08] pour identifier les principaux paramètres influençant l'apparition d'une bavure et permettant de prédire la dimension de celle-ci. Il en découle une liste des principaux paramètres tel que :

- ◆ la vitesse d'avance,
- ◆ la géométrie de l'outil, notamment l'épaisseur de l'âme.

Il est possible de réaliser un parallèle entre les paramètres responsables du délaminage dans les composites carbone/époxy et l'apparition d'une bavure dans l'aluminium même si les mécanismes en jeu sont bien différents.

En restant toujours focalisé sur le critère de qualité « hauteur de bavure », des démarches différentes ont été entreprises avec pour objectif non pas de prédire son apparition mais de minimiser son étendue.

Dans ce but, les études menées par Sung-Lim Ko [Sung1 01] [Sung2 01] se sont orientées vers la définition d'une géométrie d'outil optimale. Les paramètres géométriques d'un foret responsables de la formation de la bavure ont été isolés : l'âme du foret, son angle de pointe et la forme de la goujure. En faisant varier ces paramètres dans une campagne d'essai, une géométrie d'outil a pu être déterminée afin de :

- ◆ réduire l'effort de poussée  $F_z$  en modifiant la forme de l'âme,
- ◆ fractionner les copeaux pour faciliter leur évacuation et éviter les engorgements dans le trou.

Dans la même optique, des forets étagés ont fait l'objet de plusieurs études [Sung2 01] [Sung 03]. Comme pour le perçage des composites, où ces forets sont utilisés pour limiter

le délaminage, les forets étagés permettent de limiter l'étendue de la bavure en sortie de perçage. La pointe du foret va venir déboucher et engendrer une bavure qui sera éliminée par le deuxième étage du foret créant une bavure moindre voire nulle.

### 1.2.2.3. Rugosité

Ce critère de qualité est commun à tous les matériaux, compte tenu des contraintes imposées par les industriels, car il est primordial pour la tenue en fatigue de l'assemblage ainsi que pour sa tenue mécanique. Une rugosité trop importante est souvent considérée comme le lieu d'amorce de ruptures dans les tôles minces [Lapo 05].

Comme nous l'avons vu précédemment (cf. 1.2.2.1), les phénomènes d'arêtes rapportées engendrés par les propriétés collantes du matériau, altèrent significativement l'acuité de l'arête principale de l'outil. La capacité de l'outil à couper le matériau est alors diminuée, augmentant la rugosité sur la paroi du perçage. D'après les études réalisées par S. Laporte [Lapo 05], la rugosité n'est pas la même selon le point d'observation dans le perçage réalisé. D'après son étude, le comportement du foret à l'entrée du trou n'est pas le même que lors de sa débouchure. Des phénomènes d'instabilité en sont la cause et engendrent une détérioration systématique de la rugosité en entrée de perçage bien supérieure à celle survenant en sortie de perçage. La conicité inverse du foret ainsi que la mauvaise évacuation des copeaux conduisent à une « redépose » d'une partie des copeaux entre le listel et la paroi du perçage à l'endroit du diamètre minimal de l'outil.

Cette première partie de chapitre s'est attachée à présenter indépendamment chacun des matériaux constituant le multi-matériaux, objet de notre étude. La description des critères de qualité, leurs quantifications et les difficultés potentielles rencontrées lors du procédé de perçage ont été abordées. Cependant, le perçage multi-matériaux ne peut se cantonner à l'étude indépendante des matériaux le constituant. L'analyse de l'empilement va introduire de nouvelles problématiques qui seront abordées dans la suite de l'étude.

## 1.3. Étude du perçage d'un multi-matériaux

De plus en plus utilisés, notamment dans l'industrie aéronautique, les multi-matériaux sont un nouveau défi dans le domaine des procédés de fabrication et en particulier celui qui concerne cette étude : le perçage. Dans l'industrie aéronautique, le positionnement de cette opération dans le cycle de fabrication d'un avion, fait de la maîtrise de ce procédé un enjeu majeur pour assurer une bonne qualité de l'assemblage de toute la structure. Le perçage multi-matériaux étant réalisé lors de l'assemblage de la structure, un perçage hors tolérance engendrerait des coûts supplémentaires. Connaissant le nombre de perçages sur un avion civil (environ 400000 à 3 millions par avion), il est plus évident de se faire une idée des enjeux économiques du procédé.

Les premières études sur le sujet ont été entreprises il y a une vingtaine d'année. Celles-ci se sont focalisées sur différentes natures d'empilements tels que les empilements :

- ◆ carbone/époxy / titane,
- ◆ carbone/époxy / aluminium,
- ◆ carbone/époxy / titane / aluminium.

Une partie importante des travaux réalisés sur les multi-matériaux concerne l'empilement CFRP/Ti. Au-delà de ses performances mécaniques, cet assemblage forme un meilleur couple galvanique que l'empilement CFRP/Al. Il est souvent préféré dans l'industrie aéronautique malgré son coût bien supérieur. Son perçage reste toutefois un challenge au regard des propriétés thermiques du titane caractérisées par une mauvaise conductivité ( $21,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour le titane,  $237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour l'aluminium).

La difficulté majeure rencontrée dans le perçage de cet empilement réside dans le fait que les outils utilisés ainsi que les conditions de coupe pour l'usinage du titane ou des composites à fibres de carbone sont très différentes (cf. Figure I-31) [Ramu 01] [Kim 04] [Bonn 10].

La très mauvaise conductivité thermique du titane engendre des contraintes importantes. Le confinement de la zone d'enlèvement de matière en perçage amplifie également le phénomène. Les températures importantes mises en jeu entraînent une usure prématurée des outils et la production de bavures en sortie de perçage. La lubrification est donc indispensable pour le perçage du titane, mais elle peut avoir des effets néfastes pour le perçage d'un composite à fibres de carbone pour lequel un système d'aspiration des poussières de carbone est souvent préféré. Comme nous l'avons vu précédemment (cf. I.2.2), les enjeux écologiques mais surtout économiques poussent également à trouver des solutions moins coûteuses. La microlubrification est un bon compromis concernant le perçage de cet empilement. Il est également préconisé d'utiliser des vitesses de coupe faibles (15 à 30 m/min) pour limiter la production de chaleur. La vitesse d'avance doit quant à elle, être augmentée de manière à réduire le temps de présence de l'outil dans le perçage.

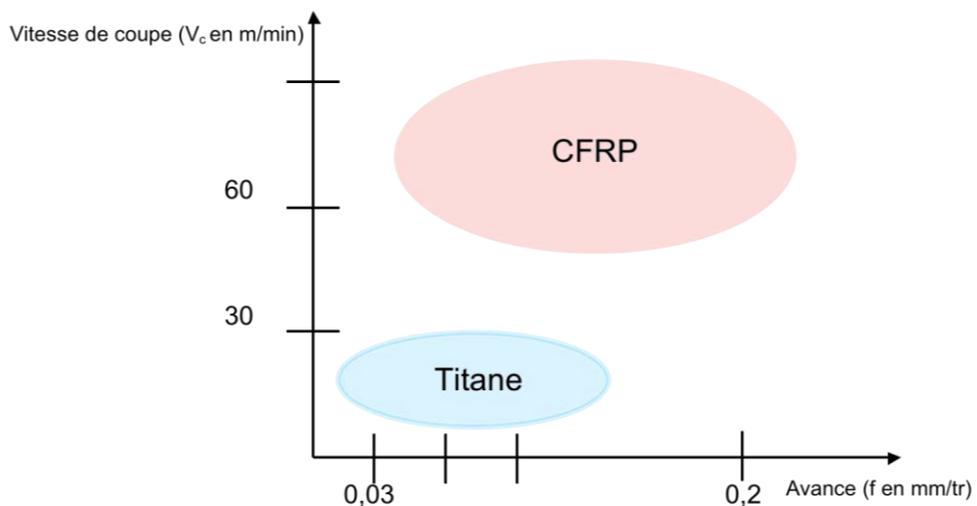


Figure I-31 : Conditions de coupe en perçage.

Des différences notables sont également à signaler en ce qui concerne les outils et notamment leurs revêtements. Les résultats précédents ont montré que les outils revêtus diamant présentaient de très bonnes propriétés de coupe pour les matériaux composites carbone/époxy. Malheureusement les outils diamant mais également CBN (nitrure de bore cubique) ou même céramique sont fortement déconseillés pour le perçage du titane car ils sont hautement réactifs à hautes températures [Rodr 06], engendrant une usure très rapide de l'outil. Il est donc préconisé d'utiliser des outils carbures que l'on pourra associer à un revêtement ((Ti,Al)N, TiN, TiC) pour augmenter leur durée de vie et la qualité du perçage réalisé.

Des compromis doivent donc être réalisés pour usiner ce multi-matériaux. Les contraintes de conception fixant l'ordre d'empilement, Ramulu et al [Ramu 01] ont étudié le perçage d'un empilement CFRP/Ti dans les deux configurations possibles, Ti/CFRP et CFRP/Ti. Selon la séquence choisie, les défauts apparaissant lors du perçage d'un multi-matériaux peuvent être de nature ou d'ampleurs différentes.

### Cas n°1 : Perçage d'une séquence CFRP/Ti

Si l'on se place dans une configuration où l'outil traverse dans un premier temps le CFRP puis le titane : le titane placé en deuxième oppose une résistance à l'effort de poussée de l'outil sur les derniers plis du composite, contribuant à diminuer les risques de délaminage. Cette séquence présente l'inconvénient de favoriser la dégradation de la paroi intérieure du trou lors de la remontée des copeaux de titane le long de l'outil et d'augmenter par conséquent la rugosité. L'augmentation de la température après le passage successif dans le composite puis le titane, va également engendrer une bavure en sortie de perçage du multi-matériaux, en l'occurrence du titane. Cette bavure sera d'autant plus importante que l'usure de l'outil sera grande.

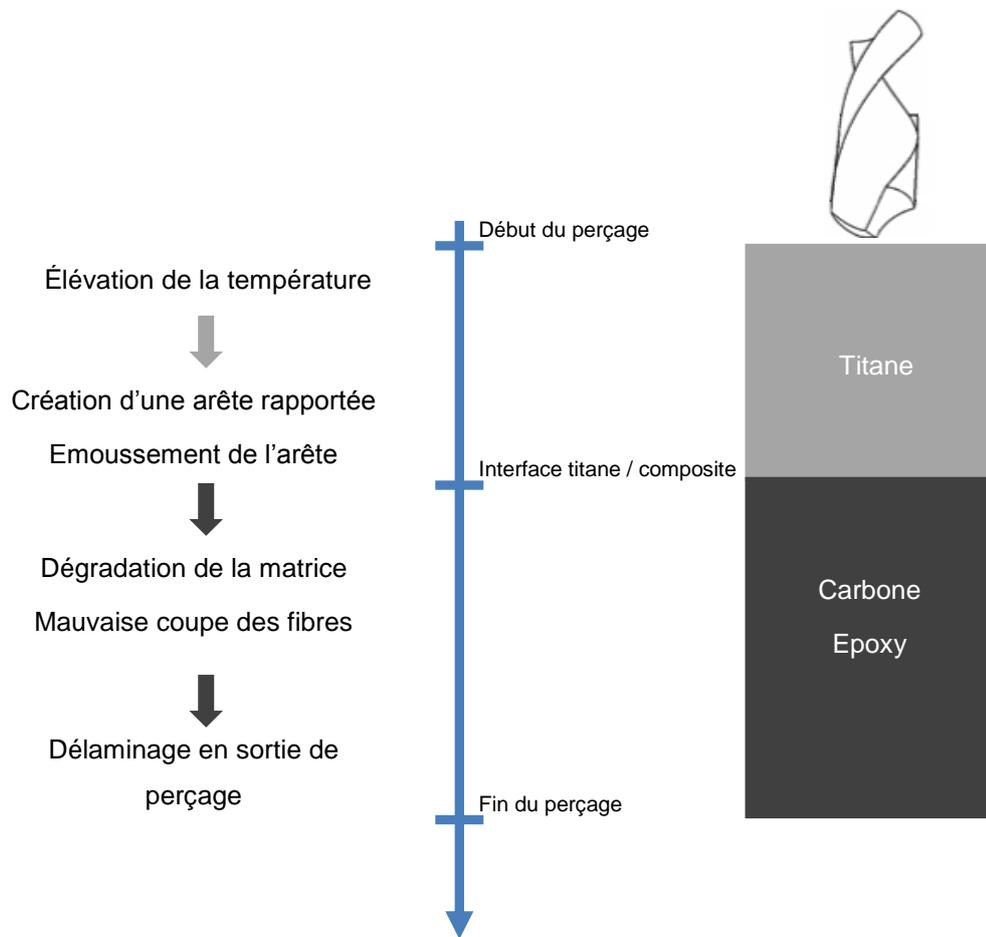


Figure I-32 : Chronologie du perçage d'un empilement Titane/CFRP.

Cas n°2 : Perçage d'une séquence Ti/CFRP (cf. Figure I-32)

Dans le cas de l'empilement inverse, l'outil traverse le titane en premier, engendrant une élévation de la température au sein de l'outil ainsi que dans l'enceinte du trou. L'importante production de chaleur et les propriétés collantes du titane vont entraîner :

- ◆ un phénomène d'adhérence sur l'arête de coupe altérant le rayon d'acuité de l'arête de coupe,
- ◆ une disparition partielle de la matrice sous l'effet des fortes températures mettant à nu les fibres.

L'outil émoussé ne coupera pas nettement les fibres de carbone engendrant une mauvaise qualité dimensionnelle du trou et une forte probabilité d'avoir un délaminage important en sortie.

Une des spécificités des multi-matériaux est l'interface entre les matériaux constituant l'empilement. Cette zone est sujette à des phénomènes spécifiques tels que :

- ◆ une dégradation de la matrice sous la forme d'un anneau,
- ◆ la formation d'un faible écoulement de matière pouvant s'apparenter à une bavure.

Quel que soit le sens de l'empilement, la forte élévation de la température pendant le perçage et l'usure de l'outil entraînent une dégradation de la matrice allant de la décoloration de la matrice jusqu'à la disparition partielle de celle-ci.

Ce dernier stade de la dégradation est non seulement dû à une très forte production de chaleur mais également à la modification de la géométrie de coupe du foret (acuité d'arête, copeau adhérent). Ces deux phénomènes réunis engendrent une disparition de la matrice sous l'effet de la chaleur mettant les fibres à nu, additionnée au délaminage provoqué par la mauvaise évacuation des copeaux.

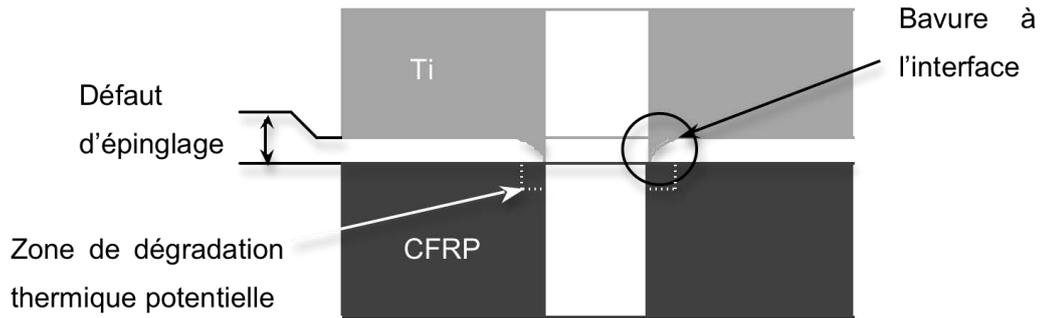


Figure I-33 : Défaits à l'interface d'un empilement Ti/CFRP.

Lorsque le titane est placé en premier un deuxième type de phénomène peut avoir lieu. Celui-ci peut se manifester lorsqu'un défaut survient au niveau de l'épinglage de l'empilement. En effet, industriellement, avant de percer la structure, un épinglage (cf. Figure I-34) est réalisé pour maintenir les deux parties du multi-matériaux l'une contre l'autre afin d'éliminer les jeux potentiels. Lorsque celui-ci est défailant, un espacement se crée entre les deux matériaux laissant la place à un léger écoulement de matière assimilable à une bavure (cf. Figure I-33).

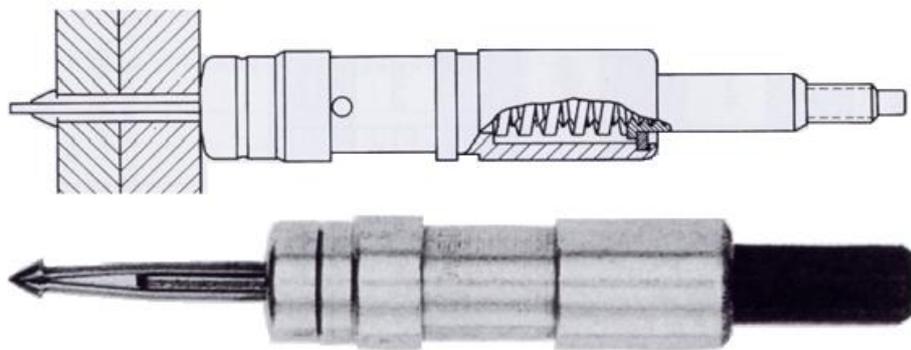


Figure I-34: Epingle Monogram® [Mono 10].

En conclusion, l'usinage d'un empilement entraîne des difficultés supplémentaires par rapport à l'usinage des matériaux constituant l'empilement pris séparément.

L'analyse des différentes séquences d'empilement n'a pas permis de dégager un empilement favorisant l'apparition des défauts. Dans une très grande majorité des cas, la séquence de l'empilement est imposée par les contraintes de conception. L'opérateur devra

donc s'adapter aux défauts potentiels en orientant le choix des outils et en adaptant les paramètres de perçage (lubrification, conditions de coupe, système d'aspiration).

### I.3.1. Empilement CFRP / Aluminium

A l'image de l'empilement CFRP/Ti, cet empilement met en jeu un matériau fortement anisotrope (à l'exception des empilements quasi-isotrope) et fibreux, le composite, avec un matériau isotrope, l'aluminium. Toutefois le perçage de l'aluminium est beaucoup moins contraignant que celui du titane. Sa conductivité thermique est bien plus élevée que celle du titane ( $237$  contre  $20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) entraînant une bien moindre élévation de température pendant son perçage.

Toutefois certaines contraintes subsistent, notamment dues aux propriétés collantes de ces deux matériaux. Elles vont engendrer un phénomène de collage matérialisé par la formation d'une arête rapportée venant altérer l'acuité d'arête de coupe de l'outil (cf. Figure I-32). Même si elle ne prend pas la même ampleur dans le titane que dans l'aluminium, cette modification de la géométrie du foret peut engendrer différents phénomènes selon la séquence d'empilement percée.

Dans le cas d'une séquence Al/CFRP, celle-ci aura pour conséquences :

- ◆ une altération de la qualité dimensionnelle du perçage,
- ◆ une forte probabilité d'apparition ou d'amplification de l'écaillage en sortie du composite.

Dans le cas d'une séquence CFRP/Al, la perte d'acuité d'arête conjuguée à l'élévation de la température va engendrer la formation d'une bavure en sortie de l'aluminium.

Une autre difficulté rencontrée lors du perçage de l'aluminium est la production de copeaux longs, engendrant lors de leur remontée le long de la goujure de l'outil, une altération de la paroi du perçage [Goul 06] [Brink 02] [Zito 10].

De manière similaire à une séquence d'empilement Ti/CFRP, lorsque dans la séquence, l'aluminium précède le composite, l'arête rapportée, fréquente pendant le perçage de l'aluminium, vient augmenter significativement le rayon d'acuité d'arête de l'outil et modifier également la géométrie de coupe.

En ce qui concerne les outils utilisés, il n'y a pas de contre indication à l'utilisation d'outils munis d'un revêtement diamant, l'aluminium ne réagissant pas chimiquement avec le carbone comme cela peut se produire pour le titane.

Malgré les propriétés mécaniques et thermiques différentes, les critères de qualité associés au perçage de l'aluminium et du titane sont en tous points similaires. Les défauts survenant lors du perçage de ces deux matériaux sont de même nature, dans des proportions différentes. Il est donc possible de définir les paramètres quantifiant la qualité d'un empilement couvrant les différentes familles d'empilement.

### I.3.2. Critères de qualité d'un perçage multi-matériaux

Comme nous l'avons vu précédemment, les différents défauts se produisent (cf. Figure I-35) :

- ◆ aux interfaces,
- ◆ sur la paroi du perçage.

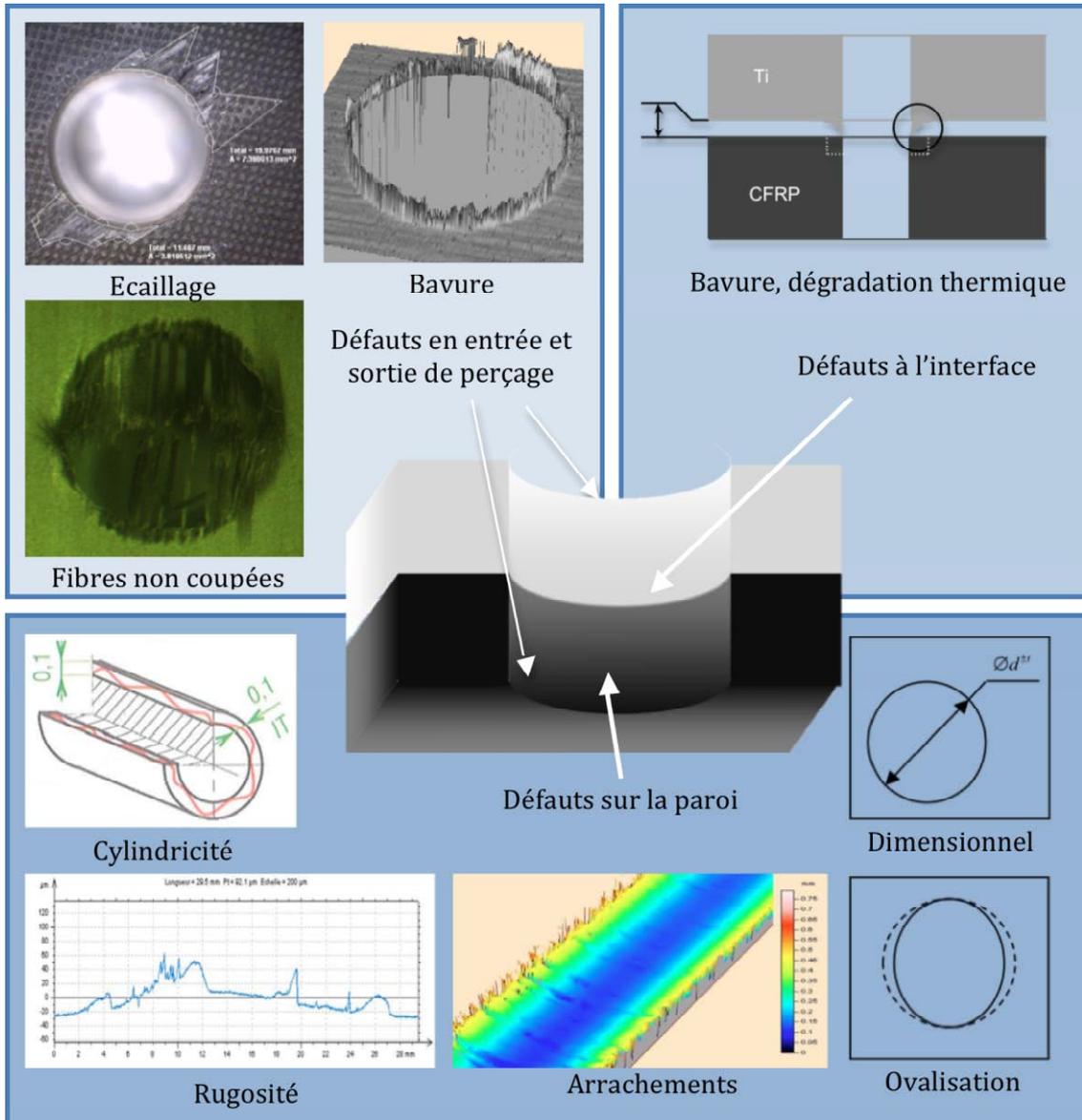


Figure I-35 : Critères de qualité du perçage d'un multi-matériaux CFRP / aluminium.

#### I.3.2.1. Critères de qualité aux interfaces

Les interfaces pour un empilement constitué de deux couches de matériaux sont au nombre de trois :

- ◆ l'interface extérieur/premier matériau, soit l'entrée du multi-matériaux,
- ◆ l'interface premier matériau/deuxième matériau,
- ◆ l'interface deuxième matériau/extérieur, soit la sortie du multi-matériaux.

A l'entrée et sortie de l'empilement les défauts sont de deux types selon le matériau :

- ◆ un délaminage des plis à proximité du bord du perçage également appelé écaillage,
- ◆ une bavure.

Une analyse exhaustive de ces deux critères de qualité ainsi qu'une présentation des moyens de quantification associés ont été réalisées dans les paragraphes I.2.1.1 et I.2.2.1.

Concernant l'interface composite/aluminium, un certain nombre d'observations ont été présentées dans le paragraphe précédent. Celles-ci sont propres à chacun des matériaux constituant l'empilement.

En résumé, dans la couche de carbone/époxy, ces défauts sont matérialisés par une dégradation superficielle de la matrice engendrée par l'élévation de la température dans l'outil et dans la couche attenante (aluminium) (cf. I.3.1).

Dans l'aluminium, une faiblesse au niveau de l'épingleage des matériaux constituant l'empilement peut engendrer l'apparition d'un jeu. Sous l'action conjuguée de la température et de la dégradation de l'outil, une bavure de faible hauteur peut se produire dans l'interstice contribuant à entretenir le jeu.

#### I.3.2.2. Critères de qualité sur la paroi

De manière analogue aux deux matériaux précédemment étudiés, les critères de qualité sur la paroi sont au nombre de trois :

- ◆ la rugosité,
- ◆ les défauts géométriques (cylindricité, ovalisation),
- ◆ les défauts dimensionnels.

Ils sont tous les trois fortement influencés par la nature très différente des matériaux constituant l'empilement.

Comme décrit précédemment, la rugosité notamment sur les parois du CFRP peut être fortement dégradée par la remontée du copeau d'aluminium lorsque celui-ci est placé en aval du composite. Cette dégradation peut même devenir catastrophique et entraîner l'apparition d'arrachements locaux. Dans les métaux, la formation d'arêtes rapportées sur l'arête de coupe de l'outil entraîne une détérioration de la géométrie de coupe ayant pour conséquence la dégradation de l'état de surface de la paroi usinée.

Concernant les défauts dimensionnels, des études ont montré [Ramu 01] [Kim 04] que l'effet était bien différent dans les deux matériaux constituant l'empilement. Dans l'aluminium, les phénomènes de vibrations dus à la longueur de l'outil, les hautes températures et la formation d'arêtes rapportées engendrent la création d'un perçage au-delà du diamètre nominal. Ce phénomène tend à augmenter au fur et à mesure de l'augmentation de l'usure de l'outil.

Pour les composites, l'effet est inverse puisque la création de l'arête rapportée entraîne une perte d'acuité d'arête engendrant une mauvaise coupe du composite. Comme

---

cela a été décrit précédemment, l'éroussement de l'arête diminue la qualité de la coupe, entraînant un fléchissement des fibres sous l'action de l'outil. Une fois l'arête de coupe passée, ces fibres se remettent en position, diminuant de ce fait le diamètre du perçage. Le diamètre percé est donc inférieur au diamètre nominal et le phénomène tend à augmenter parallèlement à l'usure de l'outil. On peut également ajouter que le resserrement des fibres sur l'outil augmente la friction entre ce dernier et la paroi du perçage. Celle-ci engendre une usure prématurée de l'outil (cf. Figure I-14) et une augmentation de la température au sein du perçage.

Les dispersions sur le diamètre sont donc dépendantes du matériau percé. Dans le cas d'un empilement CFRP/Al, l'effet sur les dispersions des deux couches de matériaux tend à s'opposer. Le diamètre percé est :

- ◆ supérieur au diamètre nominal dans le cas de l'aluminium,
- ◆ inférieur au diamètre nominal dans le cas du CFRP.

La fabrication des outils destinés au perçage de ces matériaux ainsi que les conditions de coupe associées devront donc prendre en compte ces observations en ajustant le diamètre de l'outil par rapport au diamètre nominal et en adaptant les conditions de coupe de manière à limiter les phénomènes d'arêtes rapportées.

Concernant les défauts géométriques, nous avons vu précédemment que les phénomènes d'ovalisation dans les composites étaient favorisés par l'orientation relative de l'arête de coupe par rapport à la direction des fibres. Ce phénomène est toutefois limité lors du perçage de séquences d'empilements quasi-isotropes.

De manière similaire aux dispersions sur le diamètre, indifféremment dans les composites comme dans l'aluminium, les vibrations, les hautes températures et l'usure de l'outil vont engendrer une augmentation du défaut de cylindricité au cours de l'usinage.

## I.4. Conclusions

L'utilisation croissante, notamment dans l'industrie aéronautique, des multi-matériaux CFRP/Al a engendré un certain nombre de problématiques. Leur perçage constitue un nouveau challenge dans le domaine de la coupe des matériaux. Toutefois, les progrès réalisés sur la compréhension de la coupe ainsi que sur les moyens technologiques permettent aujourd'hui de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu. Sous l'impulsion des nouvelles avancées dans le domaine des matériaux et notamment les matériaux composites, un grand nombre d'études se sont portées sur le développement de nouvelles géométries et de nouveaux revêtements d'outils. Celles-ci ont permis de mieux appréhender l'influence des paramètres géométriques de l'outil sur les phénomènes de coupe. L'intégration de ces matériaux dans le domaine aéronautique a engendré la mise en place de critères de qualité aux exigences élevées. Ces différents critères ont été analysés et les moyens de les quantifier ont été décrits. Le tableau ci-dessous (cf. Figure I-36) recense les défauts spécifiques à chacun des matériaux de l'empilement, leurs causes et les solutions à apporter.

---

A partir du travail bibliographique réalisé, la suite de l'étude va s'attacher à établir un modèle prédictif des performances du perçage multi-matériaux.

	Phénomènes de coupe	Usures de l'outil	Défauts spécifiques (*)	Solutions
CFRP	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Frictions importantes outil/fibres</li> <li>▪ Resserrement des fibres sur l'outil</li> <li>▪ Production de chaleur importante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abrasion du flan de l'outil par les fibres</li> <li>▪ Emoussement de l'arête de coupe, perte d'acuité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Délaminage</li> <li>▪ Ecaillage en entrée et sortie</li> <li>▪ Dégradation thermique de la matrice</li> <li>▪ Arrachements locaux de fibres sur la paroi du perçage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Préparation de l'âme du foret</li> <li>▪ Rayon d'acuité d'arête faible</li> <li>▪ Utilisation de revêtements contre l'abrasion intense des fibres</li> <li>▪ Limitation des conditions de coupe (<math>f</math> et <math>V_c</math>)</li> </ul>
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Formation d'une arête rapportée</li> <li>▪ Copeau long, difficile à évacuer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modification de la géométrie du foret due aux phénomènes d'adhésions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bavure en entrée et sortie</li> <li>▪ Redépose d'une petite quantité de matière à proximité de l'entrée et de la sortie du perçage.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Utilisation de revêtements pour diminuer l'adhésion du copeau</li> <li>▪ Utilisation de micro lubrification (MQL)</li> </ul>
Multi-Matériaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pas de phénomène de coupe spécifique mais la combinaison de ceux concernant les matériaux de l'empilement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pas d'usure d'outil spécifique mais la combinaison de celles concernant les matériaux de l'empilement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Altération de la paroi du CFRP par la remontée du copeau d'aluminium</li> <li>▪ Défauts à l'interface (bavure de faible ampleur, dégradation thermique)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Utilisation de revêtements spécifiques hautes performances</li> <li>▪ Limitation des conditions de coupe (<math>f</math> et <math>V_c</math>)</li> <li>▪ Utilisation de micro lubrification (MQL)</li> </ul>

(\*) Concernant les défauts survenant dans les multi-matériaux, seuls ceux dont l'apparition est spécifique à ce type d'empilement ont été mentionnés. Les défauts spécifiques au CFRP et à l'aluminium concernent également le multi-matériaux.

Figure I-36 : Synthèse des phénomènes et défauts rencontrés lors du perçage d'un multi-matériaux.

---

---

## II. Présentation et mise en œuvre des réseaux de neurones



## Nomenclature

$b_i$  : vecteur des biais [sans unité]

$d$  : diamètre du foret [mm]

$D_{max}$  : diamètre du cercle englobant la totalité de la zone délaminée [mm]

$D_{nom}$  : diamètre nominal du perçage [mm]

$e$  : erreur [%]

$f$  : avance par tour [mm/tour]

$J$  : fonction coût [sans unité]

$F_D$  : facteur de délaminage [sans unité]

$F_z$  : effort de poussée [N]

$F_c$  : effort de coupe [N]

$k$  : terme correctif de la géométrie de l'âme [sans unité]

$K_f$  : pression spécifique de coupe en avance [N/mm<sup>2</sup>]

$M_z$  : moment de coupe [N.m]

$N$  : fréquence de rotation [tr/min]

$p_j$  : vecteur entrée [sans unité]

$V_C$  : vitesse de coupe [m/min]

$W_{ij}$  : matrice des poids [sans unité]



## II.1. Présentation du modèle

L'analyse réalisée au chapitre précédent introduit les difficultés rencontrées pendant le perçage d'un multi-matériaux. Une des principales raisons de cette problématique est l'importante différence de comportement lors de l'usinage des matériaux constituant l'empilement.

Dans le cas des structures aéronautiques notamment, l'opération de perçage des panneaux multi-matériaux se situe juste avant l'assemblage final. Les pièces percées ont donc une forte valeur ajoutée et de ce fait, l'opération de perçage se trouve dans une phase critique du processus d'industrialisation. L'intérêt de pouvoir prédire le moment où la qualité du perçage s'approche des bornes des spécifications (géométriques, dimensionnelles, bavures, délaminages) prend alors tout son sens car les enjeux économiques sont importants. Compte tenu du nombre important de critères de qualité caractérisant le perçage des multi-matériaux, la sortie des bornes de l'un d'eux devient difficilement prévisible.

La mise en place d'un modèle prédictif du perçage multi-matériaux, prenant en compte la globalité des aspects qualitatifs du process, revêt dans ce cas un enjeu technico économique réel.

Ce chapitre présente la mise en place pas à pas du modèle multi-matériaux CFRP/Aluminium. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux modèles prédictifs de type "boîte noire" et aux réseaux de neurones utilisés pour les modéliser.

### II.1.1. Modélisation du perçage

L'opération de perçage, par sa nature et ses outils, présente un véritable challenge quant à sa modélisation. En effet, le confinement de l'outil et l'aspect tridimensionnel de la coupe en font un procédé bien plus difficile à modéliser que la coupe orthogonale. La géométrie complexe du foret (variation des angles de coupe selon la distance à l'axe du foret [Darg 06]) ainsi que l'important gradient de vitesse de coupe ( $V_c$ ) le long de l'arête entraînent une variation importante des conditions de formation du copeau. Ces phénomènes contribuent à complexifier la modélisation de la coupe. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas du perçage composite, où le comportement anisotrope du matériau se combine à l'aspect tridimensionnel du perçage.

### II.1.2. Méthode de modélisation

L'objectif du modèle est de prédire la qualité du perçage réalisé à partir des conditions de coupe ( $f$  et  $N$ ) à un instant donné de la vie d'un foret. Le modèle doit donc prendre en compte les paramètres évoluant pendant la durée de vie de l'outil notamment son usure et ce, pour quantifier les critères qualifiant la qualité du perçage réalisé.

Plusieurs études sur le perçage ont été réalisées au sein des laboratoires LGM<sup>2</sup>B et LMP [Lapo 05] [Darg 06]. Pour mettre en place ces deux modélisations du procédé, différentes approches ont été utilisées.

Devant la grande difficulté que représente la modélisation analytique de la coupe en perçage, S. Laporte est parti de l'hypothèse qu'une technique d'usinage peut être considérée comme une « boîte noire ». Pour un jeu de paramètres d'entrée, celle-ci fournit une réponse que l'on peut décomposer en paramètres de sortie. Cette approche expérimentale consiste à tester différents paramètres géométriques de l'outil à la manière d'un plan d'expérience pour les corrélérer avec des mesures de torseurs des actions mécaniques. Il en résulte une expression simple et linéaire du modèle de coupe expérimental permettant de cartographier la répartition des actions mécaniques tout au long de l'arête de coupe. Son modèle complet ne se limite pas à un modèle comportemental puisque celui-ci établit une corrélation entre les paramètres d'affûtage de l'outil et la qualité des trous percés. L'architecture du modèle complet (cf. Figure II-1) est un modèle géométrique de l'outil, un modèle comportemental et un modèle phénoménologique imbriqués les uns dans les autres. Pour ce faire, les paramètres de sortie du modèle en amont sont les paramètres d'entrée du modèle en aval.

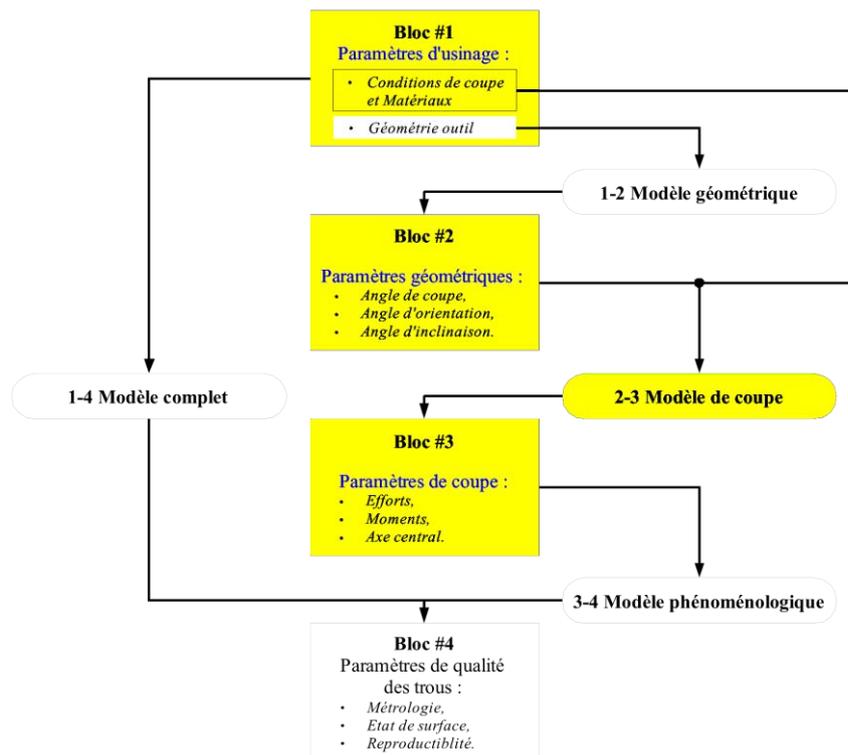


Figure II-1 : Architecture du modèle de coupe de S. Laporte [Lapo 05]

F. Dargnat [Darg 06] a, quant à lui, poussé l'étude un peu plus loin en observant plus en détail le contenu de chaque boîte noire. Pour cela, il a opté pour une modélisation semi-analytique par approche énergétique du procédé. La première partie de l'étude s'est attachée à affiner la modélisation géométrique du foret réalisée par S. Laporte, en prenant en compte la géométrie de l'âme de celui-ci. En sortie de ce modèle, il est alors possible d'obtenir les

angles d'outils le long de l'arête de coupe, qui serviront ensuite à l'application des modèles de calcul thermomécaniques aux différentes interfaces de l'outil (face de coupe et face en dépouille sur l'arête principale ainsi que sur l'âme du foret). Ces derniers permettront de prédire les actions mécaniques et thermiques liées aux phénomènes ayant lieu lors de la coupe.

L'inconvénient de l'aspect analytique de l'étude, est que celle-ci, de par les hypothèses et lois utilisées, se limite à l'étude des matériaux métalliques. Les lois de comportements utilisées pour la modélisation de la coupe s'appliquent exclusivement à cette famille de matériaux. Elles ne sont donc pas transposables à la modélisation des matériaux composites.

Devant la complexité que représente la mise en place d'un modèle comportemental de coupe en perçage composite, notamment l'identification d'une loi de comportement, le choix s'est porté vers une modélisation expérimentale de type « boîte noire » analogue à celle mise en place par S. Laporte.

### II.1.3. Modèle multi-matériaux

L'aspect multi-matériaux ne fait qu'augmenter la difficulté pour réaliser une modélisation de la coupe en perçage. La nature très différente des matériaux, aluminium et CFRP, constituant l'empilement, rend difficile l'établissement d'un modèle comportemental global. Afin de ne pas limiter le domaine d'étude, le choix a également été fait d'opter pour une modélisation capable de s'adapter à une grande variété d'empilements. En d'autres termes, le modèle doit être capable de déterminer la qualité d'un trou percé, pour un grand nombre d'épaisseurs et de séquences d'empilement différentes.

L'analyse qualitative précédemment réalisée sur les multi-matériaux a mis en exergue l'importance des zones à l'interface de deux matériaux constituant l'empilement. Celles-ci sont le lieu de phénomènes complexes difficiles à prendre en compte dans l'établissement d'un modèle physique.

Pour tenir compte des différentes zones de coupe, l'option la plus envisageable est de scinder le modèle global pour que celui-ci soit constitué de plusieurs modèles mono-matériau indépendants, mis bout à bout pour reconstituer l'empilement multicouche. Chaque modèle expérimental mono-matériau (CFRP ou aluminium) est établi à l'aide d'essais réalisés sur chacun des matériaux indépendamment. Les paramètres de sortie du premier matériau de l'empilement alimentent le modèle expérimental mono-matériau suivant (le deuxième matériau de l'empilement) pour reconstituer le modèle global multi-matériaux. L'architecture du modèle global sera donc constituée de plusieurs blocs successifs, représentant chacun un matériau de la séquence (cf. Figure II-2).

#### II.1.4. Choix des paramètres du modèle

Un certain nombre de contraintes doivent être prises en compte quant à la définition du jeu des paramètres d'entrée. Les analyses précédentes ont permis de déterminer les objectifs de la mise en place du modèle. Pour rappel, celui-ci doit permettre à partir d'un outil donné et les conditions de coupe qui lui sont associées, de prédire la qualité du perçage réalisé. Ces informations nous renseignent sur la nature des paramètres d'entrée et de sortie du modèle. Les paramètres de sortie du modèle global devront donc permettre de quantifier la qualité géométrique et dimensionnelle du trou ainsi que l'amplitude des éventuels défauts (bavures, écaillages). Les paramètres d'entrée sont, quant à eux, les conditions de coupe et la nature de l'empilement.

Pour être le plus proche possible des réalités expérimentales, des contraintes supplémentaires vont venir se greffer à celles imposées par les objectifs de l'étude. Le premier paragraphe de cette étude a mis en avant l'influence de l'usure de l'outil sur la qualité du perçage. La nature, l'importance et la rapidité de ces pertes de propriétés sont différentes d'un matériau à l'autre et également fonction des conditions de coupe utilisées. Par conséquent, selon le type de séquence d'empilement percé, l'usure de l'outil à un instant  $t$  sera fonction de l'historique des couches traversées précédemment.

La prise en compte de l'historique de l'outil dans le modèle matériau est donc un paramètre prépondérant dans la mise en place du modèle global. Un paramètre d'usure doit donc être ajouté aux paramètres précédemment déterminés. Ce dernier doit assurer deux fonctions :

- ◆ modéliser l'usure de l'outil,
- ◆ assurer l'imbrication des différents modèles matériaux pour constituer le modèle multi-matériaux.

Par conséquent ce paramètre supplémentaire devra permettre de prendre en compte l'usure de l'outil lors du perçage d'une couche de nature et d'épaisseur données et pour des conditions de coupe figées. L'usure résultant du passage dans un premier matériau sera donc quantifiée en sortie du premier modèle et intégrée en entrée du suivant afin que celle-ci soit prise en compte dans la quantification des critères de qualité du modèle global (cf. Figure II-2).

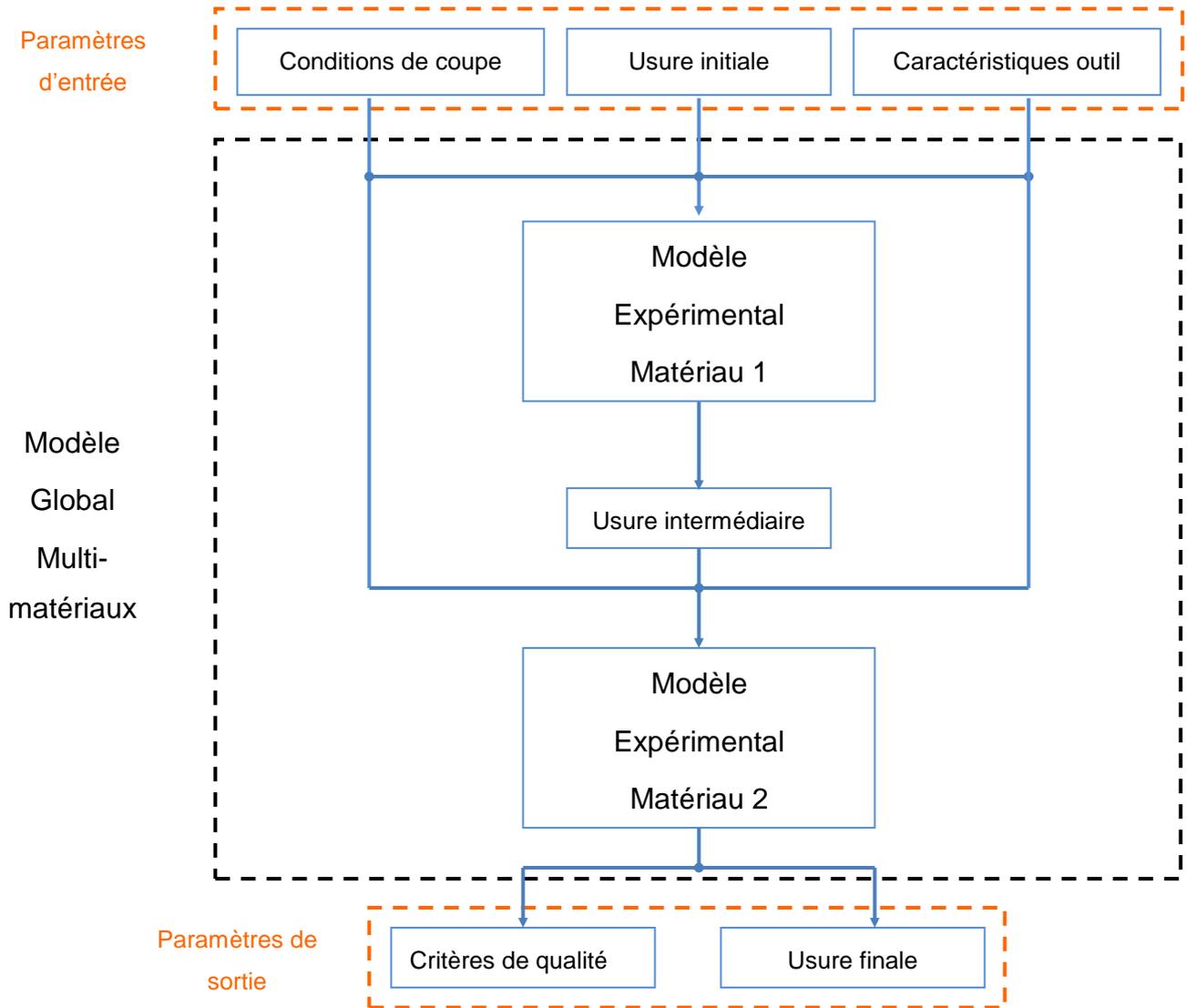


Figure II-2 : Schéma de principe de l'architecture du modèle.

L'architecture du modèle global se présente sous la forme d'un assemblage de plusieurs modèles successifs (cf. Figure II-2). Le nombre d'imbrications est fonction du nombre de matériaux constituant l'empilement multi-matériaux. Le ciment permettant de lier les différentes briques constituant le modèle, est un paramètre d'usure évaluant la santé du foret à un instant donné. Pour ce faire, l'usure sera incrémentée en sortie de chaque modèle matériau puis insérée en entrée du modèle matériau suivant pour se rapprocher des conditions expérimentales.

In fine, le modèle multi-matériaux (CFRP/Aluminium) permettra, en insérant en entrée l'état d'usure du foret et les conditions de coupe du perçage, de déterminer l'état d'usure du foret en sortie ainsi que la qualité du trou réalisé. Ce modèle est valable pour différentes séquences et épaisseurs de matériaux. La qualité globale du perçage est renseignée couche après couche, en tenant compte de l'influence des dégradations de l'outil au cours du perçage.

La partie suivante va détailler un peu plus précisément la structure du modèle matériau. Celle-ci va recentrer l'étude sur la démarche utilisée pour déterminer les modèles matériaux.

De manière similaire aux travaux de S. Laporte, le perçage de chaque matériau sera assimilé à une boîte noire mais le modèle utilisé pour notre étude ne sera pas multilinéaire. Le choix a été fait d'utiliser les réseaux de neurones pour mettre en place les modèles expérimentaux. Différentes raisons ont guidé ce choix, notamment le fait que ces derniers s'associent très bien à une démarche expérimentale de type boîte noire. La parcimonie des réseaux de neurones est également un point important. Les réseaux parcimonieux en nombre de paramètres sont de ce fait parcimonieux en nombre d'essais. Cette diminution du nombre d'essais revêt un intérêt économique important compte tenu de la réduction significative des coûts de mise en place des modèles expérimentaux mono-matériaux. La suite de l'étude va présenter et justifier leur emploi.

## II.2. Réseaux de neurones

### II.2.1. Introduction

Plusieurs méthodes permettent de mettre en œuvre une modélisation de type « boîte noire ». La première, utilisée par S. Laporte, consiste à opter dans un premier temps pour une démarche plan d'expérience pour fixer le nombre d'essais nécessaires ainsi que les niveaux des paramètres par l'intermédiaire de méthodes type Taguchi [Tagu 86]. Puis dans un second temps, la méthode se différencie de la démarche classique en établissant un modèle multilinéaire, dont la régression sera effectuée suivant un critère des moindres carrés.

Concernant la modélisation d'un multi-matériaux, le problème est tout autre. Comme nous l'avons vu précédemment (cf. I.3), lors du perçage d'un multi-matériaux, l'outil traverse des zones aux comportements bien distincts. Il est difficilement concevable que les phénomènes se manifestant à l'entrée, en sortie de perçage et surtout à l'interface soient linéaires. Le choix a donc été d'opter pour un modèle non linéaire.

Aux contraintes scientifiques, viennent se greffer les contraintes économiques. En effet, le coût d'une campagne d'essais de perçage multi-matériaux est élevé. Le prix des outils destinés au perçage des multi-matériaux ainsi que celui de la matière elle-même, en particulier le composite, nécessitent de quantifier le nombre d'essais au plus juste.

Dans le domaine de la modélisation non linéaire par apprentissage, une approche sous un angle différent a fait son apparition depuis près de vingt ans : les réseaux de neurones. Les derniers développements apportés à cette méthode, en font un outil puissant permettant pour un échantillon de population réduit d'offrir une simplicité et une rapidité de mise en place intéressantes [Drey 02]. Une diminution du nombre d'essais et par conséquent de leurs coûts peut être envisagée par rapport à la démarche « plan d'expérience ». La base

de données destinée à alimenter le réseau peut également être enrichie a posteriori par une nouvelle campagne d'essais tout en conservant la même architecture de l'algorithme.

## II.2.2. Le cerveau humain

Les formidables inventions de la nature sont une source d'inspiration intarissable pour la communauté scientifique. On compte par centaines les inventions suggérées par la nature : le Velcro® par le fruit de bardane, la ventouse par la pieuvre mais également l'avion par les oiseaux, insectes et chauve-souris (cf. Figure II-3).



*Figure II-3 : Invention de l'avion par Clément Adler. [Wiki 10]*

L'être humain, notamment son cerveau, est une incroyable machine dont les rouages sont petit à petit percés par les avancées scientifiques de ce dernier siècle. Les découvertes dans les neurosciences ont été des sources d'inspiration pour quelques mathématiciens dont les travaux ont permis de développer des algorithmes dits « génétiques » dont l'architecture et l'apprentissage imitent le fonctionnement du cerveau humain et plus particulièrement son réseau de neurones [McCu 43]. Cette partie, volontairement incomplète, présentera succinctement la structure et l'organisation du cerveau humain.

Celui-ci est constitué d'environ 100 milliards de neurones. Les neurobiologistes savent que chaque neurone naturel est lui-même connecté à parfois quelques milliers d'autres via 100000 milliards de connexions. Les informations sont transmises en envoyant des ondes de dépolarisation (assimilables à des pics électriques). Le neurone est constitué de trois composantes principales : les dendrites, le corps cellulaire et l'axone (cf. Figure II-4). Les dendrites forment un maillage de récepteurs nerveux qui permettent d'acheminer les signaux électriques vers le corps du neurone. Celui-ci agit à la manière d'un intégrateur, en accumulant des charges électriques. Une fois suffisamment excité, il engendre un potentiel électrique qui se propage à travers son axone, fibre nerveuse, pour éventuellement venir exciter d'autres axones. Le point de contact entre l'axone d'un neurone et la dendrite d'un autre neurone s'appelle la synapse. De façon grossièrement similaire, les neurones artificiels

sont connectés entre eux par des liaisons pondérées et unidirectionnelles. Un réseau de neurones peut donc se représenter par un réseau ou graphe orienté dont les nœuds sont les neurones artificiels.

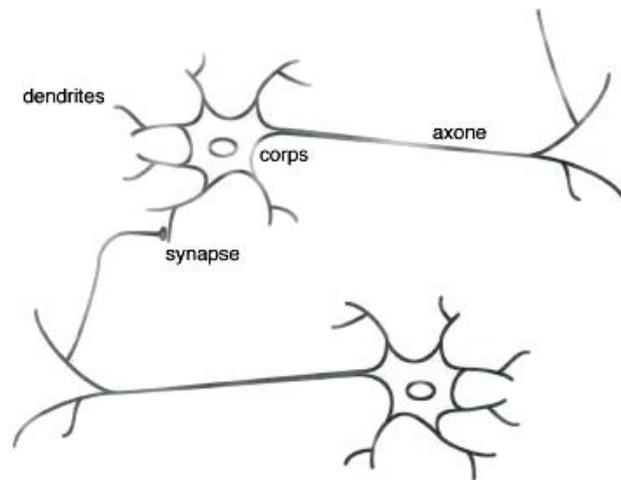


Figure II-4 Schéma d'un neurone biologique [Pari 04]

#### II.2.2.1. En quelques chiffres

Pour résumer en quelques chiffres, le cerveau humain c'est :

- ◆ pas plus de 10 catégories de neurones (aucune exclusivité humaine),
- ◆ 1000 synapses par neurones,
- ◆ la vitesse de propagation de l'influx est de l'ordre de 100 m/s,
- ◆ le nombre de neurones décroît après la naissance,
- ◆ le cerveau est capable de réaliser de  $2 \times 10^{15}$  à  $2 \times 10^{19}$  opérations logiques par seconde (un processeur type Pentium IV en réalise  $2 \times 10^{11}$ ),
- ◆ il lui faut seulement 120 millisecondes pour répondre à un stimulus visuel.

#### II.2.3. Applications

Les réseaux de neurones dont les premières applications remontent aux années 1940 [McCu 43], ont fait depuis l'objet d'innombrables développements dans des domaines aussi variés que la reconnaissance de formes, le contrôle non destructif, le filtrage d'informations textuelles, la bio ingénierie, la formulation de matériaux nouveaux, la robotique mais également la finance. Des applications plus en rapport avec le domaine de la productique ont été développées notamment dans l'élaboration de modèles prédictifs ou dans le cadre de la mise en place d'un monitoring de process. Ces derniers ont été appliqués à la modélisation des efforts en tournage [Sant 96], de l'usure d'outil [Pand 06] [Patr 07] [Pand 08], de la rugosité mais aussi à la modélisation de la formation de la bavure dans l'aluminium [Begõ 05]

et du délaminage pendant le perçage des composites [Karn 08]. Dans ces études, différents types de réseaux et algorithmes d'entraînements sont utilisés. Pour réaliser un choix pertinent quant à l'architecture du réseau, un recensement préalable doit être réalisé en amont, pour établir une comparaison selon divers critères. Ces critères sont :

- ◆ le nombre d'itérations,
- ◆ la performance du réseau.

Pour rentrer dans la phase de sélection, l'architecture d'un réseau de neurones va être détaillée pour mieux comprendre son fonctionnement. La partie qui va suivre a été réalisée à partir des travaux de synthèse de G. Dreyfus [Drey 02] et M. Parizeau [Pari 04].

### II.2.3.1. Composition d'un neurone

Un réseau de neurones est constitué d'un certain nombre de neurones organisés en couche. Dans un premier temps, l'étude va se focaliser sur la structure d'un neurone, ses entrées et ses sorties.

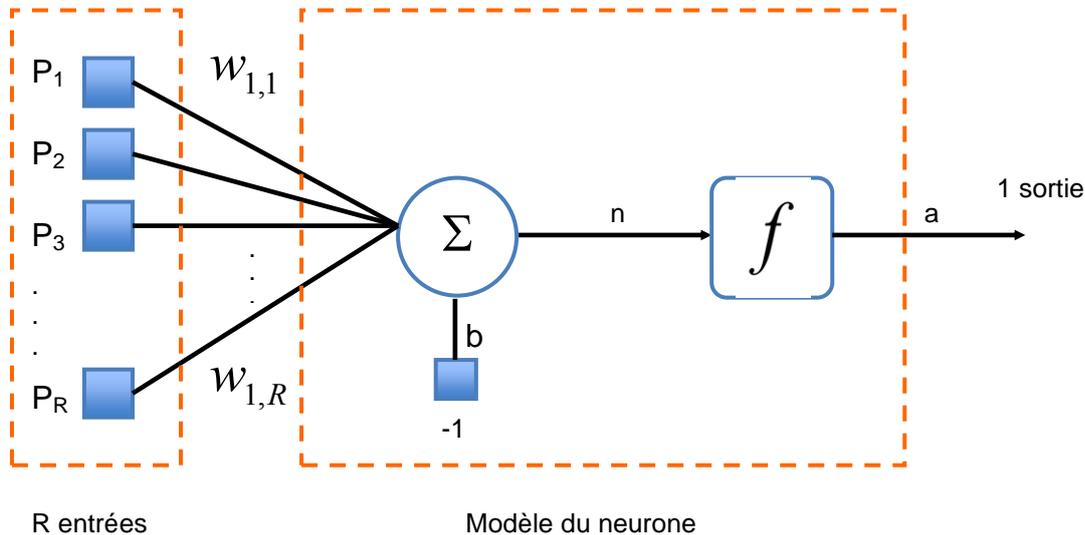


Figure II-5 : Modèle d'un neurone artificiel.

Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur réalisant la somme pondérée de ses entrées (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>...P<sub>R</sub>) (cf. Figure II-5). La sortie n de l'intégrateur est donnée par l'équation suivante :

$$n = \sum_{j=1}^R w_{1,j} P_j - b \quad (II.1)$$

que l'on peut aussi écrire sous forme matricielle :

$$n = w^T P - b \quad (II.2)$$

Cette sortie intermédiaire correspond à une somme pondérée des poids et des entrées moins ce qu'on nomme le biais b du neurone aussi appelé seuil d'activation. Lorsque la somme pondérée est supérieure au seuil, le neurone devient actif, entraînant une propagation vers l'avant. Dans le cas contraire, le neurone est au repos.

Le résultat  $n$  de cette somme, appelé niveau d'activation du neurone, est ensuite transformé par une fonction de transfert  $f$  produisant la sortie  $a$  du neurone. Les  $R$  variables d'entrées correspondent au vecteur  $P=[P_1P_2P_3\dots P_R]^T$  appelé entrées du neurone. La pondération est réalisée par le vecteur des poids  $W=[W_{1,1}W_{1,2}W_{1,3}\dots W_{1,R}]^T$  également désigné sous le nom de poids synaptiques en raison des inspirations biologiques des réseaux de neurone.

La sortie du neurone est quant à elle, une fonction du niveau d'activation du neurone. Elle peut donc s'écrire :

$$a = f(n) = f(w^T P - b) \tag{II.3}$$

Si l'on remplace  $w^T$  par une matrice d'une seule ligne  $W$ , on obtient la forme générale suivante :

$$a = f(WP - b) \tag{II.4}$$

L'équation II.4 nous amène à introduire un schéma de modèle plus compact (cf. Figure II-6).

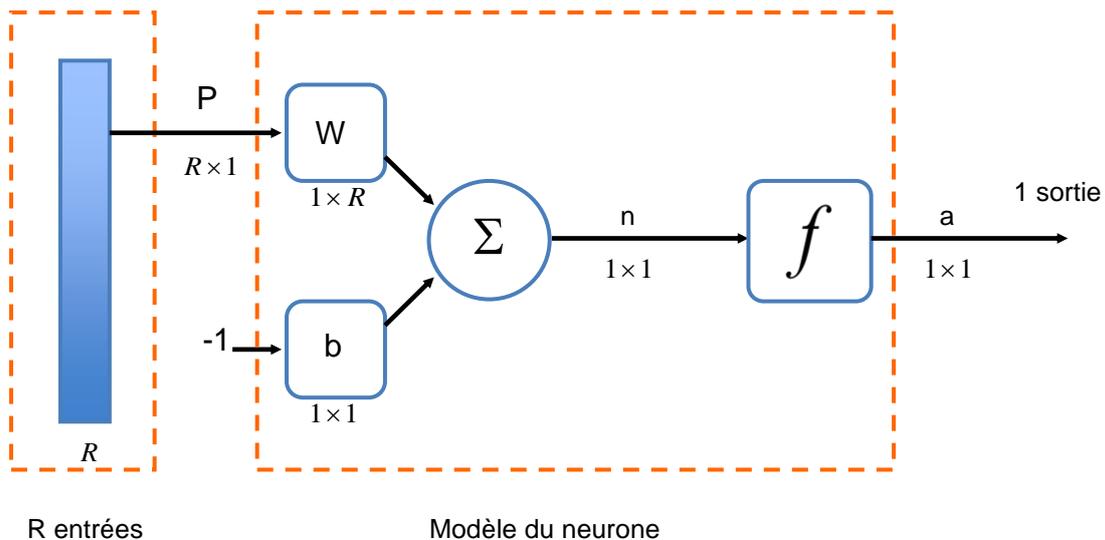


Figure II-6 : Représentation matricielle du modèle d'un neurone artificiel.

Concernant la fonction d'activation  $f$ , celle-ci peut être de différentes natures selon l'application du réseau de neurones. Les trois fonctions les plus fréquemment utilisées sont les fonctions suivantes :

- Seuil (cf. Figure II-7-a),
- Linéaire (cf. Figure II-7-b),
- Sigmoidale (cf. Figure II-7-c).

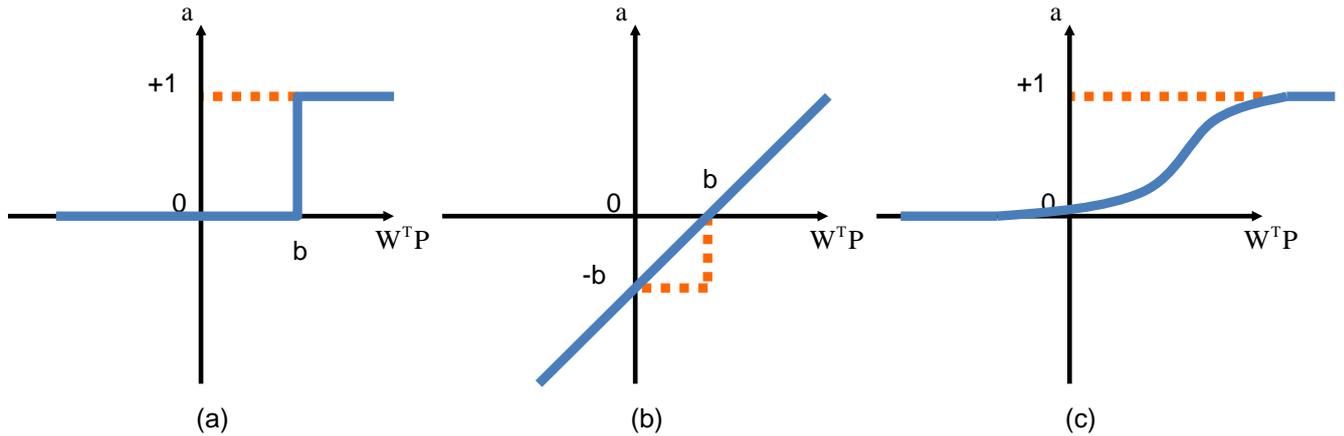


Figure II-7 : Différentes fonctions d'activations.

Dans la suite de l'étude, nous verrons que dans la très grande majorité des cas, les fonctions d'activations utilisées dans le cadre de l'établissement d'un modèle prédictif sont les fonctions sigmoïdes (cf. Figure II-7-c) et les fonctions linéaires (cf. Figure II-7-b).

L'utilisation des fonctions sigmoïdes se justifie par plusieurs raisons :

- ◆ elles sont non polynomiales, permettant de ne pas limiter la puissance du calcul du réseau obtenu [Lesh 93],
- ◆ elles sont indéfiniment, continument et rapidement dérivables.

Celles-ci peuvent être remplacées par des fonctions, comme elles, symétriques par rapport à l'origine telles que les fonctions arctangente ou tangente hyperbolique.

En conclusion, un neurone réalise simplement une fonction non linéaire, paramétrée, de ses variables d'entrée. L'intérêt des neurones réside dans les propriétés qui résultent de leur association en réseaux, c'est-à-dire de la composition des fonctions non linéaires réalisées par chacun des neurones.

### II.2.3.2. Architecture d'un réseau

Un réseau de neurones est un maillage de plusieurs neurones, généralement organisé en couches. Les  $S$  neurones d'une même couche sont tous branchés aux  $R$  entrées (cf. Figure II-8). On dit alors que la couche est totalement connectée. Un poids  $w_{i,j}$ , désignant le poids de la connexion qui relie le neurone  $i$  à son entrée  $j$ , est associé à chacune des connexions. L'ensemble des poids d'une couche forme donc la matrice  $W$  de dimension  $S \times R$ . Chaque couche possède sa propre matrice de poids  $W^k$ , où  $k$  désigne l'indice de couche.

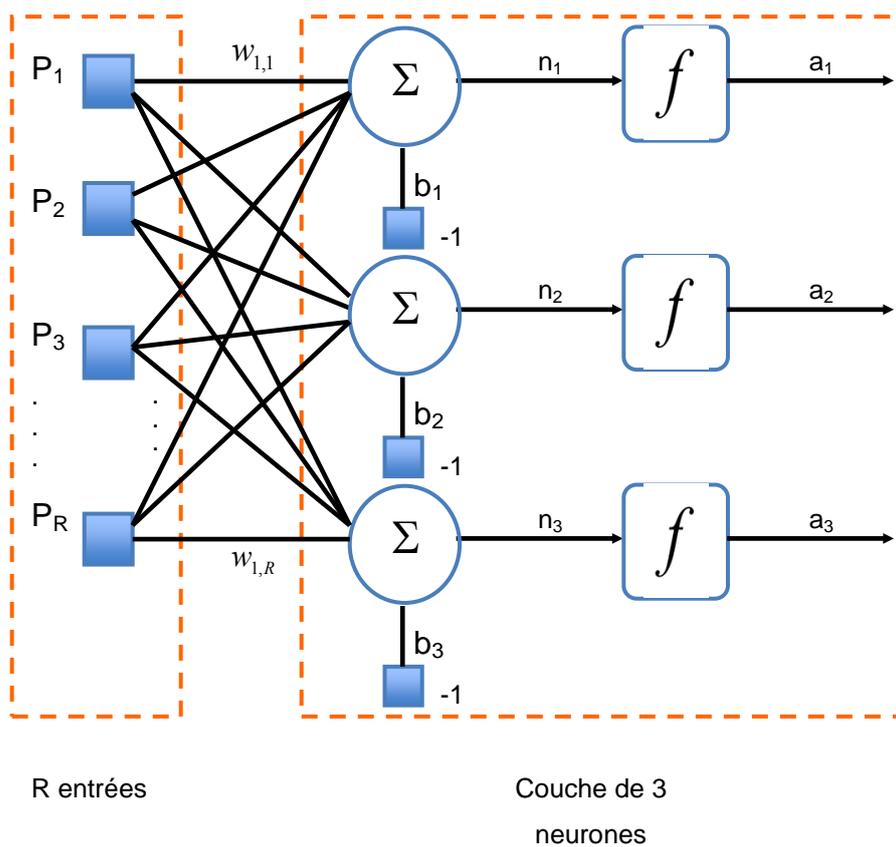


Figure II-8 : Couche de S neurones.

Dans cette étude, les réseaux de neurones sont utilisés pour réaliser une approximation d'une fonction entre les entrées du problème et les sorties de celui-ci. L'utilisation d'un réseau de neurones multicouche est alors nécessaire (cf. Figure II-9). Un réseau multicouche n'est rien d'autre qu'un assemblage de couches concaténées les unes aux autres, de la gauche vers la droite, en prenant les sorties d'une couche pour les injecter comme entrée dans la suivante. La dernière couche est nommée « couche de sortie » et les couches la précédant sont nommées "couches cachées".

Concernant l'architecture du réseau, quelques éléments permettent d'aiguiller la recherche, en particulier les travaux de K. Hornik [Horn 89] sur l'approximation par les réseaux de neurones. Toute fonction bornée suffisamment régulière peut être approchée uniformément, avec une précision arbitraire, dans un domaine fini de l'espace de ses variables, par un réseau de neurones comportant une couche de neurones cachée en nombre fini, possédant tous la même fonction d'activation, et un neurone de sortie linéaire.

Le nombre de neurones sur la couche de sortie est quant à lui déterminé par les spécifications du problème. Celui-ci dépend de la taille du vecteur sortie. Si, par exemple, le vecteur de sortie est de taille  $3 \times 1$ , la couche de sortie comptera alors 3 neurones.

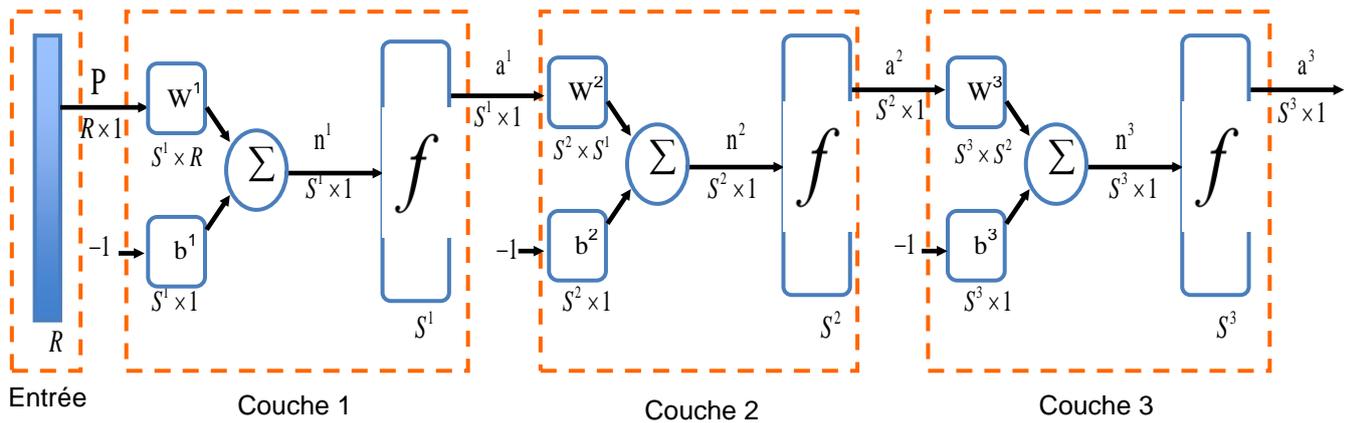


Figure II-9 : Réseau de neurones de trois couches.

La mise en place d'un modèle par la méthodologie réseaux de neurones est réalisée en deux étapes (cf. Figure II-10) :

- ◆ une phase d'étalonnage du réseau également appelée apprentissage,
- ◆ une phase d'exploitation, une fois l'étape précédente terminée.

La procédure d'apprentissage va permettre d'estimer les paramètres de ses neurones. Cette procédure est réalisée par l'intermédiaire d'algorithmes d'entraînement (cf. Figure II-11) dont les performances conditionneront la qualité de la prédiction du modèle. Ces éléments seront abordés dans le prochain paragraphe.

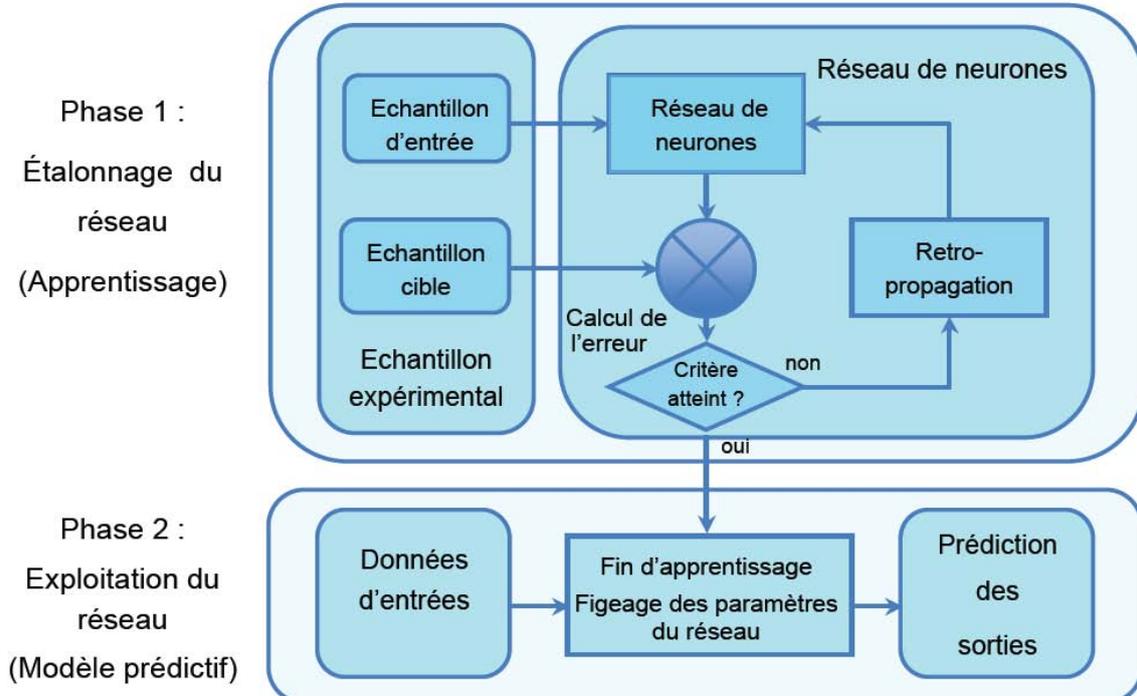


Figure II-10 : Mise en place d'un modèle prédictif par les réseaux de neurones.

### II.2.3.3. L'apprentissage

Parmi les propriétés usuelles pour un réseau de neurones, la plus fondamentale est sûrement la capacité à apprendre de son environnement, à améliorer sa performance au travers d'un processus d'apprentissage. L'apprentissage est un processus dynamique et itératif permettant de modifier les paramètres d'un réseau pour réaliser la fonction entrée/sortie désirée. Il se traduit par une modification de l'efficacité synaptique, c'est-à-dire par un changement dans la valeur des poids qui relient les neurones d'une couche à l'autre.

Différentes tâches peuvent être réalisées par un réseau de neurones selon le type d'apprentissage et l'architecture du réseau:

- ◆ L'approximation,
- ◆ L'association,
- ◆ Le classement.

Concernant cette étude, dans le cas d'une approximation de fonctions, le type de réseaux préconisé est un réseau à apprentissage supervisé [Drey 02]. Celui-ci est caractérisé par la présence d'un échantillon cible, également appelé échantillon "professeur", ou d'un couple de vecteurs entrée/sortie. Pour faire "apprendre" le réseau, les entrées sont propagées une première fois à travers le réseau pour donner en sortie une valeur  $a_k(t)$ . Celle-ci est comparée par soustraction à la sortie du réseau issue de notre échantillon  $s_k(t)$  pour produire une erreur  $e_k(t)$ .

$$e_k(t) = s_k(t) - a_k(t), \quad (\text{II.5})$$

où  $s_k(t)$  est la  $k^{\text{ème}}$  sortie mesurée et  $a_k(t)$  la valeur donnée par le réseau pour la propagation de la  $k^{\text{ème}}$  entrée mesurée.

Celle-ci est rétro propagée (backpropagation) dans le réseau pour modifier son comportement via une procédure itérative intervenant sur les valeurs des poids synaptiques (cf. Figure II-11). L'entrée est ensuite une nouvelle fois propagée à travers le réseau modifié, jusqu'à atteindre un critère d'arrêt. Les paramètres du réseau (poids synaptiques) sont alors figés.

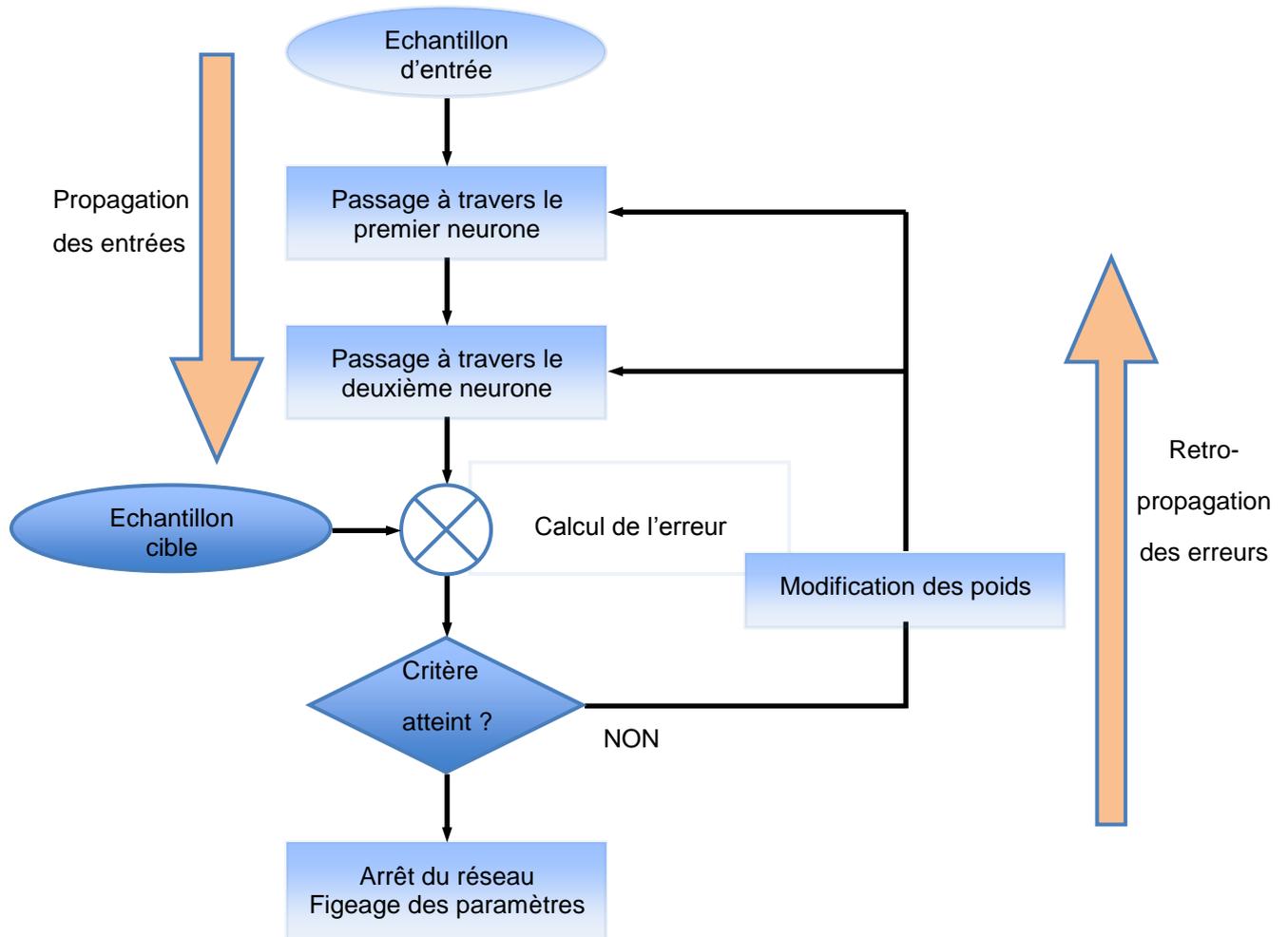


Figure II-11 : Diagramme d'apprentissage supervisé d'un réseau de neurones de deux couches.

Les deux critères d'arrêt les plus communément utilisés consistent à fixer :

- ◆ un nombre maximum d'itérations,
- ◆ une borne inférieure sur la fonction coût  $J(t)$  (cf. Équation II.6).

Cette fonction est abordée plus amplement dans le paragraphe suivant.

Dans la première partie du chapitre, un certain nombre de définitions et propriétés des réseaux de neurones ont été abordées. Celles-ci ont permis de restreindre le domaine d'étude en conservant les réseaux utilisés dans le cas d'approximation de fonctions, nécessaires à l'établissement d'un modèle de type « boîte noire ». Le réseau utilisé dans la suite de l'étude sera donc un réseau à apprentissage supervisé à correction d'erreur.

#### II.2.3.4. Les algorithmes

Cette partie n'est pas destinée à réaliser une analyse exhaustive des différents algorithmes d'entraînement des réseaux de neurones mais va permettre d'introduire un

certain nombre de notions essentielles à la bonne compréhension du reste de l'étude, en particulier concernant la méthode d'affectation des valeurs du vecteur des poids.

Avant d'aborder la partie relative aux algorithmes, il est nécessaire d'introduire la notion de « fonction coût ». L'équation II.5 a permis d'introduire précédemment la notion d'erreur également appelée résidu, définie comme l'écart entre les valeurs données par le modèle et celles issues de l'échantillon entrée/sortie de référence. La fonction coût des moindres carrés, notée  $J(t)$  n'est autre que la somme des carrés des erreurs ou résidus, sur toute la population de l'ensemble d'apprentissage.

$$J(t) = \sum_{k=1}^N (s_k(t) - a_k(t))^2 \quad (\text{II.6})$$

avec  $N$  la taille de l'échantillon entrée/sortie.

L'objectif de l'algorithme d'apprentissage est de minimiser cette fonction et pour cela deux types de méthodes peuvent être mises en place :

- ◆ une méthode non adaptative qui tient compte simultanément de l'ensemble de l'échantillon entrée/sortie,
- ◆ une méthode adaptative qui ne prend en compte qu'une partie de l'échantillon entrée/sortie. Cette méthode est très utile lorsque l'on désire réaliser un apprentissage au fur et à mesure de la disponibilité des entrées/sorties de référence.

Dans le cadre de cette étude, l'échantillon entrée/sortie est disponible dès le début de l'apprentissage. Il est donc préconisé d'utiliser la méthode non adaptative.

Dans le cas de modèles non linéaires, la méthode non adaptative nécessite à chaque itération du processus d'apprentissage les actions suivantes :

- ◆ évaluation du gradient de la fonction de coût,
- ◆ modification des paramètres (poids synaptiques) en fonction du gradient, pour approximer un minimum de la fonction coût.

Différents algorithmes permettent la modification des paramètres à partir du gradient de la fonction coût. La méthode de descente du gradient est la plus communément utilisée et certainement la plus simple à mettre en œuvre [Rume 86]. La direction de descente est simplement opposée à celle du gradient, soit la direction le long de laquelle la fonction coût diminue. Par conséquent, pour l'itération  $i$ , le vecteur des poids peut s'écrire :

$$W(i) = W(i-1) - \eta_i \nabla J(W(i-1)) \quad (\text{II.7})$$

où  $\eta_i$  est le pas d'apprentissage ( $\eta_i > 0$ ).

Le pas d'apprentissage va conditionner la rapidité et la stabilité de l'algorithme. Augmenter la valeur du pas d'apprentissage permet de converger plus rapidement vers un minimum. Seulement à partir d'une valeur de pas trop grande, l'algorithme est susceptible de diverger (cf. Figure II-12-b).

---

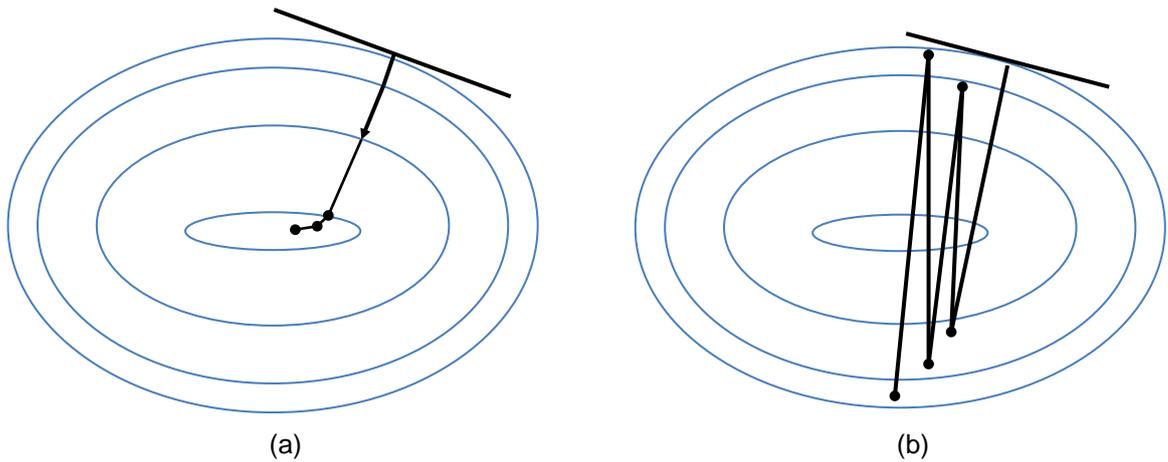


Figure II-12 : Trajectoire de descente du gradient.

### II.3. Le choix du réseau

Avant de se lancer dans l'établissement du modèle multi-matériaux par les réseaux de neurones, une analyse préalable a été réalisée pour présélectionner un certain nombre d'algorithmes d'entraînement. Celle-ci a été réalisée en deux étapes :

- ◆ une analyse bibliographique, sur les différents types de réseaux utilisés pour des problèmes de modélisation type "boîte noire",
- ◆ une étude comparative à partir d'un échantillon entrée/sortie, destinée à déterminer l'architecture et l'algorithme minimisant l'erreur en sortie de modèle.

Cette analyse va également nous permettre d'introduire un certain nombre de paramètres et d'étapes nécessaires pour une utilisation optimale de l'outil réseau de neurones.

#### II.3.1. Analyse bibliographique

L'étude s'est limitée au domaine de la coupe des matériaux dont la majeure partie des applications utilisant les réseaux de neurones concerne la mise en place d'un suivi en ligne (monitoring) pour divers facteurs de qualité, notamment l'usure d'outils.

Les réseaux de neurones principalement utilisés sont les réseaux multicouches dont l'évaluation de la fonction coût est réalisée à l'aide de la méthode de rétro propagation des erreurs (back propagation algorithm) [Sant 96] [Abu 03] [Sanj 05] [Tsao 06] [Patr 07] [Pand 08]. Celle-ci fait partie de la famille des algorithmes d'apprentissage par supervision (cf. Figure II-11) et comporte deux phases :

- ◆ Une phase de propagation, au cours de laquelle les entrées sont utilisées pour calculer la sortie,

- ◆ Une phase de rétro propagation, au cours de laquelle, les poids sont modifiés en fonction de l'erreur quadratique obtenue à l'aide de l'algorithme de descente de gradient.

Un certain nombre d'étapes essentielles au bon déroulement de la démarche réseau de neurones ont été introduites dans ces études, notamment la normalisation et le centrage préalables des valeurs du facteur d'entrée du réseau. Cette étape consiste, pour chaque vecteur d'entrée  $P_i$ , à calculer la moyenne  $\mu_i$ , et l'écart-type  $\sigma_i$  de ses composantes, et à effectuer le changement de variable suivant :

$$P'_i = \frac{P_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (II.8)$$

Des changements de variable différents peuvent être également utilisés, à partir du moment où la moyenne de chaque variable est voisine de zéro, et son écart-type de l'ordre de 1 [Drey 02]. Cette étape de normalisation permet d'adimensionner le vecteur d'entrée. Elle est nécessaire pour éviter que les entrées dont les grandeurs sont les plus importantes, confèrent aux valeurs plus "faibles" une moindre d'influence sur l'apprentissage.

L'ajout d'un terme d'inertie, appelé momentum, est également fréquemment utilisé [Diml 00] [Chak 05] [Pand 06] [Patr 07]. Celui-ci est intégré à l'équation de calcul du poids pour diminuer le risque de divergence de l'algorithme de descente de gradient. Il est noté  $\alpha$ , et n'est autre qu'une variable comprise entre 0 et 1 intégrée à l'équation II.7.

$$W(i) = \alpha W(i-1) - (1-\alpha)\eta_i \nabla J(W(i-1)) \quad (II.9)$$

Plus la valeur de  $\alpha$  est importante, plus le nouveau poids sera fonction du poids précédent. La valeur du momentum produit deux effets distincts selon la situation :

- ◆ lorsque la trajectoire du gradient a tendance à osciller, il contribue à la stabiliser en ralentissant les changements de direction.
- ◆ lorsque le gradient courant pointe dans la même direction que le gradient précédent, le terme d'inertie contribue à augmenter l'ampleur du pas dans cette direction et donc à accélérer la convergence.

Concernant les applications numériques, peu d'études mentionnent les outils utilisés. Les logiciels principalement cités sont MATLAB™ [Karn 08] [Sanj 05], dont la boîte à outil "neural network" est un moyen accessible et efficace pour mettre en œuvre une démarche réseau de neurones, et NEURALWORKS PROFESSIONAL™ [Mani 00].

Parmi les différents travaux analysés, les recherches réalisées par S. R. Karnik [Karn 08] se démarquent par leurs proximités avec le sujet de notre étude. Celles-ci abordent la mise en place d'un modèle prédictif du délaminage en entrée lors du perçage d'un matériau composite. L'algorithme utilisé dans cette étude est l'algorithme de descente de gradient à pas variable. Cette variante de l'algorithme de descente de gradient, utilise un pas d'apprentissage variable pour accélérer la convergence. Ceci permet d'adapter le pas à la valeur de l'erreur ou du résidu à chaque itération.

---

Il est également intéressant de mentionner les résultats obtenus par cette étude. Pour quantifier la précision du réseau de neurones, S. R. Karnik a opté pour le calcul de la valeur absolue de l'erreur soit :

$$\% \mathcal{E}_{absolue} = \left| \frac{(F_{d,exp} - F_{d,pred})}{F_{d,exp}} \right| \times 100 \quad (II.10)$$

où  $F_{d,exp}$  est la valeur expérimentale du facteur de délaminage (cf. I.2.1.1) et  $F_{d,pred}$  est la valeur du facteur de délaminage prédite par le modèle.

L'analyse de ce critère a mis en évidence une variation de la précision selon le positionnement de l'échantillon de vérification choisi. Lorsque les valeurs de l'échantillon de vérification sont comprises dans l'échantillon d'entraînement, l'erreur est de 1,46%, alors qu'elle est de 12,5% lorsque ces deux échantillons sont disjoints. Ce résultat illustre les limites d'extrapolation du réseau de neurones mis en place. Celui-ci est performant à proximité des points d'apprentissage mais il présente des résultats dégradés pour un échantillon de validation bien distinct de l'échantillon d'apprentissage. Des modifications de l'algorithme d'apprentissage permettent d'améliorer la capacité d'un réseau à prédire des valeurs de sortie en dehors de l'échantillon d'apprentissage. Cette méthode, appelée régularisation, sera abordée dans la suite de l'étude.

### II.3.2. Analyse expérimentale

L'étude bibliographique a mis en avant l'omniprésence de l'utilisation de la méthode d'apprentissage par rétro propagation des erreurs. En fonctionnement "normal", le réseau propage les entrées vers l'avant pour déterminer les sorties du modèle. Nous avons vu précédemment (cf. II.2.3.3) que pour que ses sorties soient les plus proches possibles des valeurs cibles, le réseau doit apprendre. Cet apprentissage est réalisé en rétro propageant "vers l'arrière" le gradient des erreurs, entre les sorties et leurs valeurs cibles, pour modifier les poids synaptiques. On parle alors de "rétro propagation des erreurs". L'algorithme d'affectation des valeurs du vecteur poids associé dans la quasi-totalité des études, est l'algorithme de descente de gradient. Cette prédominance s'explique d'une part, par le fait que cet algorithme présente le meilleur compromis précision/rapidité de mise en œuvre. D'autre part, il est historiquement le premier à avoir été développé et est utilisé par défaut par le logiciel Matlab™.

Dans le cadre de cette étude, la sélection de l'algorithme ne s'est pas cantonnée au simple algorithme de descente de gradient. L'utilisation du logiciel MATLAB™ et de sa boîte à outils "Neural Networks Toolbox" met à disposition de l'utilisateur un panel d'algorithmes dans le but de diminuer les temps de calculs ou d'en augmenter la précision.

Cette étude préliminaire, est destinée à valider l'utilisation des réseaux de neurones pour établir un modèle prédictif de type "boîte noire". Dans un second temps, l'analyse s'attachera à sélectionner le couple architecture/algorithme d'entraînement le plus performant pour mettre en place, par la suite, le modèle multi-matériaux.

---

Pour analyser la performance des différentes architectures et algorithmes, une phase d'apprentissage du modèle doit être réalisée. Il est alors nécessaire de disposer d'un échantillon d'entraînement associant un jeu de paramètres d'entrée à un jeu de paramètres de sortie. La constitution d'un échantillon étant coûteuse en temps et en argent, le choix de l'échantillon s'est porté sur des essais de fraisage réalisés précédemment (cf. Figure II-13). Ces derniers ont été sélectionnés pour la proximité des grandeurs des paramètres d'entrées/sorties avec celles utilisées pour la modélisation du perçage multi-matériaux. Dans les deux cas de figure les conditions de coupe sont définies par la vitesse d'avance  $f$  et la fréquence de rotation  $N$ . Les paramètres relatifs à l'épaisseur percée et l'usure de l'outil sont remplacés dans cette analyse par la profondeur de passe et l'angle de coupe.

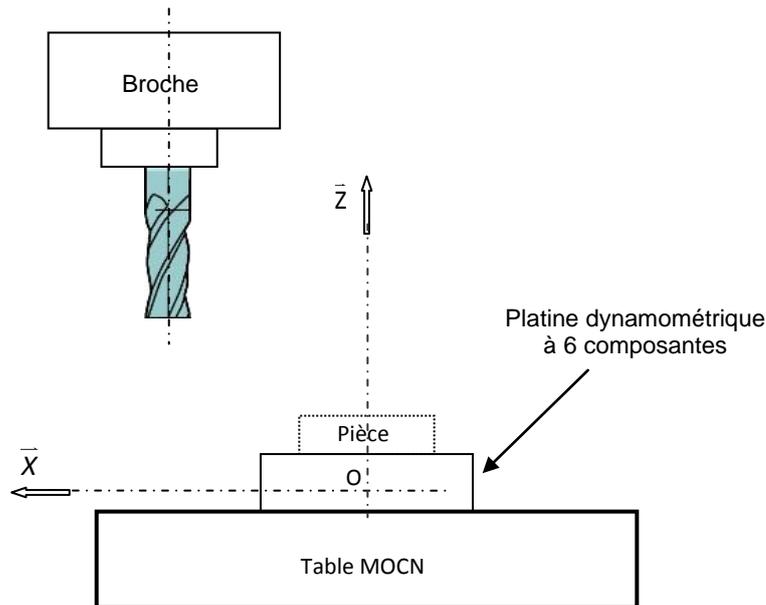


Figure II-13 : Configuration des essais.

Les paramètres de sortie quant à eux sont définis par les actions de coupe dont l'acquisition, effectuée pendant le fraisage, a été réalisée par une platine dynamométrique 6 composantes. Celle-ci doit son existence aux travaux de Y. Couétard [Coué 93] au sein du LMP et permet de mesurer le torseur complet des actions mécaniques.

L'échantillon "professeur" a été constitué en réalisant un plan complet des 4 entrées précédemment citées. Celles-ci ont toutes 2 niveaux à l'exception de l'angle de coupe qui en compte 3, soit un échantillon de 24 essais.

La mise en place d'une modélisation par les réseaux de neurones peut se résumer au choix d'un couple architecture/algorithmes d'entraînement performant par rapport à la problématique de l'étude. Pour sélectionner le couple le plus pertinent, le choix a été fait d'analyser un grand nombre de paramètres influant sur l'un ou l'autre de ces deux éléments.

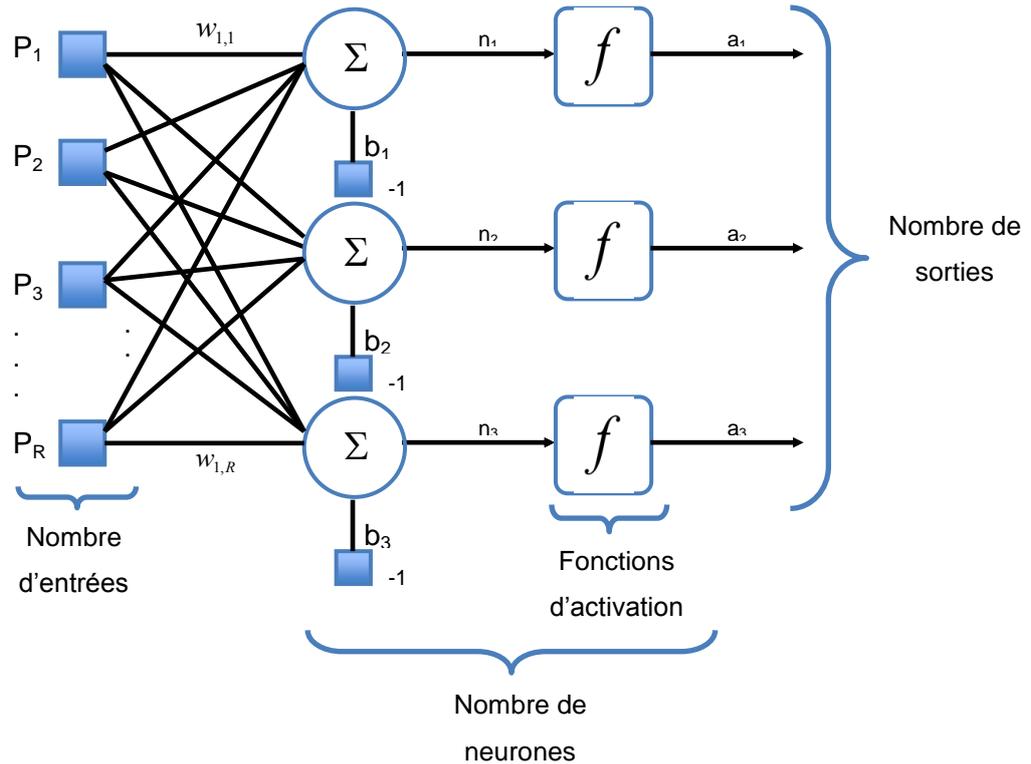


Figure II-14 : Paramètres modifiables sur l'architecture d'un réseau de neurones.

Les paramètres que l'on va pouvoir faire varier dans l'architecture d'un réseau sont (cf. Figure II-14) les suivants :

- ◆ le nombre d'entrées,
- ◆ le nombre de neurones sur les couches cachées,
- ◆ la fonction d'activation d'une couche de neurones,
- ◆ le nombre de sorties fixant le nombre de neurones sur la dernière couche.

Concernant les algorithmes d'entraînement, la méthodologie d'apprentissage (cf. II.2.3.2) ainsi que l'algorithme de rétropropagation des erreurs (cf. II.2.3.3) ont été abordés précédemment. L'adaptation de ce dernier à un réseau multicouche a créé un fort engouement autour des réseaux de neurones depuis le début des années 80. En s'appuyant sur son architecture, un nombre important d'algorithmes ont été développés par la suite. D'un simple ajout d'un terme correctif, à la modification plus globale de l'algorithme, la suite de l'étude va s'attacher à présenter et comparer un certain nombre d'entre eux pour sélectionner un ou plusieurs couples architectures/algorithmes les plus performants. Leurs paramètres seront conservés ensuite dans la mise en place de la modélisation du perçage des multi-matériaux.

La première partie de l'analyse va concerner un réseau de neurones à une seule sortie, l'effort selon l'axe  $z$  ( $F_z$ ), dont l'algorithme d'entraînement, le nombre de couches et le nombre de neurones par couche va varier pour observer l'influence de ces paramètres sur la rapidité et la précision de la méthode.

II.3.2.1. Réseaux de neurones à une couche cachée et une sortie

Dans un premier temps, l'analyse s'est portée sur les réseaux à une seule sortie, l'effort selon l'axe z ( $F_z$ ), pour limiter la quantité d'informations à intégrer au réseau et pouvoir comparer par la suite l'influence de l'augmentation de la taille du vecteur de sortie sur la précision du réseau.

Pour chaque algorithme testé avec cet échantillon, un programme a été réalisé pour déterminer dans diverses configurations architectures/algorithmes, celle offrant la meilleure précision. De la même manière que S. Karnic [Karn 08], la précision est définie comme la valeur absolue du pourcentage d'erreur entre la sortie expérimentale et la sortie prédite par le modèle soit :

$$erreur = \left| \frac{(F_{z,exp} - F_{z,pred})}{F_{z,exp}} \right| \times 100 \tag{II.11}$$

Tout d'abord, seront étudiés les réseaux dont la modification des valeurs du vecteur poids est réalisée à partir de l'algorithme de descente de gradient (cf. II.2.3.4). L'analyse bibliographique (II.3.1) a également permis de présenter une première amélioration par l'ajout d'un momentum. L'analyse qui va suivre va s'attacher à présenter une autre variante de cet algorithme et va comparer leurs précisions.

- Algorithme de descente de gradient

L'analyse de la littérature relative aux réseaux de neurones a montré que cet algorithme est le plus fréquemment utilisé, notamment pour son compromis précision/simplicité de mise en œuvre. Deux algorithmes de la même famille sont également abordés dans cette étude (cf. Figure II-15) :

- ◆ descente de gradient avec momentum,
- ◆ descente de gradient à pas d'apprentissage variable.

Algorithme	Variantes	
Descente de gradient	Ajout d'un terme correctif	Modification de la structure
	Avec momentum	Pas d'apprentissage variable

Figure II-15 : Tableau récapitulatif des différentes variantes étudiées de l'algorithme de descente de gradient.

Les études précédemment réalisées sur cet algorithme ont abordé ses possibles instabilités lorsque le pas d'apprentissage est trop important [Pari 04]. A l'inverse, celui-ci peut devenir très lent avec un pas d'apprentissage trop faible. Pour améliorer la convergence, ces variantes de l'algorithme ont été développées en conservant la même procédure d'optimisation (cf. II-3-1).

Outre le type d'algorithmes utilisés, l'architecture du réseau sera elle aussi modifiée pour vérifier son influence sur l'erreur en sortie de réseau. Dans un premier temps l'étude va concerner un réseau de neurones à une couche cachée et une couche de sortie. La recherche du minimum sur l'erreur de prédiction est réalisée en modifiant le nombre de

neurones sur la couche cachée de 1 à 100. Le nombre de neurones sur la couche de sortie correspond au nombre de sorties du problème soit une seule pour cet essai. Les critères d'arrêt fixés pour cette étude sont :

- ◆ arrêt au delà de  $3 \times 10^5$  itérations,
- ◆ arrêt dès l'obtention d'une erreur quadratique inférieure à  $10^{-6}$ .

Un dernier critère d'arrêt non modifiable par l'utilisateur, consiste à stopper l'entraînement lorsque l'erreur quadratique ne progresse plus ou trop lentement.

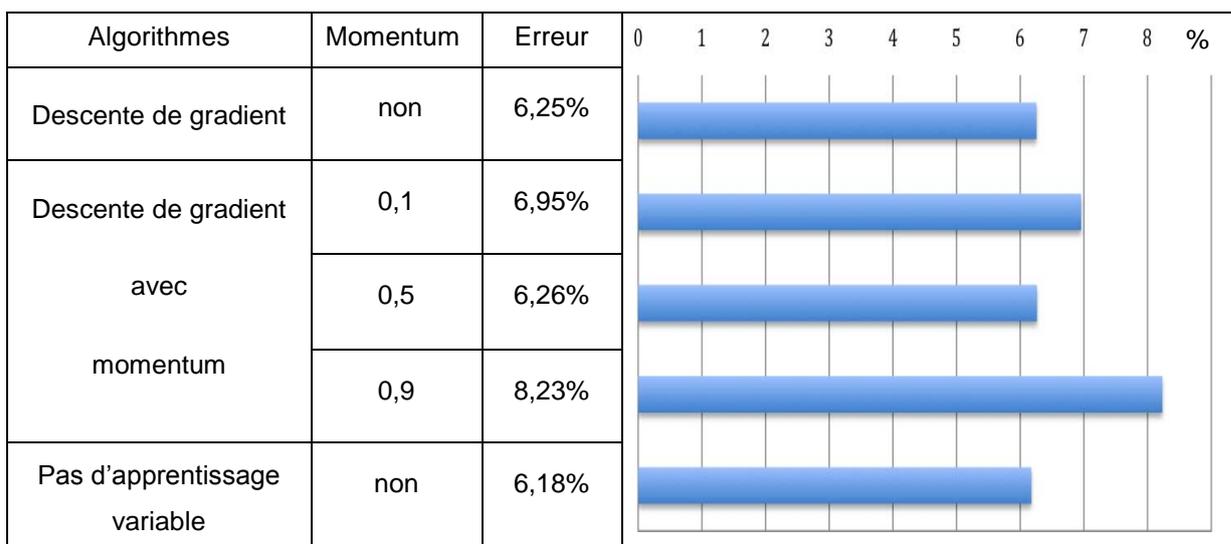


Figure II-16 : Erreur d'un réseau à deux couches de neurones.

L'intérêt de l'ajout d'un momentum semble discutable au vu des résultats (cf. figure II-16). Le momentum est, rappelons le, un terme d'inertie inséré à l'algorithme de descente de gradient, qui permet de stabiliser ou d'accélérer la convergence de la descente de gradient selon la valeur de celui-ci. Pour limiter les temps de calcul, trois valeurs de ce dernier ont été analysées [0,1 ; 0,5 ; 0,9]. Une valeur de momentum égale à 0,9 doit donner de la stabilité à l'algorithme en conservant 90% de la valeur précédente du gradient. Cette stabilité va toutefois au détriment de la rapidité de l'algorithme. La performance du réseau pour cette valeur de momentum est la plus faible observée lors de cette analyse avec une erreur de 8,23%. L'un des inconvénients de l'utilisation de l'algorithme de descente de gradient est qu'il peut rester "bloqué" dans sa descente dans un minimum local. Dans ce cas de figure, l'évolution de la valeur du gradient devient trop lente et le réseau s'arrête.

Une valeur de momentum de 0,1 doit accélérer l'algorithme en conservant seulement 20% de la valeur précédente du gradient. Cependant, cette solution peut contribuer à rendre la descente de gradient instable.

La réalisation d'une analyse pour une valeur de momentum de 0,5 ne se justifie qu'à titre de vérification. Pour cette valeur, l'équation de l'algorithme (II.9) est équivalente à celle de l'algorithme de descente de gradient. Les précisions, sensiblement les mêmes, des réseaux entraînés par ces deux algorithmes confirment la justesse des résultats obtenus.

Une autre façon d'améliorer la convergence est de modifier le pas d'apprentissage pendant l'entraînement. L'algorithme de descente à pas variable adapte la valeur du pas d'apprentissage à l'évolution de l'erreur quadratique. Les modifications de poids peuvent être abandonnées si celles-ci vont au détriment de la diminution de l'erreur. La performance obtenue pour un réseau entraîné par cet algorithme est la meilleure observée dans cette analyse avec une erreur de 6,18%.

Pour augmenter la précision des résultats, une méthode appelée régularisation permet d'améliorer la généralisation du réseau. Cette dernière est définie comme étant la capacité d'un réseau de neurones à approximer des valeurs en dehors des points de mesure. Dans le cadre de la mise en place d'un modèle prédictif, cette propriété est primordiale pour un réseau de neurones. Le modèle prédictif va être issu de l'entraînement d'un réseau de neurones par un échantillon d'essais. La taille de cet échantillon va être la plus réduite possible compte tenu du temps et du coût qu'engendre une campagne d'essais. Améliorer la généralisation du réseau permet d'augmenter la précision du modèle hors des points expérimentaux.

La régularisation consiste à modifier l'équation de la fonction coût en ajoutant un terme défini comme la somme quadratique des moments du réseau [Drey 02].

$$J_{reg}(i) = \gamma J(i) + (1 - \gamma) \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W(i)^2 \right) \quad (II.12)$$

où  $\gamma$  est le taux de performance.

Cette modification engendre une diminution de la valeur des poids et force le réseau à répondre moins brutalement. L'intégration de ce nouveau terme entraîne la mise en place d'une nouvelle analyse destinée à déterminer la valeur optimale du taux de performance. Pour cela, l'algorithme à pas d'apprentissage variable a été régularisé pour des valeurs de taux de performance allant de 0,1 à 0,9 (cf. Figure II-17). Les valeurs extrêmes 0 et 1 ont été écartées de l'analyse car leur étude présente un intérêt modéré. Pour un taux de performance proche de 0, la fonction coût régularisée ne prend pas en compte l'erreur de modélisation. A l'inverse, pour un taux de performance proche de 1, le terme de régularisation ajouté a très peu d'effet sur l'apprentissage.

L'échantillon "professeur" et les critères d'arrêt restent strictement les mêmes que dans l'analyse précédente.

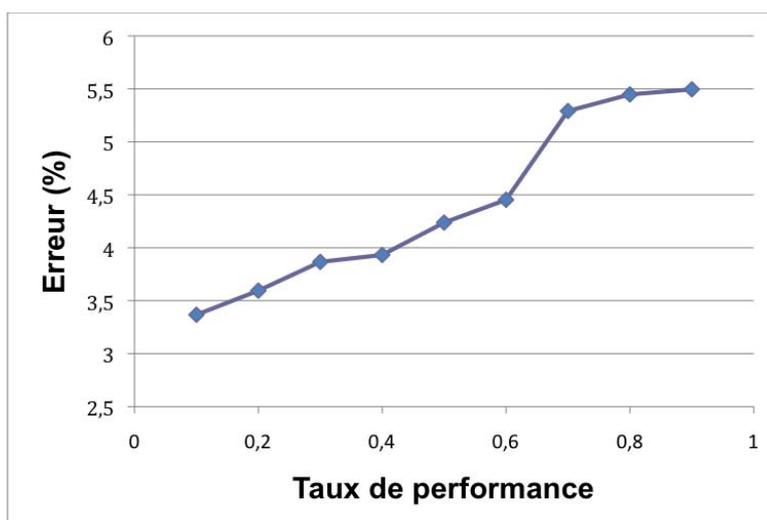


Figure II-17 : Performance du réseau en fonction du taux de performance.

La courbe de la figure II-17 fait apparaître un minimum pour un taux de performance égale à 0,1. Pour cette valeur, on observe une diminution de l'erreur de 40% par rapport à un réseau non régularisé. Dans la suite de l'étude, l'utilisation de la régularisation sera systématiquement intégrée aux algorithmes d'entraînement.

Cette première analyse des réseaux de neurones a permis de faire un tour d'horizon des algorithmes d'entraînement utilisant la méthode de la descente de gradient. Dans un premier temps, l'étude s'est limitée à l'analyse de réseaux à une seule sortie pour simplifier l'analyse.

Les résultats obtenus sont tous satisfaisants quant à leur précision puisque l'erreur n'excède pas 8,5%. Le réseau le plus performant, l'algorithme de descente de gradient à pas variable, a pu être amélioré par une méthode dite de "régularisation" permettant d'obtenir une erreur inférieure à 3,5%.

L'algorithme de descente de gradient n'est pas le seul utilisé pour entraîner les réseaux de neurones. Un certain nombre d'architectures d'algorithmes ont été analysées dans la suite de l'étude pour identifier la plus performante pour cet exemple.

- Algorithme du gradient conjugué

Comme nous venons de le voir, la méthode de descente de gradient, également appelée méthode du gradient simple, modifie la valeur du vecteur poids selon la direction pour laquelle la fonction coût diminue le plus rapidement. Ceci n'engendre pas forcément la convergence la plus rapide. Dans l'algorithme du gradient conjugué, la recherche de l'optimum est réalisée selon des directions conjuguées, produisant généralement la convergence la plus rapide [Pari 04]. Cet algorithme est dérivé de la méthode de Newton qui se différencie de la méthode de descente de gradient par le fait que l'approximation de la fonction coût  $J$  est basée sur la série de Taylor de deuxième ordre. Le développement de Taylor d'une fonction  $J(w)$  d'une seule variable  $w$  au voisinage d'un minimum  $w^*$  est donné par la relation :

$$J(w) = J(w^*) + \frac{1}{2}(w - w^*)^2 \left( \frac{d^2 J}{dw^2} \right) \quad (\text{II.13})$$

Pour déterminer la direction de recherche du minimum de la fonction coût, la méthode des gradients conjugués utilise le concept des vecteurs conjugués. Cette méthode présente la propriété intéressante de pouvoir minimiser en un nombre fini d'itérations n'importe quelle fonction. La boîte à outil "Neural Network" du logiciel Matlab™ propose 4 variantes de cet algorithme [Seif 06] [Demu 10] :

- ◆ Fletcher-Reeves update [Flet 64],
- ◆ Polak-Ribière update [Hag 96],
- ◆ Powell-Beale restarts [Beal 72],
- ◆ Scaled conjugate gradient [Moll 93].

De la même manière que pour l'algorithme de descente de gradient à pas d'apprentissage variable, le pas d'apprentissage est ajusté à chaque itération. Une recherche est réalisée le long de la direction conjuguée pour minimiser la fonction coût. Pour y parvenir, le logiciel Matlab™ permet d'utiliser 5 routines de recherches :

- ◆ Golden section search [Hag 96],
- ◆ Brent's search [Bren 73],
- ◆ Hybrid bisection-cubic search [Scal 85],
- ◆ Charalambous' search [Char 92],
- ◆ Backtracking [Den 83].

Une étude comparative va permettre de déterminer le couple algorithme/routine le plus performant. Dans un premier temps, l'analyse va comparer la précision des différents algorithmes. Les différentes routines seront ensuite associées à l'algorithme le plus performant pour former le couple minimisant l'erreur en sortie du réseau.

L'échantillon d'entraînement utilisé dans cette analyse est strictement le même que celui utilisé précédemment pour l'entraînement de l'algorithme de descente de gradient. De la même manière, l'architecture du réseau comportera une couche cachée et une couche de sortie comportant un seul neurone. Pour réaliser une comparaison pertinente des différentes variantes de l'algorithme, la même routine de recherche de minimum de la fonction coût est utilisée pendant l'analyse. Celle-ci est la méthode Charalambous' search [Char 92], utilisée par défaut par le logiciel.

Une analyse supplémentaire sera réalisée par la suite, une fois la version de l'algorithme choisie, pour déterminer la méthode de recherche la plus performante.

Pour limiter l'influence sur les résultats d'éventuels problèmes de convergence, les valeurs des erreurs présentées pour chacune des versions de l'algorithme du gradient conjugué sont les moyennes issues de 10 valeurs d'erreurs d'entraînement.

---

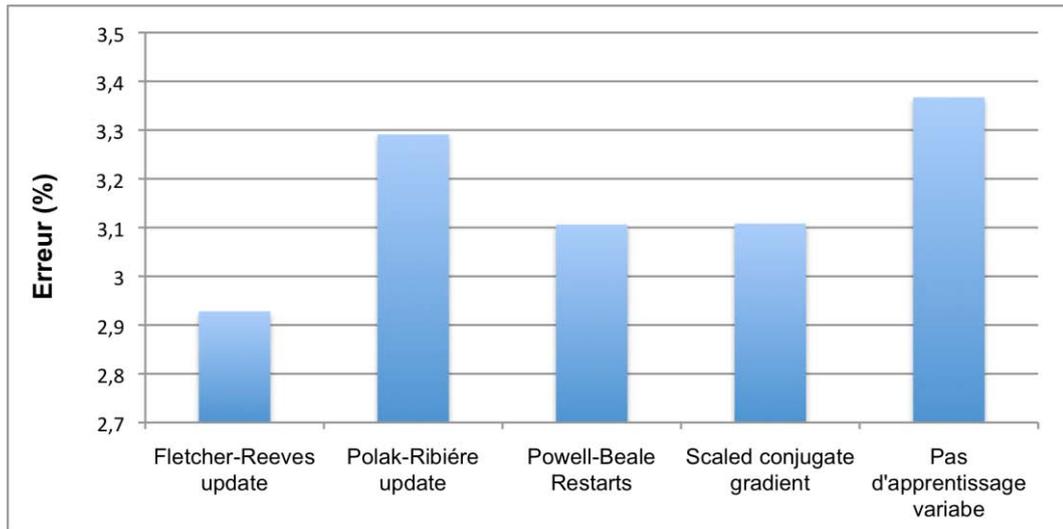


Figure II-18 : Précision du réseau en fonction de l'algorithme utilisé.

De manière générale, les algorithmes du gradient conjugué commencent par rechercher le minimum de la fonction coût par la méthode de descente de gradient. Une fois celle-ci identifiée, l'une des 5 routines de recherche est lancée pour déterminer le pas de déplacement le long de cette direction. La direction de recherche suivante est déterminée de sorte qu'elle soit conjuguée à la direction de recherche précédente. La procédure généralement utilisée pour déterminer la nouvelle direction  $p_k$  est une combinaison de celle-ci avec la direction précédente  $p_{k-1}$ .

$$p_k = -g_k + \beta_k p_{k-1} \quad (\text{II.14})$$

où  $g_k$  est le gradient à l'instant  $k$ . Les différents algorithmes se distinguent par leur méthode de calcul de la constante  $\beta_k$ .

D'après les résultats de l'analyse comparative (cf. Figure II-18), la version de l'algorithme du gradient conjugué la plus performante est la méthode Fletcher-Reeves avec une erreur inférieure à 3% (2,92%). Pour cette méthode, le calcul de  $\beta_k$  est réalisé de la manière suivante :

$$\beta_k = \frac{g_k^T g_k}{g_{k-1}^T g_{k-1}} \quad (\text{II.15})$$

$\beta_k$  est le rapport de la norme au carré du gradient actuel par la norme au carré du gradient précédent.

La première conclusion de cette analyse est, que la précision en sortie des 4 versions de l'algorithme du gradient conjugué entraînées est supérieure à l'algorithme de descente de gradient à pas variable (cf. Figure II-18). La diminution de l'erreur de prédiction à la sortie du réseau va de 3 à 15% dans le cas de l'algorithme le plus performant : l'algorithme de Fletchers-Reeves update. L'erreur obtenue lors de son entraînement est inférieure à 3%, ce qui fait de lui l'algorithme le plus performant utilisé dans cette analyse.

L'analyse suivante, toujours dans une démarche d'optimisation de la performance, consiste à entraîner un réseau par la version de Fletchers-Reeves de l'algorithme du gradient conjugué, pour les différentes routines de recherche disponibles dans la boîte à outil du logiciel. De la même manière que pour l'analyse précédente, les résultats affichés dans le tableau sont les moyennes issues de 10 valeurs d'erreurs d'entraînement.

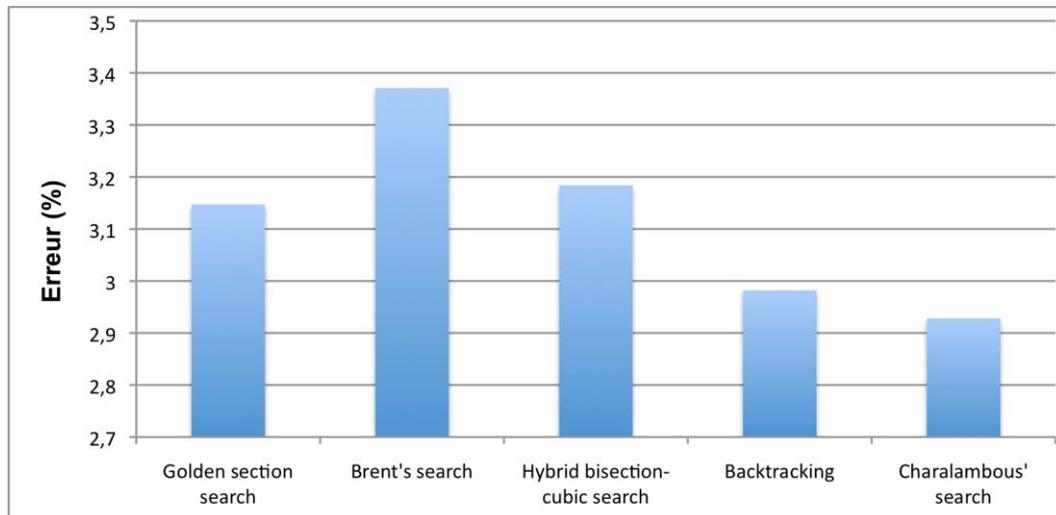


Figure II-19 : Performance du réseau selon la méthode de recherche de minimum utilisée.

La routine de recherche "Charalambous' search" offre les meilleures performances [cf. Figure II-19]. Elle a été développée spécifiquement pour l'algorithme du gradient conjugué, faisant d'elle, la routine de recherche la plus utilisée et la plus performante dans le cadre de cette association [Seif 06] [Demu 10]. Cette routine est une combinaison de deux interpolations [Char 92] :

- ◆ une dichotomie,
- ◆ une interpolation cubique.

Concernant la méthode de dichotomie, celle-ci consiste à répéter des partages d'un intervalle en deux parties puis à sélectionner le sous-intervalle dans lequel se trouve le minimum. Une fois cette opération réalisée, une recherche du minimum est effectuée par une interpolation cubique. Si le minimum de la fonction se trouve dans l'intervalle précédemment déterminé, il est utilisé pour réduire l'intervalle. Dans le cas contraire, l'intervalle déterminé par la méthode de la bisection est utilisé.

Cette première partie de l'analyse a permis d'écartier un certain nombre d'algorithmes en fonction de leur performance. Le vocabulaire nécessaire à la bonne compréhension de l'utilisation des réseaux de neurones, a été introduit. Une erreur inférieure à 3 % a été atteinte entre la sortie du réseau et l'échantillon test. Cependant, cette analyse s'est limitée à un réseau à une seule couche de neurones cachée et une seule sortie. La suite de l'étude va étendre l'analyse en étudiant l'influence de la modification de ces deux paramètres sur la performance du réseau.

L'analyse consiste à entraîner des réseaux de neurones, en modifiant l'architecture du réseau. Pour cela, l'étude s'appuie sur les conclusions de l'analyse précédente. Le choix de l'algorithme va donc se porter sur l'algorithme du gradient conjugué, dans sa version Fletchers-Reeves update. La routine de recherche du minimum dans chaque direction de descente du gradient s'appuiera sur la méthode "Charalambous' search". Enfin, l'ajout d'une régularisation est effectué systématiquement pour augmenter la capacité du réseau à approximer des valeurs en dehors des points expérimentaux (généralisation).

Dans un premier temps, l'architecture du réseau va être modifiée en ajoutant une couche de neurones. Le réseau sera alors constitué de :

- ♦ deux couches cachées dont la fonction de transfert associée sera une fonction sigmoïde (cf. II.2.3.1),
- ♦ une couche de sortie linéaire à un seul neurone (une seule sortie).

L'ajout de celle-ci augmente la capacité du réseau à approximer une fonction, à l'image de l'augmentation du degré d'une fonction polynomiale [Pari 04]. Cependant, cette modification présente l'inconvénient d'accroître les temps de calcul de manière significative. Pour réaliser ce test, un programme a été mis au point pour étudier la performance du réseau pour l'ensemble des configurations possibles sachant que le nombre de neurones sur chacune des couches cachées,  $S^1$  et  $S^2$  (cf. figure II-20), peut varier de 1 à 50. Le nombre de neurones a été réduit de 100 à 50 par rapport à l'analyse précédente pour limiter le nombre d'entraînement. En effet, en étudiant la totalité des configurations, le nombre d'entraînement s'élève à 2500 ( $50 \times 50$ ) soit le nombre de configurations.

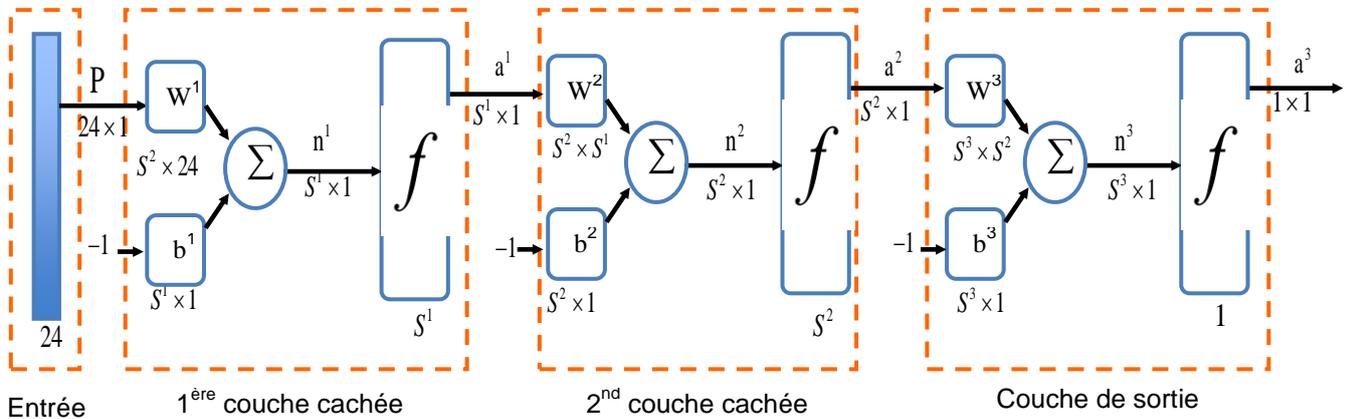


Figure II-20 : Réseau de neurones à deux couches cachées et deux sorties.

Dans un deuxième temps, l'architecture du réseau est une nouvelle fois modifiée mais cette fois-ci en augmentant le nombre de neurones sur la couche de sortie (cf. figure II-20). Dans les différentes analyses comparatives précédemment réalisées, l'échantillon "professeur" permettant l'entraînement des réseaux de neurones est conservé. Celui-ci comporte une seule sortie, l'effort de coupe selon  $z$  ( $Fz$ ). Pour étudier l'influence de l'ajout d'une entité au vecteur sortie, le moment  $Mz$  a été ajouté à l'échantillon initial.

Pour quantifier cette influence, l'erreur en sortie de ce réseau est calculée de deux manières différentes (cf. Figure II-21) :

- ◆ l'erreur de prédiction du moment  $M_z$ , notée  $Emz_2$ ,
- ◆ l'erreur de prédiction de l'effort de poussée  $F_z$ , notée  $Efz_2$ ,

Pour établir une comparaison pertinente, les signaux  $F_z$  et  $M_z$  sont analysés de manière indépendante dans la suite de l'étude. Les erreurs de prédiction des réseaux de neurones à 1 sortie, de l'effort et du moment,  $F_z$  et  $M_z$ , sont notées respectivement  $Efz_1$  et  $Emz_1$  (cf. Figure II-21).

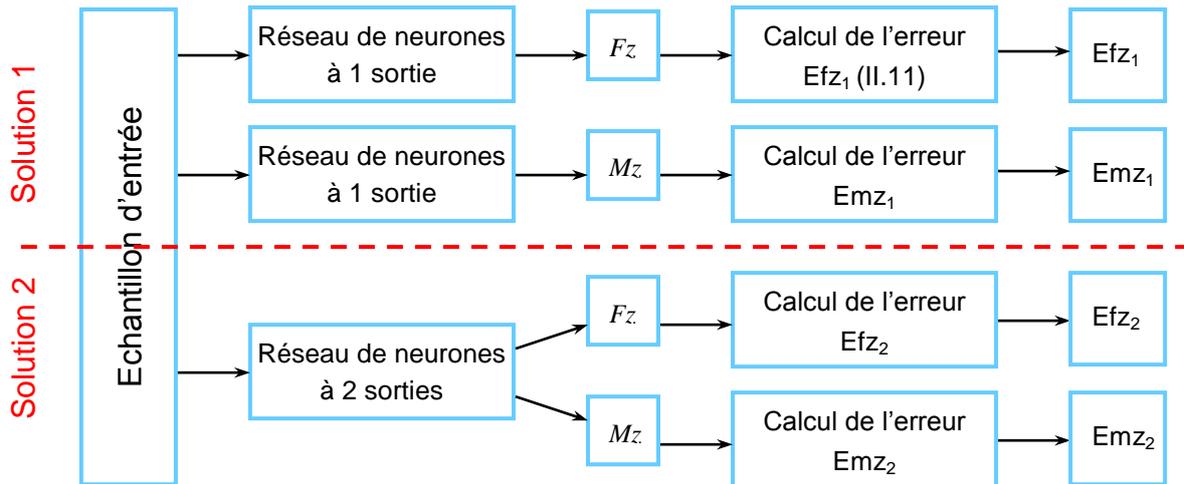


Figure II-21 : Différentes solutions d'architecture du réseau.

Cette analyse permettra par la suite d'influencer la stratégie de mise en place du modèle multi-matériaux. Plus précisément, les performances affichées par un réseau de neurones à deux couches cachées et deux sorties orienteront le choix de l'architecture du modèle.

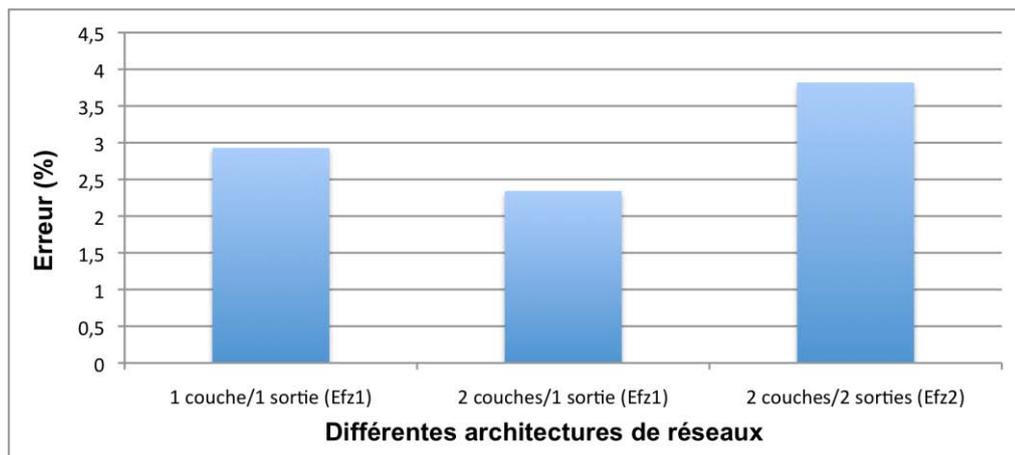


Figure II-22 : Erreur de prédiction de l'effort  $F_z$  en fonction de l'architecture du réseau.

L'erreur de prédiction de l'effort  $F_z$  pour différentes configurations de l'architecture du réseau est présentée sur la figure II-22. En premier lieu, il est intéressant de noter que le passage d'une seule à deux couches cachées diminue significativement l'erreur en sortie de

réseau, de l'ordre de 20% pour cette analyse. Ce résultat confirme qu'il est possible d'améliorer la capacité du réseau à approximer une fonction, en augmentant le nombre de couches cachées de neurones. Cependant cette augmentation, s'accompagne d'un accroissement du temps de calcul. Pour cette raison, le nombre de couches cachées est limité à deux dans cette étude.

Les résultats montrent également que l'erreur sur la prédiction de  $F_z$  pour un réseau de neurones comportant deux sorties ( $E_{fz_2}$ ) est supérieure de 63% à l'erreur  $E_{fz_1}$ . L'influence de l'ajout d'un paramètre au vecteur sortie de l'échantillon d'entraînement est donc visible sur l'erreur en sortie du réseau. Ces résultats sont confirmés par l'analyse des moments  $M_z$  (cf. Figure II-23). La tendance est la même mais les effets sur ce paramètre sont moindres puisque l'erreur  $E_{mz_2}$  est 40% supérieure à  $E_{mz_1}$ .

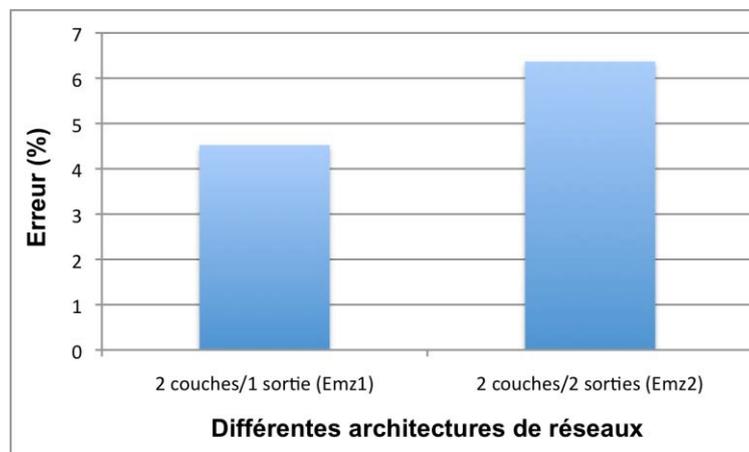


Figure II-23 : Erreur de prédiction de l'effort  $M_z$  en fonction de l'architecture du réseau.

Comme nous l'avons vu précédemment, ces résultats sont à prendre en compte dans l'établissement du choix de l'architecture globale du modèle multi-matériaux. Ils mettent en avant l'intérêt pour la performance du réseau, d'entraîner  $n$  réseaux de neurones à 1 sortie plutôt qu'un réseau de neurones à  $n$  sorties,  $n > 1$ . Dans la mesure du possible, le choix de l'architecture du modèle global doit s'orienter vers un morcellement du vecteur sortie (cf. figure II-24). C'est notamment le cas, lors de la mise en place du modèle prédictif des six composantes des actions mécaniques de coupe en perçage. Pour éviter une baisse de la performance du réseau, le modèle sera alors constitué de six réseaux de neurones correspondant aux six composantes du torseur.

Cependant il ne sera pas toujours possible de séparer l'étude des paramètres de sortie. L'application de cette étude à des problèmes de surveillance tel que le monitoring nécessite d'obtenir les sorties du modèle dans un laps de temps réduit. De plus, la difficulté matérielle que représente l'entraînement simultané de  $n$  réseaux de neurones à 1 sortie, va naturellement orienter le choix vers un seul réseau de neurones à  $n$  sorties,  $n > 1$ . Pour optimiser la performance de la surveillance, l'échantillon de sortie devra être le plus parcimonieux possible.

Les résultats de la prédiction des efforts  $F_z$  et  $M_z$  obtenus en sortie d'un réseau de neurones à deux sorties soulèvent la question sur la pertinence de prédire l'intégralité du torseur, notamment dans le cas du perçage. Malgré tout, les performances affichées par un réseau à  $n$  sorties ( $n > 1$ ), restent tout à fait acceptables. En ce qui concerne l'effort  $F_z$ , l'erreur entre la sortie du réseau et sa valeur expérimentale est inférieure à 4%.

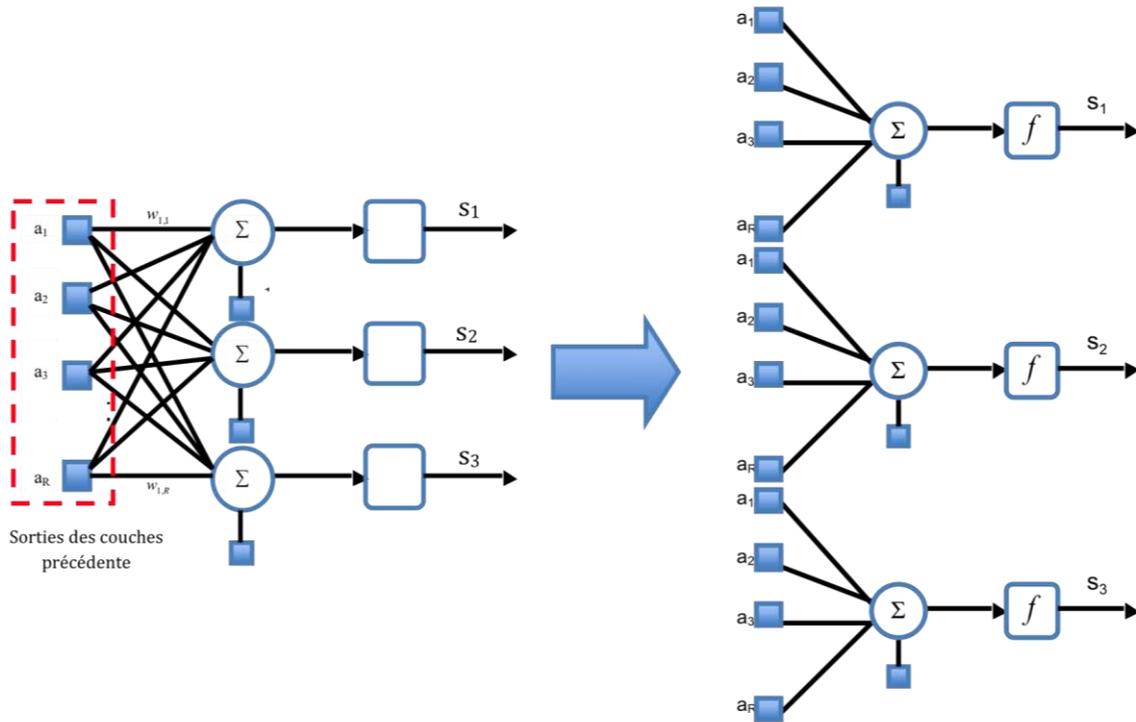


Figure II-24 : Modification de l'architecture du réseau par séparation des paramètres de sortie.

## II.4. Justification de l'utilisation des réseaux de neurones

L'utilisation des réseaux de neurones est relativement longue à mettre en place. L'analyse précédente a permis de comparer les performances de plusieurs couples architecture/algorithmes. La précision obtenue entre deux architectures ou même tout simplement deux algorithmes peut varier de plus de 250%. Avant de pouvoir comparer cette méthode à des méthodes plus classiques du type "plan d'expérience", il a donc fallu obtenir un réseau dont les performances puissent être suffisamment bonnes pour en justifier l'utilisation. Les analyses du paragraphe II.3 ont permis d'ajuster les différents paramètres d'un réseau de neurones pour déterminer le couple algorithme/architecture le plus performant.

Cette partie va donc s'attacher à comparer, pour un même échantillon d'essais, les performances offertes par une modélisation réalisée à l'aide des réseaux de neurones et par la méthode "plan d'expérience".

Pour cette analyse, l'échantillon d'essais concerne les essais futurs, destinés à la mise en place du modèle multi-matériaux. Pour que cette comparaison soit la plus pertinente possible, l'échantillon a été constitué à partir d'une campagne d'essais de perçage d'une plaque d'aluminium d'épaisseur variable. L'échantillon complet compte 30 essais :

- ◆ 24 essais utilisés pour la mise en place du modèle également appelé échantillon "professeur",
- ◆ 6 essais destinés à sa validation.

Concernant l'échantillon d'entrée, celui-ci est constitué de différents paramètres prenant en compte les conditions de coupe et l'usure de l'outil :

- ◆ la fréquence de rotation  $N$  et la vitesse d'avance  $f$ ,
- ◆ l'épaisseur de la plaque percée,
- ◆ un indicateur caractérisant l'historique de l'outil.

Cet indicateur est défini par l'épaisseur cumulée percée par l'outil.

L'échantillon de sortie quant à lui est constitué de deux paramètres :

- ◆ l'effort de poussée  $F_z$ ,
- ◆ le moment  $M_z$ .

Dans un premier temps, la démarche de modélisation par les plans d'expériences sera détaillée puis elle sera comparée avec les résultats obtenus par une modélisation à l'aide des réseaux de neurones.

### II.4.1. Modélisation par les plans d'expériences

La présentation des plans d'expériences qui va suivre, ne se veut pas exhaustive. L'étude va se limiter à la modélisation à l'aide de plans de type Box [Box 71]. Avant de rentrer un peu plus en détails dans cette démarche, les objectifs d'une telle méthode vont être présentés.

#### II.4.1.1. Objectif des plans d'expériences

La méthode des plans d'expériences permet de limiter le nombre d'essais, de les planifier rigoureusement, de repérer les paramètres et interactions influents et d'obtenir des modèles représentant le phénomène étudié [Lahe 05]. L'objectif concernant la modélisation est de créer une fonction :

$$Y = f(x_i) \quad (\text{II.16})$$

où  $Y$  représente les réponses ou grandeurs mesurées lors des expérimentations et  $x_i$  correspond au niveau du facteur  $i$ . Le modèle ainsi créé est une fonction linéaire telle que :

$$Y = m + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_ix_i + a_{12}x_1x_2 + \dots + a_{ij}x_ix_j \quad (\text{II.17})$$

où  $m$  est la moyenne des valeurs obtenues pour  $Y$ ,  $a_i$  est la valeur de l'effet du facteur  $x_i$  et  $a_{ij}$  représente la quantification de l'influence combinée des facteurs  $x_i$  et  $x_j$  pris simultanément,

également appelée interaction. En d'autres termes, l'interaction caractérise l'effet d'un facteur A lorsqu'un facteur B prend différentes valeurs (cf. Figure II-25).

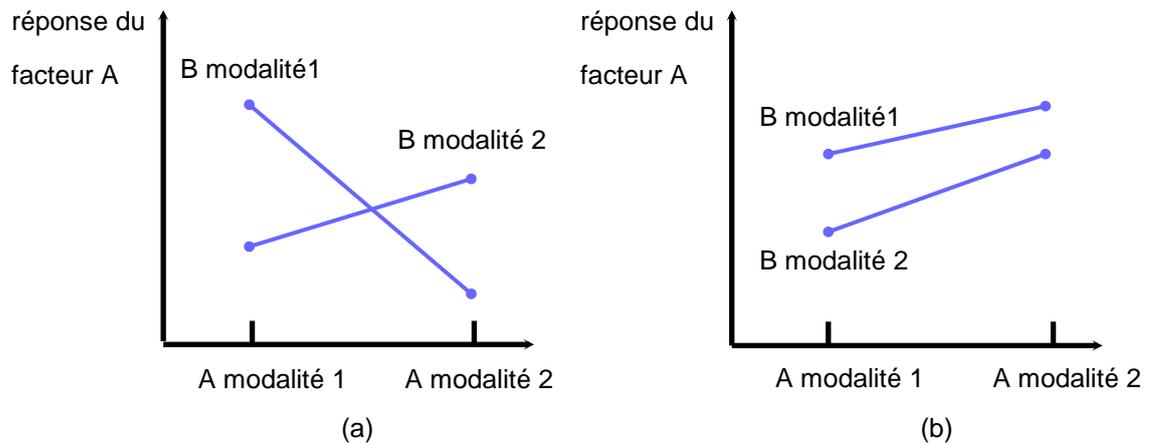


Figure II-25 : Interaction entre deux facteurs A et B. (a) interaction significative ;  
(b) interaction non significative.

Dans le cadre de cette analyse, les facteurs sont les différents paramètres d'entrée du problème. Ces facteurs varient généralement entre deux bornes : une borne supérieure et une borne inférieure. Comme cela a été spécifié plus haut, la détermination de ces coefficients est réalisée par l'intermédiaire de la méthode Box [Box 71]. L'originalité de cette méthode réside dans le fait qu'elle réalise des produits matriciels. Pour cela, il est tout d'abord nécessaire de créer les différentes matrices concernées. Elles sont au nombre de trois :

- ◆ La matrice de calcul des effets,
- ◆ La matrice des réponses,
- ◆ La matrice des coefficients.

N° essai	Moyenne	Facteur 1	Facteur 2	Interaction 12
1	1	-1	-1	1
2	1	1	-1	-1
3	1	-1	1	-1
4	1	1	1	1

Figure II-26 : Matrice de calcul des effets pour un plan complet à deux facteurs de deux niveaux chacun.

La matrice de calcul est créée de la manière suivante (cf. figure II-26) :

- ◆ La première colonne est attribuée au calcul de la moyenne, elle est composée uniquement de 1,
- ◆ Les deux colonnes suivantes sont attribuées aux niveaux des deux facteurs, -1 étant la borne inférieure et 1 la borne supérieure.
- ◆ La dernière colonne est attribuée à l'interaction entre les facteurs 1 et 2, calculée en multipliant les niveaux de deux facteurs de l'interaction.

Ceci est valable dans le cas d'un plan complet à deux facteurs de deux niveaux chacun. Concernant notre étude, il s'avère que la détermination de la matrice est bien plus complexe. Le nombre de facteurs est effectivement plus important (4 au lieu de 2) augmentant, de ce fait, le nombre d'essais à réaliser. Cependant, la difficulté principale vient du fait que ces facteurs ne comptent pas tous deux niveaux, comme c'est généralement le cas lors de l'utilisation de cette méthode.

#### II.4.1.2. Mise en place du modèle

Les spécificités de la modélisation multi-matériaux ont conduit à l'utilisation d'un critère d'usure dont la valeur augmente continuellement au cours de la campagne. Ce facteur n'a donc pas deux, voire trois niveaux, mais une évolution continue de celui-ci. Pour représenter cette évolution de manière fidèle, il est possible d'en déterminer la valeur par l'intermédiaire de la variable centrée réduite.

Une des particularités des plans de type Box est que les valeurs des niveaux des facteurs sont normées de la manière suivante :

$$x = \frac{V - V_0}{pas} \quad (II.18)$$

où  $V$  est la variable d'origine,  $V_0$  est la valeur centrale du repère d'origine. Le  $pas$  est la différence entre la valeur de  $V_0$  et un de ces extremums.

Moyenne	N	f	ep	usure
1	-1	-1	-1	-1,00
1	1	-1	-1	-0,96
1	-1	1	-1	-0,93
1	1	1	-1	-0,89
1	-1	-1	0	-0,79
1	1	-1	0	-0,71
1	-1	1	0	-0,64
1	1	1	0	-0,57
1	-1	-1	1	-0,39
1	1	-1	1	-0,29
1	-1	1	1	-0,18
1	1	1	1	-0,07
1	-1	-1	-1	0,07
1	1	-1	-1	0,11
1	-1	1	-1	0,14
1	1	1	-1	0,18
1	-1	-1	0	0,29
1	1	-1	0	0,36
1	-1	1	0	0,43
1	1	1	0	0,50
1	-1	-1	1	0,68
1	1	-1	1	0,79
1	-1	1	1	0,89
1	1	1	1	1,00

Figure II-27 : Matrice de calcul des effets.

Pour augmenter la lisibilité de la matrice (cf. Figure II-27), les colonnes des interactions ont été volontairement masquées. Cependant, celles-ci ont été prises en compte dans la détermination de la matrice des coefficients.

La matrice de calcul des effets a donc deux facteurs à 2 niveaux,  $N$  et  $f$ , et un facteur à 3 niveaux, l'épaisseur de la plaque percée  $ep$ . Les différents niveaux du dernier facteur, l'épaisseur percée cumulée (usure), ont été déterminés par l'intermédiaire de la variable centrée réduite. Les valeurs des niveaux maximum et minimum restent 1 et -1.

A partir de cette matrice, il est maintenant possible de déterminer la matrice des coefficients. Pour rappel, l'objectif de cette méthode est de créer une fonction linéaire (équation II.15). En notation matricielle, cette fonction peut s'écrire :

$$Y = X.A \quad (II.19)$$

où  $Y$  est la matrice des réponses, déterminée par les sorties du modèle,  $X$  est la matrice des effets des facteurs et enfin  $A$  est la matrice des coefficients.

La seule inconnue de cette équation est la matrice des coefficients, permettant de déterminer les coefficients du modèle. Celle-ci peut être déterminée par la relation :

$$A = X^{-1}.Y \quad (II.20)$$

En général, ce système ne peut être résolu, le nombre d'équations étant inférieur au nombre d'inconnues (matrice des coefficients). Une méthode de régression est par conséquent utilisée pour estimer les coefficients du modèle. La solution de ce système est donc :

$$A = [X^T.X]^{-1}.X^T.Y \quad (II.21)$$

Une fois les coefficients déterminés, il est alors possible de vérifier la précision de la méthode "plan d'expérience" par l'intermédiaire de l'échantillon d'essais destiné à sa validation (cf. Figure II-28). Cet échantillon est constitué de 6 essais dont les paramètres sont les suivants :

- ◆ les conditions de coupe ( $N$  et  $f$ ) ont été choisies "au centre",
- ◆ en utilisant ces conditions de coupe, deux essais ont été réalisés pour les trois épaisseurs utilisées (4, 8 et 12 mm),
- ◆ de la même manière que pour l'échantillon "professeur", la valeur du facteur d'usure est déterminée par l'intermédiaire de la variable centrée réduite.

m	N	f	ep	usure
1	0	0	-1	-0,86
1	0	0	0	-0,50
1	0	0	1	0,04
1	0	0	-1	0,21
1	0	0	0	0,57
1	0	0	1	1,11

Figure II-28 : Echantillon de validation du modèle.

## II.4.2. Comparaison avec la méthode “réseaux de neurones”

La description de la démarche permettant la mise en place d’une modélisation par les plans d’expériences a été réalisée au paragraphe précédent (cf. II.4.1). La précision d’un modèle est bien évidemment un élément très important, mais la rapidité de mise en place, voire sa capacité à s’adapter à la modification d’un échantillon d’entrée, sont également des critères à prendre en compte lors du choix de ce dernier. Que cela soit dans le domaine scientifique ou dans le domaine industriel, un modèle pouvant s’adapter rapidement et simplement à une nouvelle entrée est très souvent privilégié.

Deux indicateurs ont donc été choisis pour comparer les deux méthodes :

- ◆ la précision de la sortie du modèle par rapport au résultat expérimental,
- ◆ le temps de mise en place et de calcul de la méthode.

### II.4.2.1. Précision des modèles dans le domaine expérimental

De la même manière que dans le paragraphe précédent (cf. II-3-2), la précision est la capacité d’un modèle à approximer une valeur cible. Elle est quantifiée par la valeur absolue du pourcentage d’erreur entre la sortie expérimentale et la sortie prédite par le modèle (Equation II.11).

Celle-ci a été calculée pour les deux méthodes de modélisation abordées et pour différentes tailles (nombre d’essais) de l’échantillon “professeur”. La comparaison a donc porté sur la précision des modèles pour des tailles d’échantillons de 24, soit un échantillon complet, 12 et 8 essais.

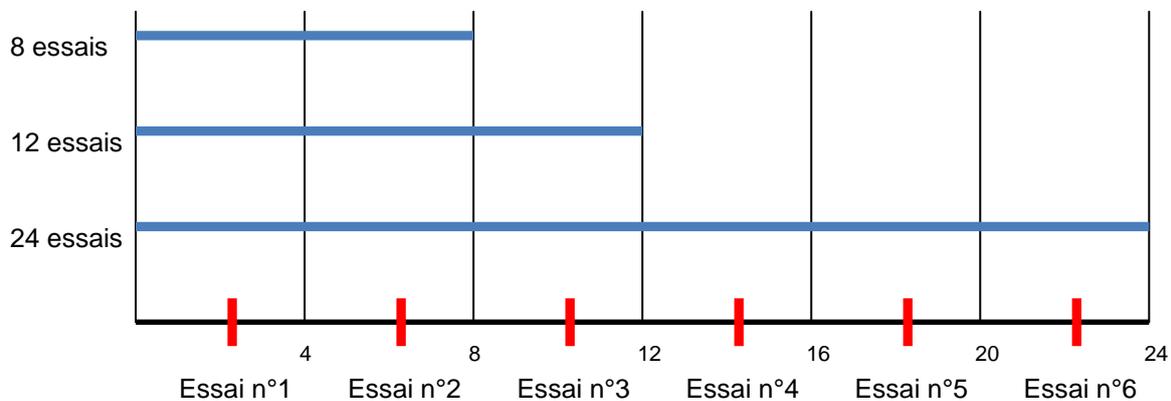


Figure II-29 : Positionnement des essais de validation dans la campagne d’essais.

La taille de l’échantillon de validation a volontairement été conservée, même si une partie de l’échantillon se retrouve en dehors des bornes de l’étude lors de la réduction de la taille de l’échantillon “professeur”. Cela permet de vérifier la validité du modèle en dehors des bornes du problème (cf. Figure II-29).

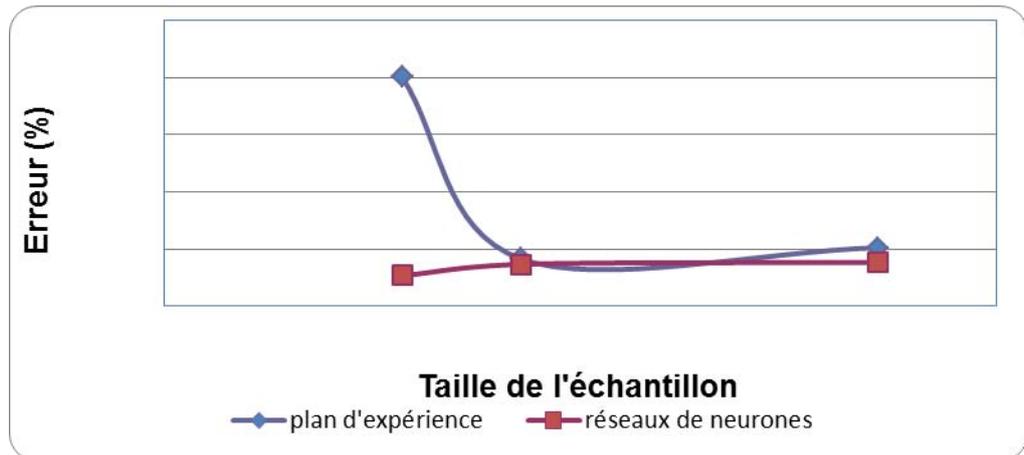


Figure II-30 : Erreur sur la prédiction de l'effort  $F_z$  pour des valeurs cibles à l'intérieur des bornes expérimentales du problème.

Les résultats concernant la prédiction des valeurs cibles comprises dans le domaine expérimental mettent en avant des performances supérieures offertes par la méthodologie "réseaux de neurones" (cf. Figure II-30).

Cependant l'allure de la courbe des performances du modèle réseau de neurones suscite quelques interrogations. La logique voudrait qu'une diminution de l'échantillon d'entrée et donc du nombre "d'exemples" permettant l'apprentissage du réseau s'associerait à une augmentation de l'erreur en sortie.

Ces résultats peuvent s'expliquer par deux phénomènes. D'une part, le nombre d'essais de validation décroît lors de la diminution de la taille de l'échantillon. Comme nous l'avons vu précédemment (cf. Figure II-29), celles-ci sont au nombre de 6, 3 et 2 essais de validations pour des échantillons respectivement de taille 24, 12 et 8 essais. Par conséquent le calcul de l'erreur de prédiction est réalisé sur un nombre de plus en plus réduit de valeurs permettant de limiter l'influence des dispersions expérimentales. D'autre part, l'aspect parcimonieux de la méthodologie "réseaux de neurones" abordée précédemment (cf. II.1.4) est ici confirmé. La diminution de la taille de l'échantillon a peu d'influence sur les performances des réseaux. Celle-ci s'associe même à une légère diminution de l'erreur pouvant s'expliquer par la présence possible, dans l'échantillon d'entraînement expérimental, de valeurs incohérentes perturbant la convergence du réseau. En diminuant la taille de l'échantillon d'entraînement, un certain nombre de ces essais ont peut être été exclus, améliorant la précision.

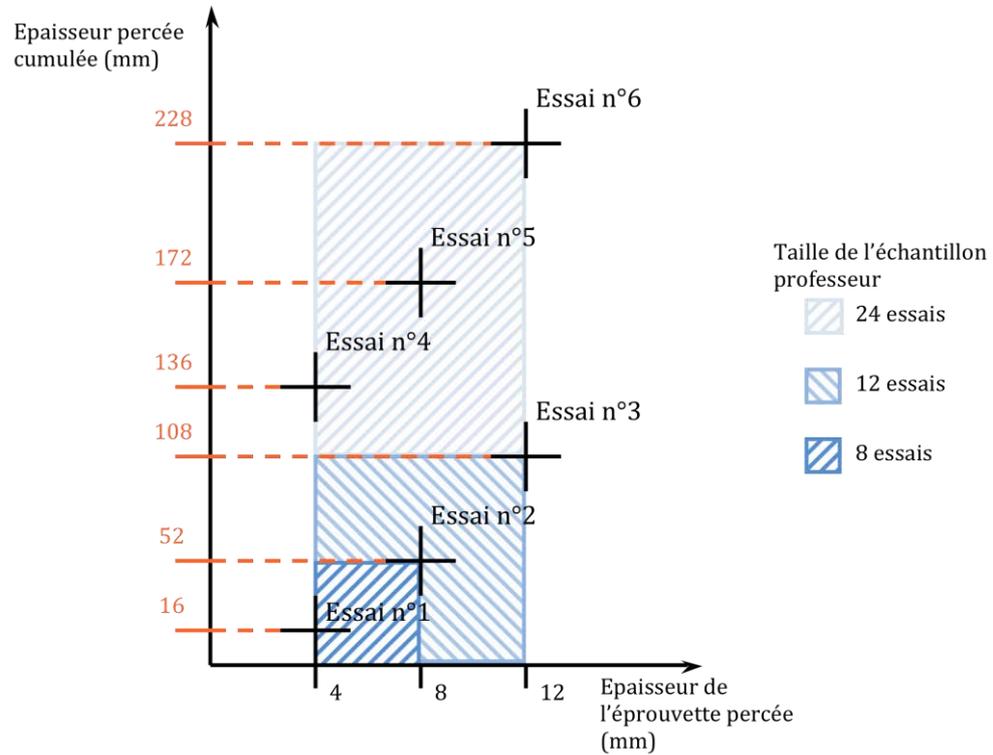
La courbe d'erreur de prédiction en sortie du modèle "plan d'expérience" illustre la difficulté à extrapoler de ce type de modélisation. L'erreur obtenue pour un échantillon de 8 essais atteint 20% alors qu'elle est inférieure à 3% en sortie du réseau de neurones.

Cependant, l'augmentation significative de l'erreur de prédiction n'est remarquable que pour une taille d'échantillon de 8 essais. Pour une taille d'échantillon de 12 essais, l'erreur montre une diminution de sa valeur par rapport à la modélisation d'un échantillon complet,

corroborant l'hypothèse de la présence de valeurs expérimentales incohérentes dans l'échantillon d'entrée/sortie.

#### II.4.2.2. Précision des modèles hors du domaine expérimental

L'analyse va maintenant s'intéresser à la globalité de l'échantillon de validation. Le nombre d'essais en dehors des bornes augmente avec la diminution de la taille de l'échantillon professeur (cf. Figure II-31). Les essais de validation sont numérotés de 1 à 6, de telle manière que l'essai n°6 soit le plus éloigné des bornes de l'étude (cf. Figure II-29).



Taille de l'échantillon professeur	24	12	8
Essai n°1			
Essai n°2			
Essai n°3			Hors $D_A$
Essai n°4		Hors $D_A$	Hors $D_A$
Essai n°5		Hors $D_A$	Hors $D_A$
Essai n°6		Hors $D_A$	Hors $D_A$

Figure II-31 : Positions des essais de validation par rapport au domaine d'apprentissage ( $D_A$ ) de l'étude.

Les précisions des deux sorties du modèle,  $F_z$  et  $M_z$ , sont analysées séparément. Les résultats confirment la tendance observée précédemment lors de l'analyse de l'échantillon de validation inclus dans les bornes de l'étude.

Pour une taille d'échantillon de 12 essais, les deux méthodes donnent des résultats relativement proches, globalement meilleurs pour la méthode "réseaux de neurones" (cf. Figure II-32). L'erreur de prédiction moyenne sur les 3 essais hors bornes est de 11,26% pour cette méthode, alors qu'elle atteint 13,9% pour la méthode "plan d'expérience".

La précision en sortie du modèle devrait diminuer avec l'éloignement des essais de validation des bornes du domaine expérimental de l'étude. Cette hypothèse ne se vérifie qu'une seule fois, dans le cas de la prédiction de l'effort de poussée  $F_z$  par les réseaux de neurones. Cependant, l'essai n°6, le plus éloigné des bornes, présente la précision la plus faible dans tous les cas de figure (cf. Figure II-34).

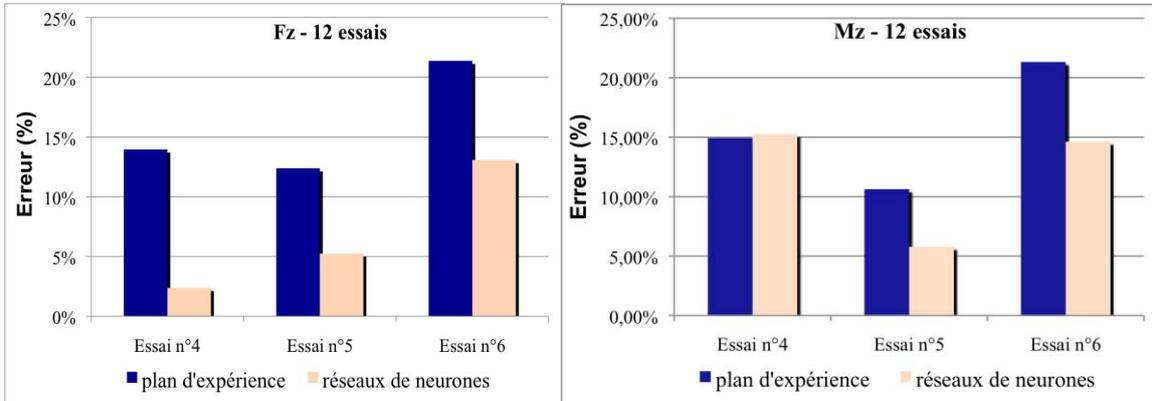


Figure II-32 : Erreur de modélisation hors des bornes de la modélisation.

Pour une taille d'échantillon de 8 essais, la dérive importante des résultats, observée précédemment pour une modélisation par les plans d'expériences (cf. Figure II-33), est, là encore, confirmée. La capacité de ce modèle à extrapoler est, dans ce cas, très inférieure à une modélisation par les réseaux de neurones. L'erreur moyenne obtenue sur les 4 essais de validation hors des bornes du domaine d'apprentissage est de 129% pour cette méthode, alors qu'elle n'est que de 14% pour la méthode réseaux de neurones. Un modèle prédictif mis en place par les réseaux de neurones est d'autant plus performant, que l'erreur semble augmenter très lentement lors de l'éloignement des bornes de l'étude de l'échantillon de validation.

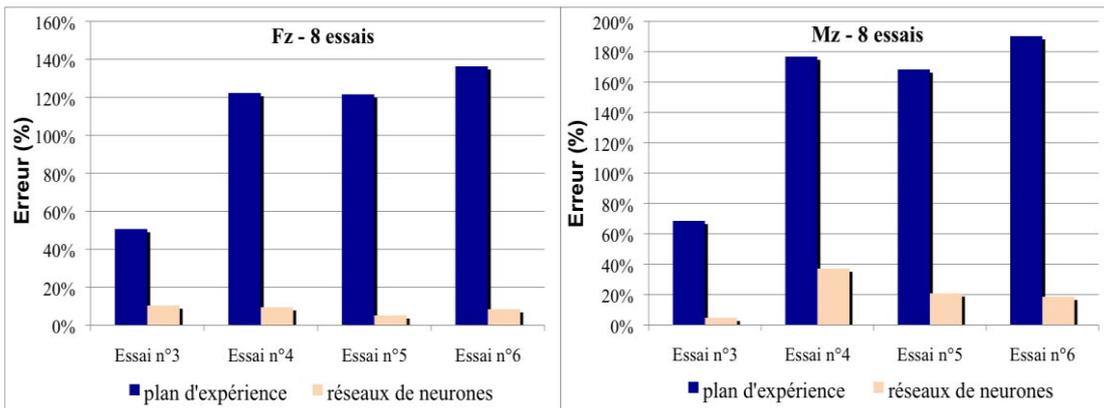


Figure II-33 : Erreur de modélisation hors des bornes de la modélisation.

Ces résultats confirment la capacité de la méthode "réseaux de neurones" à extrapoler au delà des valeurs explorées expérimentalement, malgré une taille d'échantillon d'entraînement réduite (cf. II.3.2.1).

La précision de l'essai de validation n°6, le plus éloigné du domaine expérimental, illustre bien cette observation. Les erreurs obtenues pour les signaux  $F_z$  et  $M_z$  sont

respectivement de 8% et 18%, bien que l'épaisseur de l'éprouvette percée et surtout le cumul de l'épaisseur percée par l'outil, soient respectivement 50% et 440%, supérieurs à la valeur maximale du domaine expérimental. La figure II-34 met en avant l'éloignement de ces valeurs par rapport aux frontières du domaine.

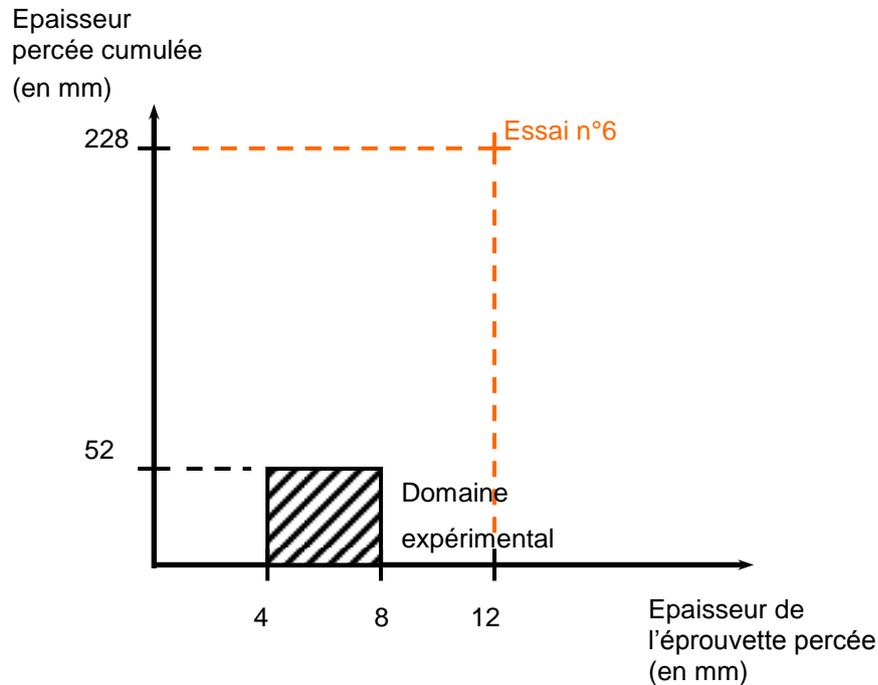


Figure II-34 : Eloignement de l'essai de validation n°6 du domaine expérimental.

#### II.4.2.3. Comparaison par rapport au temps de mise en place du modèle

Concernant l'étude du temps de mise en place de la méthode de modélisation, celle-ci doit prendre en compte plusieurs paramètres :

- ◆ le temps de prise en main de la méthode, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre le début de l'apprentissage de ce nouvel outil et l'obtention des premiers résultats,
- ◆ sa flexibilité, soit la capacité de la méthode à s'adapter à une modification de l'échantillon d'apprentissage et de validation.

Le temps de prise en main d'une méthode par rapport à l'autre est difficilement quantifiable. Celui-ci est étroitement lié à la capacité de l'utilisateur à s'approprier la méthode.

La méthodologie "plan d'expérience" est accessible au regard de son contenu scientifique.

La méthodologie "réseau de neurones" fait quant à elle appel à des notions mathématiques plus "complexes", notamment concernant les algorithmes d'entraînement. Cependant, la prise en main des réseaux de neurones peut être accélérée par l'utilisation de logiciels adaptés. C'est notamment le cas du logiciel Matlab®, qui, par l'intermédiaire de sa

boîte à outils “Neural Networks”, met à disposition de l'utilisateur un panel important d'architectures et d'algorithmes d'entraînement. Globalement, la méthodologie “plan d'expérience” est un outil relativement facile d'utilisation comparée aux réseaux de neurones.

Un des gros avantages de la méthode “réseaux de neurones” réside dans sa bonne flexibilité. Il est, en effet, très rapide de modifier les échantillons nécessaires à l'entraînement du réseau. Une comparaison de celle-ci à la méthodologie “plan d'expérience”, lorsque l'architecture des deux méthodes a été au préalable arrêtée, a été réalisée (cf. Figure II-35). Elle met en avant la simplicité et la rapidité de l'obtention d'un nouveau résultat faisant suite à l'analyse d'un nouvel échantillon ou tout simplement l'enrichissement de la base de donnée existante.

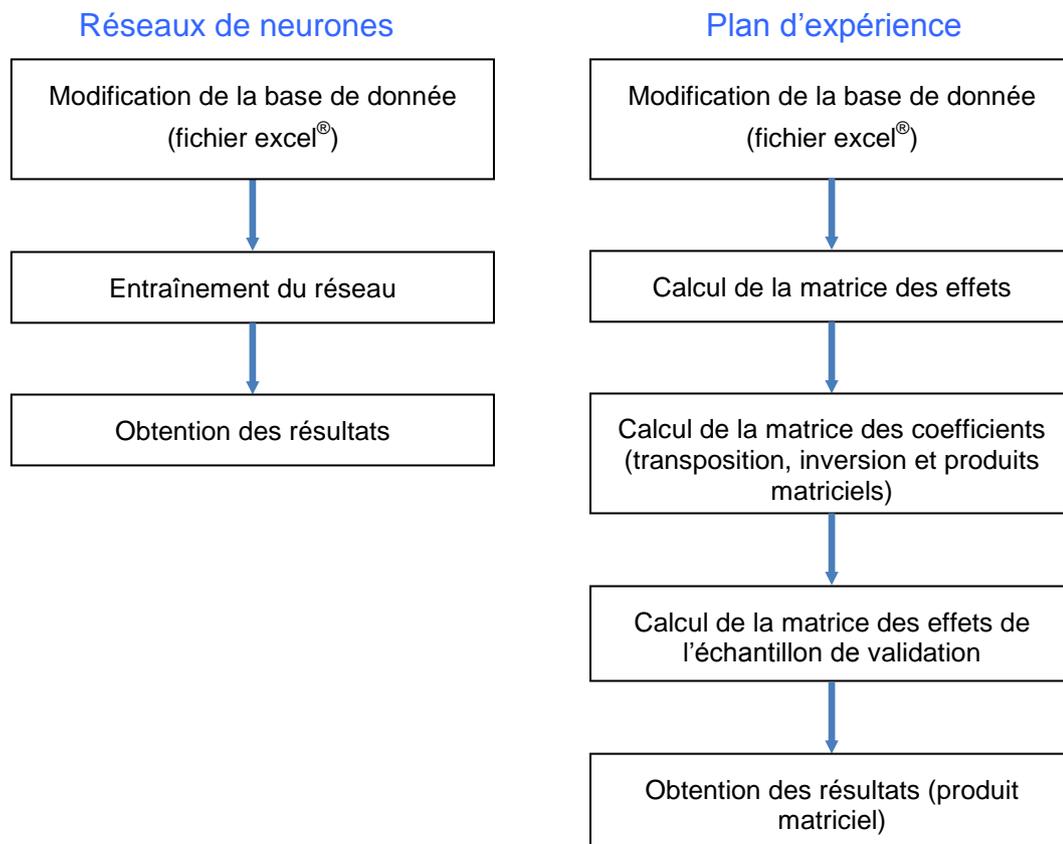


Figure II-35 : Procédure de modification d'un modèle.

Cette analyse a donc permis d'établir une comparaison entre deux méthodes de modélisation destinées à la mise en place d'un modèle prédictif expérimental de type “boîte noire”. Ce type de modélisation s'appuie uniquement sur des données expérimentales et a donc un domaine de validité borné. Il est toutefois possible pour les deux méthodes, d'obtenir un certain nombre d'informations “cachées” dans la boîte. C'est notamment le cas de la sensibilité des paramètres de sortie par rapport aux variables d'entrée. Cette information est intéressante dans une démarche d'optimisation pour connaître les facteurs les plus influent et de ce fait, affiner le modèle en réduisant le nombre de paramètres d'entrée. L'obtention des sensibilités est une opération très aisée dans le cadre d'une démarche de modélisation par les

plans d'expériences qui permet d'isoler les facteurs ou les interactions prépondérantes. Concernant une modélisation par les réseaux de neurones, cette opération se révèle bien plus complexe.

Les résultats ont montré l'intéressante capacité des réseaux de neurones à conserver une précision satisfaisante pour une taille d'échantillon réduite (8 essais). Cela représente un intérêt important notamment dans l'industrie, permettant une économie de temps et d'argent suite à la diminution de la quantité d'essais à réaliser. La méthode "réseaux de neurones" apporte une flexibilité, s'adaptant rapidement et simplement à une nouvelle campagne. Elle revêt un caractère évolutif en permettant l'enrichissement d'un modèle au fur et à mesure de l'élaboration de la base d'apprentissage.

## II.5. Conclusions

Ce chapitre a présenté l'ensemble des démarches nécessaires à la mise en place d'une modélisation par les réseaux de neurones. Les différentes analyses réalisées ont permis d'identifier un couple architecture/algorithme le plus performant. En amont, la structure d'un neurone et l'organisation de ce dernier en réseau ont été introduites. Les algorithmes de descente de gradient et gradient conjugué ainsi que leurs paramètres influant ont été décrits. Le tableau (cf. Figure II-36) synthétise les différents couples architecture/algorithme étudiés et leurs paramètres associés.

	Paramètres	Paramètres analysés		Le + performant
Architecture	Nombre de couches	2 à 3		3
	Nombre de neurones	1 à 100		variable
	Fonction d'activation	Seuil		couple sigmoïde/ linéaire
		Linéaire		
Sigmoïde				
Algorithme	Descente de gradient	Classique		Fletcher-Reeves avec la routine de recherche Charalambous
		Avec momentum		
		Pas d'apprentissage variable		
	Gradient conjugué	version	routine	
		Fletcher-Reeves	Golden section	
		Polak-Ribière	Brent's	
		Powell-Beale	Bisection-cubic	
		Scaled conjugate	Charalambous	
			Backtracking	
	Régulation	Avec ou sans		

Figure II-36 : Synthèse des paramètres d'un réseau de neurones.

Pour déterminer le couple architecture/algorithme optimal, l'étude a présenté les algorithmes les plus fréquemment étudiés dans la bibliographie, les algorithmes de descente

de gradient. L'analyse s'est dans un premier temps cantonnée à une architecture de réseaux à une seule couche cachée et une sortie pour ensuite pouvoir analyser l'influence de la modification de l'architecture sur les performances du réseau. Une autre famille d'algorithmes d'entraînement a ensuite enrichi l'étude : l'algorithme du gradient conjugué. Une analyse exhaustive des différentes versions de cet algorithme a été menée. Ces derniers se sont révélés plus performants que l'algorithme de descente de gradient.

Une fois, le couple architecture/algorithme déterminé, les performances de la méthodologie "réseaux de neurones" a pu être comparée à celles offertes par un modèle multi-linéaire mis en place par la méthodologie "plan d'expérience". Les résultats ont mis en avant les performances bien supérieures que permet l'utilisation d'un modèle "réseaux de neurones". Celles-ci se manifestent par une erreur de modélisation plus faible ainsi que par une capacité supérieure du modèle à extrapoler des résultats en dehors du domaine d'étude.

La suite de l'étude va aborder la mise en place du modèle multi-matériaux. Les paramètres du couple architecture/algorithme le plus performant ont été déterminés avec un échantillon d'entraînement similaire à celui du modèle multi-matériaux. Les résultats de cette analyse seront réutilisables dans la suite de l'étude. Les différentes procédures expérimentales destinées à mettre en place cet échantillon seront également présentées.

### III. Démarches expérimentales



### III.1. Introduction

Le chapitre précédent a permis d'introduire les outils destinés à mettre en place le modèle multi-matériaux. Le choix a été fait de s'orienter vers une modélisation dite "boîte noire" à l'aide d'algorithmes, dont l'architecture est fondée sur le fonctionnement du cerveau humain, appelés "réseaux de neurones". Il existe un grand nombre d'architectures et d'algorithmes d'entraînement disponibles pour ce type de modélisation. Après en avoir présenté un certain nombre, une analyse a ensuite été menée afin d'en déterminer les plus performants pour notre étude. Pour ce faire, à partir des résultats d'une campagne d'essais, une base de données a pu être constituée dans le but d'analyser, comprendre et optimiser le fonctionnement des réseaux de neurones. Le choix de l'échantillon d'entraînement a été guidé par la proximité de ses paramètres (entrée, sortie) avec la future base de données multi-matériaux. L'ensemble de cette démarche a permis de gagner un temps précieux dans l'attente du dépouillement des essais matériaux et multi-matériaux permettant de constituer les échantillons d'entraînement et de validation du modèle.

L'étape suivante de l'étude est donc la constitution de la base de données. Le modèle multi-matériaux présenté au paragraphe II.1, est un assemblage composite de deux modèles matériaux mis en série pour reconstituer l'empilement considéré. Le choix a donc été fait de réaliser deux campagnes d'essais. Une première campagne va permettre de constituer une base de données concernant le perçage indépendant des matériaux composant l'empilement (CFRP et aluminium). Ces échantillons permettront de mettre en place les modèles expérimentaux destinés à prédire le comportement propre de chacun des matériaux de l'empilement. Ces derniers seront les maillons de la chaîne formant l'architecture du modèle global multi-matériaux. La deuxième campagne consiste quant à elle, à établir un échantillon d'essais multi-matériaux pour valider les résultats obtenus en sortie du modèle global.

Deux types d'essais ont donc été entrepris :

- ◆ des essais de perçage sur des éprouvettes en aluminium et en CFRP de 3 épaisseurs (4, 8 et 12 mm),
- ◆ des essais de perçage sur des empilements CFRP/Aluminium, dans les deux configurations possibles, pour toutes les combinaisons réalisables avec les épaisseurs précédentes, soient 18 empilements.

Ce chapitre s'attache donc à décrire dans un premier temps, l'ensemble des techniques expérimentales destinées à quantifier les différents critères de qualité caractérisant un perçage multi-matériaux. Cette étape a également pour objectif, d'identifier les paramètres influant sur ces critères pour les prendre en compte dans le modèle global multi-matériaux. Pour ce faire, une démarche devra être mise en place pour les caractériser et les quantifier.

Le paragraphe qui va suivre va s'attacher à décrire les essais réalisés pour la constitution des bases de données.

## III.2. Présentation des essais

La phase d'apprentissage (cf. II.2) d'un réseau de neurones consiste à l'alimenter par un échantillon professeur. Cet échantillon est constitué d'un jeu de paramètres d'entrée auquel il faut associer un jeu de paramètres de sortie. Le paragraphe II.1.4 s'est attaché à déterminer les paramètres d'entrée pertinents vis à vis de l'architecture du modèle multi-matériaux global. Pour rappel, ces derniers sont :

- ◆ les conditions de coupe ( $N$  et  $f$ ),
- ◆ l'épaisseur percée,
- ◆ un indicateur de l'usure initiale de l'outil avant le perçage.

Un point important est à souligner : aucun des paramètres ne fait référence à la géométrie du foret (diamètre, angles de coupe). Chaque modèle est par conséquent rattaché à un outil bien défini (diamètre, géométrie, revêtement). Plusieurs raisons peuvent expliquer ce choix.

La généralisation du modèle à un grand nombre de géométries aurait entraîné l'augmentation significative du nombre d'essais. L'augmentation du nombre de paramètres d'entrée débouche sur une multiplication de la taille de la campagne d'essais et avec elle, l'augmentation :

- ◆ du temps destiné à sa réalisation et par conséquent de la mobilisation des machines utilisées,
- ◆ du coût de la campagne d'essais.

Ce dernier augmenterait de manière significative du fait de la consommation supplémentaire de matière (éprouvettes supplémentaires pour les deux matériaux et pour les multi-matériaux) ainsi que d'outils. A ces éléments, il faut également ajouter que l'objectif de cette étude n'est pas de déterminer une géométrie optimale de la coupe en perçage multi-matériaux, mais d'établir un modèle prédictif, pour un outil donné, en réalisant un nombre d'essais réduit.

Pour que l'apprentissage du réseau puisse être réalisé, les paramètres d'entrée doivent être associés à un jeu de paramètres de sortie. Ces derniers ont également été évoqués dans le paragraphe II.1.4 et sont :

- ◆ la qualité du perçage réalisé,
- ◆ un indicateur de l'usure de l'outil après le perçage.

La qualité du perçage est quantifiée par des critères de qualité, précédemment abordés dans le paragraphe I.3.2. Dans le cadre de cette étude, la qualité du perçage est définie par :

- ◆ les défauts dimensionnels,
- ◆ les défauts géométriques (circularité, cylindricité)

- ◆ la hauteur de bavure (dans le cas de l'aluminium),
- ◆ l'étendue du délaminage (dans le cas du composite).

Bien que très utilisée industriellement, la rugosité n'est pas mesurée dans cette analyse. L'étude bibliographique (cf. I.2.1.3) a montré les difficultés rencontrées lors de la mesure de ce critère sur un perçage dans un CFRP, dues à la nature fibreuse et à l'hétérogénéité du matériau. Des travaux réalisés sur l'acquisition de profils de rugosité selon différentes génératrices [Roud 06] ont montré que les défauts locaux (arrachements, fibres non coupées) altéraient l'état de surface de la paroi percée et ce, de manière inégale selon les différents profils mesurés (cf. Figure III-1). La mesure est de ce fait non répétable, il est par conséquent peu pertinent d'utiliser ce critère dans le cadre de notre modélisation.

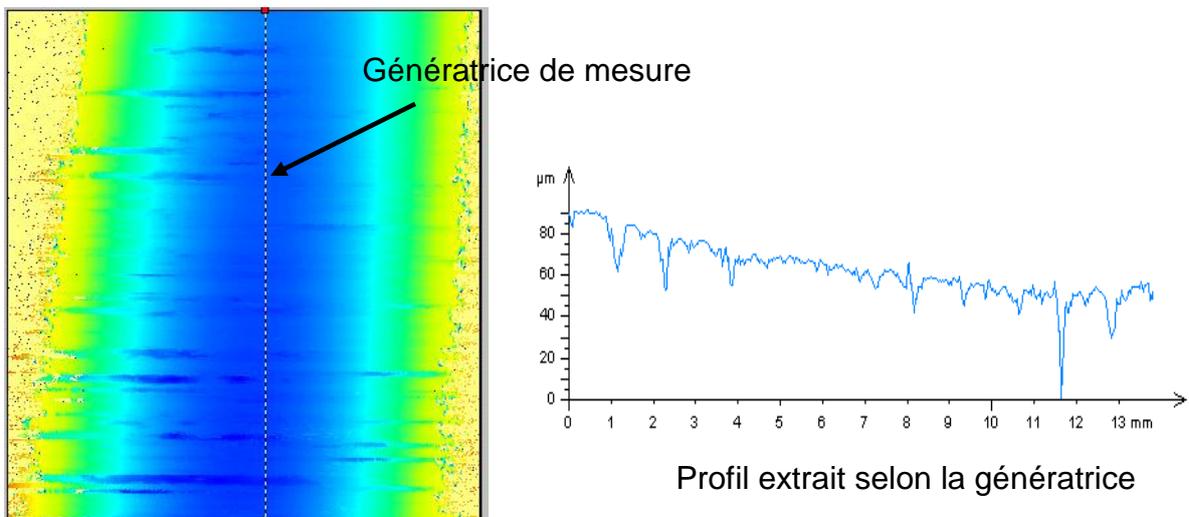


Figure III-1 : Extraction des profils de rugosité.

Il en est de même pour les dégradations thermiques pour lesquelles il est difficile de mettre en place un critère quantifiable.

### III.2.1. Dispositif expérimental

Les essais ont été réalisés par l'intermédiaire du plateau en techniques avancées d'usinage d'aquitaine (PTAU) au sein de l'IUT Génie Mécanique et Productique (GMP) de Bordeaux 1.

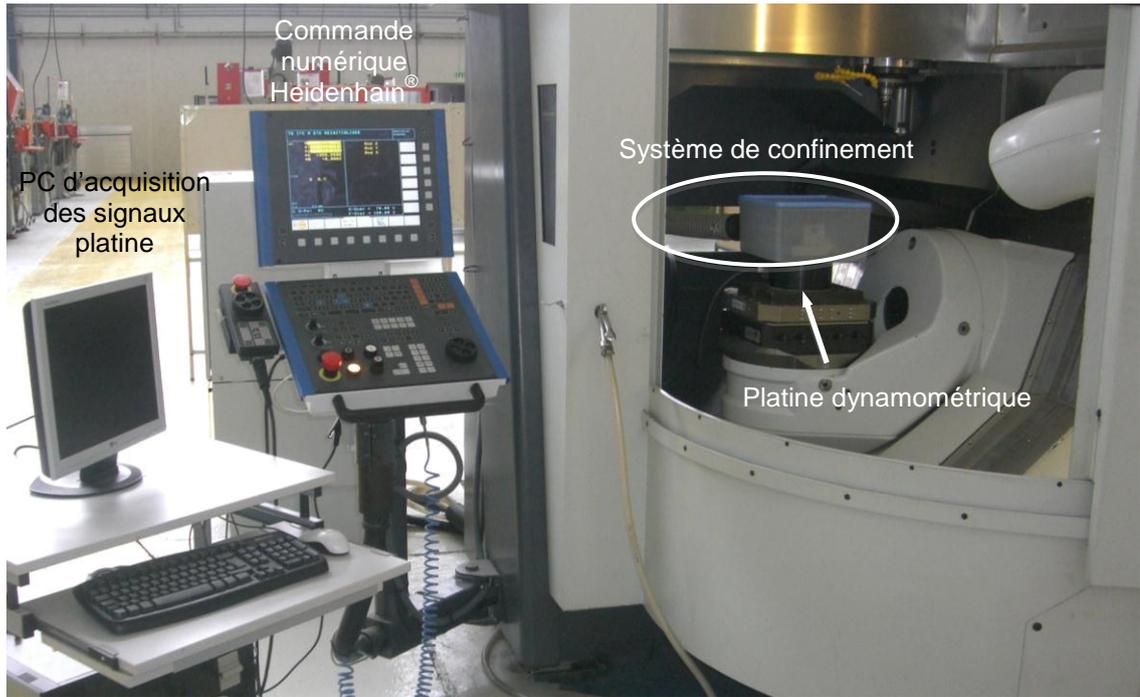


Figure III-2 : Dispositif expérimental.

Le dispositif expérimental est constitué d'un centre d'usinage UGV MIKRON HSM 600 U 5 axes, équipé d'un dispositif d'aspiration composite (cf. Figure III-2). Le porte pièce est monté sur une platine dynamométrique 6 composantes (cf. Figure III-3), elle même fixée à la table de la machine. Cette platine est capable de mesurer les actions mécaniques sur les 6 composantes du torseur en tout point de l'espace de mesure. Elle a été développée par Y. Couétard [Coué 93] au sein du Laboratoire de Mécanique Physique (LMP). Elle sera présentée dans la suite de l'étude (cf. III.3.1).

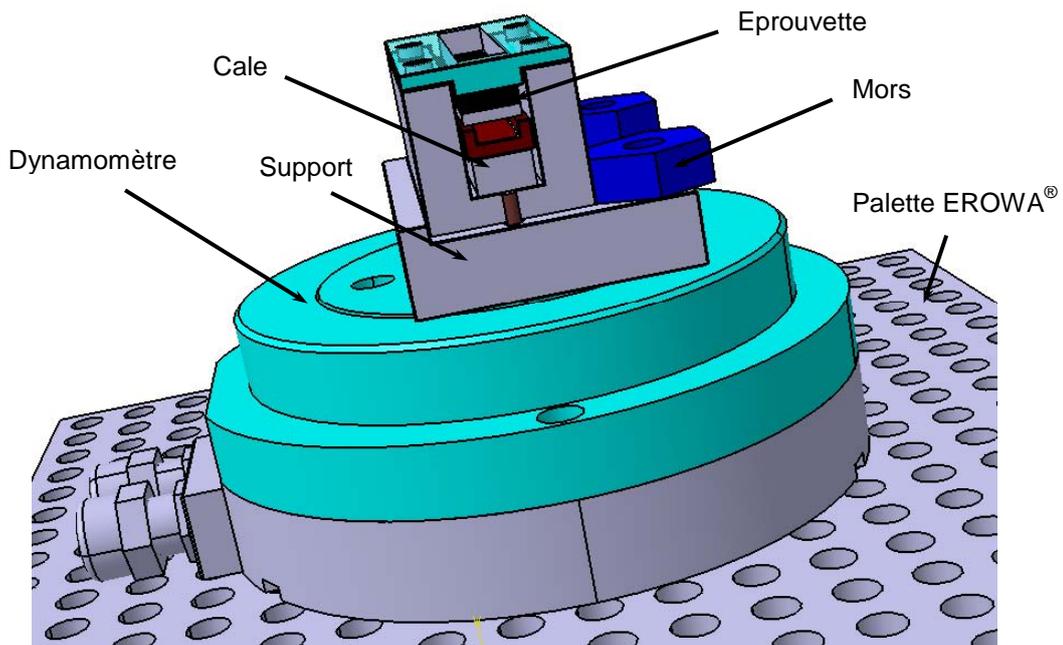


Figure III-3 : Schéma du montage expérimental sans le système d'aspiration.

### III.2.1.1. Porte pièce

Le positionnement des éprouvettes par rapport à la platine est réalisé par l'intermédiaire du montage porte-pièce. Pour conserver la position de perçage par rapport aux capteurs de la platine et limiter les dispersions sur la mesure des actions de coupe, le choix a été fait de réaliser la totalité des perçages au centre de celle-ci. Le montage porte-pièce doit donc réaliser deux fonctions :

- ◆ le maintien de l'empilement pendant le perçage,
- ◆ le positionnement au centre de la platine du perçage à réaliser.

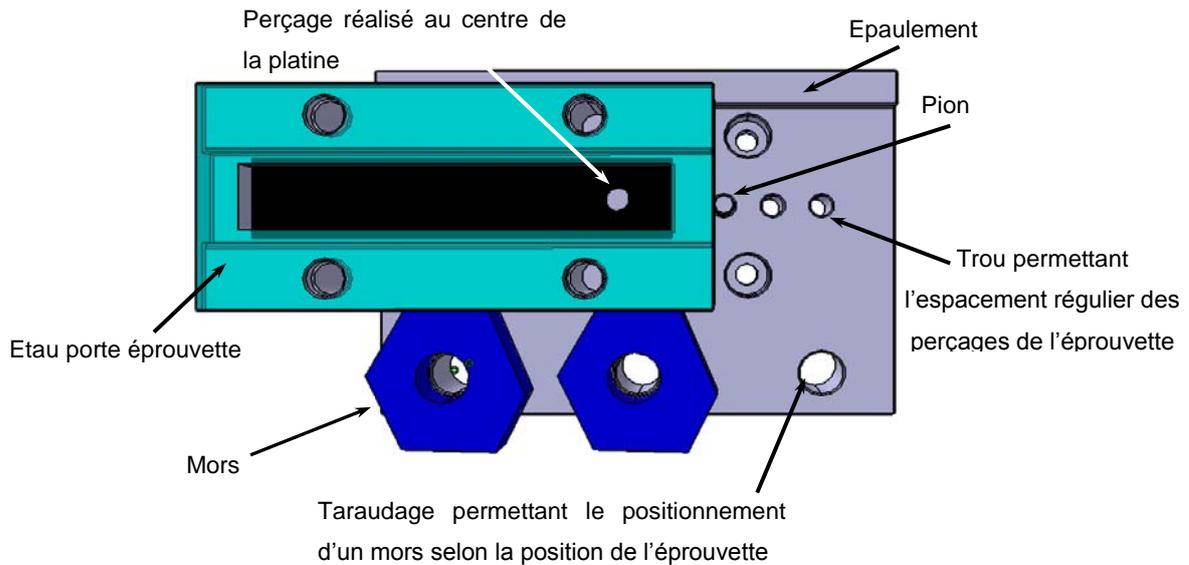


Figure III-4 : Schéma du porte pièce (sans la visserie).

Pour réaliser ces deux fonctions, le porte-pièce est constitué de plusieurs éléments (cf. Figure III-3 et Figure III-4). Le support permet de réaliser une liaison complète démontable avec la platine. L'isostatisme de la mise en position est assuré par :

- ◆ un appui plan sur le support (3 degrés de liberté),
- ◆ un appui linéaire sur l'épaulement (2 degrés de liberté),
- ◆ un appui ponctuel sur le pion (1 degré de liberté).

Le maintien en position est assuré par les deux mors dont la position est réglable selon le numéro du perçage à réaliser (cf. Figure III-5-c et cf. Figure III-5-d). La liaison entre le support et la platine étant complète, seul le déplacement de l'étai porte-échantillon peut assurer la mise en position relative de l'éprouvette par rapport à la broche et par conséquent du foret (cf. Figure III-5).

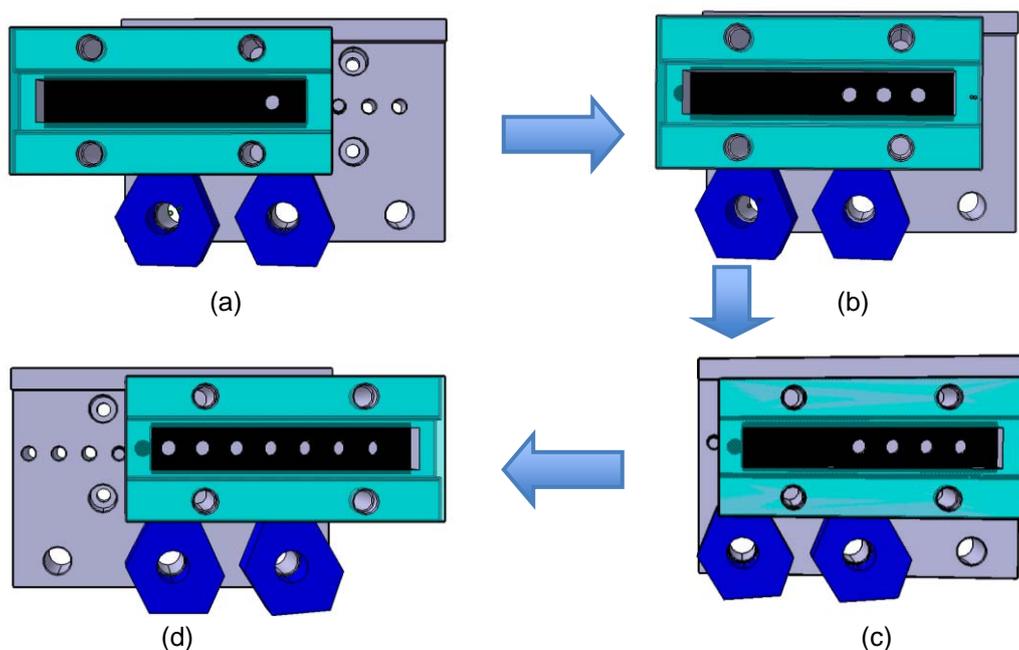


Figure III-5 : Différents positionnements relatifs entre l'étau porte éprouvette et le support.

Pour que l'étau puisse maintenir l'éprouvette, un jeu de cales (cf. Figure III-3) sur mesure a été réalisé, assurant son adaptabilité aux différentes épaisseurs des éprouvettes.

Enfin, une "cloche" reliée à un aspirateur à composite (cf. Figure III-2) permet d'aspirer les particules de carbone et de ce fait, d'éviter qu'elles ne saturant l'atmosphère de la machine. Ces particules très fines peuvent également s'immiscer dans certains organes de la machine notamment dans les glissières.

### III.2.1.2. Éprouvettes

Deux types d'éprouvettes sont utilisées dans cette étude :

- ◆ les éprouvettes mono-matériau (aluminium, CFRP),
- ◆ les éprouvettes multi-matériaux.

Quelque soit le type de celles-ci, seule l'épaisseur peut varier d'une éprouvette à une autre. Celle-ci peut être de 4, 8 et 12mm en ce qui concerne les éprouvettes mono-matériau. Les différentes combinaisons possibles réalisées à partir de deux éprouvettes mono-matériau ont été étudiées, soit des épaisseurs de 8, 12, 16, 20 et 24 mm.

L'obtention de ces dernières diffère selon la nature du matériau considéré. Les éprouvettes en aluminium ont été obtenues après découpe de barres de 2 m de long. Afin de coller au plus près aux conditions aéronautiques, le choix a été fait d'utiliser une nuance de la série 7000, l'alliage d'aluminium 7175 (alliage aluminium-zinc). Cet alliage dit «à haute résistance» est un dérivé de l'alliage 7075. Il s'en distingue par une teneur en impuretés inférieure et par là même une meilleure ténacité sans modifier ses propriétés.

En ce qui concerne les éprouvettes CFRP, le choix a été fait d'opter pour une séquence quasi isotrope (-45, 0, 45, 90)S en carbone/époxy, réalisée en autoclave par le CRITT Mécanique et Composites de Toulouse (cf. Figure III-6). Le CFRP a été obtenu à partir d'un empilement de préimprégnés unidirectionnels. Ce préimprégné est constitué :

- ◆ d'une résine époxy HexPly® M21 de la société Hexcel® ,
- ◆ de fibres T800S unidirectionnelles.

Le taux massique de résine du préimprégné est de 35% et l'épaisseur d'une couche est de 0,193 mm [Hex 10].

Une fois sorties de l'autoclave, les éprouvettes sont ensuite obtenues par une découpe au jet d'eau.

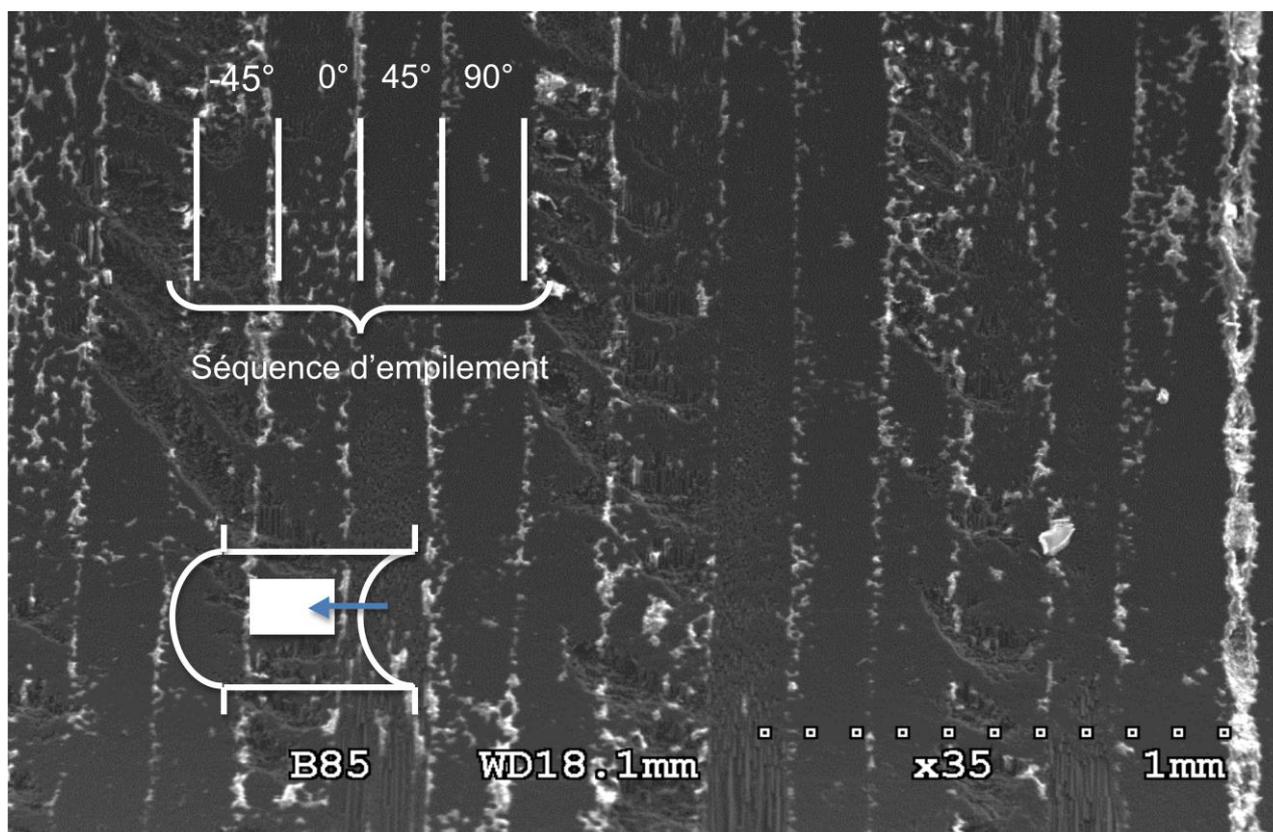


Figure III-6 : Image prise au MEB de la séquence d'empilement.

Afin d'obtenir un empilement multi-matériaux, les deux éprouvettes matériaux ont été collées par l'intermédiaire d'une colle époxy (cf. Figure III-7). Le collage permet de fixer durablement les parties de l'assemblage et autorise la réalisation des mesures dimensionnelles et géométriques.

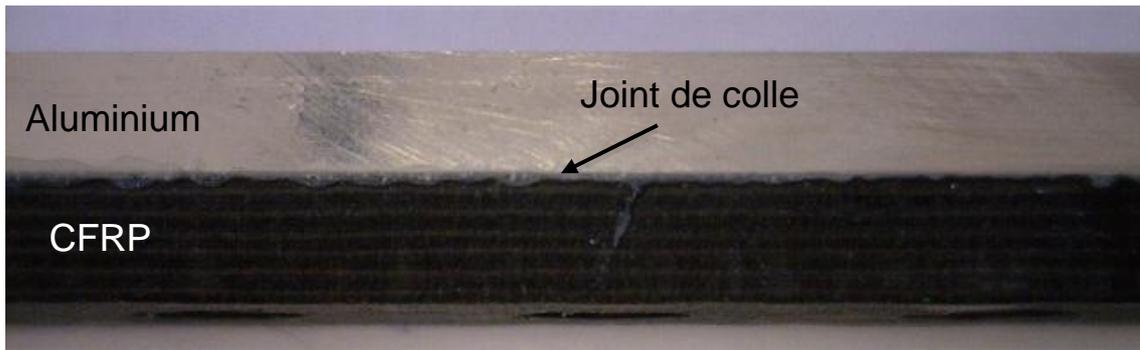


Figure III-7 : Assemblage par collage.

### III.2.2. Outils

Pour être le plus cohérent possible vis à vis des problématiques industrielles, notamment aéronautiques, dans lesquelles se place cette étude, le choix du diamètre des outils s'est porté sur un diamètre  $\varnothing 6,35$  mm (1/4 de pouce), utilisé dans le cadre d'assemblage par rivets (cf. I.2.1.1).

L'observation de l'influence de paramètres tels que le revêtement ou la géométrie du foret, a nécessité l'utilisation de différents outils issus de la combinaison de ces deux paramètres. Le choix des outils s'est porté vers l'utilisation de 4 forets détaillés dans le tableau suivant (cf. Figure III-8).

	Outil 1	Outil 2	Outil 3	Outil 4
Géométrie	Sandvik	Guhring (réf 5517)	Guhring (réf 5517)	Guhring (réf 5517)
Revêtement	DLC (C7)	sans	DLC (PDR)	Tetrabond®

Figure III-8 : Nomenclature des outils utilisés.

Trois versions de l'outil Guhring (réf 5517) ont été utilisées dans cette étude. Ce foret en carbure de tungstène micrograin (nuance K) est vendu sans revêtement. Pour observer l'influence du revêtement sur la qualité du perçage et la durée de vie de l'outil, deux natures de revêtements ont été déposées par la société Ionbond® sur cet outil (outil 3 et outil 4). Ces deux revêtements sont des couches de DLC (Diamond like Carbon), obtenues par dépose PVD (cf. I.2.1.4). Les revêtements DLC sont des couches de diamant amorphes associant une dureté élevée (entre 70 et 90 GPa) à un très faible coefficient de frottement.

La seconde géométrie est un outil Sandvik revêtu DLC. Sa géométrie (cf. Figure III-9-b) est typiquement destinée au perçage des matériaux fibreux tel que le carbone/époxy. Celle-ci se caractérise notamment par :

- ◆ une préparation de l'arête à proximité de l'âme du foret afin de limiter sa partie non coupante (cf. Figure I-5),
- ◆ la présence à l'extrémité extérieure de l'arête de coupe d'une partie tranchante.

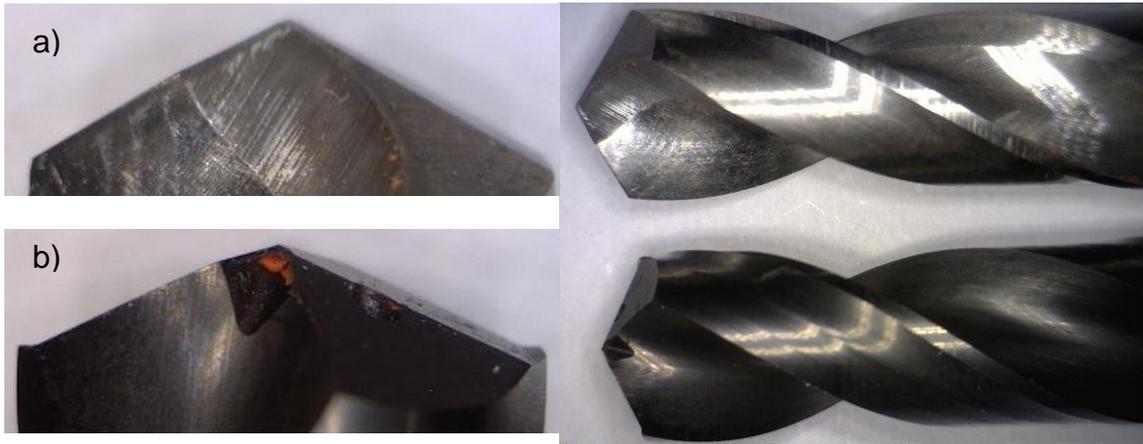


Figure III-9 : Géométries des forets de l'étude.

Comme nous l'avons vu précédemment (cf. I.2.1.1), ces particularités géométriques permettent respectivement de diminuer l'effort de poussée  $F_z$  et d'augmenter la faculté de coupe de l'outil sur la périphérie de l'arête. Dans les deux cas, l'objectif est de diminuer l'ampleur du délaminage en sortie du perçage.

Les conditions de coupe utilisées (cf. Figure III-10) ont été sélectionnées pour correspondre aux deux matériaux constituant l'empilement. Celles-ci vont principalement être imposées par le CFRP, dont le domaine de coupe est plus restreint que celui de l'aluminium (cf. Figure I-21).

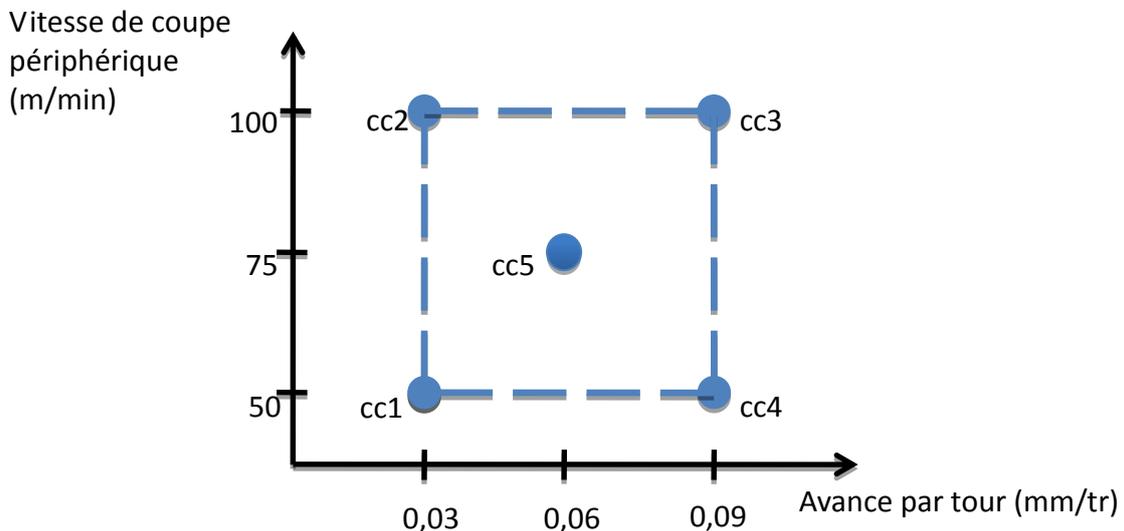


Figure III-10 : Conditions de coupe (cc) des essais.

En prenant en compte les différentes contraintes telles que la quantité de matière, ou la durée de vie des outils, la planification de la campagne d'essais a pu être réalisée.

L'architecture de celle-ci pour chaque outil s'organise sous la forme d'un plan complet de 3 facteurs :

- ◆ la fréquence de rotation,
- ◆ l'avance par tour,
- ◆ l'épaisseur des éprouvettes.

Afin de prendre en compte dans le modèle, l'usure de l'outil, ce plan complet a été réalisé deux fois consécutivement pour le même outil (cf. Figure III-11). Ainsi, pour chaque combinaison des 3 facteurs, il sera possible de comparer les résultats correspondant pour deux états d'usure de l'outil.

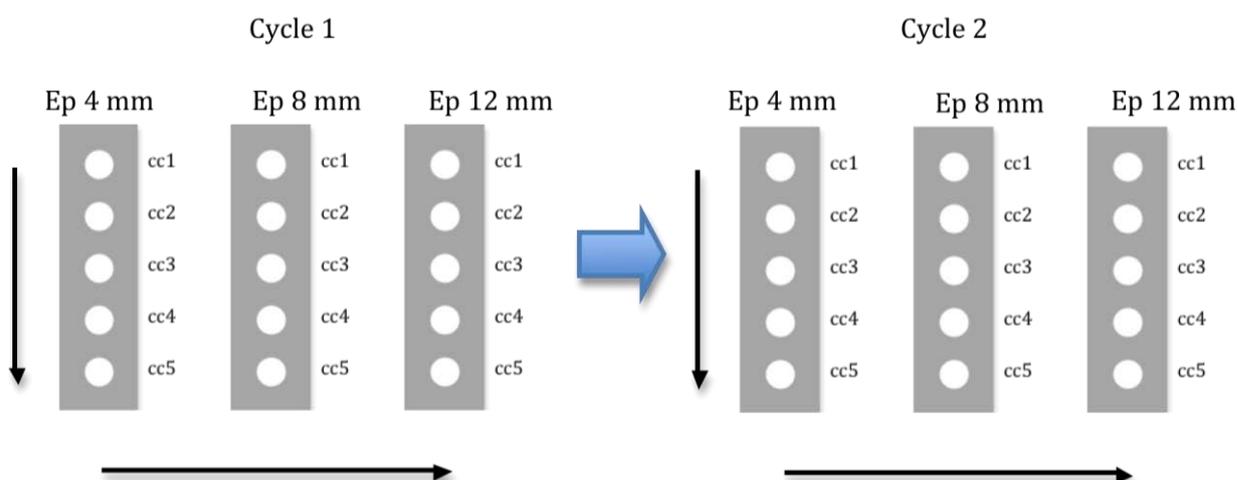


Figure III-11 : Ordre des perçages de la campagne d'essais matériaux seuls.

Dans ce paragraphe, le déroulement des essais et les outils permettant de les réaliser ont été présentés. Pour mieux comprendre l'influence des deux principaux paramètres variables de cette étude (géométrie et revêtement) une analyse des actions mécaniques de coupe est entreprise dans la suite de l'étude. Celle-ci débouche sur la caractérisation du comportement ou "signature" de l'outil.

### III.3. Analyse des signaux d'efforts

Pour mesurer les actions mécaniques de coupe, deux moyens de mesures ont été utilisés (cf. Figure III-12) :

- ◆ la platine dynamométrique 6 composantes,
- ◆ la fonction oscilloscope de la commande numérique Heidenhain® ITNC 530 du centre d'usinage MIKRON HSM 600 U.

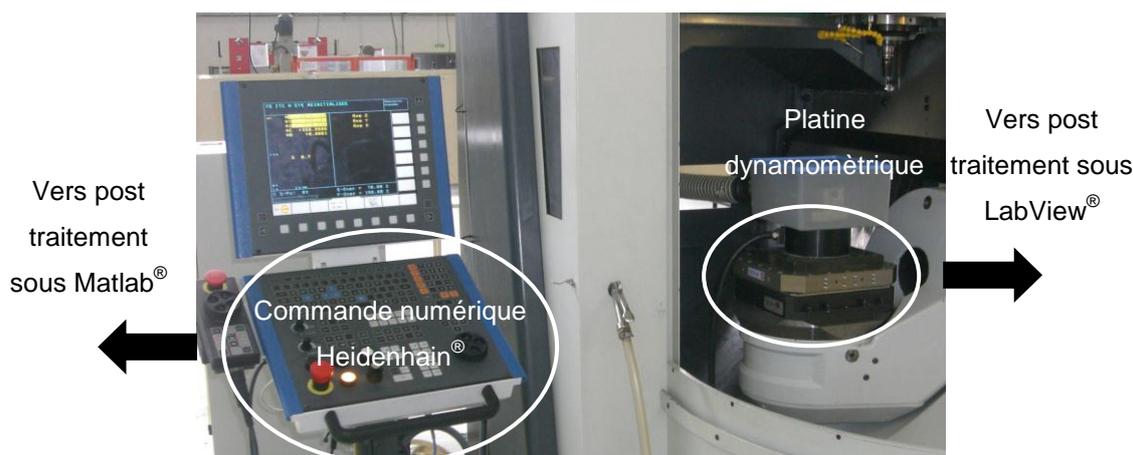


Figure III-12 : Systèmes d'acquisition des efforts de coupe.

Le choix de ces deux outils de mesure a été dicté par les objectifs de l'étude. La réalisation des mesures à l'aide de la platine dynamométrique a plusieurs objectifs :

- ◆ l'identification de la "signature" de l'outil,
- ◆ la mise en place d'un modèle phénoménologique,
- ◆ l'étalonnage des signaux de l'oscilloscope.

Cette dernière opération est nécessaire car les signaux de l'oscilloscope sont des enregistrements des intensités des courants d'alimentation des moteurs d'avance et de rotation de la broche. Dans le but de pouvoir exploiter ces relevés, une superposition de ces derniers avec les signaux d'efforts issus de la platine est nécessaire.

Cette analyse est abordée dans la suite de l'étude, après avoir présenté et commenté l'analyse des signaux de la platine dynamométrique.

### III.3.1. Signaux issus de la platine dynamométrique

Comme nous l'avons vu précédemment, la platine dynamométrique est conçue pour mesurer les actions mécaniques sur les 6 composantes du torseur en tout point de l'espace de mesure [Coué 93]. Elle permet donc de rendre compte des phénomènes de coupe sans éluder une partie de l'information comme dans le cas de l'utilisation de capteurs 2, 3 ou 4 composantes. Dans le cadre de cette étude, celle-ci a permis d'enregistrer les actions mécaniques de coupe lors du perçage des différents échantillons avec les 4 outils précédemment présentés.

Pour réaliser l'enregistrement des signaux, un dispositif d'acquisition a été mis en place (cf. Figure III-13). Celui-ci est constitué :

- ◆ de la platine dynamométrique 6 composantes,
- ◆ d'un dispositif d'amplification constitué de 6 amplificateurs (un amplificateur par voie), permettant également le réglage de la sensibilité de la mesure selon les matériaux usinés,
- ◆ d'une application de post-traitement.

Cette dernière, développée au sein du PTAU, à partir du logiciel Labview®, permet d'obtenir graphiquement le torseur complet des actions mécaniques.

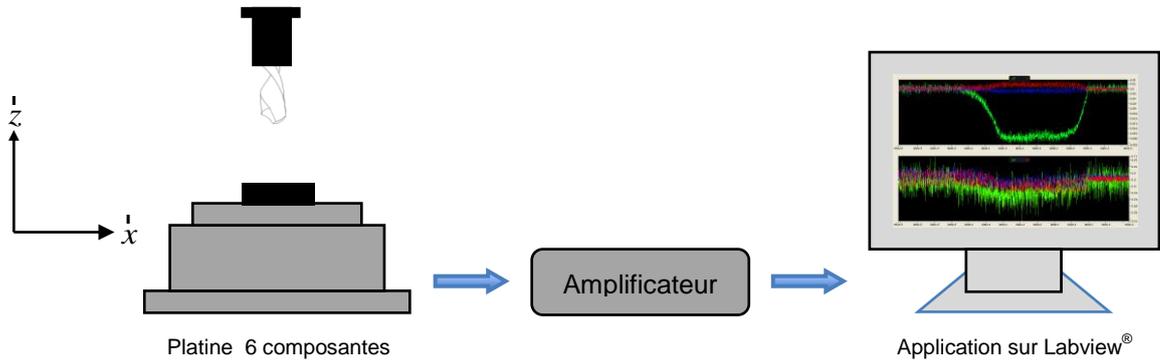


Figure III-13 : Chaîne d'acquisition des actions mécaniques de coupe.

Dans le cas du perçage, la forme du torseur des actions mécaniques de coupe est supposée uniquement constituée de l'effort de poussée  $F_z$  et du moment de coupe  $M_z$ . Les mesures réalisées (cf. Figure III-14) montrent que les efforts et moment radiaux ne sont pas nuls. Ces actions sont dues aux différents défauts qui peuvent exister sur la géométrie de l'outil ou sur son positionnement et son orientation par rapport à l'axe de la broche [Lapo 05].

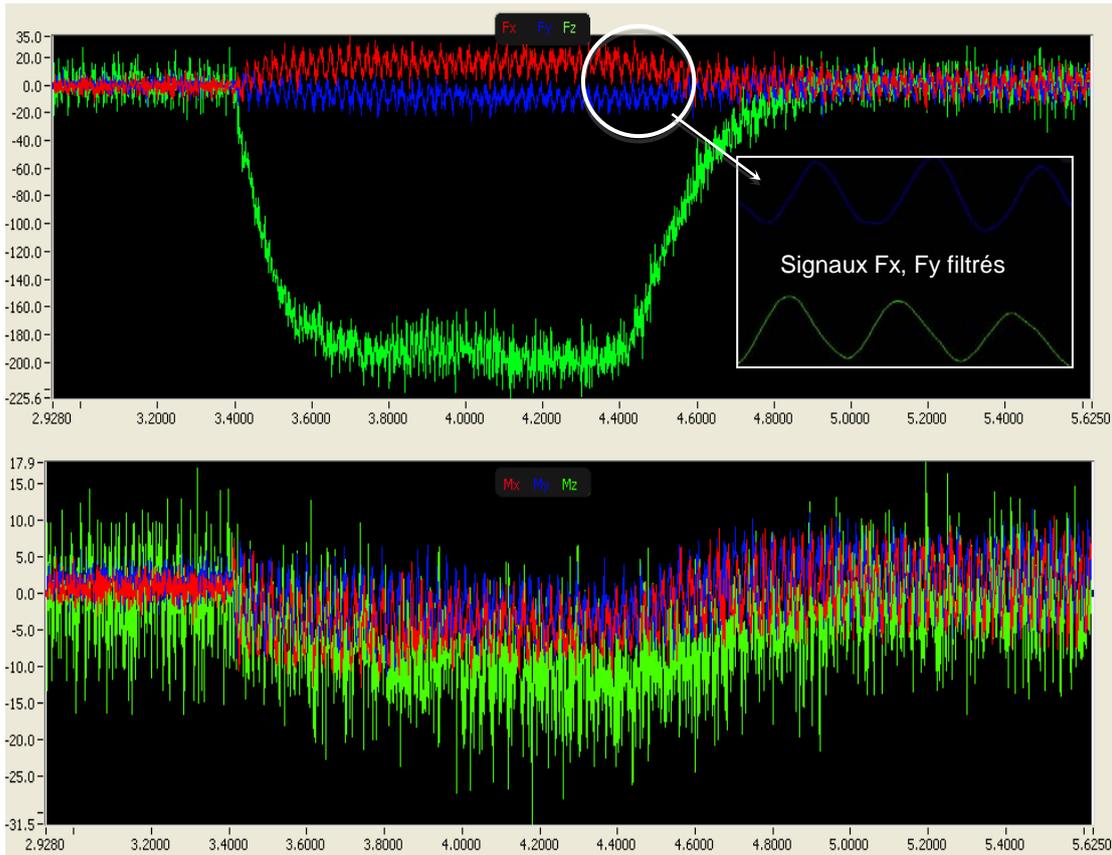


Figure III-14 : Mesure du torseur des actions mécaniques en perçage d'une éprouvette d'aluminium ; efforts en N, moments en N.dm en fonction du temps en s.

L'application de post-traitement permet également de sélectionner une partie du signal et de l'exporter sous format ASCII. Ces données sont ensuite traitées à l'aide du logiciel

Matlab<sup>®</sup>, où elles sont filtrées puis analysées, pour en extraire les informations nécessaires à la constitution de la base de données destinée à alimenter le réseau de neurones (cf. Figure III-15). Ces informations sont :

- ◆ la valeur moyenne des différentes composantes du torseur des actions mécaniques,
- ◆ leurs valeurs maximales.

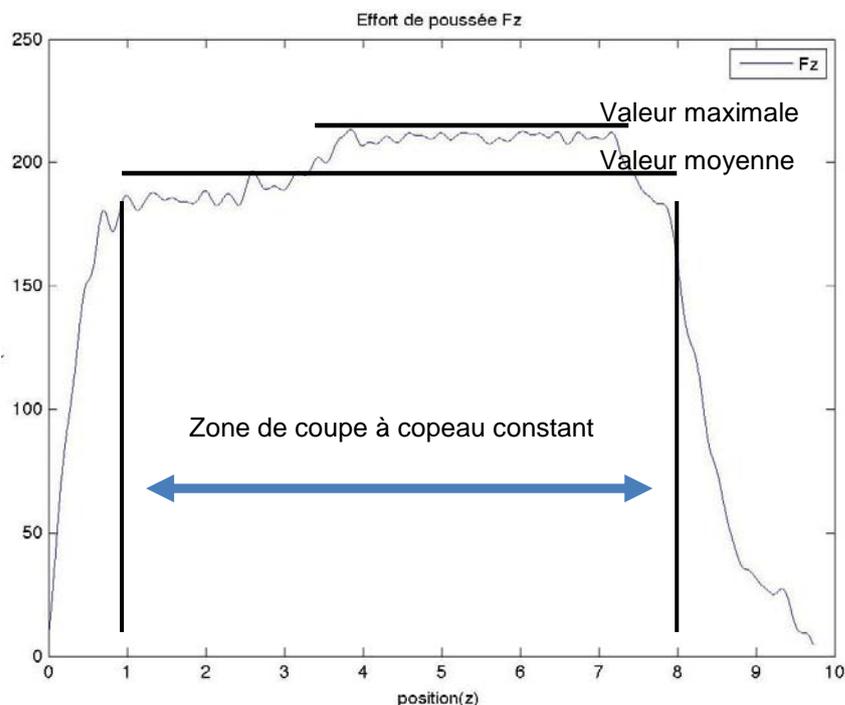


Figure III-15 : Informations extraites des signaux d'efforts.

### III.3.1.1. Analyse des signaux des efforts $F_z$ et $M_z$

L'analyse va dans un premier temps aborder l'étude des signaux mono-matériau mesurés lors du perçage de l'aluminium et du CFRP séparément puis, celle-ci s'intéressera aux signaux multi-matériaux.

Tous les perçages sont réalisés à vitesse d'avance et fréquence de rotation constante. Il est donc possible d'établir une correspondance entre la progression du foret pendant le perçage et les mesures des actions mécaniques de coupe notamment l'effort de poussée  $F_z$  et le moment de coupe  $M_z$ . Si on observe les signaux de ces deux composantes du torseur des actions mécaniques lors du perçage d'un échantillon d'aluminium, celui-ci est décomposable en 3 phases :

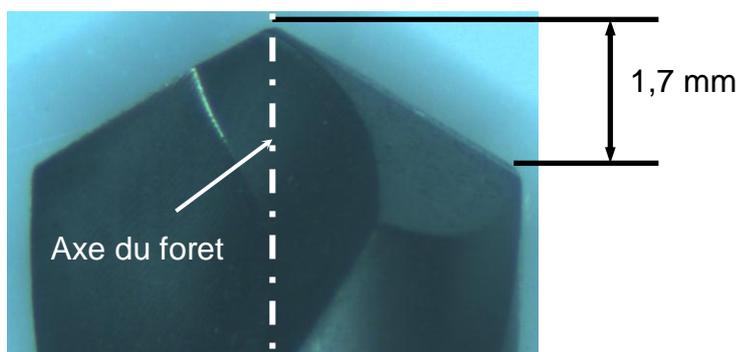
- ◆ la phase d'attaque du foret,
- ◆ la phase de coupe à copeau constant,
- ◆ la phase de débouchure.

La figure III-17 illustre l'évolution des signaux des efforts  $F_z$  et  $M_z$  en fonction de la pénétration du foret dans le perçage. Les signaux sont issus d'un essai de perçage dans un

échantillon d'aluminium d'épaisseur 4 mm avec l'outil 2. L'avance par tour utilisée est de 0,03 mm/tr et la fréquence de rotation de 2500 tr/min. La connaissance de ces informations ainsi que les paramètres géométriques de l'outil permettent une description plus détaillée des différentes phases du perçage.

Phase n°1 : Phase d'attaque du foret.

Elle correspond à la pénétration de la pointe du foret et à l'engagement des arêtes de coupe. Elle se caractérise par une augmentation des efforts jusqu'à l'engagement de la totalité de l'arête de coupe. Pour cet exemple, la longueur de la pointe du foret mesure 1,7 mm (cf. Figure III-16).



*Figure III-16 : Longueur de la pointe de l'outil 2.*

Phase n°2 : Phase de coupe à copeau constant.

L'intégralité de la pointe a pénétré le matériau, les arêtes de coupe sont donc entièrement en prise avec la matière. Dans cette phase, les efforts sont constants et les signaux forment un plateau.

Phase n°3 : Phase de débouchure.

Le foret débouche progressivement du perçage. Les efforts décroissent jusqu'à la débouchure complète de l'outil.

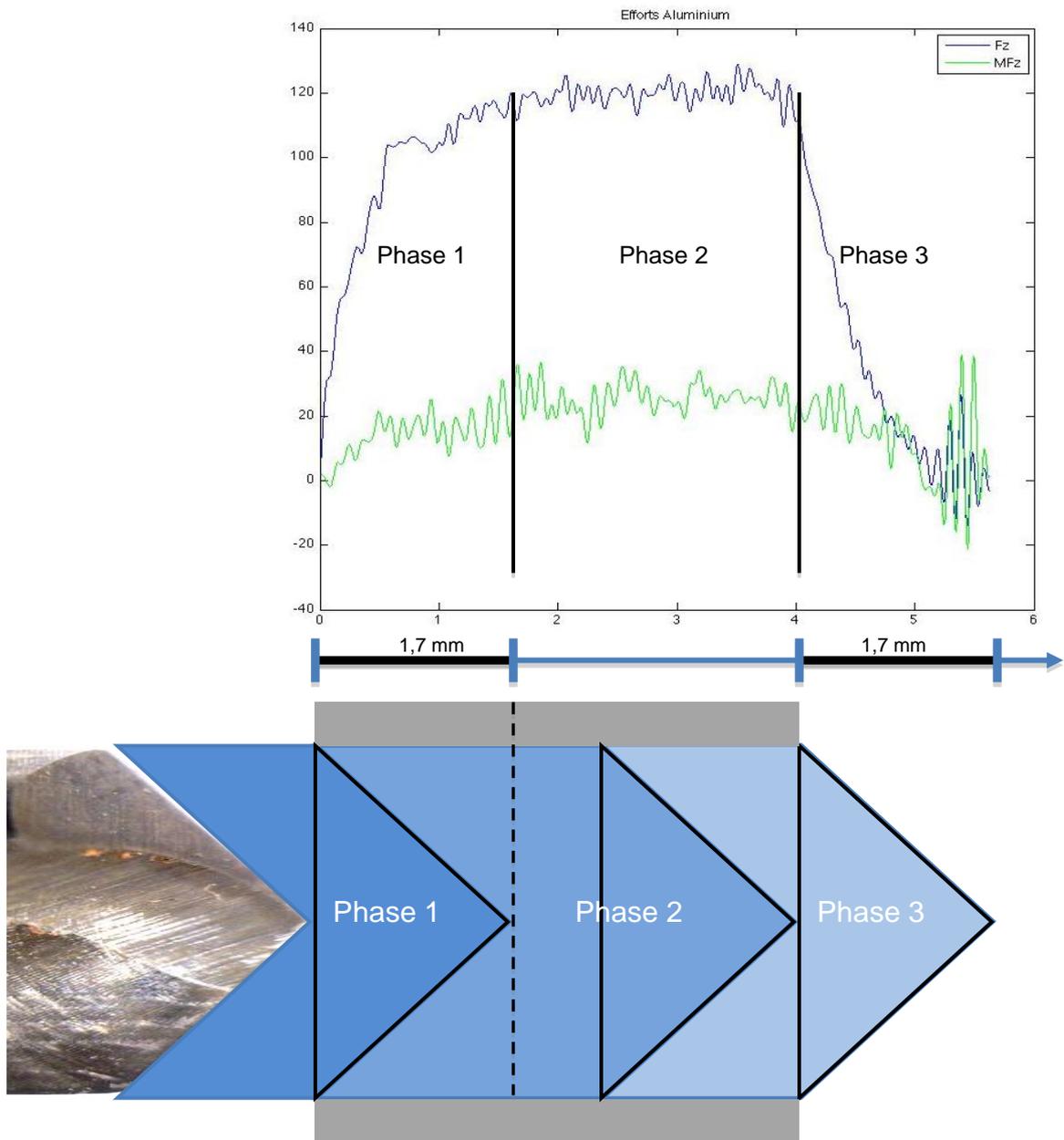


Figure III-17 : Evolution des efforts  $F_z$  et  $M_z$  en fonction de la progression du foret dans le trou.

Il existe cependant des nuances selon le matériau considéré voire l'empilement.

Le perçage d'un CFRP se différencie du précédent par les importantes disparités comportementales des deux matériaux (CFRP et Aluminium) notamment dues à l'aspect fibreux du composite (cf. Figure III-18). Ces différences se caractérisent par :

- ◆ des actions mécaniques de plus faibles intensités,
- ◆ des signaux plus "bruités" dus à l'aspect fibreux du matériau,
- ◆ des moments qui ne s'annulent pas lors de la débouchure du foret causés par le resserrement des fibres sur le listel.

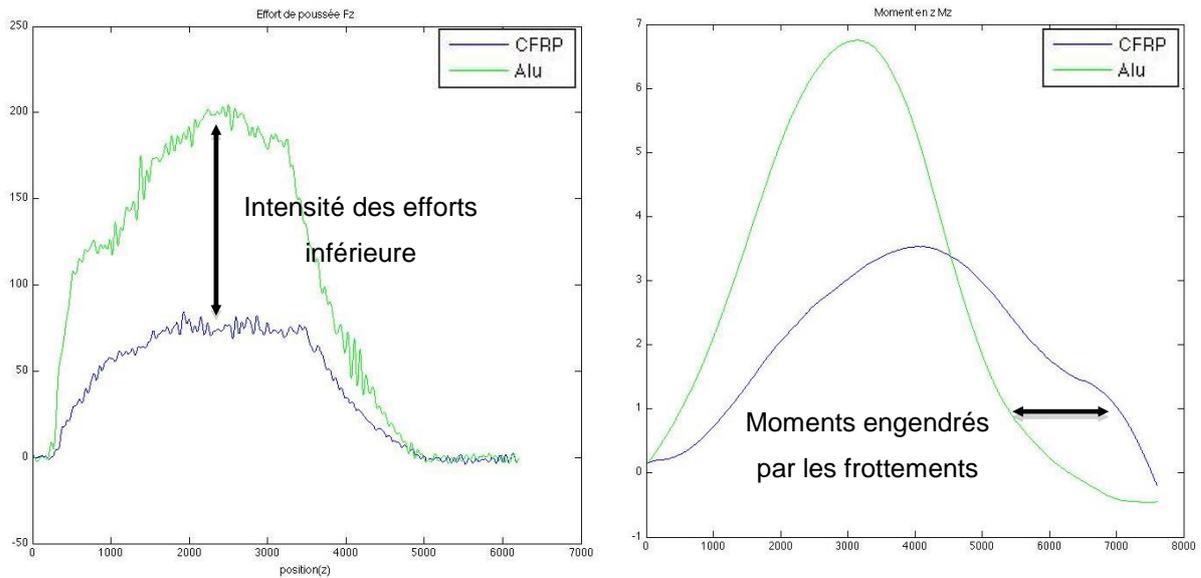


Figure III-18 : Disparités comportementales du perçage CFRP et aluminium.

L'analyse des signaux des deux matériaux constituant l'empilement doit permettre de faciliter l'interprétation des mesures réalisées lors du perçage d'un multi-matériaux. En toute logique, l'allure du signal multi-matériaux doit correspondre à la mise en série de l'allure des deux matériaux formant la séquence d'empilement. Toutefois, deux inconnues subsistent :

- ◆ les phénomènes à l'interface entre les deux matériaux de l'empilement,
- ◆ l'influence des frottements outil/paroi (cf. Figure III-18) sur l'allure des signaux d'efforts et en particulier le moment  $M_z$ .

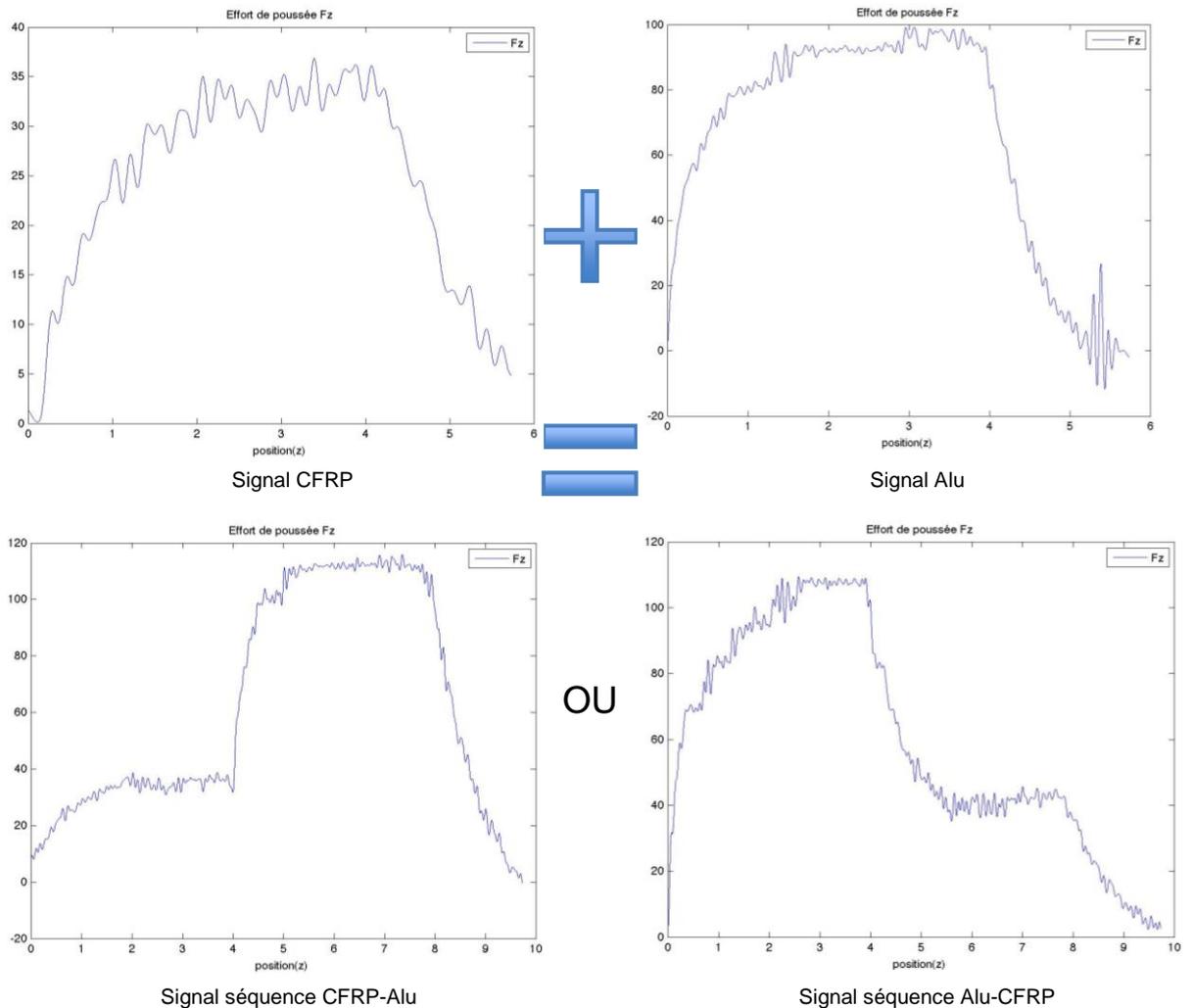


Figure III-19 : Superposition des signaux des efforts de poussée  $F_z$  matériaux et multi-matériaux.

La Figure III-19 présente pour un même triptyque géométrie d'outil / conditions de coupe / épaisseur percée, les signaux de l'effort de poussée  $F_z$  pour les différentes combinaisons possibles à partir des deux matériaux de l'étude (aluminium et CFRP), soit :

- ◆ aluminium et CFRP seuls,
- ◆ CFRP/aluminium,
- ◆ aluminium/CFRP.

Pour une comparaison plus pertinente, les 4 perçages sont réalisés avec des outils neufs. Les signaux sont, dans un premier temps, exportés depuis le logiciel Labview<sup>®</sup> sous le format ASCII, pour ensuite être filtrés et analysés à l'aide du logiciel MATLAB<sup>®</sup>. Cette démarche permet donc de traiter les signaux de manière à identifier les valeurs moyennes des différentes composantes du torseur des actions mécaniques.

Pour vérifier la bonne superposition des signaux, une étude comparative des valeurs moyennes des efforts  $F_z$  a été entreprise. Ces dernières sont déterminées en réalisant la moyenne du signal lors de la phase de coupe à copeau constant (cf. Figure III-20).

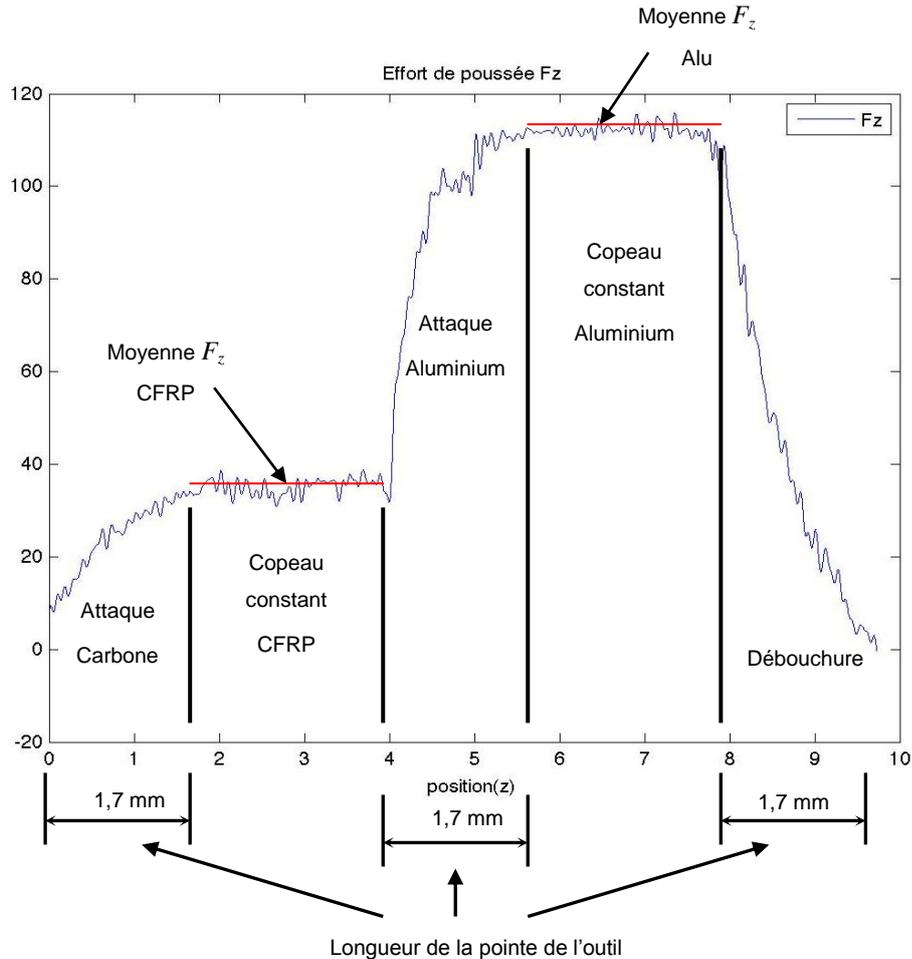


Figure III-20 : Décomposition du signal de l'effort  $F_z$  lors du perçage d'une séquence d'empilement CFRP/Alu d'épaisseur 8 mm (4+4).

Les valeurs mesurées à partir des signaux des efforts  $F_z$  montrent que la superposition des signaux n'est pas parfaite (cf. Figure III-22). Les forets étant neufs au début du perçage, la responsabilité de cet écart ne peut être imputée à une usure quelconque de l'outil.

La figure III-21 présente deux comparaisons selon l'empilement considéré. Celle-ci montre que dans les deux cas de figure, l'intensité de l'effort de poussée dans le premier matériau de l'empilement est très proche (écart inférieur à 5%) de celle observée pendant le perçage de ce même matériau seul. Ce résultat semble tout à fait logique compte tenu du fait que les conditions de coupe, d'usures et d'épaisseurs de l'échantillon sont identiques.

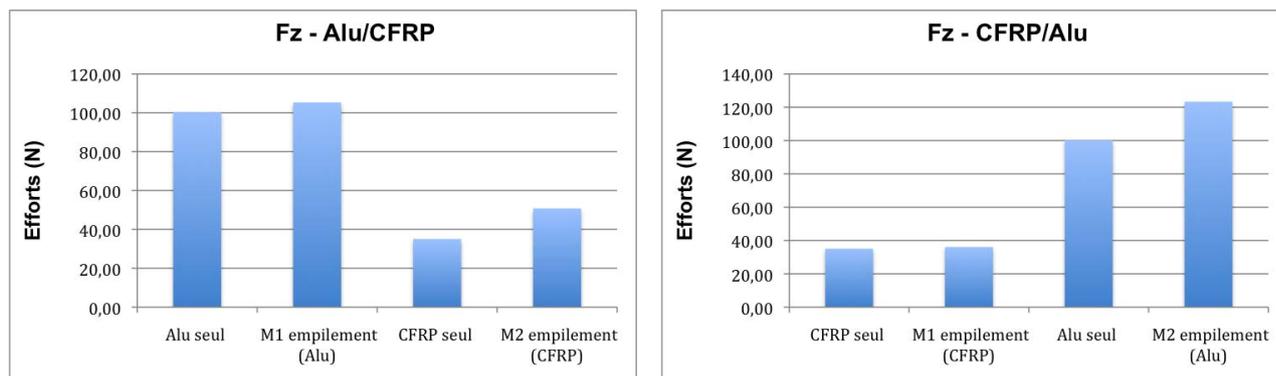


Figure III-21 : Comparaison de l'effort  $F_z$  matériau et multi-matériaux.

Concernant le second matériau de l'empilement, les résultats montrent que la superposition des signaux n'est plus réalisable dans ce cas. L'intensité de l'effort observée lors du perçage du deuxième matériau de l'empilement est supérieure à celle observée sur ce matériau seul.

1<sup>er</sup> empilement : Empilement CFRP/Aluminium

Dans ce cas de figure, le perçage de l'aluminium placé en second engendre des efforts 10% supérieurs à ceux enregistrés lors du perçage de la même épaisseur d'aluminium seule.

2<sup>ème</sup> empilement : Empilement Aluminium/CFRP

Le phénomène observé sur l'empilement précédent est amplifié dans ce cas de figure. Les efforts de perçage du CFRP, placé en second, sont ici plus de 40% supérieurs à ceux enregistrés sur le CFRP seul. Cette augmentation est probablement due aux conséquences sur l'outil du passage de ce dernier dans le premier matériau de l'empilement en l'occurrence l'aluminium. Il est très probable que lors du perçage de celui-ci, une modification de la géométrie de l'outil ait été opérée, formant un copeau adhérent. Celle-ci a pour conséquence de diminuer l'acuité d'arête de l'outil est de ce fait, d'augmenter l'effort de poussée  $F_z$ .

### III.3.1.2. Identification de la signature comportementale des forets

A partir des signaux des actions mécaniques de coupe, il est possible d'observer le comportement d'un outil par rapport à un autre. Ce comportement spécifique, également appelé "signature" de l'outil est identifié à partir de l'analyse des signaux des efforts de coupe pour les différents outils disponibles. La figure III-22 présente les signaux  $F_z$  correspondants aux 4 outils utilisés dans cette étude.

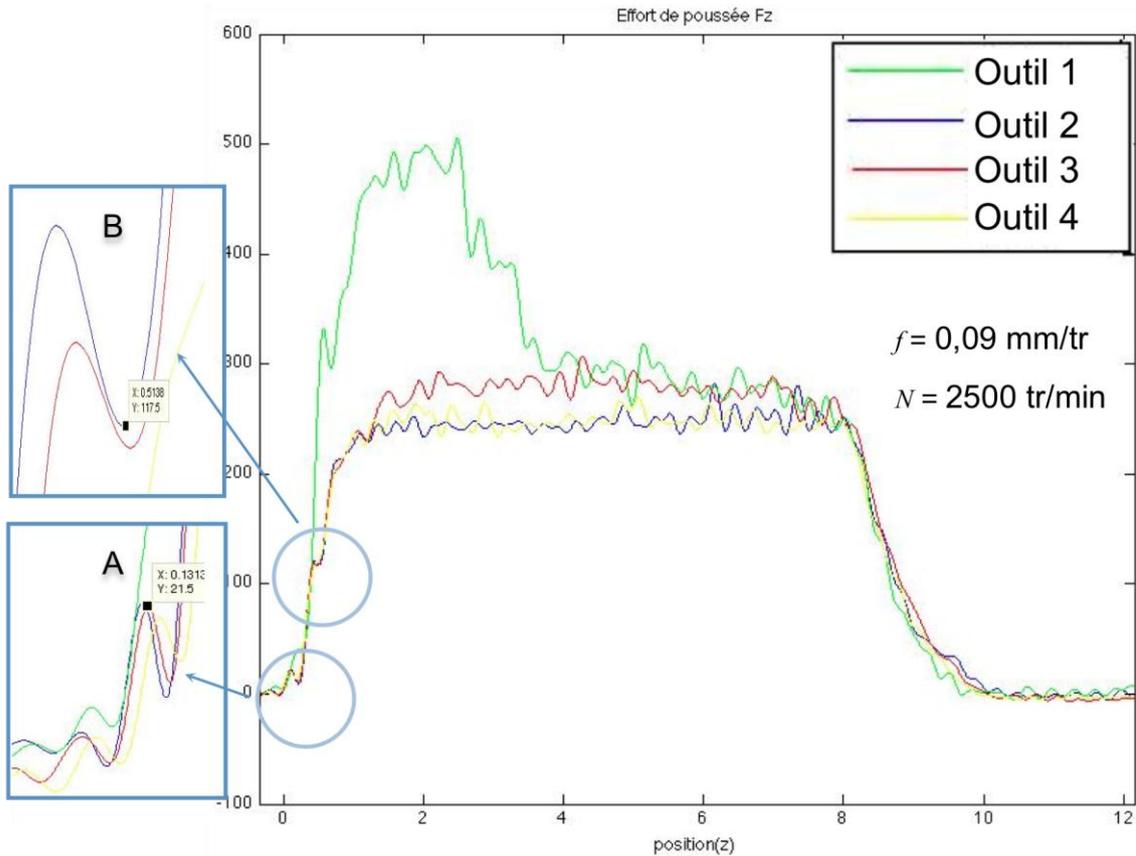


Figure III-22 : Efforts lors du perçage d'un échantillon d'aluminium d'épaisseur 8 mm.

Ces signaux (cf. Figure III-22) réalisés dans les mêmes conditions expérimentales (conditions de coupe, épaisseur, cumul d'épaisseur percée par l'outil et nature des éprouvettes) présentent des disparités selon les géométries et les revêtements utilisés.

Cependant, un certain nombre de similitudes sont à noter concernant les trois outils ayant la même géométrie (cf. Figure III-22-A et Figure III-22-B) permettant d'identifier la signature de cet outil notamment lors de la phase d'attaque du foret (phase 1). Deux singularités apparaissent sur l'allure des trois signaux pour des abscisses similaires (0,35 et 0,55 mm). Les phénomènes qui en sont la cause peuvent être identifiés en corrélant les informations des signaux et l'observation de la géométrie de l'outil.

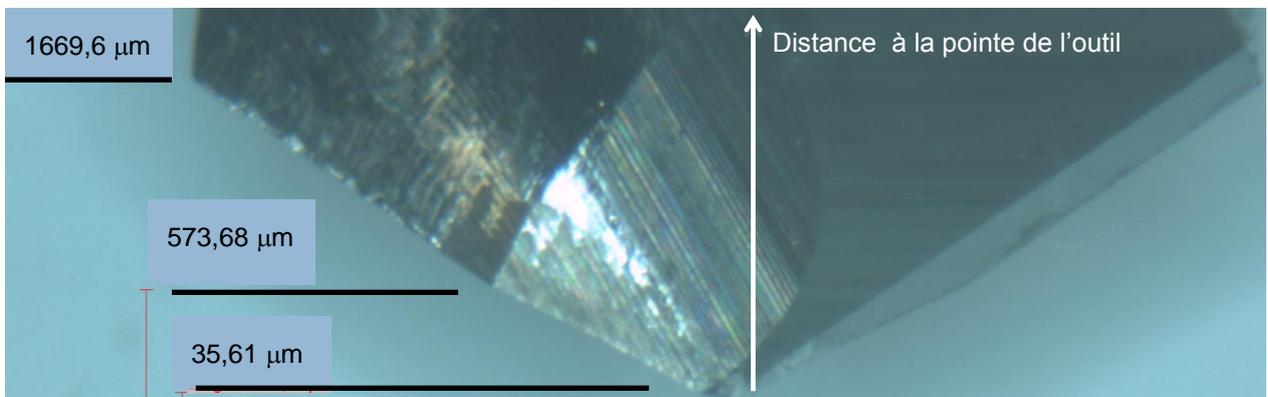


Figure III-23 : Mesures de la géométrie de la pointe du foret.

En observant au microscope binoculaire la pointe de l'outil (cf. Figure III-23), il est possible d'identifier des points caractéristiques de sa géométrie et de les faire coïncider avec les valeurs relevées sur les courbes d'efforts.

Les phénomènes, dont l'apparition se situe dès le début du perçage, lors de l'attaque du foret dans l'échantillon, peuvent être engendrés par un effet "poinçon" de l'outil. Comme nous l'avons vu précédemment lors de l'étude bibliographique de l'écaillage dans le CFRP (cf. Figure I-5), lors de l'entrée ou la débouchure du perçage, l'outil se comporte comme un poinçon du fait de la vitesse de coupe  $V_c$  nulle en son centre. Ce phénomène se caractérise par une augmentation de l'effort de poussée (cf. Figure III-22-A) jusqu'à ce que la pénétration de l'outil soit suffisante pour que l'arête de coupe commence à générer un copeau.

Le second phénomène se situe toujours dans la phase d'attaque du foret. L'effet se produit lorsque la pointe de l'outil a pénétré l'échantillon de 0,5 mm. En corrélant cette distance avec la géométrie de la pointe de l'outil, on s'aperçoit qu'elle correspond à l'intersection géométrique de l'âme du foret et de son arête de coupe principale.

L'étude de la globalité de ces phénomènes permet de définir la signature comportementale d'un outil.

### III.3.1.3. Identification des paramètres influents

Jusqu'à présent l'étude des signaux s'est cantonnée à l'observation de quelques exemples permettant de mieux comprendre les corrélations entre la progression de l'outil dans le perçage, sa géométrie et son comportement. Dans la suite de l'étude, une analyse plus globale est réalisée. Comme nous l'avons spécifié précédemment (cf. III.3.1), sur chaque signal un certain nombre de paramètres sont identifiés. Ces derniers vont permettre d'observer, sur la globalité de la campagne d'essais réalisée, l'influence:

- ◆ de la géométrie (géométrie globale de l'outil),
- ◆ des revêtements,
- ◆ de l'usure du foret (acuité d'arête de coupe).

L'étude va passer de l'observation d'éléments spécifiques de la géométrie à une prise en compte plus globale de cette dernière. Le paramètre principalement étudié dans la suite de l'étude est l'effort de poussée moyen lors de la phase de coupe à copeau constant.

En corrélant ce paramètre au cumul de l'épaisseur percée, il est possible de mettre en avant trois phénomènes :

- ◆ l'influence d'une géométrie ou d'un revêtement,
- ◆ l'influence de l'avance par tour,
- ◆ la perte d'acuité d'arête de l'outil.

La première analyse concerne l'étude de l'évolution de l'effort de poussée moyen au cours d'une campagne de perçages d'un aluminium pour différentes vitesses d'avances (0,03 et 0,09 mm/tr).

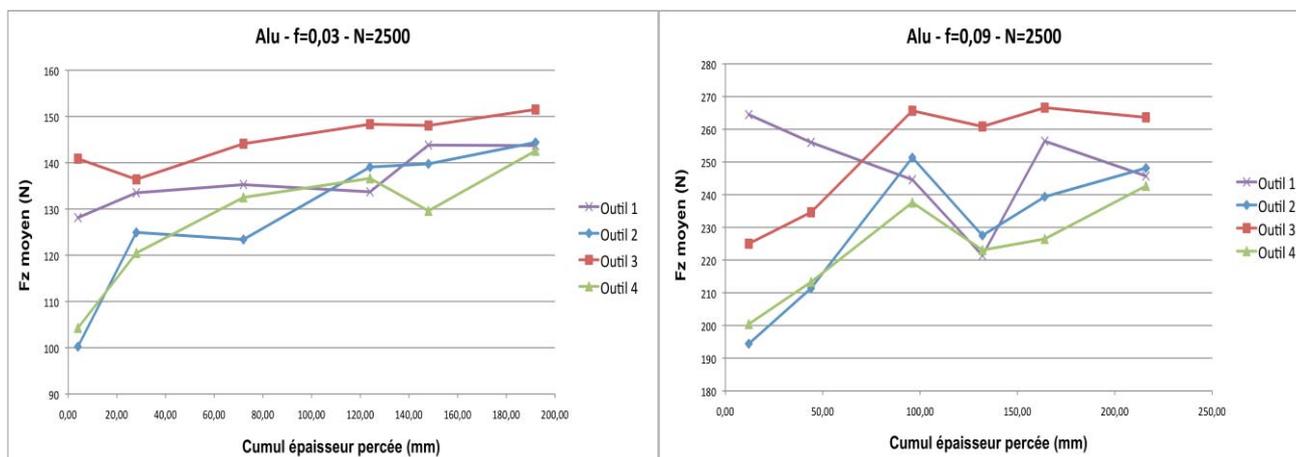


Figure III-24 : Effort  $F_z$  moyen en fonction de l'épaisseur d'aluminium percée.

Les courbes (cf. Figure III-24) montrent un accroissement de l'effort  $F_z$  au cours de la campagne d'essais et ce, pour la globalité des outils utilisés. Cette dérive peut être imputable à l'augmentation de l'usure de l'outil, caractérisée par une modification de la géométrie de coupe du foret. Dans le cas du perçage de l'aluminium, nous avons vu précédemment (cf. I-2.2), que les propriétés collantes du matériau peuvent engendrer des phénomènes d'arêtes rapportées altérant significativement l'acuité de l'arête du foret.

Au delà de cette tendance, les résultats permettent d'identifier l'outil le plus performant et à travers lui, son revêtement et sa géométrie. Cette dernière est un paramètre interne à cette étude, la géométrie de l'outil n'étant pas décomposée mais considérée dans son intégralité. Il est donc impossible de vérifier l'influence d'un des angles d'outil sur les actions mécaniques de coupe en perçage. Si l'on néglige les dispersion dans l'affûtage, l'utilisation dans cette étude de trois outils de même géométrie (outil 2, outil 3 et outil 4) permet de pouvoir comparer l'influence des revêtements sur le comportement du foret.

Les résultats (cf. Figure III-24) montrent une tendance similaire pour les signaux correspondant à ces trois outils pour les deux avances étudiées. Il est, par conséquent, difficile de dégager une hiérarchie. Cependant, l'effort  $F_z$  moyen de l'outil 3 est supérieur dans les deux cas de figures, respectivement de 8 et 10% aux outils 2 et 4 de géométries similaires, pour chaque mesure réalisée. Bien qu'une dispersion dans l'affûtage soit envisageable, le paramètre responsable de cet écart semble être le revêtement.

Engendrer un effort  $F_z$  moyen inférieur aux autres outils n'est pas systématiquement associé à une qualité supérieure du perçage réalisé. Cependant, l'étude bibliographique montre que l'ampleur des défauts en perçage tels que le délaminage ou la bavure est étroitement liée à l'intensité de  $F_z$ .

Enfin, les résultats mettent en évidence l'influence de l'avance par tour ( $f$ ) sur l'intensité des signaux. L'intensité moyenne augmente de 100% entre des perçages réalisés avec une avance de 0,03 mm/tr et 0,09 mm/tr, pour une même fréquence de rotation ( $N$ ).

Cette première analyse a permis de mettre en relief différents paramètres influant sur l'intensité de l'effort de poussée tels que le revêtement de l'outil ou l'avance par tour. Pour

confirmer ces résultats une analyse similaire est entreprise dans le cadre du perçage d'un CFRP.

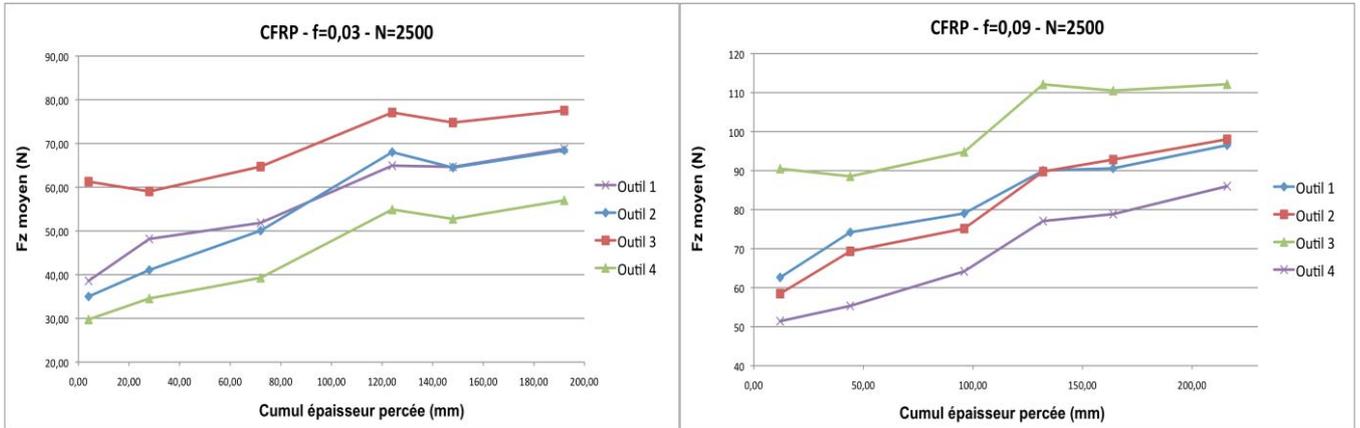


Figure III-25 : Effort  $F_z$  moyen en fonction de l'épaisseur du CFRP percé

Les tendances observées précédemment sont, dans le cadre de cette analyse, plus nettes (cf. Figure III-25). L'effort moyen engendré par l'outil 3 est, dans ce cas, supérieur à ceux observés sur l'outil 2 et 4, respectivement de 20 et 40%, confirmant l'influence du revêtement sur le comportement mécanique du foret. L'augmentation de l'effort moyen  $F_z$  évolue parallèlement pour les deux avances et les 4 outils étudiés. L'influence de l'usure en fonction du cumul de l'épaisseur percée est donc similaire pour les 4 outils.

Les résultats présentés dans cette étude sont issus de l'analyse des signaux de l'effort  $F_z$  mesurés par l'intermédiaire de la platine dynamométrique 6 composantes. Celle-ci n'a pas été le seul moyen de mesure utilisé pour observer les actions mécaniques de coupe en perçage. La suite de l'étude va s'intéresser aux signaux mesurés par l'intermédiaire de l'oscilloscope du directeur de commande numérique Heidenhain® ITNC 530.

### III.3.2. Signaux issus de l'oscilloscope de la commande numérique.

Le centre d'usinage UGV MIKRON® HSM 600 U 5 axes est équipé de 6 moteurs (cf. Figure III-26) :

- ◆ un moteur par axe de déplacement,
- ◆ un moteur gérant la fréquence de rotation de la broche.

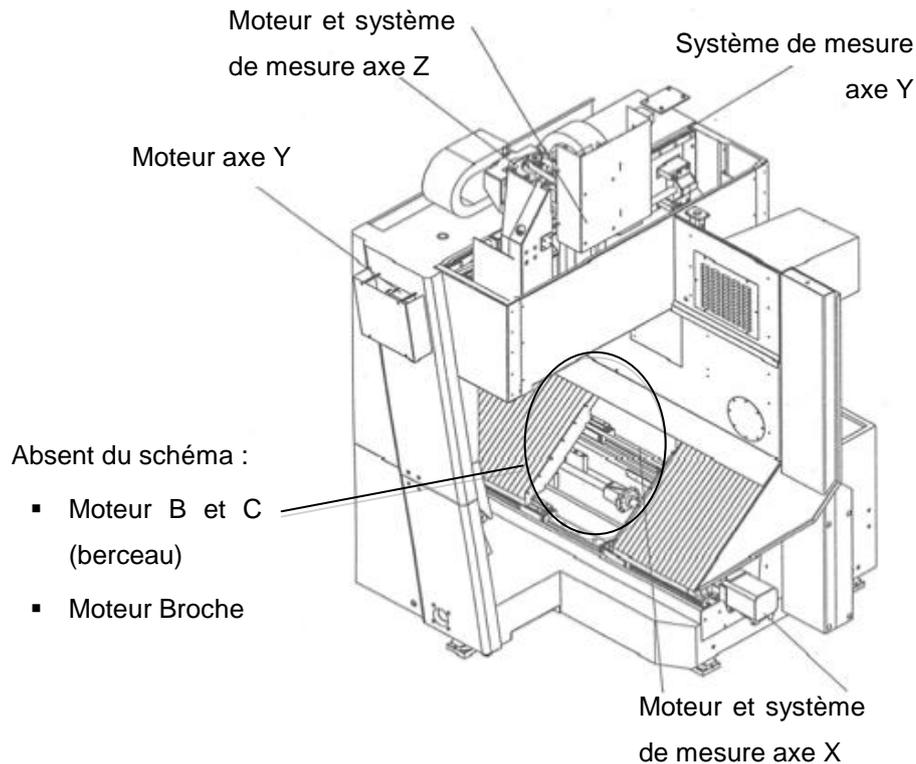


Figure III-26 : Schéma d'implantation des moteurs de l'UGV Mikron<sup>®</sup> HSM 600 U.

La commande numérique permet de gérer l'alimentation en courant de ces moteurs en fonction des réglages de l'opérateur. Un oscilloscope directement intégré à cette dernière permet d'observer et enregistrer l'évolution de la consommation en courant de chacun d'entre eux, de manière indépendante, au cours d'une opération d'usinage par exemple. Le seul axe de déplacement utilisé pour une opération de perçage étant l'axe z, l'analyse concerne donc l'étude de l'évolution des courants alimentant celui-ci ainsi que la broche.

La programmation des enregistrements nécessite le réglage de trois paramètres principaux (cf. Figure-27) :

- ◆ la période d'échantillonnage,
- ◆ la nature des signaux mesurés,
- ◆ le lancement de l'enregistrement.

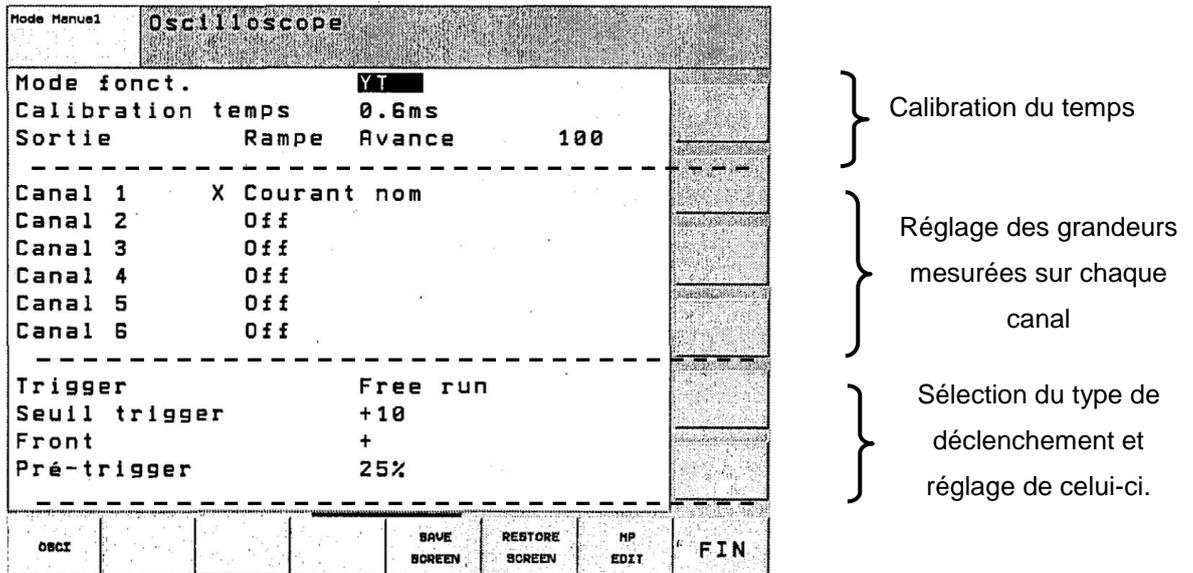


Figure III-27 : Ecran de configuration de l'oscilloscope interne de la commande numérique Heidenhain® de l'UGV.

### III.3.2.1. Grandeurs mesurables par l'oscilloscope

L'oscilloscope de la commande numérique peut représenter jusqu'à 6 canaux simultanément (cf. Figure III-28). Chaque canal correspond à un signal défini par une grandeur mesurée et par l'axe considéré.

Un certain nombre de grandeurs peuvent être affectées aux canaux :

- ◆ la position d'un axe en mm (nominale et effective),
- ◆ la vitesse d'avance d'un axe en mm/min (nominale et effective),
- ◆ la vitesse de rotation d'un axe en mm/min (nominale et effective),
- ◆ les puissances mécaniques et électriques en W,
- ◆ la valeur nominale du courant en A.

Parmi ces grandeurs, celles qui nous intéressent particulièrement dans le cadre de cette étude sont :

- ◆ les intensités du courant des moteurs des axes z et broche notées respectivement Iz et Is,
- ◆ la position de l'axe z notée s effect./Z,
- ◆ la puissance mécanique notée P mec.

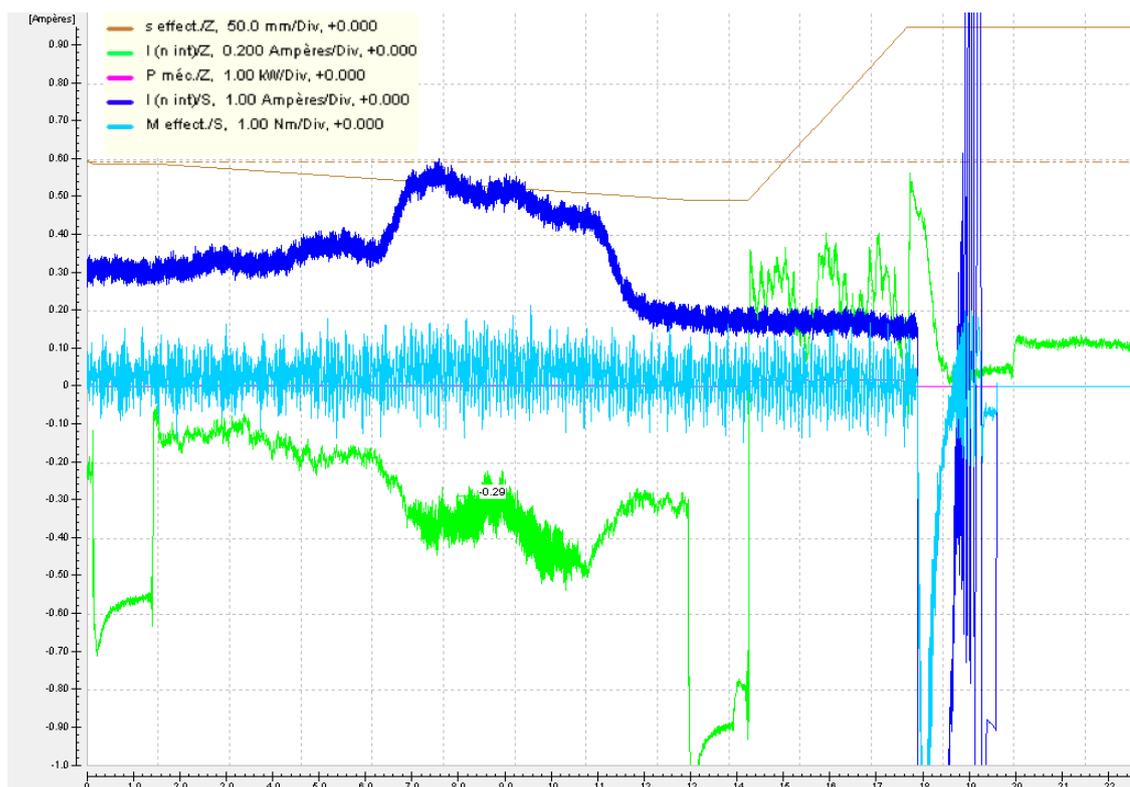


Figure III-28 : Exemple d'enregistrement de différents signaux par l'oscilloscope pendant une opération de perçage.

La figure III-28 illustre un exemple des données brutes obtenues lors d'un enregistrement en perçage. Pour exploiter ces courbes et les intégrer dans un réseau de neurones, celles-ci sont post-traitées dans le logiciel Matlab<sup>®</sup>. Cette analyse consiste à reconstruire les signaux enregistrés à partir des échantillons mesurés par l'oscilloscope puis d'en extraire les valeurs moyennes et maximales de la même manière que pour les signaux issus de la platine (cf. Figure III-20). Cette opération va permettre de corrélérer ces courbes avec celles obtenues précédemment à partir de la platine dynamométrique. Elle permettra également, de la même manière que précédemment (cf. III.3.1.2) d'étudier la "signature" comportementale de chaque foret et ainsi mettre en avant l'efficacité d'une géométrie ou d'un revêtement.

Avant de pouvoir effectuer correctement les enregistrements, un certain nombre de paramètres d'acquisition sont à fixer au préalable. La partie qui va suivre va s'attacher à présenter et commenter le réglage de ces différents paramètres.

### III.3.2.2. Paramètres d'acquisition

La commande numérique n'a pas la capacité de stockage suffisante pour réaliser un enregistrement sur une longue période. Pour enregistrer les signaux sans perdre d'informations, un réglage pertinent des paramètres doit être réalisé. Ces derniers doivent permettre :

- ◆ de lancer l'enregistrement de manière répétable,
- ◆ de sélectionner le signal désiré,

- ◆ d'arrêter l'enregistrement.

La durée d'enregistrement est définie en réalisant une "calibration temps". Celle-ci consiste à définir la base de temps utilisée pendant l'enregistrement des courbes. Un certain nombre de périodes d'échantillonnage sont prédéfinies dans l'oscilloscope :

- ◆ 0,6 ms,
- ◆ 3 ms,
- ◆ 6 ms.

La commande numérique est capable de mémoriser 4096 points par enregistrement. Pour les valeurs prédéfinies de période d'échantillonnage, les durées d'enregistrement correspondantes sont donc respectivement :

- ◆ 2,46 s,
- ◆ 12,23 s,
- ◆ 24,56 s.

Concernant les essais sur les mono-matériaux, le cas de figure le plus défavorable vis-à-vis de l'usure de l'outil et de la qualité du trou, correspond au perçage de l'épaisseur maximale avec la vitesse d'avance minimale. Par conséquent le temps d'enregistrement doit être supérieur au temps de perçage d'un échantillon de 12 mm d'épaisseur avec une vitesse d'avance de 75 mm/min ( $f = 0,03$  mm/tr,  $N = 2500$  tr/min) soit 9,6 s. Le choix s'est donc porté sur une période d'échantillonnage de 3 ms soit une fréquence de 333 Hz.

Le même raisonnement a été employé pour le paramétrage des essais multi-matériaux. L'intégralité des essais peut être réalisée en conservant les réglages préalablement définis, à l'exception d'une petite quantité d'essais concernant l'empilement d'épaisseur maximale (24 mm). Le choix a donc été fait de privilégier la précision de la mesure en conservant la valeur de période de 3 ms. Une augmentation de celle-ci sera alors réalisée pour le petit nombre d'essais dont la durée dépasse 12 s.

Comme nous venons de le voir, la durée d'enregistrement a été choisie au plus juste. Le lancement de l'enregistrement doit, par conséquent, démarrer à proximité du début de l'attaque du foret. Pour ce faire, un paramètre appelé "Trigger" permet de définir le type de déclenchement de l'acquisition.

Différents lancements sont disponibles dans l'oscilloscope. L'obtention d'un lancement répétable va rendre l'analyse des signaux plus aisée en offrant la possibilité d'automatiser la mesure. Dans cette optique, le paramètre "Trigger" facilite cette opération en lançant l'enregistrement lorsque un seuil prédéfini est atteint sur un des canaux.

Le choix de l'affectation du canal s'est porté vers la position effective de l'axe z (mm). Ce paramètre est le seul qui va nous permettre de déclencher l'enregistrement sur une position répétable. L'étape suivante consiste à fixer un seuil (valeur de la position en z) à partir duquel l'enregistrement démarre. Pour limiter la durée de l'enregistrement des phases où

l'outil n'est pas dans la matière, le seuil de déclenchement sur la position en z sera choisi à proximité de l'attaque de l'outil dans l'échantillon (cf. Figure III-29).

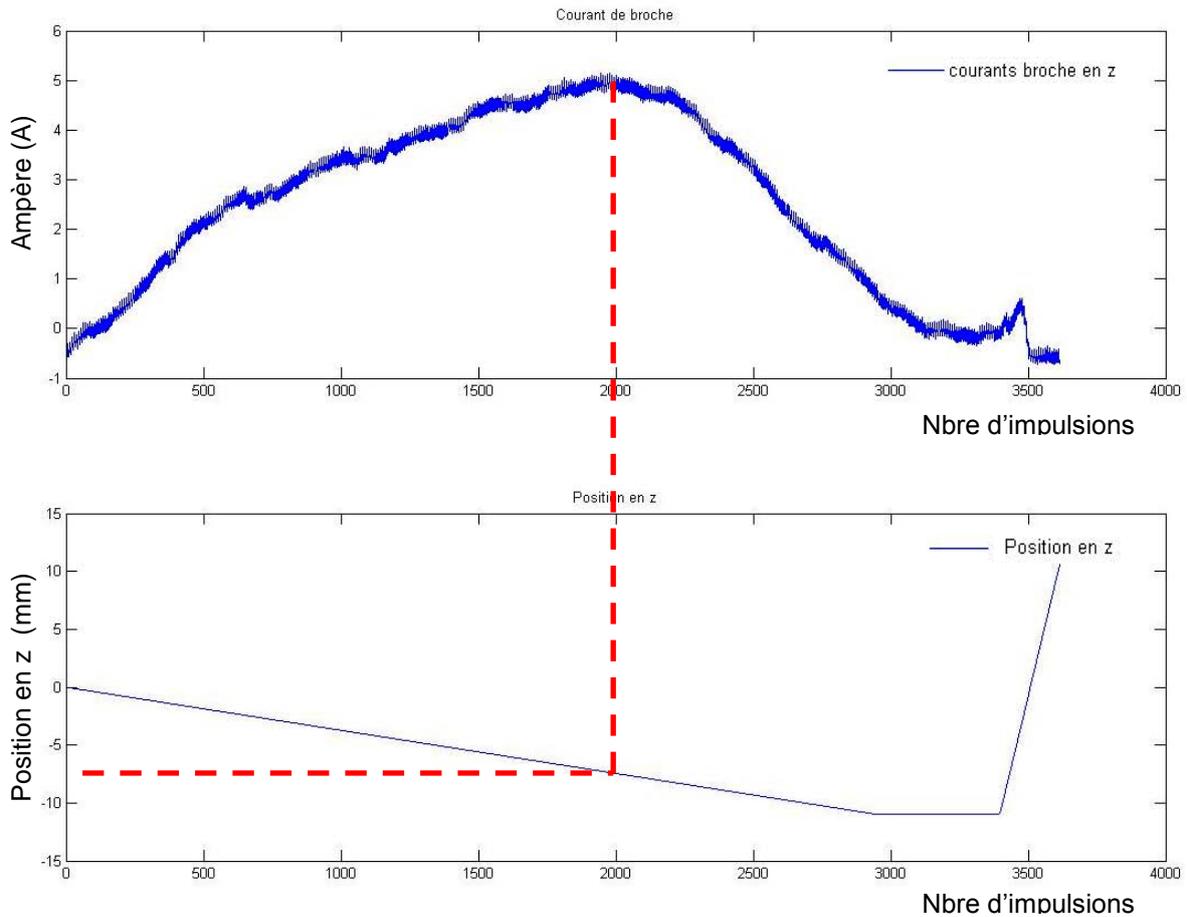


Figure III-29 : Exemple d'un enregistrement du courant de broche lancé à partir de la position en z ; perçage éprouvette composite, 8 mm d'épaisseur.

Cette partie a introduit les paramètres nécessaires au réglage de l'enregistrement des différents canaux de l'oscilloscope. Un enregistrement systématique des 6 canaux disponibles est effectué pour chaque essai. Pour exploiter ces mesures, une analyse doit être réalisée au préalable, pour vérifier la pertinence de l'observation des courbes issues de l'oscilloscope et notamment l'étude des courants des moteurs de la machine. Pour ce faire, l'étude qui va suivre, est destinée à réaliser la superposition des courbes de l'oscilloscope avec celles issues des mesures effectuées avec la platine dynamométrique afin d'en vérifier la bonne corrélation.

### III.3.2.3. Corrélation des signaux issus du dynamomètre et de l'oscilloscope.

Pour crédibiliser les observations faites à partir des courbes issues des mesures réalisées avec l'oscilloscope de la commande numérique, une analyse a été entreprise afin de vérifier la bonne corrélation entre ces dernières et les courbes issues du dynamomètre 6 composantes. En intégrant les signaux échantillonnés dans le logiciel Matlab<sup>®</sup>, un programme

a été élaboré (cf. Figure III-30) pour les superposer et pouvoir vérifier visuellement la cohérence des mesures réalisées.

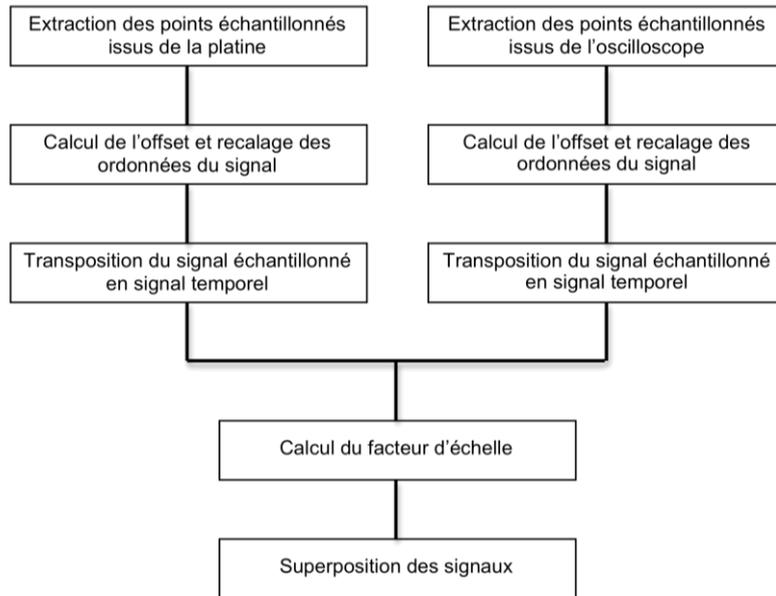


Figure III-30 : Architecture du programme de superposition.

Les deux courbes n'ayant pas les mêmes grandeurs (Intensité (A) et Effort (N)) un facteur d'échelle doit être appliqué dans le but de superposer les deux signaux. Ce dernier est calculé de la manière suivante :

$$\text{facteur d'échelle} = \frac{\text{moyenne } Fz \text{ platine}}{\text{moyenne } Iz} \quad (\text{III.1})$$

Pour vérifier la bonne corrélation des deux signaux une dernière étape est nécessaire. Les signaux doivent être recalés de manière à avoir la même origine sur les deux axes. Dans les deux cas de figures, les axes des abscisses par défauts correspondent au numéro de l'échantillon (échantillonnage). Le recalage nécessite la conversion dans l'échelle temporelle des deux axes. Celle-ci doit être réalisée par le calcul suivant :

$$\text{temps (s)} = \text{numéro de l'échantillon} \times \text{période d'échantillonnage (s)} \quad (\text{III.2})$$

Concernant l'axe des ordonnées, le recalage nécessite la détermination de l'offset des signaux par rapport à l'origine du repère. Celui-ci est quantifié en retranchant du signal global (cf. Figure III-31) la moyenne du signal avant la pénétration de l'outil.

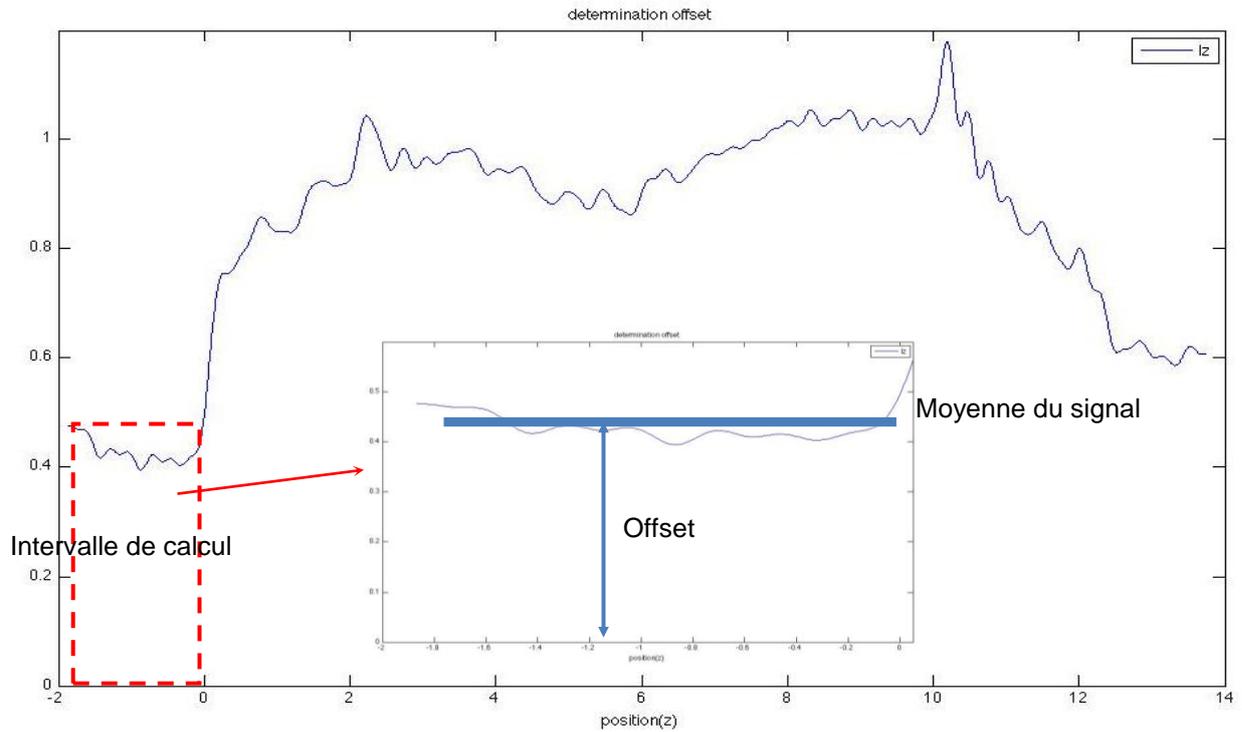


Figure III-31 : Détermination de l'offset des signaux.

Deux superpositions ont été réalisées (cf. Figure III-31):

- ◆ celle des signaux  $F_z$  et  $I_z$ , soit respectivement l'effort en z mesuré par la platine et l'intensité du courant d'avance du moteur de l'axe z,
- ◆ celle des signaux  $M_z$  et  $I_s$ , soit respectivement le moment en z mesuré par la platine et l'intensité du courant du moteur de la broche.

En ce qui concerne ces deux superpositions, les signaux sont issus du même essai de perçage.

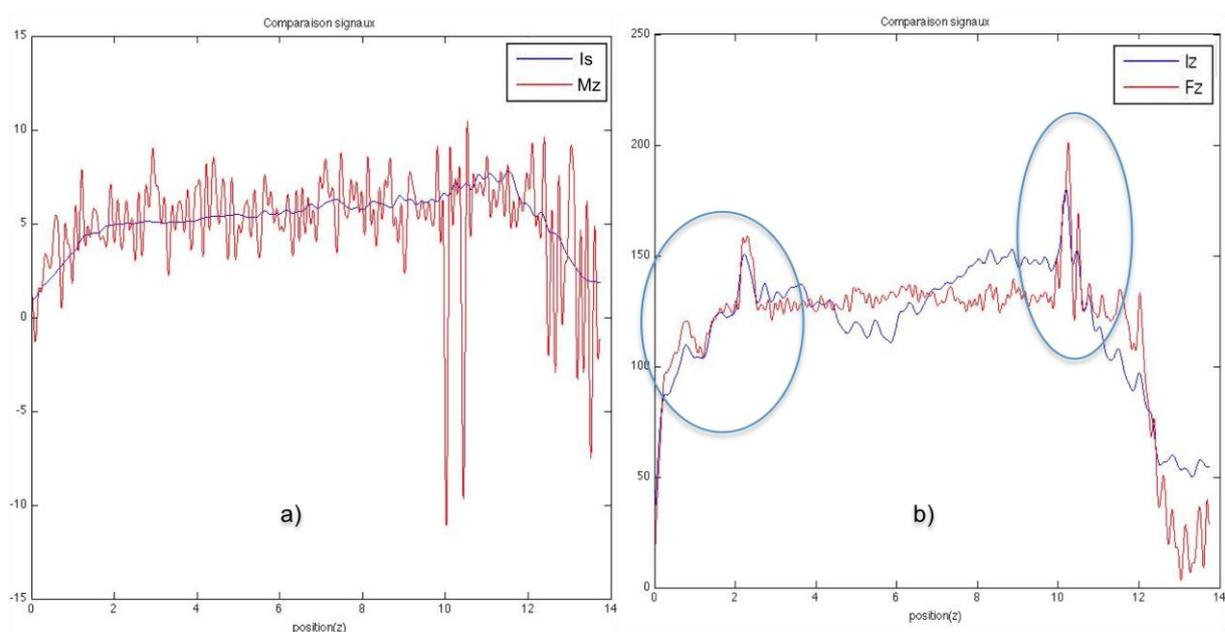


Figure III-32 : Superposition des signaux de perçage d'une éprouvette d'aluminium d'épaisseur 8 mm par l'oscilloscope et la platine; a) signaux  $M_z$  et  $I_s$ , b) signaux  $F_z$  et  $I_z$ .

Les résultats font apparaître une excellente corrélation des signaux notamment pour les courbes  $F_z$  et  $I_z$ . La signature du foret y est très similaire notamment à l'entrée et à la sortie du perçage (cf. Figure III-32-b). Dans les deux cas de figure, les allures des signaux sont identiques. Les signaux issus de l'oscilloscope présentent également l'avantage d'être moins bruités que ceux issus de la platine. La lecture des signaux, notamment celle des moments en est d'autant plus facilitée.

Cette méthode présente par conséquent un certain nombre d'avantages notamment le fait qu'elle ne nécessite aucune installation supplémentaire telle que la platine dynamométrique. L'évolution des signaux pouvant être analysée au fur et à mesure de la progression du perçage, cette méthode peut être une option intéressante dans le cadre de la mise en place d'une supervision du perçage multi-matériaux. La superposition dans ce cas de figure est aussi satisfaisante que dans les cas du perçage d'un matériau seul (cf. Figure III-33).

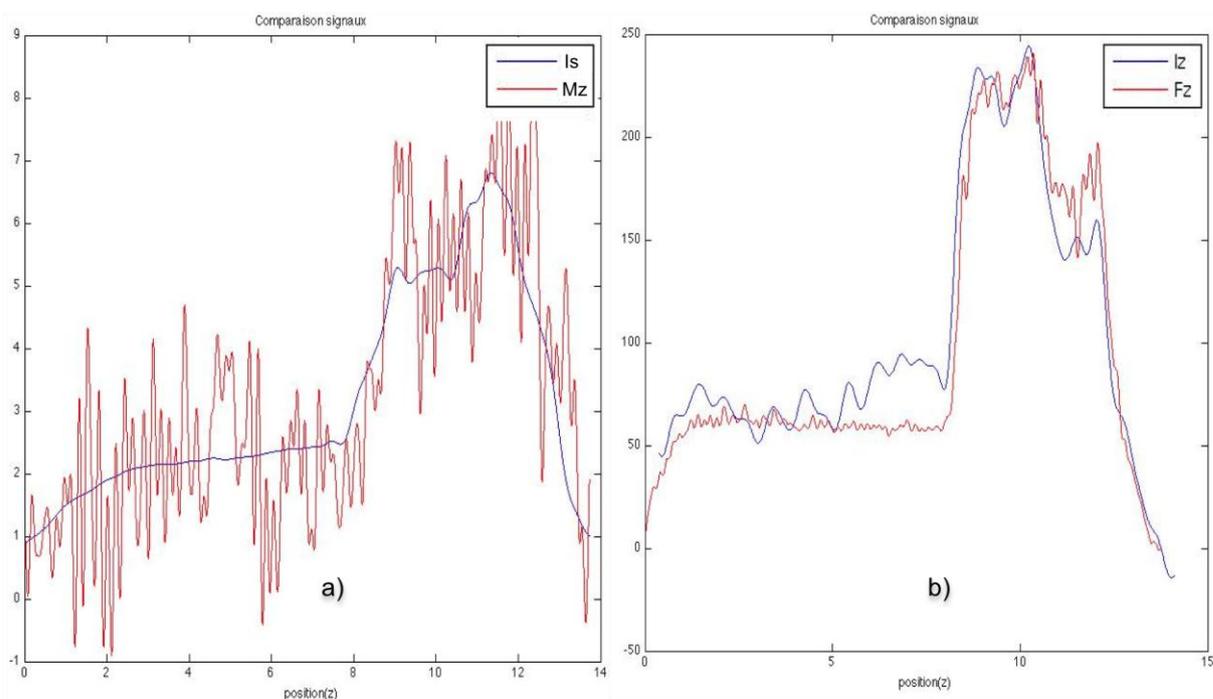


Figure III-33 : Superposition des signaux de perçage d'un empilement CFRP/Alu d'épaisseur 12 mm (8/4) par l'oscilloscope et la platine; a) signaux Mz et Is, b) signaux Fz et Iz.

Les conclusions de l'analyse des deux superpositions multi-matériaux sont similaires à celles précédemment réalisées pour le perçage de l'éprouvette d'aluminium. La corrélation des signaux est tout à fait satisfaisante et le bruit de mesure est inférieur à celui issu de la platine malgré le filtre appliqué.

Le début du chapitre a présenté le processus expérimental destiné à la réalisation des différents perçages mono-matériau (CFRP, Aluminium) et multi-matériaux. Un enregistrement systématique des actions mécaniques de coupe des perçages réalisés a été entrepris. Ces enregistrements et les moyens techniques permettant leurs acquisitions ont été présentés et analysés. L'étude s'est également attachée à valider l'acquisition des enregistrements par l'oscilloscope de la CN en les corrélant avec les courbes obtenues à l'aide de la platine dynamométrique 6 composantes.

La suite de l'étude va présenter les différents moyens techniques utilisés pour quantifier les paramètres nécessaires à la constitution de la base de données destinée à l'entraînement du réseau de neurones du modèle. Ces paramètres sont les critères de qualité d'un perçage multi-matériaux présentés précédemment dans le chapitre I, soit :

- ◆ l'écaillage en entrée et sortie du CFRP,
- ◆ la bavure en sortie de l'aluminium,
- ◆ les défauts dimensionnels et géométriques (cylindricité, circularité).

### III.4. Quantification des paramètres d'entrée/sortie.

La quantification des critères de qualité d'un perçage est une étape prépondérante dans la constitution de la base de données du modèle multi-matériaux. La finalité de l'étude étant la constitution d'un modèle permettant la prédiction de la qualité d'un perçage, de ce fait la précision de la quantification, influe immédiatement sur celle du modèle. On comprend alors mieux l'importance de cette étape dans ces travaux de thèse.

L'étude va dans un premier temps s'intéresser au délaminage en entrée et sortie du perçage.

#### III.4.1. Délaminage en entrée et sortie du perçage

La caractérisation de ce critère a été précédemment réalisée dans le chapitre I (cf. I.2.1.1). Cette partie s'intéresse à la procédure expérimentale mise en place pour quantifier ce défaut. Elle s'appuie donc sur l'étude bibliographique et sur les travaux précédemment réalisés sur le sujet au sein du LGM<sup>2</sup>B [Roud 06]. Ces derniers concernent la quantification du délaminage en sortie par l'intermédiaire d'un rugosimètre 3D Altisurf 500<sup>®</sup>. La fonction première de celui-ci est la réalisation de microtopographies ou de mesures d'état de surfaces avec une grande précision (1 nm en z et 0,5 µm en x et y). Pour ce faire, un relevé topographique est réalisé par l'intermédiaire de prises de profils successifs sur la surface extérieure de l'échantillon (cf. Figure III-34). Dans le cas du perçage d'un CFRP ou d'un multi-matériaux CFRP/Alu, un logiciel de traitement d'images permet ensuite de quantifier l'écaillage en entrée ou sortie. Pour cela, différentes fonctionnalités sont disponibles tel que le seuillage permettant d'observer les surfaces au dessus ou en dessous d'un niveau en z défini par l'utilisateur.

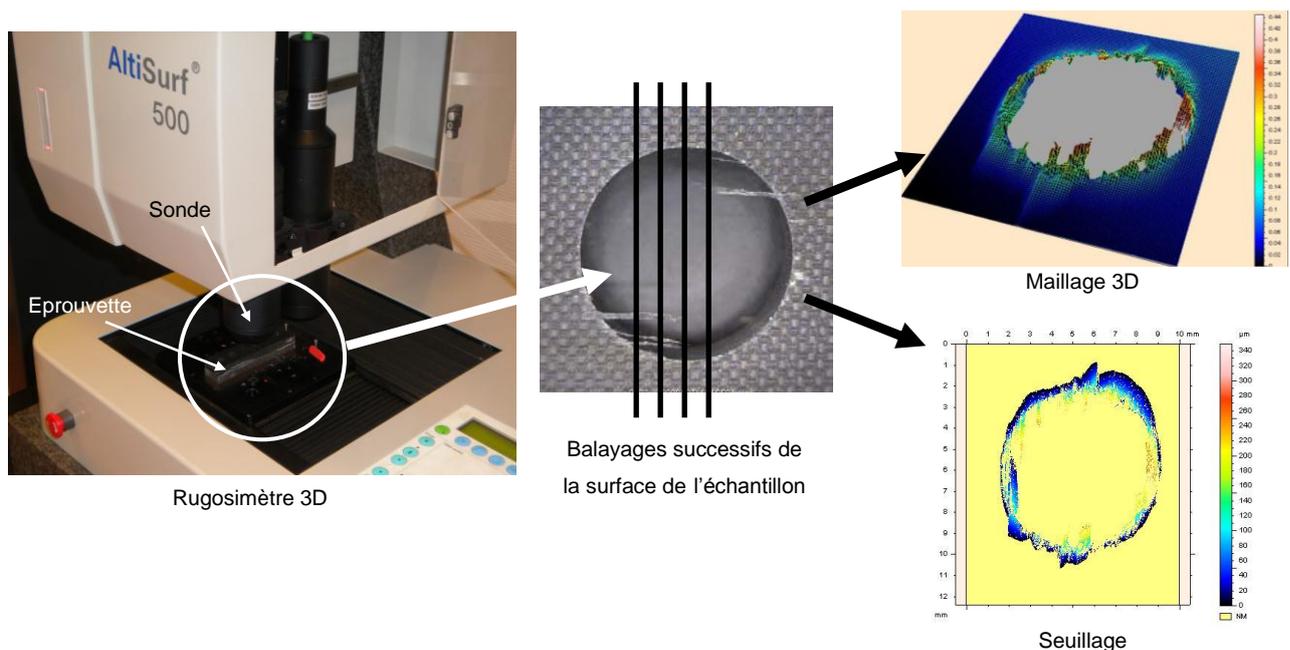


Figure III-34 : Quantification de l'écaillage à l'aide d'un rugosimètre 3D.

Avant la réalisation de la campagne d'essais destinés à la constitution de la base de données, une campagne de quelques essais permettant la validation du processus expérimental est nécessaire. Ces essais sont réalisés avec les conditions de coupe, les outils et surtout les matériaux, en particulier les éprouvettes de CFRP, de la campagne d'essais multi-matériaux.

La quantification de l'écaillage en entrée et sortie de perçage a été réalisée à l'aide du rugosimètre 3D. Ces mesures montrent l'inefficacité de la méthode dans le cadre de cette campagne. Les images sont de qualités médiocres du fait du mauvais renvoi du faisceau par l'éprouvette. Pour que la sonde puisse recréer la topographie de l'éprouvette, un faisceau balayant celle-ci permet d'enregistrer avec une fréquence d'échantillonnage et une vitesse d'avance données les différentes altitudes des points mesurés. Pour ce faire, la surface réfléchit le faisceau, dont le retour est enregistré par la sonde.

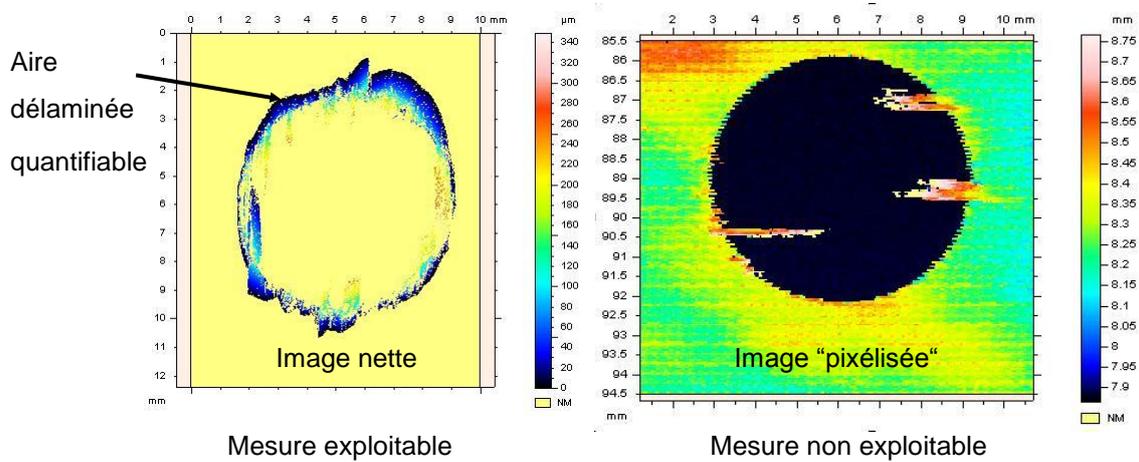


Figure III-35 Images de la débouchure d'un perçage obtenue à l'aide d'un rugosimètre 3D.

Lors de la fabrication des plaques de CFRP destinées à la campagne, les empilements de couches pré-imprégnés ont été placés dans l'autoclave entre deux tissus d'arrachage utilisés pour absorber le surplus de résine et augmenter par là même le taux de fibres. En polymérisant, les surfaces des plaques ont conservé le motif du tissu (cf. Figure III-36), engendrant une réflexion insuffisante du signal (cf. Figure III-35). Bien qu'elle présente l'avantage d'être précise et automatisable, cette méthode n'en demeure pas la seule.

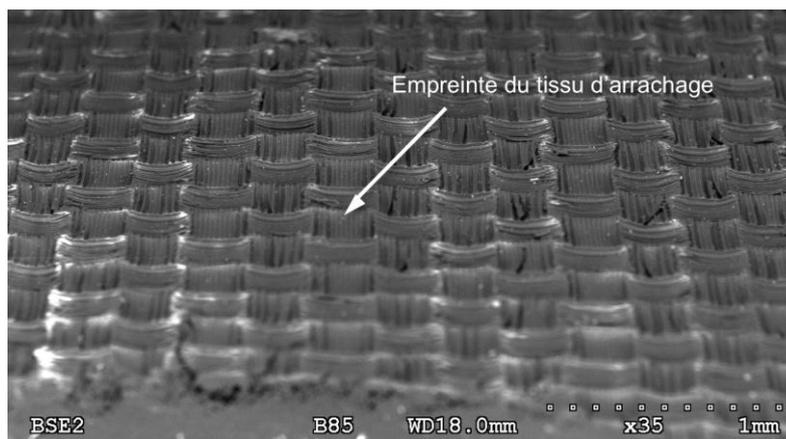


Figure III-36 : Image prise au MEB de l'état de surface de l'échantillon.

L'analyse s'est donc tournée vers une autre solution pour quantifier ce défaut. Le choix s'est porté vers l'utilisation d'un microscope digital compact Dino-Lite<sup>®</sup>. Ce dernier permet de réaliser directement l'acquisition d'image avec un agrandissement pouvant atteindre 250×. Un logiciel de post traitement DinoCapture<sup>®</sup> met à la disposition de l'utilisateur un certain nombre de fonctionnalités telles que :

- ◆ la mesure d'une distance,
- ◆ la mesure d'un diamètre,
- ◆ le calcul de l'aire d'un cercle ou d'une surface fermée quelconque.

Les critères de quantification ont été abordés précédemment dans l'étude bibliographique (cf. I.2.1.1). La notion de facteur de délaminage a été introduite dans un certain nombre de travaux [Chen 96] [Tsao 04] [Abrã 07] [Karn 08] [Fara 09]. Pour rappel celui-ci s'exprime de la manière suivante :

$$F_D = \frac{D_{\max}}{D_{\text{nom}}} \quad (\text{III.3})$$

avec  $D_{\max}$  le diamètre du cercle, caractérisé par le centre du perçage et le point extrême de la zone délaminée, et  $D_{\text{nom}}$  le diamètre nominal du perçage.

La réalisation des perçages de diamètre  $\varnothing 6,35$  mm étant destinée au positionnement des rivets notamment sur les structures aéronautiques, il est donc primordial pour la durée de vie de la structure que la tête du rivet ne s'appuie pas sur une surface écaillée.

Cependant ce critère ne caractérise pas réellement l'étendue écaillée en entrée ou sortie de perçage. En effet, il suffit d'une petite quantité de fibres délaminées sur une longueur importante pour obtenir un facteur de délaminage élevé (cf. Figure III-37).

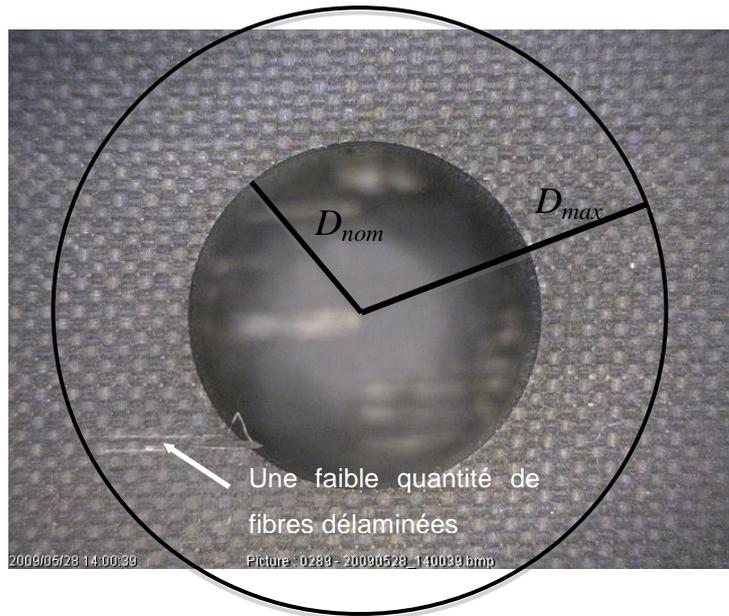


Figure III-37 : Cas spécifique illustrant les inconvénients de la quantification par le facteur de délaminage  $F_d$ .

Pour obtenir une caractérisation plus représentative de l'étendue de l'écaillage en entrée et sortie du perçage, un second facteur, noté DF, a été mis en place [Fara 09] :

$$DF = \left( \frac{A_{del} - A_{nom}}{A_{nom}} \right) \% \quad (III.4)$$

où  $A_{del}$  est le cumul de l'aire des zones délaminées et  $A_{nom}$  est l'aire du trou percée (cf. Figure III-38).

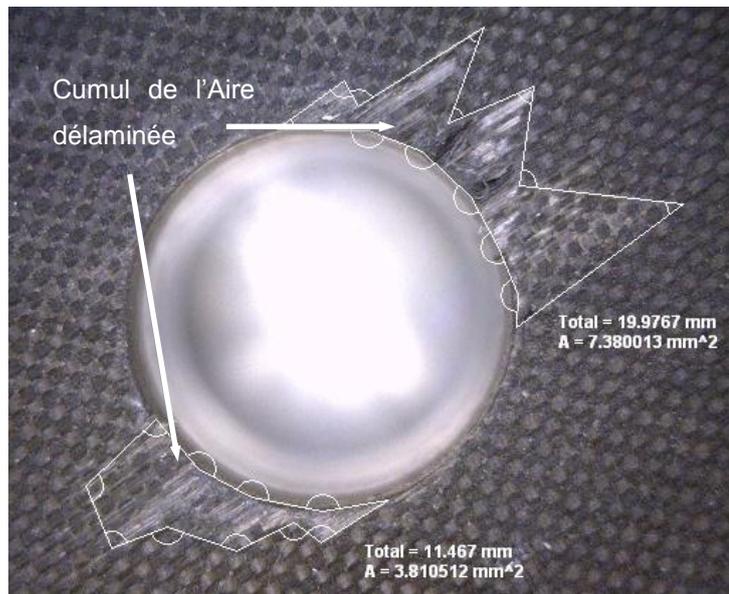


Figure III-38 : Détermination du cumul de l'aire délaminée.

Pour vérifier la pertinence de l'utilisation des deux critères de quantification, une analyse des résultats a été entreprise. Celle-ci va également permettre d'identifier les facteurs influant sur l'étendue du délaminage et les outils permettant de le limiter.

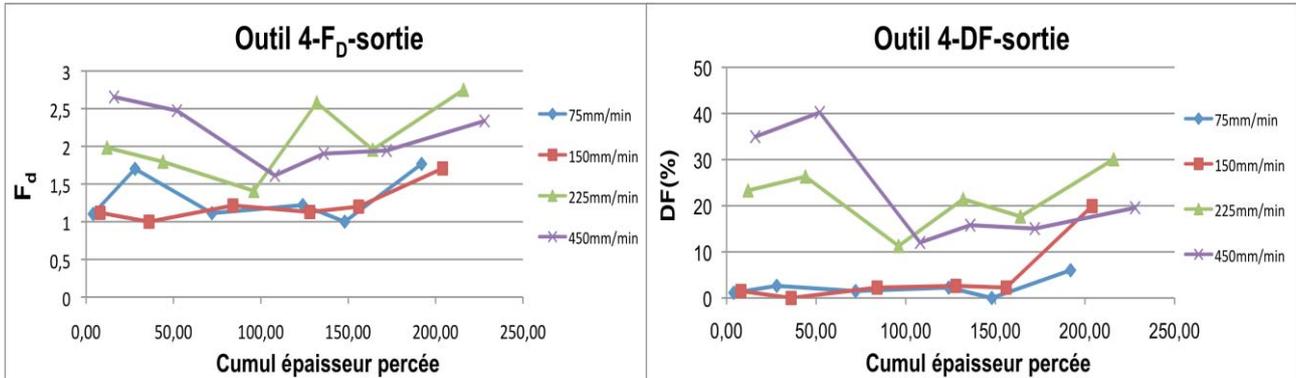


Figure III-39 : Critères de quantification du délaminage en sortie d'un perçage de CFRP en fonction de l'épaisseur percée pour différentes vitesses d'avance ( $V_f$ ).

Une première analyse concerne le délaminage en sortie lors du perçage de CFRP par l'outil 4. L'étendue de celui-ci est quantifiée par les deux facteurs,  $F_d$  et  $DF$  pour différentes valeurs de la vitesse d'avance ( $V_f$ ). L'analyse des deux critères confirme que lorsque l'on augmente la vitesse d'avance, on observe un accroissement de l'étendue délaminée (cf. Figure III-39). Les courbes correspondant aux vitesses d'avance 75 et 150 mm/min sont très proches et présentent une légère augmentation sur la fin de l'observation due à l'usure de l'outil. Les deux courbes correspondant aux vitesses d'avance les plus élevées, 225 et 450 mm/min, ont des valeurs moyennes bien plus élevées. Il est toutefois difficile de dégager une tendance entre ces deux courbes qui s'entrecroisent plusieurs fois.

Un certain nombre de travaux de recherche s'attachent à déterminer un effort critique à partir duquel, l'étendue du délaminage en sortie augmente [Gueg 94] [Piqu 99] [Abrā 07] [Karn 08]. Les études précédentes (cf III.3.1.2) ont montré que l'augmentation de l'effort de poussée  $F_z$  est étroitement liée à celle de l'avance. Il est par conséquent possible de faire un lien entre ce phénomène et l'allure des courbes de délaminage (cf. Figure III-38). En effet, les deux courbes ayant les plus faibles valeurs d'avances ont toutes deux des étendues de délaminage faibles voire nulles pour certains points. À partir d'une valeur critique de  $V_f$ , l'effort critique est dépassé provoquant l'apparition du délaminage illustrée par les deux courbes de vitesse d'avance maximale.

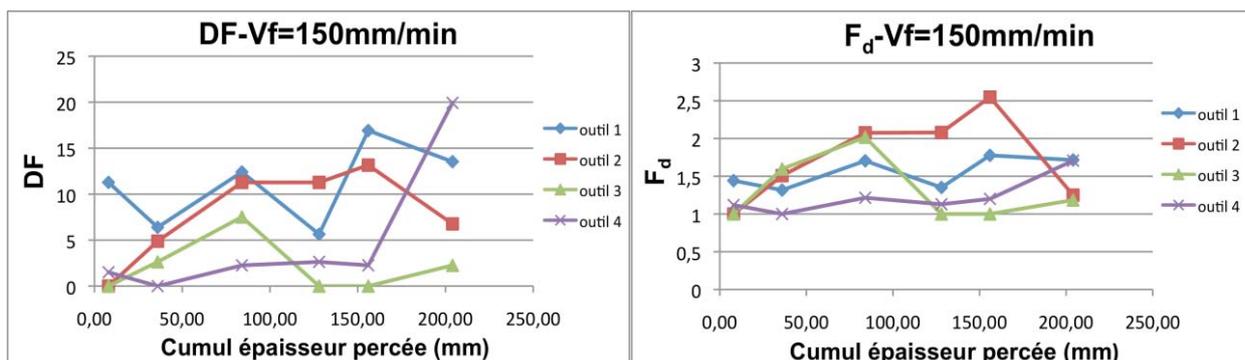


Figure III-40 : Critères de quantification du délaminage en sortie d'un perçage de CFRP.

La deuxième analyse concerne le délaminage en sortie lors du perçage de CFRP par les différents outils utilisés dans l'étude pour une même vitesse d'avance de 150 mm/min. De la même manière que pour l'analyse précédente, les deux critères de quantification ont été étudiés. Il est difficile, au regard des résultats (cf. Figure III-40) de dégager une tendance nette permettant de hiérarchiser les outils par rapport à ce critère. Cependant, l'outil 4 et dans une moindre mesure l'outil 3, semblent les plus performants vis à vis des deux critères. Les revêtements déposés sur ces deux outils ont donc un effet bénéfique sur l'étendue du délaminage en sortie, ces derniers ayant la même géométrie que l'outil 2 dont les performances sont très nettement inférieures.

Selon la nature de la séquence percée, la surface extérieure du multi-matériaux peut présenter un délaminage dans le cas d'un empilement Alu/CFRP ou une bavure lorsque l'aluminium est placé en second. La suite de l'étude va s'intéresser à cette dernière en présentant le processus de quantification de ce défaut.

### III.4.2. Bavure en sortie de perçage.

Une description de ce défaut a été précédemment réalisée dans l'étude bibliographique (cf. I.2.2.1). Cette partie va présenter la procédure utilisée pour quantifier ce défaut et permettre l'introduction de ce paramètre dans la base de données du modèle multi-matériaux.

#### III.4.2.1. Processus de quantification

De la même manière que pour la quantification du délaminage, le choix de l'outil de mesure s'est orienté vers le rugosimètre 3D mais cette fois-ci avec succès. Le problème de la mauvaise réflexion du faisceau n'a pas lieu d'être dans le cas de l'aluminium.

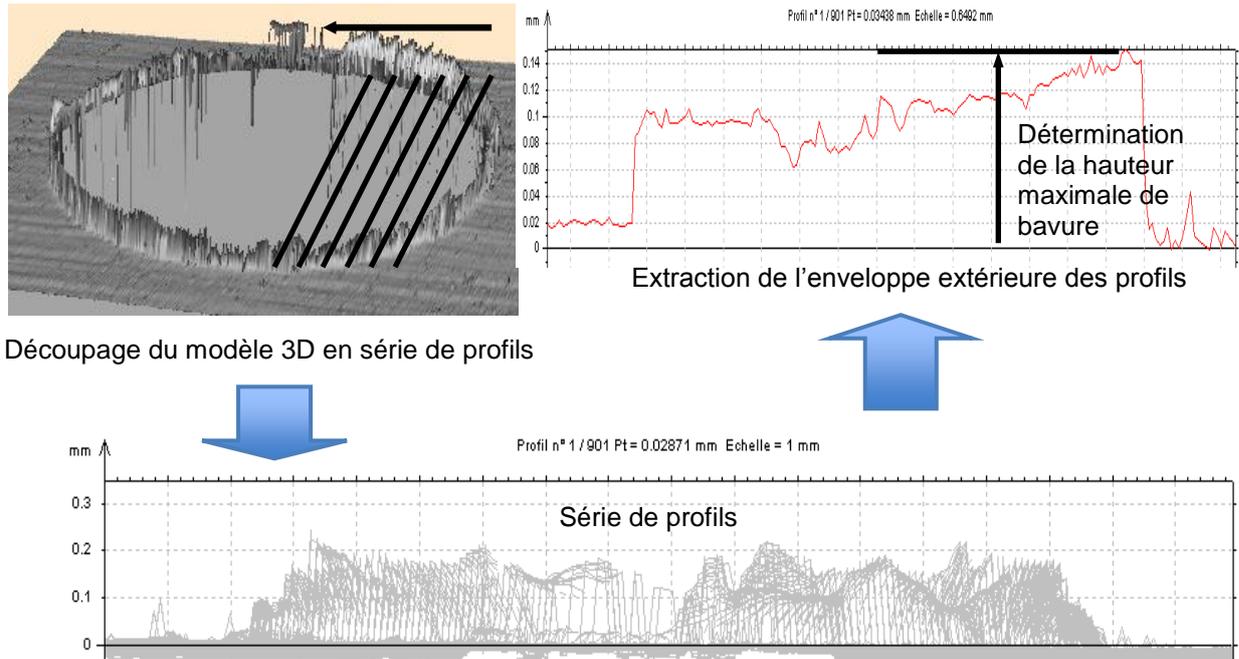


Figure III-41 : Quantification de la hauteur de bavure par post traitement des mesures réalisées au rugosimètre 3D.

Le fonctionnement du rugosimètre 3D a été décrit précédemment (cf. III.4.1). Dans le processus de quantification de la hauteur de bavure, celui-ci permet d'effectuer une cartographie de la débouchure du perçage (cf. Figure III-41). Une fois cette opération réalisée, le logiciel de post traitement associé au rugosimètre, AltiMap<sup>®</sup>, permet de décomposer la mesure en une série de profils superposés. Pour quantifier la hauteur de bavure, une autre fonctionnalité du logiciel permet d'extraire l'enveloppe extérieure des profils successifs.

#### III.4.2.2. Validation des mesures réalisées

Une analyse des mesures réalisées va permettre la validation du processus de quantification et l'identification des paramètres influents sur la hauteur de bavure.

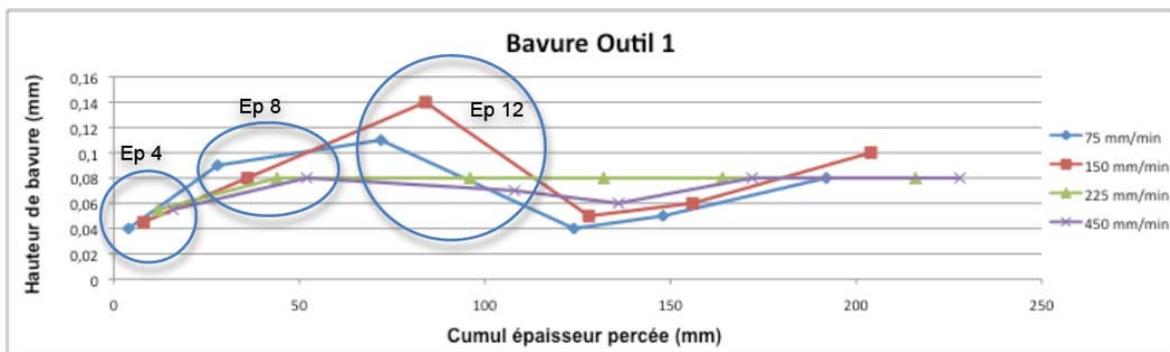


Figure III-42 : Evolution de la hauteur de bavure pour différentes vitesses d'avance.

L'analyse porte sur les hauteurs des bavures mesurées en sortie de perçages à sec, par l'outil 1, des éprouvettes d'aluminium d'épaisseurs 4, 8 et 12 mm pour 4 vitesses d'avance  $V_f$ .

L'analyse montre que contrairement aux résultats issus des travaux bibliographiques, la vitesse d'avance et l'épaisseur cumulée ont peu d'influence sur la hauteur de bavure (cf. Figure III-42). Ces résultats doivent être toutefois nuancés par le fait que cette étude porte sur seulement 30 perçages. Or, la durée de vie d'un outil en perçage à sec de l'aluminium est bien supérieure (de l'ordre de 1000 perçages selon la profondeur percée). Par conséquent, l'usure de l'outil n'est certainement pas suffisante pour que les résultats soient affectés.

La campagne d'essais a consisté à percer les échantillons dans l'ordre croissant des épaisseurs une fois par conditions de coupe, puis de renouveler l'opération une seconde fois. Cette séquence explique la forme des différentes courbes observées sur la figure III-42. En effet, les hauteurs de bavures augmentent linéairement jusqu'au perçage de l'éprouvette de 12mm puis diminuent nettement au démarrage du deuxième cycle avant d'augmenter une nouvelle fois. Le paramètre influant sur la hauteur de bavure est donc l'épaisseur de l'échantillon.

Comme nous l'avons vu précédemment (cf. I.2.2.1), la bavure est engendrée par l'augmentation de la ductilité de l'aluminium due à la température dans l'enceinte du trou. La création de chaleur se produit par les frottements intenses entre l'outil et la paroi du trou. Par conséquent, plus l'épaisseur de l'échantillon est importante, plus le perçage dure longtemps, plus on crée de chaleur et plus la bavure est susceptible d'être importante.

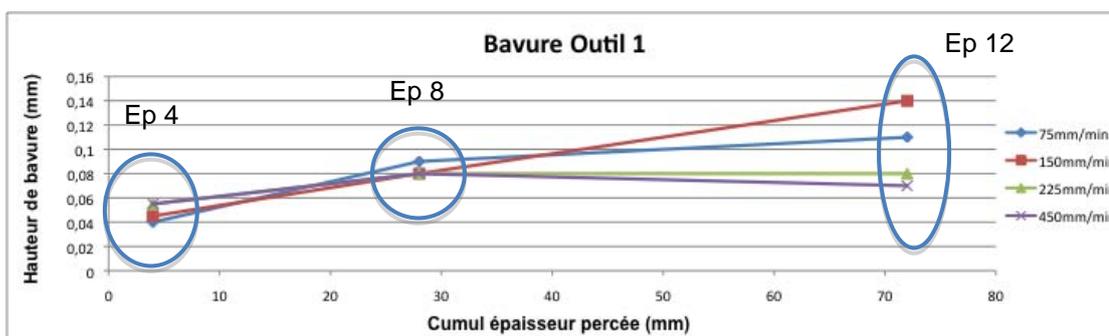


Figure III-43 : Observation de la première partie de l'échantillon.

Une observation plus fine de la première partie de l'échantillon vient confirmer ces résultats (cf. Figure III-43). L'allure des courbes montre effectivement que les hauteurs de bavures générées par les vitesses d'avances les plus élevées sont celles dont l'ampleur est la moins importante.

Pour observer l'influence des paramètres outils (géométrie, revêtement), une analyse a porté sur l'observation de la hauteur de bavure consécutive à un perçage à sec d'un échantillon d'aluminium par les 4 outils de l'étude. Les résultats montrent que l'outil 2, dont la géométrie est la même que les outils 3 et 4, présente une hauteur de bavure bien supérieure pouvant s'expliquer par l'absence de revêtements sur ce dernier (cf. Figure III-43).

Comme nous l'avons vu dans l'étude bibliographique (cf. I.2.2.1), l'absence de fluide de coupe, lors du perçage à sec peut être en partie compensée par la dépose d'un revêtement permettant notamment de réduire les frottements outil/copeau. Sans revêtement,

la chaleur créée dans l'enceinte des perçages réalisés par l'outil 2 est par conséquent plus importante expliquant la hauteur de bavure supérieure.

Les outils 3 et 4 ayant les mêmes géométries, le revêtement déposé sur l'outil 3 est par conséquent le plus performant.

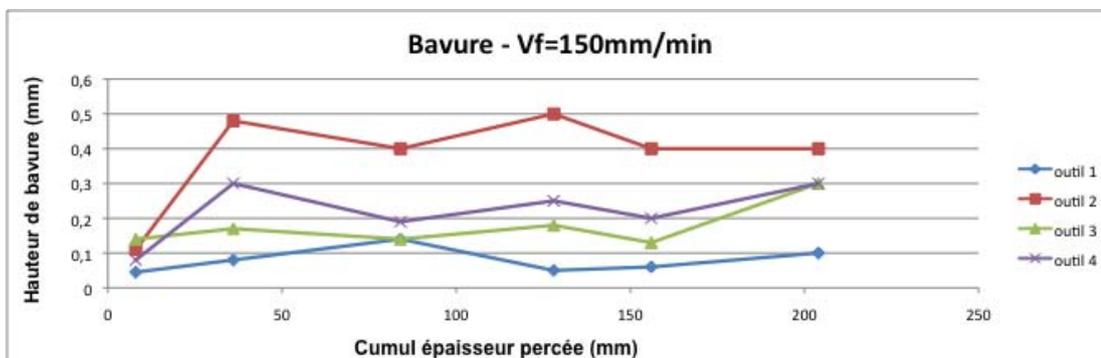


Figure III-44 : Hauteur de bavure en perçage à sec d'un aluminium.

### III.4.3. Mesures dimensionnelles et géométriques

La quantification des défauts dimensionnels et géométriques a été réalisée par l'intermédiaire d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) permettant l'obtention de mesures précises et la mise en place de gammes de mesures. L'étude s'est portée sur l'analyse d'une mesure dimensionnelle et de deux défauts géométriques :

- ◆ la cylindricité,
- ◆ la circularité.

Une gamme de mesure appelée "panoplie" a été mise en place afin d'obtenir une bonne répétabilité des vitesses et trajectoires d'accostage. Pour ce faire, un logiciel de contrôle et de mesure 3D, Prélude Inspection<sup>®</sup>, a été utilisé permettant de dupliquer un mesurage et par conséquent de conserver le même nuage de points palpés d'un perçage mesuré à un autre.

#### III.4.3.1. Configurations des mesures

Les mesures dimensionnelles et géométriques concernant l'intégralité des échantillons de l'étude soient :

- ◆ des échantillons CFRP de 4, 8 et 12 mm,
- ◆ des échantillons aluminium de 4, 8 et 12 mm,
- ◆ des échantillons multi-matériaux de 8 à 24 mm.

Des configurations différentes ont été utilisées selon l'épaisseur et le nombre de couches de matériaux. Cependant, dans chaque couche, l'analyse consiste à mesurer :

- ◆ deux circularités sur deux sections différentes en palpant 6 points, par exemple à 2 et 6 mm de la surface supérieure dans le cas d'une éprouvette de 8 mm,

- ♦ une cylindricité en palpant 8 points sur une zone de palpation plus ou moins importante selon l'épaisseur de l'éprouvette. Pour une éprouvette de 8 mm, les points de mesure sont répartis sur une zone s'étendant sur 4 mm de hauteur (cf. Figure III-45).

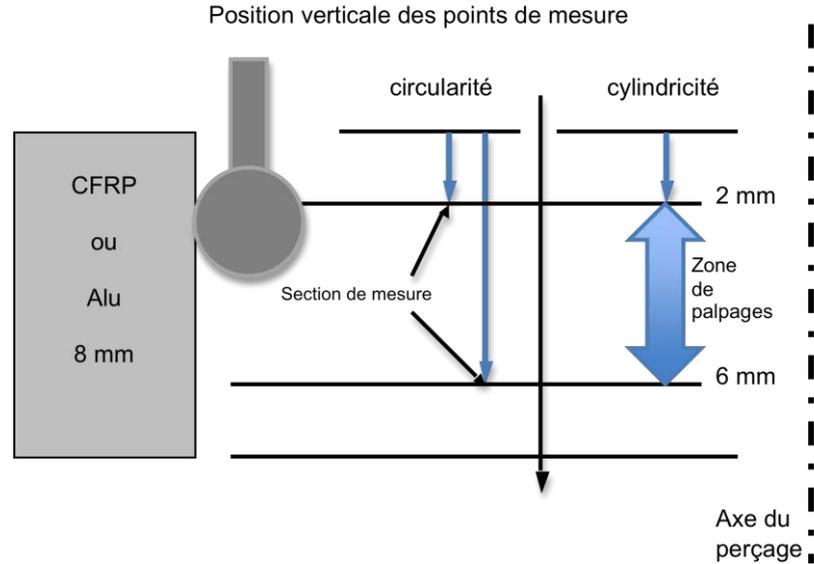


Figure III-45 : Positionnement des sections et zones de palpation (éprouvette de 8 mm d'épaisseur).

Dans le cas d'un échantillon multi-matériaux, une mesure de la cylindricité globale du perçage sur l'ensemble de l'empilement a été ajoutée aux mesures réalisées sur chaque couche.

#### III.4.3.2. Analyse dimensionnelle

L'analyse porte sur l'observation de l'évolution dimensionnelle d'un perçage multi-matériaux CFRP/Alu. Deux mesures sont effectuées sur chacune des couches de l'empilement. La Figure III-46 présente l'évolution des diamètres moyens (sur deux mesures) pour chacun des matériaux pris séparément puis sur le perçage complet en tenant compte des 4 mesures simultanément.

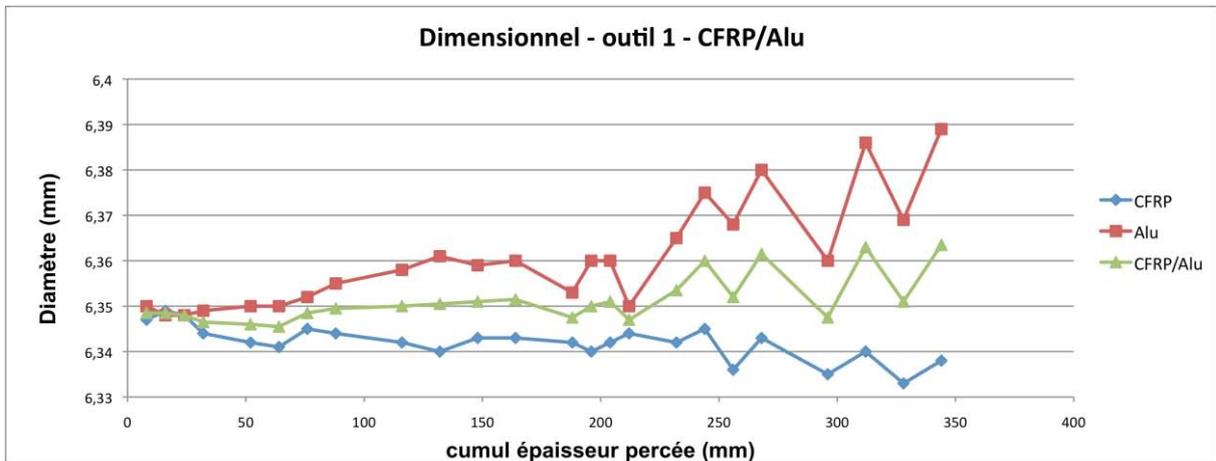


Figure III-46 : Évolution du diamètre moyen.

Les résultats montrent que le diamètre moyen tend à augmenter dans la couche d'aluminium au cours de la campagne, alors que parallèlement celui-ci diminue dans le CFRP. Ces deux phénomènes, pourtant opposés, peuvent s'expliquer par le changement de morphologie de l'arête de coupe au fur et à mesure de l'usure de l'outil. D'un côté, la perte d'acuité d'arête du foret augmente le phénomène de resserrement des fibres engendrant la diminution du perçage réalisé dans le CFRP. De l'autre, la formation d'une arête rapportée dans l'aluminium augmente progressivement le diamètre percé. Dans l'exemple étudié (cf. Figure III-46) ce phénomène s'accroît lorsque le cumul de l'épaisseur percée atteint la valeur de 230 mm.

#### III.4.3.3. Mesure du défaut de circularité

Le défaut de circularité est calculé à partir du palpement de 6 points (diamètre du palpeur 3 mm). La mesure est réalisée deux fois sur deux sections différentes dont le positionnement varie selon l'épaisseur de la couche concernée (cf. Figure III-45). La Figure III-47 présente l'évolution du défaut de circularité moyen (sur deux sections) pour chacun des matériaux pris séparément.

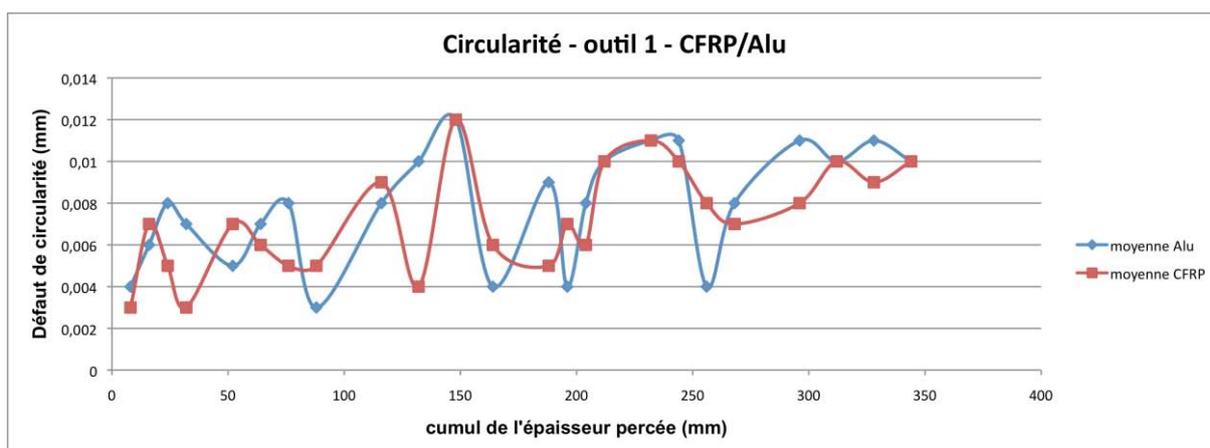


Figure III-47 : Mesure du défaut moyen de circularité de perçage réalisé dans un empilement CFRP/Alu.

Il est difficile de dégager des résultats une véritable tendance (cf. Figure III-47). Le défaut de circularité dans les deux couches semble toutefois croître du fait de l'usure de l'outil. D'autre part, la qualité du perçage réalisé dans l'échantillon étudié est à souligner, le défaut de cylindricité n'excédant pas 12  $\mu\text{m}$  après 350 mm percés.

#### III.4.3.4. Mesure du défaut de cylindricité

Le défaut de cylindricité est calculé à partir du palpement de 8 points dans une zone dont la hauteur varie selon l'épaisseur de la couche concernée (cf. Figure III-45). La Figure III-48 présente l'évolution du défaut de cylindricité dans les deux cas de figure évoqués précédemment soit :

- ◆ pour les deux matériaux constituant l'empilement pris séparément,
- ◆ pour l'empilement complet.

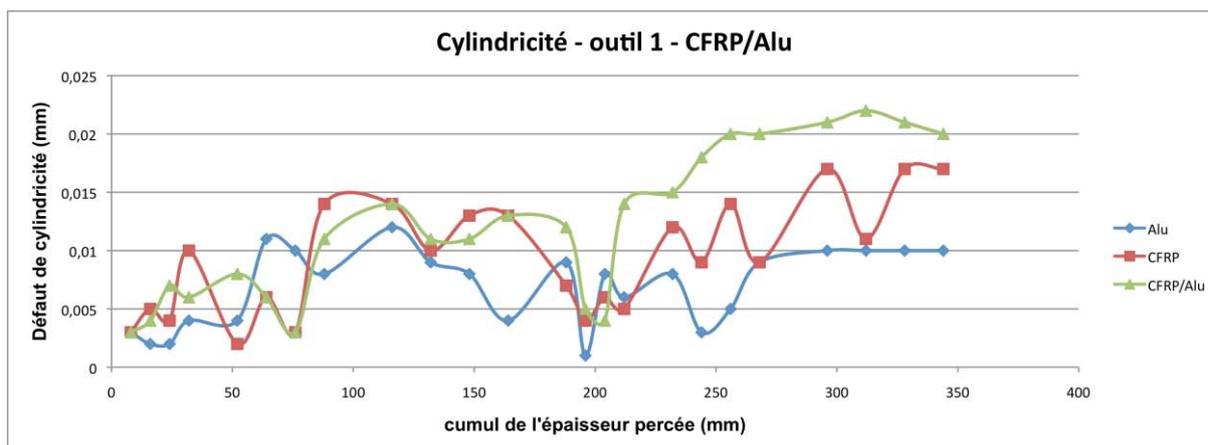


Figure III-48 : Mesure du défaut de cylindricité de perçage réalisé dans un empilement CFRP/Alu.

De la même manière que pour le défaut de circularité, il est difficile de dégager des résultats une tendance nette. L'augmentation progressive du défaut est visible notamment pour le défaut de cylindricité de l'ensemble de l'empilement à proximité d'une valeur de l'épaisseur percée cumulée de 230 mm. Ce phénomène peut s'expliquer, en partie, par la nette augmentation, observée dans l'analyse dimensionnelle, de l'écart entre le diamètre moyen de chaque couche de l'empilement. La qualité du perçage est, là encore, très satisfaisante dans l'échantillon étudié. Le défaut de cylindricité calculé sur toute la hauteur de l'empilement multi-matériaux n'excède pas 22  $\mu\text{m}$ .

L'analyse de trois des quatre critères de qualité (dé laminage, défauts dimensionnels et géométriques) a mis en avant le rôle prépondérant de l'usure de l'outil dans leurs mécanismes de dégradation. La prédiction de la qualité d'un perçage par le modèle doit par conséquent prendre en compte ce paramètre pour qu'elle puisse être quantifiée à un moment donné de la vie de l'outil, en d'autres termes pour une usure donnée du foret. Cette dernière partie du chapitre va aborder la caractérisation et la mise en place d'un processus de quantification de l'usure de l'outil au cours de la campagne d'essais.

#### III.4.4. Mesure de l'usure de l'outil

L'analyse des différents critères de qualité a montré l'importance de l'usure de l'outil sur la qualité du perçage réalisé. Ce paramètre doit donc être pris en compte dans le modèle.

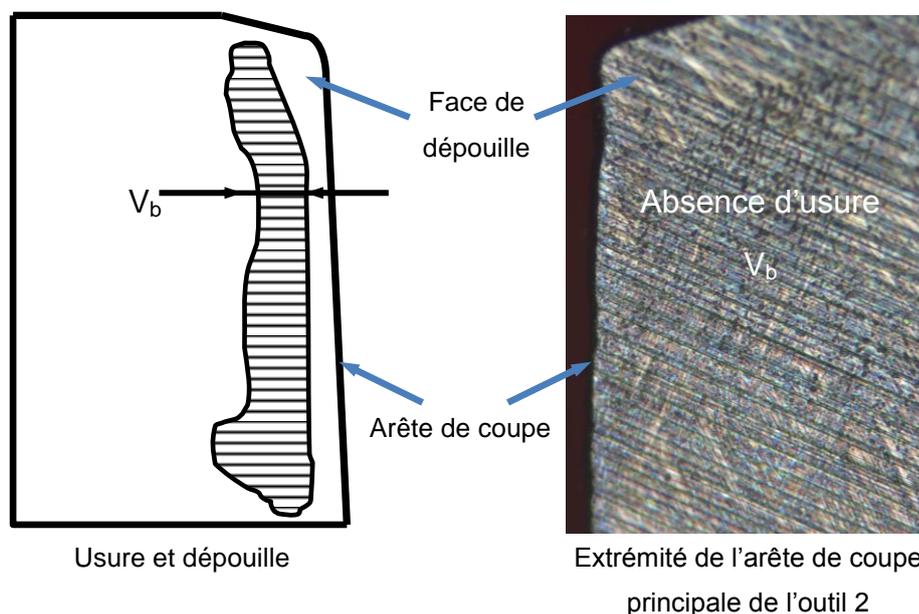
Cependant, l'usure d'un foret ne s'exprime pas de la même manière selon les applications. Celle-ci se manifeste sous différents aspects selon la nature des matériaux percés. Par conséquent, l'étude de ce paramètre dans le cas d'un perçage multi-matériaux n'en est que plus complexe du fait des natures très différentes des matériaux constituant l'empilement.

##### III.4.4.1. Caractérisation de l'usure du foret

Le critère d'usure  $V_b$  quantifiant l'usure sur la face en dépouille du foret est le plus communément utilisé (cf. Figure III-49). La caractérisation de l'usure de l'outil s'est donc

turnée dans un premier temps vers ce critère. Des essais ont donc préalablement été réalisés avec pour objectif de vérifier la faisabilité d'une mesure en continue de ce paramètre. En effet, la mesure du critère ne doit pas se cantonner à une quantification initiale et finale du paramètre, d'une part car l'évolution de celui-ci n'est pas forcément linéaire. D'autre part, sans l'acquisition d'un nombre de valeurs intermédiaires suffisantes de ce paramètre, le critère ne peut être intégré au réseau de neurones du modèle. L'étude précédente (cf. II.4.2) a montré qu'un minimum de huit valeurs est nécessaire à la constitution d'un échantillon d'entraînement du réseau.

La mesure de ce critère est réalisée par l'intermédiaire d'observation à la binoculaire permettant l'obtention d'une image précise de la face en dépouille (cf. Figure III-49). La quantification du défaut est réalisée ensuite par l'intermédiaire d'un logiciel d'analyse d'image.



Pour vérifier que la dérive de ce critère est quantifiable au cours des 30 perçages constituant les campagnes d'essais de chaque mono-matériau ou séquence d'empilement, l'usure de l'outil 2 a été mesurée à plusieurs reprises lors d'une série de perçage d'une éprouvette d'aluminium. Les résultats issus de cette analyse montrent que même après la réalisation de la totalité de la campagne d'essais (30 perçages), aucune usure n'est visible sur l'outil (cf. Figure III-49). La caractérisation du critère d'usure ne peut donc pas être réalisée par l'intermédiaire du critère  $V_b$ .

L'étude bibliographique précédemment réalisée a mis en avant l'importance de la perte d'acuité d'arête de l'outil sur l'apparition d'un certain nombre de phénomènes de coupe tels que le délaminage, la bavure ou l'ovalisation. Le choix du paramètre caractérisant l'usure de l'outil s'est donc tourné vers le rayon d'acuité d'arête de coupe principale dont la quantification s'avère bien plus complexe que dans le cas du critère  $V_b$ .

#### III.4.4.2. Processus de quantification

La mesure de ce paramètre pose un certain nombre de difficultés compte tenu des contraintes imposées par l'aspect continu de l'observation. La quantification du rayon d'acuité doit effectivement être réalisée au cours de la campagne, nécessitant un processus de mesure sur site pour ne pas ralentir son déroulement. Une autre difficulté réside dans le fait que l'acuité d'arête n'est pas forcément la même le long de l'arête de coupe. La vitesse de coupe étant plus importante sur la périphérie de l'outil (cf. Figure I-5), l'éroussement de l'arête due aux frictions outil/fibres y est plus prononcé.

Différents moyens de mesure peuvent être utilisés pour mesurer l'acuité de l'arête de coupe. Une étude a montré qu'il est possible de la quantifier à partir d'un microscope électronique à balayage (MEB) dont les images sont ensuite analysées avec un logiciel de traitement [Peig 10]. Cette méthode a dû être écartée rapidement car les dimensions des outils ne permettent pas leurs positionnements dans l'enceinte du MEB disponible au LGM<sup>2</sup>B. Une réduction de leurs longueurs compromettrait la poursuite de la campagne d'essais.

Une deuxième solution consiste à détourner le rugosimètre 3D de sa fonction principale de métrologie des surfaces pour qu'il puisse mesurer l'acuité de l'arête de coupe de l'outil. Pour cela, différentes méthodes ont été testées. La première consiste à conserver les sondes utilisées précédemment afin de cartographier l'arête de coupe. Cette solution n'est malheureusement pas viable, pour les mêmes raisons que pour la quantification de la zone délaminée (cf. III.4.1). La restitution du signal par l'arête de l'outil n'est pas suffisamment bonne pour effectuer une mesure.

Les deux sondes disponibles par défaut sur le rugosimètre 3D Altimet<sup>®</sup> peuvent être remplacées par un palpeur mécanique avec une résolution de mesure de 5 nm. Ce palpeur est constitué d'un bras monté en pivot au bout duquel se trouve le stylet de mesure se terminant par une bille de 2 µm de diamètre en tungstène. La mesure est réalisée en balayant l'arête de coupe en partant de la face de coupe vers la face en dépouille sur trois sections distantes de 1 mm (cf. Figure III-50). Pour obtenir une bonne répétabilité de positionnement des sections mesurées, une automatisation de la mesure est nécessaire. Un montage a donc été conçu de manière à positionner l'outil et plus particulièrement son arête de coupe avec la même orientation à chaque mesure.

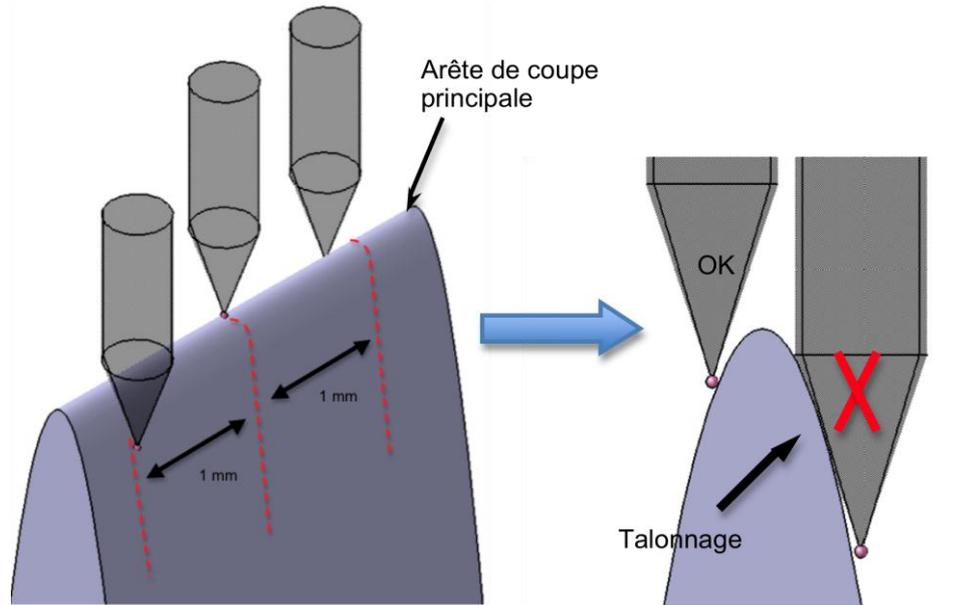


Figure III-50 : Configurations des mesures du rayon d'acuité d'arête.

Le profil mesuré est ensuite exporté sous format ascii vers le logiciel Matlab® par l'intermédiaire duquel est calculé le rayon d'acuité. L'acquisition du profil étant réalisée à partir du centre de la bille du palpeur, un déplacement des différents points d'acquisition de manière normale au profil permet de reconstituer le profil réel de l'arête de coupe (cf. Figure III-51).

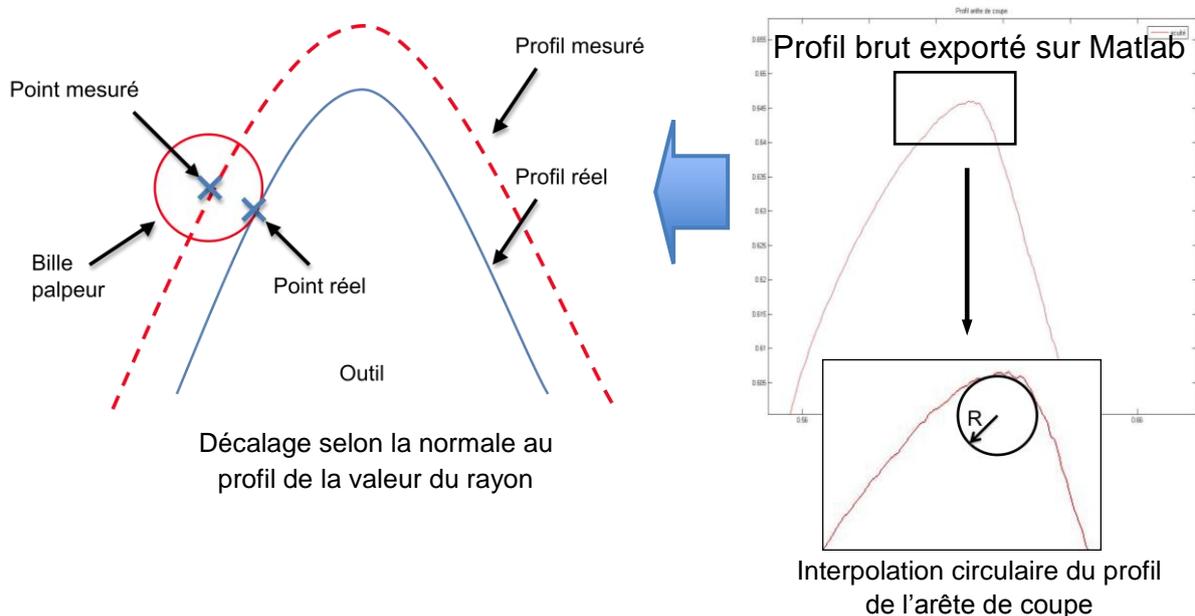


Figure III-51 : Reconstitution du profil réel de l'outil.

Un dernier problème subsiste car l'angle trop important de la pointe du palpeur vient talonner la surface de l'arête de coupe faussant la mesure au début et à la fin de celle-ci. Afin de prendre en compte ce phénomène, les points d'incertitudes ont été déterminés sur le logiciel Matlab® puis supprimés du profil de calcul pour cantonner la mesure du rayon d'acuité aux surfaces de contact outil/bille.

Une fois le processus mis en place, 13 mesures, sur les 30 perçages de la campagne, ont été réalisées. Ces mesures ont été réalisées après le 3 et 5<sup>ème</sup> perçage de chaque épaisseur et pour les deux niveaux d'usure soit 12 mesures (cf. Figure III-11) auxquelles il faut ajouter une mesure sur l'outil neuf.

De la même manière que pour les paramètres étudiés précédemment dans cette partie, une analyse visant à valider le processus de quantification est effectuée dans la suite de l'étude.

#### III.4.4.3. Analyse des résultats

L'analyse des résultats porte sur un échantillon de perçage CFRP par l'outil 2. La figure III-52 montre une augmentation progressive de l'usure de l'outil caractérisée par l'émoussement de l'arête de coupe.

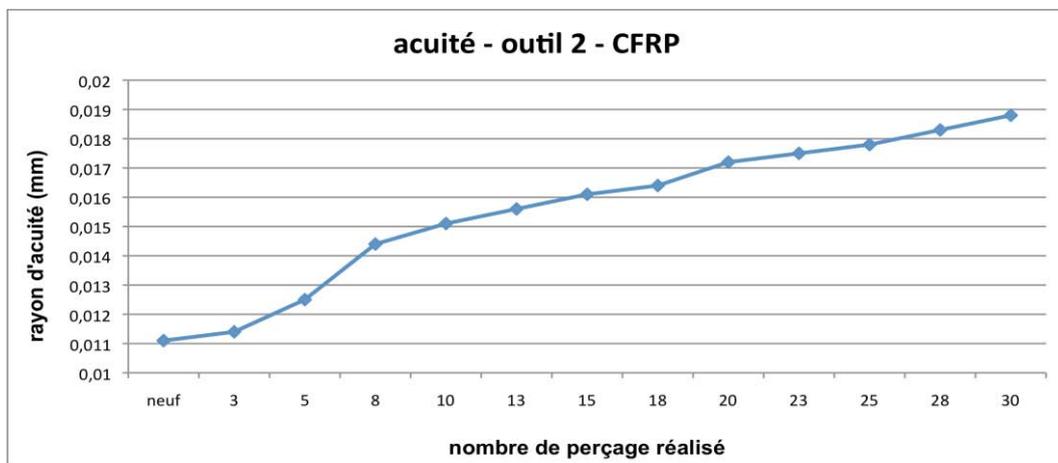
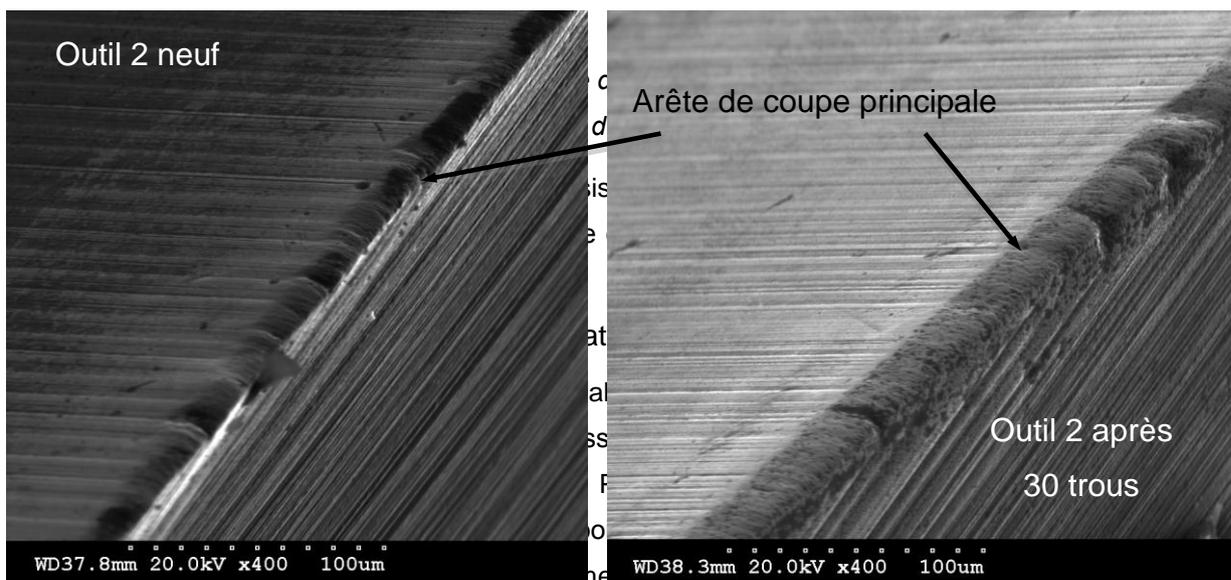


Figure III-52 : Rayon d'acuité de l'arête de coupe de l'outil 2.

Ces résultats sont confirmés par les images prises à l'aide d'un MEB, d'une arête de coupe neuve et une arête de coupe ayant percée la totalité de la campagne.



satisfaire ces deux conditions avec le montage utilisé dans cette étude.

L'utilisation d'un microscope de nouvelle génération permettra de résoudre en grande partie tous ces problèmes. Le laboratoire LGM<sup>2</sup>B a fait l'acquisition d'un microscope KEYENCE VHX-600 Génération II<sup>®</sup>. Celui-ci est constitué d'une caméra haute définition (54 mégapixels) reliée à un moniteur LCD haute résolution intégrant un disque dur. Ce système assure l'observation, l'enregistrement et la mesure directement sur site, facilitant la réalisation de la campagne d'essais. Il permet la construction d'images 3D (cf. Figure V-1) précises par une évaluation du flou.

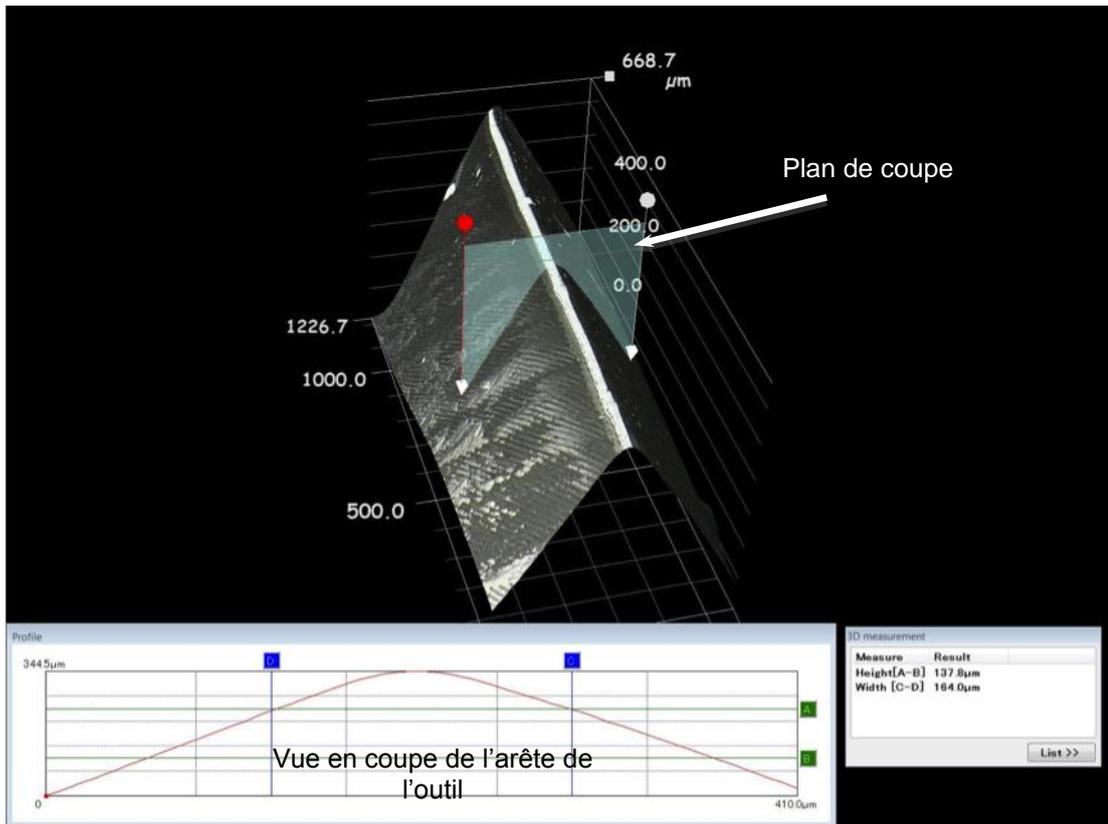


Figure III-54 : Reconstruction 3D de l'arête de coupe principale.

Une mesure de l'arête de coupe principale d'un foret a été réalisée à l'aide de ce système. La figure III-54 montre la grande qualité des images obtenues. Une fonctionnalité proposée par le logiciel de traitement d'image intégré permet d'obtenir l'acuité d'arête de l'outil très rapidement (cf. Figure III-54) en positionnant des plans de coupe. Il est alors très aisé d'obtenir des mesures de manière répétable.

### III.5. Conclusions

Cette partie a présenté l'ensemble des techniques expérimentales employées pour constituer l'échantillon d'entraînement des modèles matériaux et multi-matériaux. L'analyse des différents critères de qualité a débouché sur l'identification des différents paramètres influant sur leur évolution. Pour établir un modèle pertinent, la totalité de ces paramètres sera prise en compte dans les entrées du problème. Le tableau suivant (cf. Figure III-55) résume les paramètres influant sur chacun des critères étudiés dans cette partie.

Critères de qualité	Paramètres influant	Outils de mesure
Défauts dimensionnels et géométriques	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ usure de l'outil</li> <li>◆ nature du matériau</li> </ul>	MMT SKY®
Délaminage	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ usure de l'outil</li> <li>◆ conditions de coupe</li> </ul>	Microscope digital compact Dino-Lite®
Bavure	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ usure de l'outil</li> <li>◆ conditions de coupe</li> </ul>	Rugosimètre 3D Altimet®

Figure III-55 : Tableau récapitulatif.

La mise en évidence de l'influence de l'usure de l'outil dans l'évolution de deux des trois critères étudiés, a rendu nécessaire l'établissement d'une caractérisation, ainsi qu'une méthode de quantification associée, pertinente par rapport à la problématique de l'étude. L'étude d'un certain nombre de solutions a débouché sur la caractérisation de l'usure de l'outil par l'analyse du rayon d'acuité de l'arête de coupe principale. La quantification de ce paramètre est réalisée par l'intermédiaire d'un palpeur mécanique associé au rugosimètre 3D permettant, en balayant l'outil de la face de coupe vers la face en dépouille, d'obtenir un profil de l'outil en un point de l'arête de coupe. Une moyenne est ensuite réalisée à partir de trois mesures effectuées en des points distants de 1mm (cf. Figure-48).

Cette partie a donc permis de constituer l'échantillon d'entraînement des réseaux de neurones et d'identifier les paramètres d'entrée. La suite de l'étude va donc s'attacher à entraîner les réseaux de neurones correspondant aux modèles matériaux et mettre en place le modèle multi-matériaux.





IV. Modélisation du perçage multi-matériaux



## Nomenclature

$d$  : diamètre du foret [mm]

$DF$  : facteur de délaminage [%]

$f$  : avance par tour [mm/tour]

$F_D$  : facteur de délaminage [sans unité]

$F_z$  : effort de poussée [N]

$I_z$  : intensité du courant du moteur de l'axe z [A]

$I_s$  : intensité du courant du moteur de la broche [A]

$M_z$  : moment de coupe [N.m]

$N$  : fréquence de rotation [tr/min]

$V_C$  : vitesse de coupe [m/min]

$V_f$  : vitesse d'avance [mm/min]

$W_{i,j}$  : matrice des poids [sans unité]



## IV.1. Introduction

La modélisation du perçage multi-matériaux nécessite dans un premier temps la mise en place des modèles prédictifs, type “boîte noire”, de la qualité du perçage des matériaux, CFRP et aluminium, constituant l’empilement. Ce type de modélisation associe à un jeu de paramètres d’entrée, un jeu de paramètres de sortie. L’objectif du modèle étant la prédiction de la qualité d’un perçage multi-matériaux, les paramètres de sortie sont par conséquent les différents critères permettant de la caractériser. Pour identifier les paramètres d’entrée associés, les analyses réalisées au chapitre précédent ont permis d’identifier les paramètres influant sur les différents critères de qualité soit :

- ◆ les conditions de coupe ( $N$  et  $f$ ),
- ◆ l’épaisseur percée,
- ◆ le rayon d’acuité de l’arête de coupe principale du foret.

Les travaux réalisés dans le deuxième chapitre de cette thèse ont débouché sur la mise en place de la méthode de modélisation. Celle-ci est réalisée par l’intermédiaire des réseaux de neurones dont les différents paramètres, architectures et algorithmes, ont été introduits. A partir d’un même échantillon d’entraînement, une analyse a permis d’identifier le couple architecture/algorithme le plus performant.

La méthode de modélisation ayant été figée et la base de donnée constituée, l’étape suivante est par conséquent l’entraînement des modèles qualitatifs du perçage CFRP et aluminium. La partie qui va suivre va s’attacher à présenter cette étape ainsi que la précision des modèles créés.

## IV.2. Mise en place du modèle global

L’architecture du modèle global multi-matériaux a été exposée au deuxième chapitre (cf. II.1.4). Celle-ci se présente sous la forme d’un assemblage de plusieurs modèles imbriqués les uns dans les autres (cf. Figure IV-1). Ces derniers sont les modèles mono-matériaux permettant de prédire la qualité d’un perçage dans le matériau correspondant. Cette qualité est caractérisée différemment dans le modèle global, selon la séquence d’empilement. Par exemple, l’étendue délamérée peut être prise en compte en entrée ou en sortie selon si le CFRP est placé respectivement en premier ou en second dans la séquence d’empilement. Seuls les défauts dimensionnels et géométriques sont pris en compte de manières similaires pour les deux matériaux quel que soit la séquence considérée.

L’analyse de l’effort  $F_z$  réalisée au chapitre III (cf. III.3.1.2) a montré, l’influence de la séquence d’empilement sur l’intensité de l’effort dans le second matériau. L’augmentation engendrée est très certainement due à la modification, au cours du perçage du premier matériau, de la géométrie de l’arête de coupe principale de l’outil (acuité d’arête). Pour

prendre en compte ce phénomène, la valeur du rayon d'acuité d'arête est modifiée au cours de la mise en place du modèle global, par l'intermédiaire des modèles matériaux successifs.

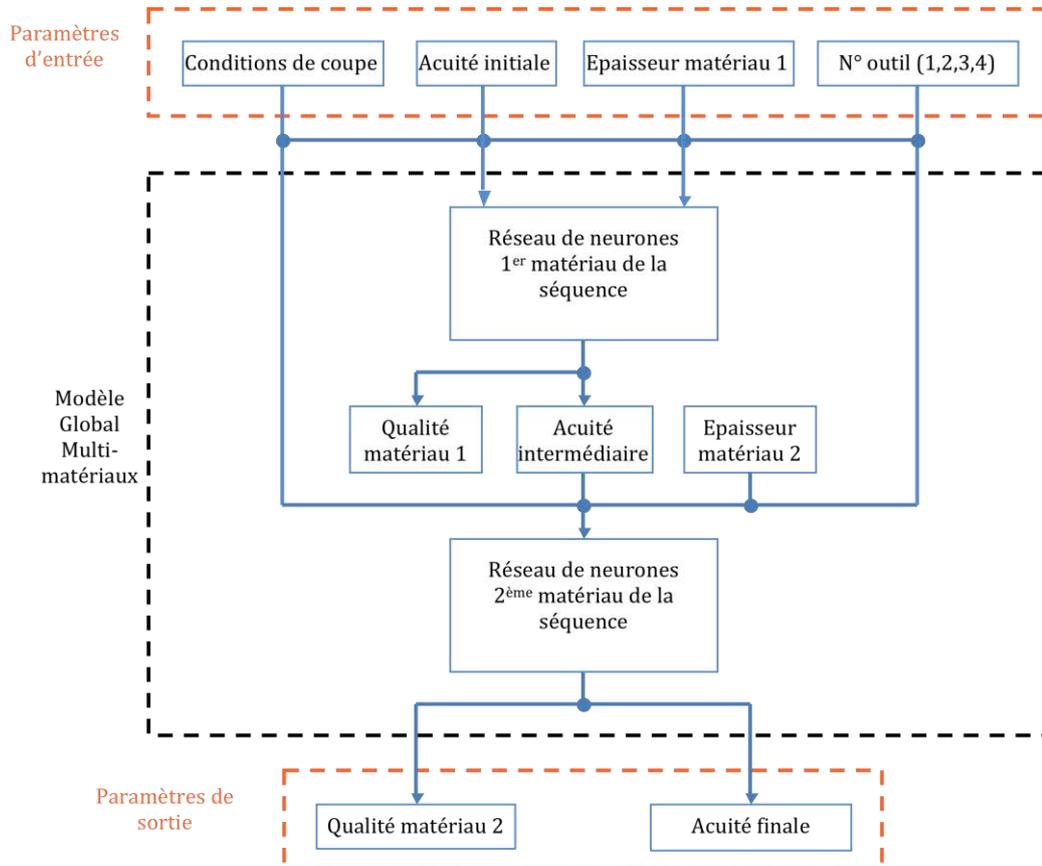


Figure IV-1 : Architecture du modèle global

La suite de l'étude va s'intéresser en détails à la mise en place des modèles mono-matériaux à l'aide des réseaux de neurones.

#### IV.2.1. Les modèles mono-matériaux

L'étude réalisée au deuxième chapitre de cette thèse a permis d'identifier le couple architecture/algorithmes le plus performant. Cette partie aborde la suite de la démarche, en l'occurrence, l'entraînement des réseaux par les échantillons issus de la base de données. Cette dernière est constituée de deux natures d'échantillons :

- ◆ les essais mono-matériaux (CFRP, aluminium),
- ◆ les essais multi-matériaux.

Au-delà de l'analyse réalisée dans le chapitre précédent, ces essais ont des rôles différents selon leurs natures. Les essais matériaux permettent l'entraînement des réseaux de neurones et par conséquent la mise en place du modèle. L'échantillon multi-matériaux, quant à lui, permet la validation du modèle global en comparant la sortie de ce dernier avec les valeurs cibles obtenues expérimentalement.

Dans un premier temps, l'étude se focalisera sur l'entraînement des réseaux de neurones et leurs performances, puis le modèle sera analysé dans sa globalité.

IV.2.1.1. Défauts dimensionnels et géométriques

Lors de la détermination du couple architecture/algorithmes optimal au chapitre II, l'analyse s'est cantonnée à la prédiction de l'effort de poussée  $F_z$  et du moment de coupe  $M_z$ . Pour valider ces résultats pour la suite de l'étude, l'analyse s'élargie à la prédiction des critères de qualité et de l'acuité de l'arête de coupe principale. Pour ce faire, un réseau de neurones est entraîné par les échantillons matériaux seuls.

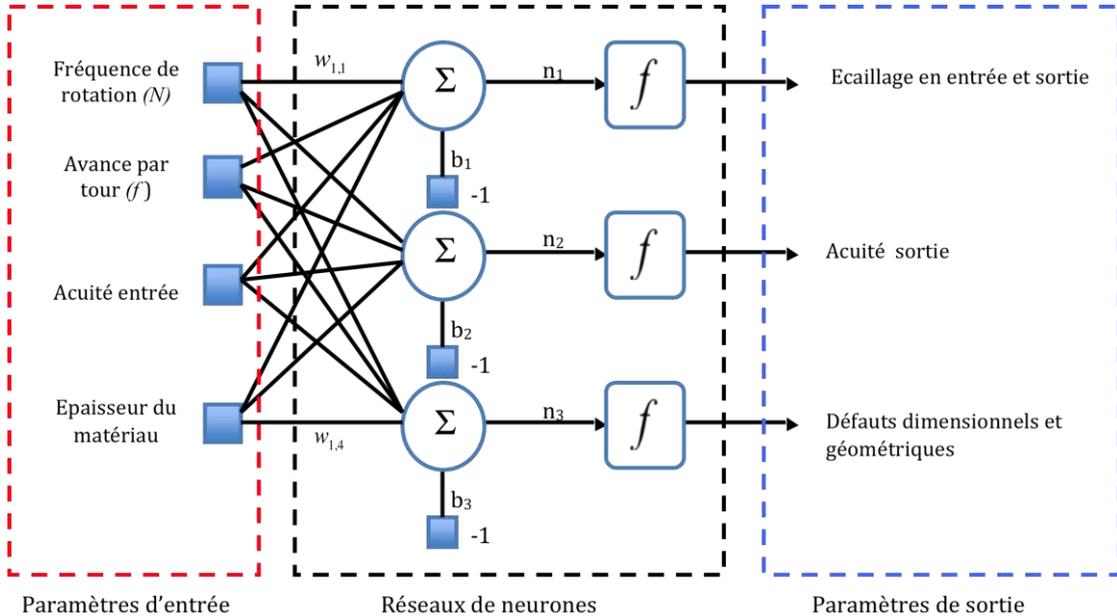


Figure IV-2 : Modélisation par les réseaux de neurones du perçage d'un CFRP par un outil défini.

Nous avons vu précédemment que les critères de qualité diffèrent selon le matériau percé. L'étude de la performance des réseaux de neurones doit donc être réalisée de manière séparée du fait des disparités de la nature des paramètres de sortie, selon les matériaux de l'empilement. La performance d'un réseau de neurones a été caractérisée au chapitre II (cf. II.3.1). Celle-ci est quantifiée par le calcul de la valeur absolue de l'erreur de prédiction (Equation II.10).

La figure IV-2 présente les paramètres d'entrée et de sortie d'une modélisation par les réseaux de neurones du perçage d'un CFRP. Ce modèle est réalisé indépendamment pour chacun des outils de l'étude. L'analyse des performances des réseaux en fonction du nombre de leurs sorties (cf. II.3.2.1) a montré qu'il est préférable, vis à vis de la précision du modèle prédictif, d'entraîner n réseaux à 1 sortie qu'un réseau à n sorties.

Par exemple, dans le cas d'un perçage CFRP, l'analyse concerne l'étude de la performance des 5 réseaux de neurones correspondant aux 5 critères de qualité caractérisant le perçage d'un CFRP soit :

- ◆ écaillage en entrée,
- ◆ écaillage en sortie,

- ◆ défaut dimensionnel,
- ◆ cylindricité,
- ◆ circularité.

D'après les analyses présentées dans le chapitre II (cf. II.3.2.1), l'augmentation du nombre de couches de neurones améliore significativement la performance du réseau. Pour ne pas trop augmenter les temps de calcul, l'architecture du réseau se limite à trois couches entraînées par l'algorithme de Fletcher-Reeves [Flet 64]. Cette configuration est appliquée pour les 5 réseaux du modèle prédictif CFRP.

Avant d'aborder les défauts spécifiques à chacun des matériaux constituant l'empilement, l'analyse va, dans un premier temps, porter sur la précision de la prédiction des défauts dimensionnels et géométriques des deux matériaux de l'étude. Ayant figé le couple architecture/algorithme, le seul paramètre variable du réseau est le nombre de neurones sur les deux couches cachées. Ainsi, la recherche du réseau le plus performant est effectuée en faisant varier ce nombre sur les deux couches cachées de 1 à 50. Concernant les critères d'arrêt, le choix a été fait de conserver les valeurs fixées précédemment dans le chapitre II soit :

- ◆ arrêt au-delà de  $3 \times 10^5$  itérations,
- ◆ arrêt dès l'obtention d'une erreur quadratique inférieure à  $10^{-6}$ .

Les valeurs de ces paramètres sont conservées tout au long de l'étude.

Pour valider la précision de la mesure d'un critère, il faut ramener celle-ci à la dimension de la grandeur mesurée et la précision de l'outil de mesure. En effet, une précision de 1% sur la prédiction des efforts de coupe n'est pas équivalente à une précision similaire pour la prédiction des défauts dimensionnels. La précision de la MMT et l'intervalle de tolérance pour un diamètre  $\varnothing 6,35$  mm qualité 9 sont respectivement de 3 et 36  $\mu\text{m}$ . L'erreur de prédiction doit donc être comprise entre ces deux bornes soit entre 0,56 et 0,047% de la valeur du diamètre nominal. Cet intervalle définit l'intervalle de validité de la précision en sortie du modèle prédictif.

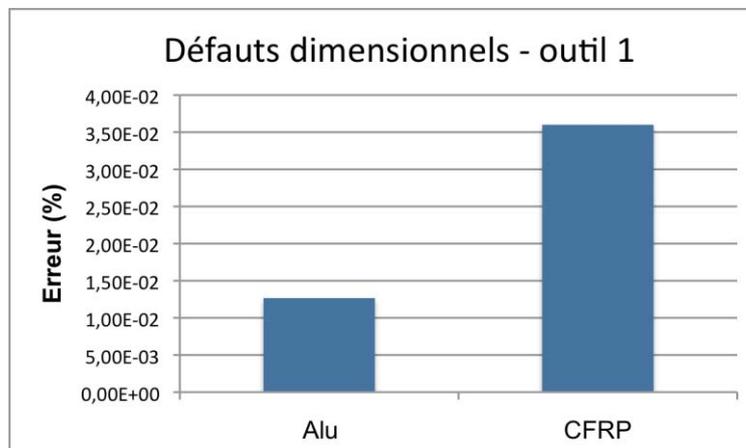


Figure IV-3 : Erreur de prédiction des défauts dimensionnels.

Les résultats montrent que l'erreur de prédiction des réseaux est inférieure à la borne minimale de l'intervalle de validité et ce, pour les deux matériaux de l'empilement (cf. Figure IV-3). La précision du réseau est par conséquent excellente, ce dernier pouvant prédire le diamètre percé avec une erreur comprise entre 0,6 et 2,2  $\mu\text{m}$  selon le matériau considéré. Toutefois, le fait que celle-ci soit supérieure à la précision minimale de la MMT, incite à la prudence. La bonne répétabilité des mesures réalisées due notamment au processus de quantification du défaut peut expliquer ce résultat. Ce dernier consiste à palper 8 points sur la paroi du perçage (cf. III.4.3.1) permettant de limiter les dispersions de mesure et d'assurer une bonne convergence du modèle.

L'écart de performance des réseaux de chacun des matériaux peut être imputé à l'imprécision de mesure de l'échantillon CFRP, due en partie au mauvais état de surface de la paroi du perçage. Les défauts locaux (arrachements, fibres non coupées) peuvent altérer les mesures réalisées et diminuer leurs répétabilités. Ces informations sont ensuite intégrées au réseau empêchant la bonne convergence de ce dernier.

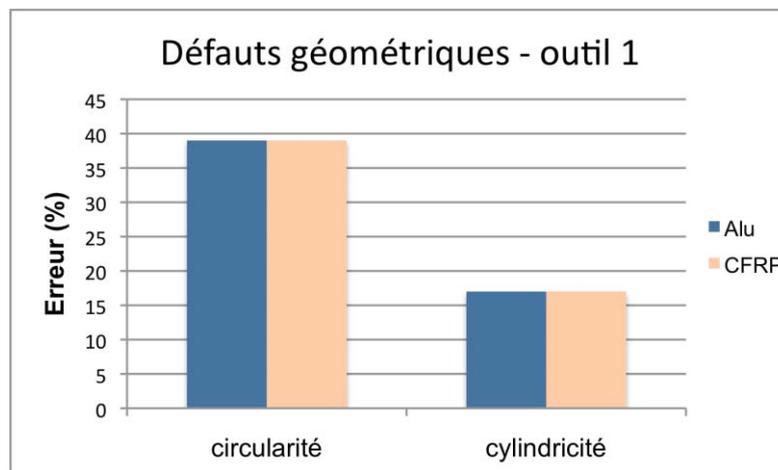


Figure IV-4 : Erreur de prédiction des défauts géométriques.

L'analyse de la prédiction des défauts géométriques (cf. Figure IV-4) montre des résultats similaires pour les deux matériaux de l'empilement. L'observation portant sur les deux critères caractérisant la qualité géométrique du perçage, révèle un écart significatif de la précision de la prédiction de leurs valeurs. Ce dernier peut s'expliquer par le fait que le défaut de circularité est mesuré sur une seule section qui, bien que toujours à la même hauteur, est plus sensible à la présence de défauts locaux. La mesure du défaut de circularité, quant à elle, est obtenue sur une hauteur suffisamment grande pour diminuer l'influence de ces défauts. La répétabilité de la mesure en est par conséquent accrue.

En observant la précision des réseaux de neurones relatifs à chacun des critères, on s'aperçoit que les résultats sont bien distincts selon les défauts considérés (cf. Figure IV-3 et Figure IV-4). Comme nous venons de le voir précédemment, cette différence peut s'expliquer en partie par le fait que les valeurs des défauts n'ont pas les mêmes grandeurs.

Pour pouvoir comparer de manière pertinente ces critères, une normalisation de ces 3 défauts est réalisée. Celle-ci a pour but de supprimer l'influence des différences de grandeurs sur les résultats.

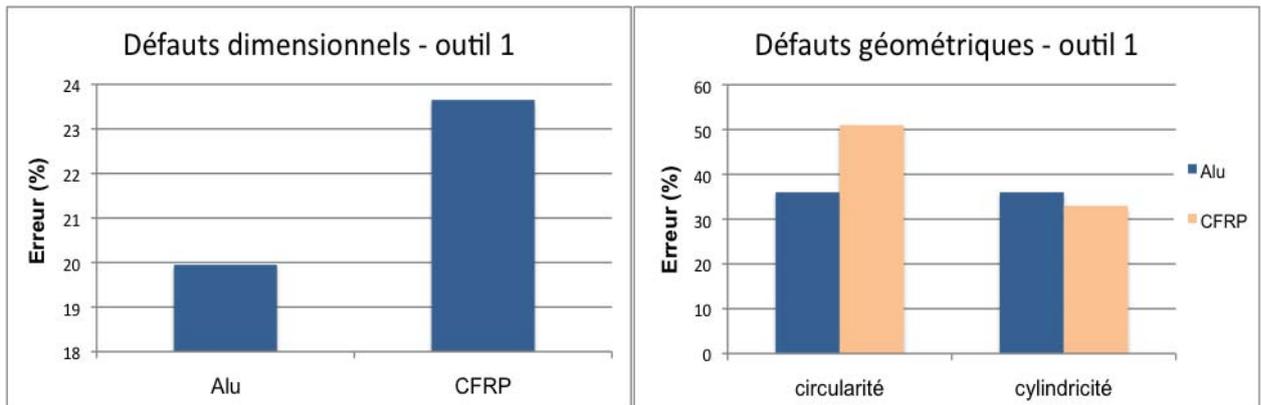


Figure IV-5 : Erreur de prédiction des défauts normalisés.

Malgré la normalisation appliquée aux 3 critères, des différences perdurent en ce qui concerne les erreurs de prédiction (cf. Figure IV-5). Il est toutefois cohérent que, bien que normalisée, la répétabilité des mesures reste un élément prépondérant dans la bonne qualité de l'entraînement du réseau. La quantification d'un défaut dont l'ordre de grandeur est très proche de celui de la précision de l'outil de mesure peut engendrer des incohérences dans les mesures obtenues.

De la même manière que lors de l'étude précédente (sans normalisation), la précision de la prédiction des défauts du CFRP semble moins performante. Cette différence avec l'aluminium est d'autant plus visible pour le défaut de circularité du fait de la localisation des points de mesure de ce critère. Le processus de quantification est alors plus sensible à la présence de défauts locaux que pour le défaut de cylindricité dont le positionnement des points de palpation sur une zone de mesure plus large atténue les dispersions.

Concernant l'aluminium, le bon état de surface des parois de perçage engendre une bonne répétabilité des mesures. Les erreurs obtenues pour ces deux défauts sont de ce fait très proches.

Cette analyse a traité d'un critère de qualité commun aux deux matériaux constituant l'empilement. La suite de l'étude aborde les critères spécifiques à chacun de ces matériaux. Dans un premier temps, celle-ci va s'attacher à analyser la prédiction du délaminage en entrée et sortie du perçage.

#### IV.2.1.2. Prédiction du délaminage en entrée et sortie

D'après le chapitre I et 3 (cf. I.2.1.2 et cf. III.4.1), la qualité du perçage d'un CFRP est caractérisée par deux critères spécifiques s'ajoutant aux défauts dimensionnels et géométriques. Ces deux critères sont utilisés pour quantifier les défauts en entrée et en sortie du perçage. Par conséquent, pour les mêmes raisons que dans l'analyse précédente, 4 réseaux de neurones à 1 sortie sont nécessaires pour réaliser cette étude (2 pour chaque critère de quantification).

La recherche du réseau le plus performant est effectuée en faisant varier le nombre de neurones sur les deux couches cachées de 1 à 50 et en conservant les critères d'arrêt de l'analyse précédente.

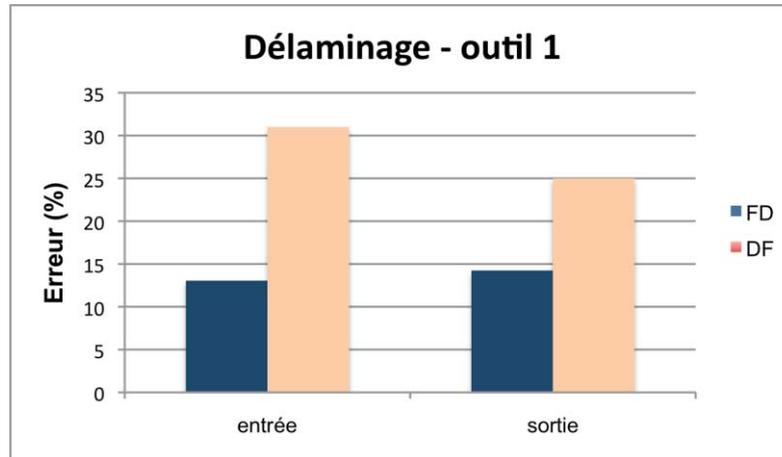


Figure IV-6 : Erreur de prédiction du délaminage dans un CFRP.

Les résultats montrent un écart significatif de l'erreur de prédiction selon le critère de quantification utilisé, valable pour le délaminage en entrée et sortie du perçage (cf. Figure IV-6). Le critère  $F_D$  présente des résultats satisfaisants avec des erreurs dans les deux cas de figure (entrée et sortie) inférieure à 15%. Un résultat contraire était attendu car le processus de quantification de ce critère est potentiellement plus exposé à la présence d'une petite quantité de fibres non coupées sur une longueur importante.

De la même manière que pour les défauts dimensionnels et géométriques (cf. IV.2.1.1), cet écart peut se justifier par la différence d'ordre de grandeur des deux critères. Pour cette analyse, les moyennes des critères DF et  $F_D$  mesurés en sortie sont respectivement, 0,19 et 1,99.

Pour comparer ces deux critères, une normalisation de l'échantillon d'entraînement est réalisée. Celle-ci permet de limiter les conséquences sur les performances des réseaux de l'entraînement de deux échantillons d'ordres de grandeur différentes. Elle concerne les valeurs en entrée et en sortie des deux critères.

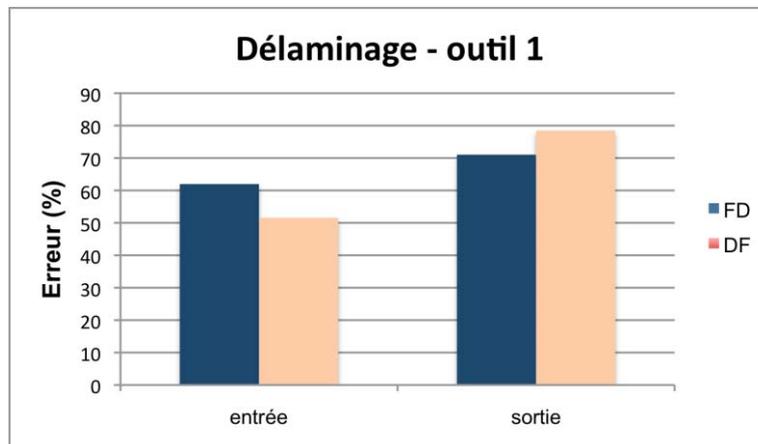


Figure IV-7 : Erreur de prédiction du délaminage après normalisation.

Alors qu'un écart significatif était prévisible, l'étude comparative des deux critères ne permet pas de dégager une tendance nette (cf. Figure IV-7). L'influence dans la manière dont ces derniers sont quantifiés aurait dû être observée à travers les résultats.

L'écaillage, sur une longueur importante, d'une très faible quantité de fibres n'a pas la même répercussion sur la valeur des critères. Le critère  $F_D$  (cf. Figure III-35), défini comme le rapport du diamètre délaminé sur le diamètre nominal du perçage est plus sensible à ces variations (cf. III.4.1). Ces augmentations aléatoires compromettent la convergence du modèle et diminuent sa précision.

L'analyse montre que la précision de la prédiction du délaminage en entrée est plus performante quel que soit le critère étudié. La différence de morphologie des écaillages en entrée et en sortie de perçage peut expliquer ce résultat.

Les écaillages en entrée de perçage sont d'une part moins étendus, limitant les dispersions entre deux perçages. D'autre part, l'apparition de ces derniers subvient lorsque l'angle relatif entre la face de coupe et la direction des fibres est compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  (cf. Figure IV-8). Dans cet intervalle, les fibres composant les premiers plis sont soulevées par la face de coupe de l'arête principale (cf. Figure I-10). Ce phénomène s'interrompt lorsque la raideur des plis au-dessus de la face de coupe est suffisante [Gueg 94] [Piqu 99] [Surc 05].

L'écaillage en sortie est quant à lui engendré par l'effet poinçon de l'âme du foret sur les derniers plis de l'échantillon. Ce phénomène apparaît lorsque le nombre de plis sous l'âme n'est plus suffisant pour empêcher le décollement des fibres (cf. I.2.1). Le poinçonnage étant localisé au centre de l'outil, l'étendue d'écaillage maximale survient sur une bande située au centre du perçage soit lorsque l'angle relatif entre la face de coupe et la direction des fibres est de  $90^\circ$  (cf. Figure IV-8). Cette étendue est plus importante dans ce cas de figure. Les valeurs des critères DF et  $F_D$  le confirment, ces dernières étant respectivement, 17% et 22% supérieures en sortie de perçage.

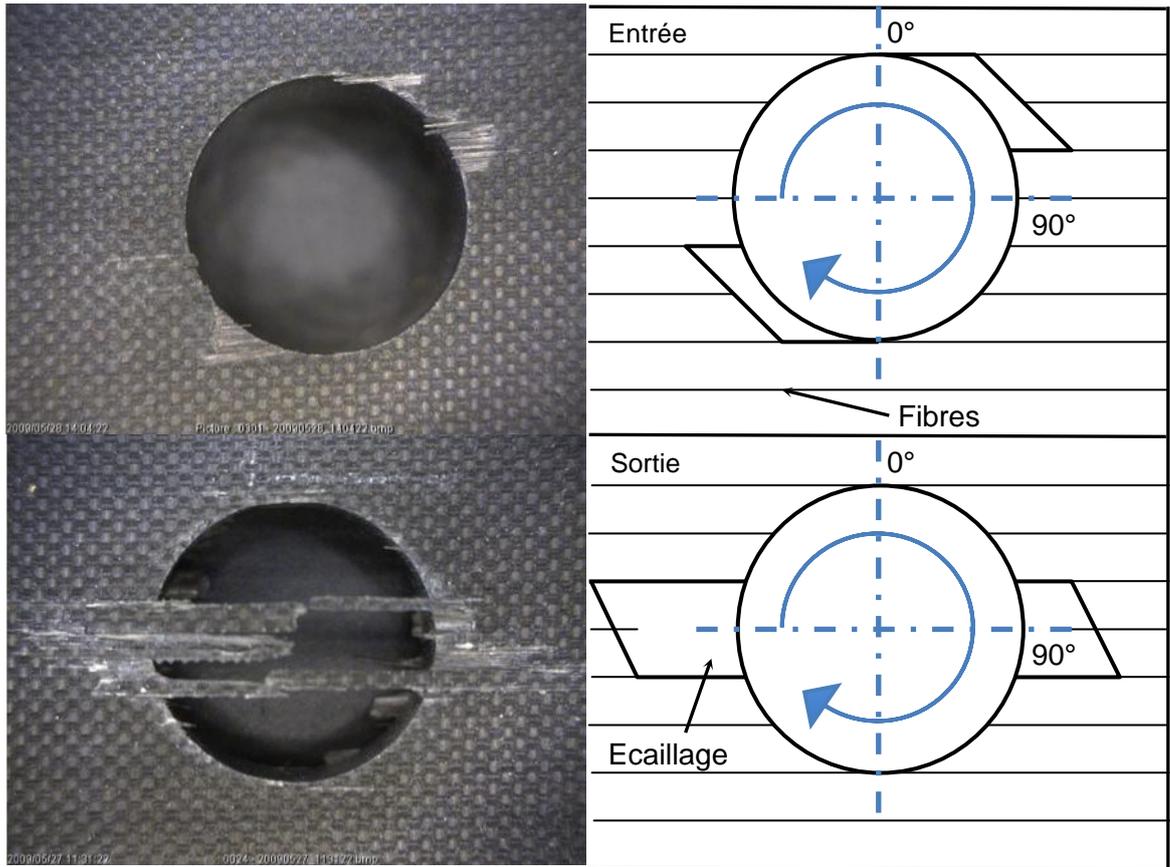


Figure IV-8 : Localisation de l'écaillage en entrée ou sortie de perçage.

#### IV.2.1.3. Prédiction de la hauteur de bavure

Concernant le perçage de l'aluminium, la bavure en sortie de perçage vient s'ajouter aux défauts dimensionnels et géométriques. Celle-ci est caractérisée par sa hauteur en mm (cf. I.2.2 et cf. III.4.2). Un réseau de neurones à 1 sortie est donc nécessaire et suffisant pour prédire la valeur de ce critère. L'analyse a porté sur la prédiction de la hauteur de bavure pour des perçages réalisés par les outils 1 et 2. Celle-ci a pour but de vérifier la répétabilité de la précision d'un outil à un autre.

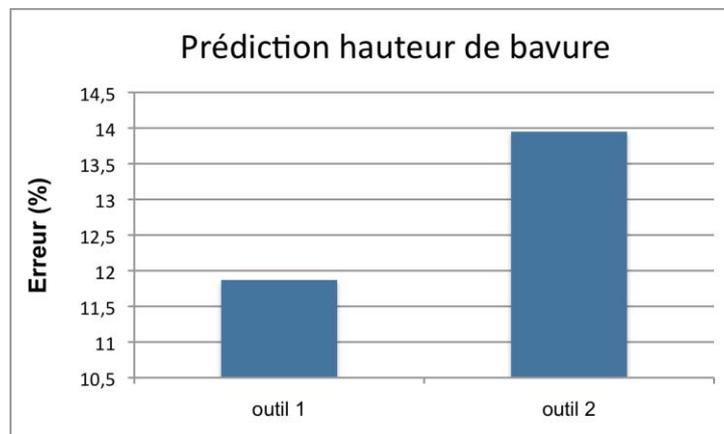


Figure IV-9 : Erreur de prédiction de la hauteur de bavure.

Les résultats de l'analyse montrent des erreurs de prédiction pour l'outil 1 et 2, respectivement de 12 et 14% (cf. Figure IV-9). Les précisions des réseaux de neurones pour ce critère sont donc assez proches pour conclure sur la répétabilité des modèles établis.

#### IV.2.1.4. Prédiction de l'usure

Comme l'illustre la Figure IV-1, l'usure de l'outil, caractérisée par le rayon d'acuité de l'arête de coupe principale du foret, permet de faire le lien entre les différentes "briques" (modèles mono-matériaux) formant le modèle multi-matériaux. Elle permet de prendre en compte l'évolution de la géométrie de l'outil au cours du perçage d'un empilement. Pour ce faire, l'usure est incrémentée en sortie du modèle du premier matériau de la séquence puis insérée en entrée du modèle du matériau suivant pour se rapprocher des conditions expérimentales.

Il est par conséquent indispensable, pour que cette modélisation soit pertinente, que la prédiction du rayon d'acuité d'arête soit précise.

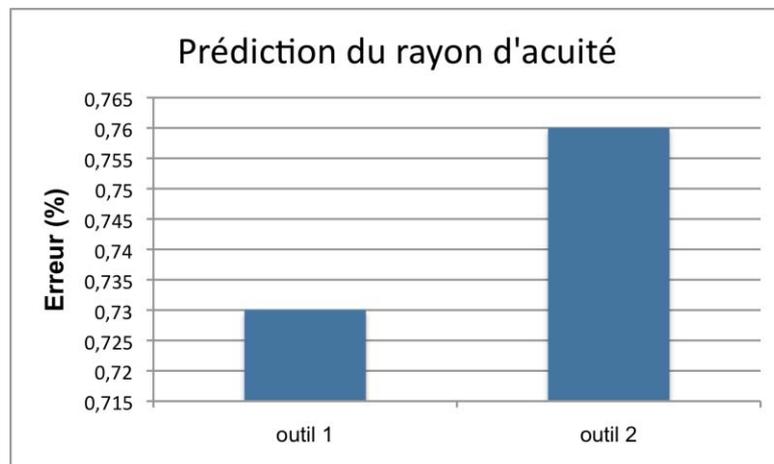


Figure IV-10 : Prédiction du rayon d'acuité de l'arête de coupe principale de l'outil

Les résultats de l'analyse (cf. Figure IV-10) montrent une erreur de prédiction très faible, de l'ordre de 0,75% et ce, pour les deux géométries d'outils de l'étude (outil 1 et 2). Sachant que les valeurs du rayon d'acuité varient entre 100 et 200  $\mu\text{m}$  pour les différents outils utilisés, l'erreur maximale en sortie des réseaux peut donc atteindre 1,5  $\mu\text{m}$ , justifiant l'utilisation de ce paramètre.

Les très bonnes performances observées sur la prédiction de l'usure sont dues à la quasi linéarité de l'évolution de ce paramètre et à l'absence de bruit sur les mesures réalisées. Ces deux caractéristiques augmentent la capacité du réseau à converger de manière rapide et précise.

Cette première partie de chapitre a permis de vérifier la capacité de la modélisation par les réseaux de neurones à prédire les valeurs des différents critères de qualité du perçage d'un empilement multi-matériaux. Les différents éléments constituant le modèle global ont été validés permettant sa mise en place dans la prochaine partie du chapitre.

### IV.2.2. Le modèle global

Les analyses réalisées précédemment (cf.III.3.1.1 ) concernant le perçage des multi-matériaux ont montré que celui-ci ne peut être simplement assimilé, en terme d'intensité d'efforts de coupe, aux perçages indépendants des deux mono-matériaux constituant l'empilement (principe de superposition) (cf. Figure III-19). La mise en évidence de l'influence de l'usure de l'outil sur les différents critères de qualité (cf. III.4.1), a conduit à la prise en compte de ce paramètre dans le modèle global. Pour se placer au plus près des conditions expérimentales, le choix a été fait de modéliser ce paramètre pour prendre en compte l'évolution de la géométrie du foret au cours du perçage.

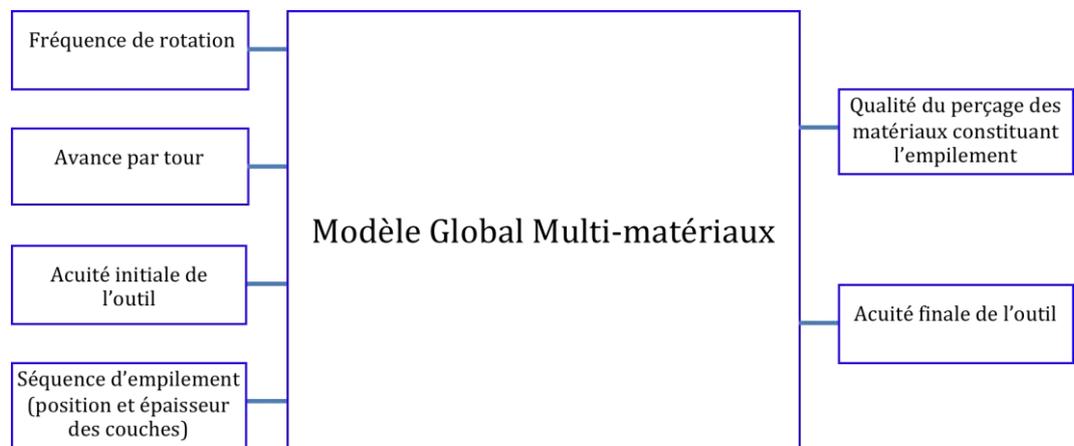


Figure IV-11 : Schéma simplifié de l'architecture du modèle global.

Pour valider l'architecture du modèle global (cf. Figure IV-11), l'étude porte sur l'analyse de la précision de la prédiction de la qualité d'un perçage multi-matériaux et ce, pour différentes séquences d'empilement. Celle-ci est quantifiée par le calcul de l'erreur, entre la sortie de chacun des deux réseaux de neurones et les valeurs expérimentales obtenues lors de la constitution de l'échantillon multi-matériaux (cf. Figure IV-12).

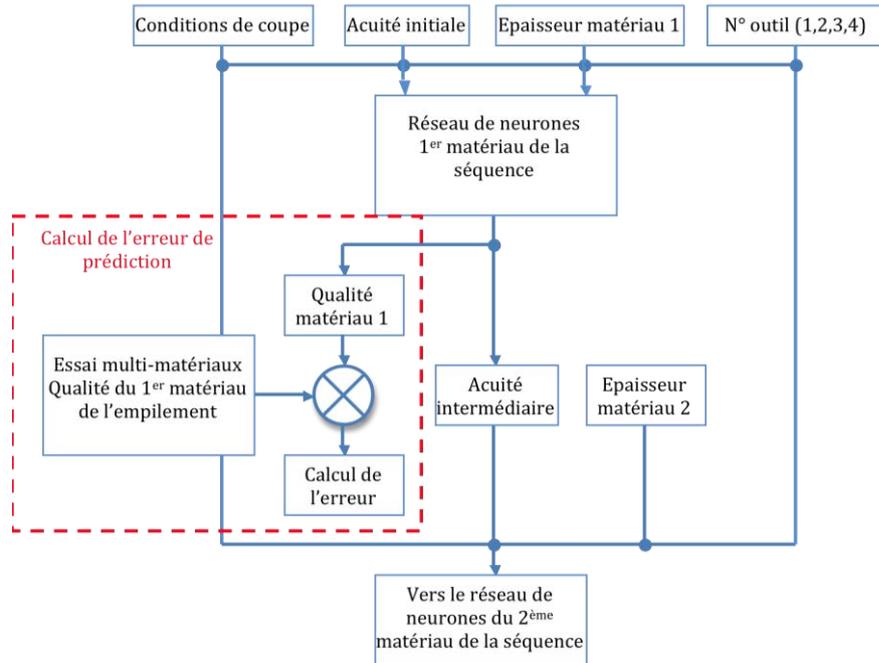


Figure IV-12 : Calcul de l'erreur en sortie du 1<sup>er</sup> matériau de l'empilement.

L'analyse porte sur la qualité du perçage d'un empilement CFRP/alu et plus particulièrement sur les défauts dimensionnels. L'erreur de prédiction de ces derniers est calculée pour différentes séquences d'empilement en faisant varier l'ordre et l'épaisseur des deux matériaux. Pour ne pas fausser les résultats, les conditions de coupe choisies sont celles des essais au centre n'ayant pas servi à l'entraînement du réseau, soit :

- ◆ une fréquence de rotation de 3750 tr/min ( $V_c=75$  m/min),
- ◆ une avance par tour de 0,06 mm/tr.

Les valeurs de l'usure initiale ont été déterminées en fonction du rayon d'acuité d'arête mesuré pendant les essais matériaux pour établir une comparaison pertinente entre la sortie des deux réseaux de neurones et les valeurs expérimentales.

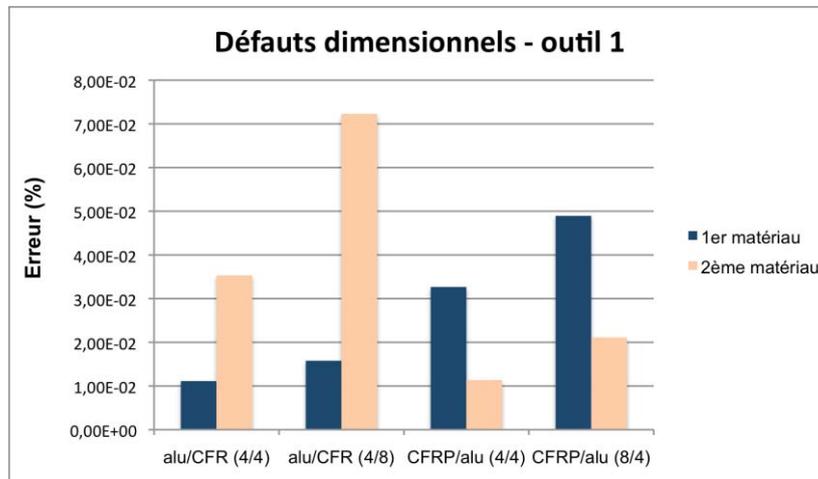


Figure IV-13 : Erreur de prédiction pour différentes séquences d'empilement. (CFRP/alu).

Les résultats (cf. Figure IV-13) présentent des différences notables selon les séquences d'empilement. Toutefois il est possible d'extraire une tendance globale. Premièrement, l'erreur de prédiction des défauts dimensionnels dans le CFRP semble, de manière générale, supérieure à celle de l'aluminium, confirmant les résultats observés précédemment (cf. Figure IV-3). Une deuxième tendance semble indiquer que la position d'un matériau dans la séquence influe sur la précision de la prédiction de sa qualité. Dans l'intégralité des cas étudiés, le matériau placé en second voit son erreur de prédiction augmenter de manière plus ou moins importante par rapport aux valeurs de ce même matériau placé en premier dans la séquence (cf. Figure IV-14).

Epaisseur de l'empilement (mm) (CFRP/Al)	8 (4/4)	12 (4/8)
CFRP	7,95%	47,8%
Aluminium	2,7%	33,5%

Figure IV-14 : Augmentation de l'erreur de prédiction lors du passage de la première à la deuxième position dans l'empilement.

Cette dernière tendance est certainement imputable à des phénomènes dont l'importance est amplifiée lors de la coupe des multi-matériaux. C'est notamment le cas des aspects thermiques de la coupe dont l'influence dans le modèle n'a pu être prise en compte. L'intégration de ce paramètre nécessite la réalisation de mesures à l'aide de thermocouples placés dans l'outil ou d'une caméra thermique. Cette dernière méthode a été testée et validée pour des problématiques de perçage CFRP [Roud 06]. Cependant, elle est difficilement transposable à cette étude car elle nécessite une très bonne accessibilité visuelle de la pièce, compromise notamment par le système d'aspiration des particules de carbone.

L'influence de l'augmentation de la température dans l'enceinte du perçage est plus sensible dans le deuxième matériau de la séquence. La qualité dimensionnelle du CFRP semble plus touchée par ce phénomène (cf. Figure IV-14), pouvant se matérialiser par une dégradation voire une destruction locale de la matrice.

Pour observer l'influence de l'usure de l'outil sur l'erreur de prédiction des défauts dimensionnels, celle-ci a été calculée pour un même empilement à différents états d'usure.

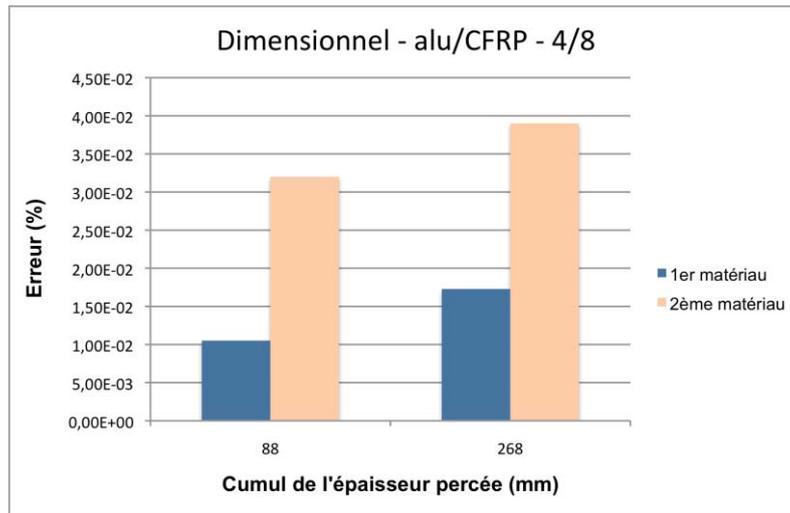


Figure IV-15 : Erreur de prédiction d'un empilement alu/CFRP.

Les résultats montrent que l'erreur de prédiction tend à augmenter avec l'usure de l'outil et ce, pour les deux matériaux de l'empilement (cf. Figure IV-15). Plusieurs raisons peuvent expliquer ce phénomène. L'aspect thermique peut, là encore, avoir une importance prépondérante. L'augmentation de la génération de chaleur engendrée par l'usure de l'outil peut, de manière analogue à l'analyse précédente, conduire à l'augmentation de l'erreur de prédiction. Cependant, à la différence des résultats précédents (cf. Figure IV-13), l'erreur de prédiction du premier matériau de l'empilement croît de la même manière que celle du second matériau. Celui-ci devrait pourtant être moins sujet à l'augmentation de la température du fait de son épaisseur faible (4 mm) et de sa proximité avec le début du perçage. Ce phénomène peut également être dû à des dispersions expérimentales conduisant à la diminution de la précision des réseaux de neurones. Le réseau de neurones étant entraîné par l'intermédiaire d'un échantillon d'apprentissage, d'éventuelles dispersions ou valeurs erronées se répercutent directement sur les performances du modèle.

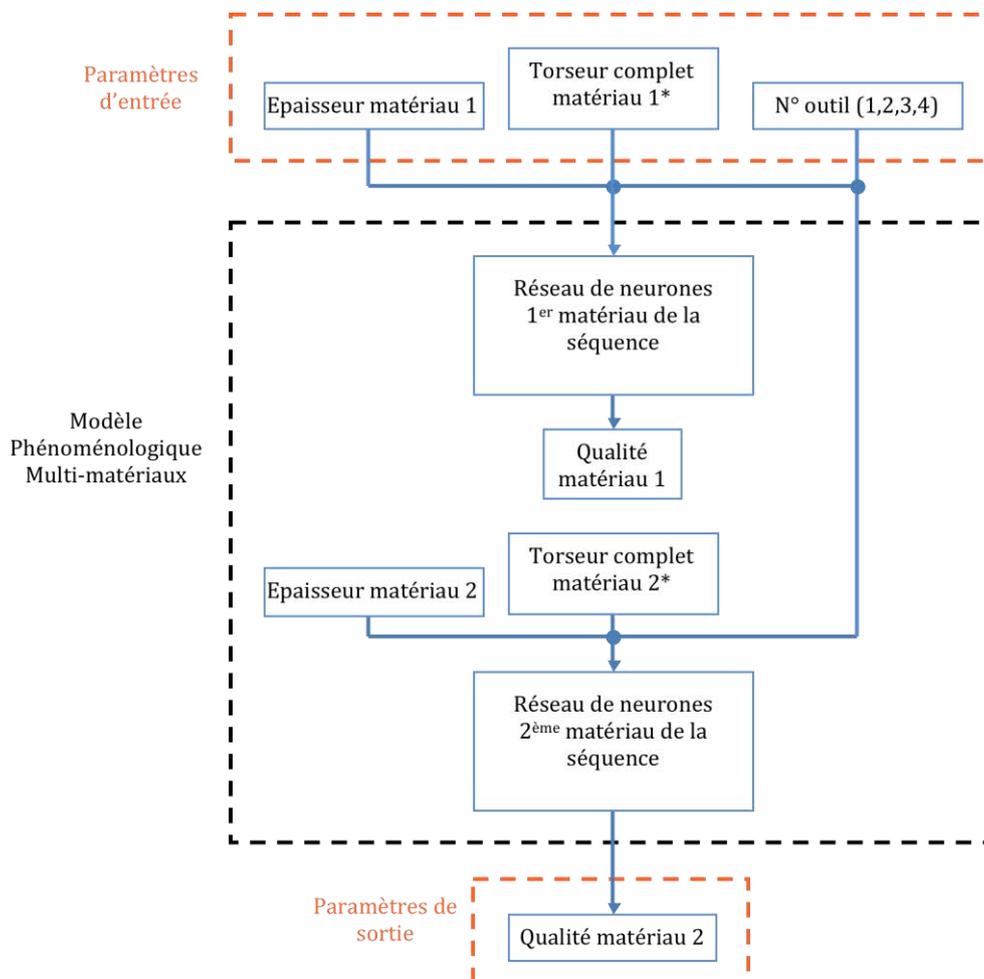
Cette partie a présenté la mise en place du modèle global. L'objectif de celui-ci est la prédiction de la qualité d'un perçage multi-matériaux en renseignant les conditions de coupe ( $N$  et  $f$ ), la séquence d'empilement (ordre et épaisseur des matériaux) et l'usure du foret avant le perçage. Cette dernière peut être caractérisée de manière précise par le rayon d'acuité de l'arête de coupe principale du foret ou simplement par l'épaisseur cumulée percée par l'outil. Ce modèle type "boîte noire" lie donc directement les paramètres d'usinage à la qualité du perçage réalisé.

En modifiant la nature des paramètres d'entrée du modèle, il est possible d'adapter la démarche utilisée à des problématiques différentes. L'établissement d'un modèle phénoménologique permettant de prédire la qualité d'un perçage à partir des actions mécaniques de coupe présente un intérêt notamment dans le cadre de la mise en place d'une surveillance du procédé. La suite de l'étude va présenter la mise en place d'un modèle phénoménologique type "boîte noire" à l'aide des réseaux de neurones.

### IV.3. Modèle phénoménologique

Le chapitre précédent a présenté l'identification de la signature des phénomènes physiques de coupe d'un foret en corrélant son comportement mécanique lors d'un perçage à sa géométrie (cf. Figure III-21). En connaissant la signature d'un foret en fonction de son état d'usure, il est possible en associant celle-ci à la qualité du perçage réalisé, de faire un encadrement des signaux des composantes du torseur à l'intérieur desquels les différents critères de qualité satisfont aux exigences des tolérances d'assemblage. Cette méthode peut être, par exemple, utilisée dans le cadre de la mise en place d'une surveillance en ligne d'un perçage pour garantir la qualité de la pièce et atteindre une pleine productivité.

Dans le cadre de la modélisation phénoménologique d'un perçage multi-matériaux, la qualité de ce dernier doit être prédite dans les différents matériaux constituant l'empilement. Pour cela, l'architecture du modèle multi-matériaux doit être constituée de plusieurs modèles phénoménologiques, correspondant à chacun des matériaux de l'empilement, placés dans l'ordre de la séquence (cf. Figure IV-16).



\*Les torseurs complets des matériaux 1 et 2 sont issus de l'analyse des mesures des actions mécaniques de coupe effectuées lors de la campagne d'essais multi-matériaux.

Figure IV-16 : Architecture du modèle phénoménologique.

De la même manière que pour le modèle global, la mise en place du modèle phénoménologique nécessite la détermination au préalable des réseaux de neurones de chacun des matériaux constituant l'empilement. Le choix du type de modélisation associant la qualité du perçage aux torseurs des actions mécaniques s'est porté vers l'utilisation des réseaux de neurones.

La suite de l'étude va s'attacher à présenter la modélisation phénoménologique des deux matériaux de l'empilement indépendamment.

### IV.3.1. Modèles phénoménologiques matériaux

Le modèle phénoménologique permet de corréler les composantes du torseur des actions mécaniques aux critères de qualité d'un perçage multi-matériaux. L'association des actions mécaniques de coupe à la qualité d'un perçage est réalisée par l'intermédiaire d'une modélisation de type "boîte noire" à l'aide des réseaux de neurones. Pour établir cette corrélation, l'échantillon d'entraînement des réseaux correspondant à chacun des deux matériaux (CFRP et aluminium) constituant l'empilement doit comporter en entrée des composantes du torseur des actions mécaniques de coupe en perçage. Les travaux réalisés par S. Laporte [Lapo 05] ont montré que la prise en compte des paramètres de coupe ne devait pas se réduire à l'effort de poussée  $F_z$  et au couple de perçage  $M_z$ . Les composantes radiales (efforts et moments) jouent un rôle prépondérant dans la qualité du perçage réalisé. Pour ne pas négliger des informations, la prise en compte du torseur complet des actions mécaniques de coupe est nécessaire (cf. Figure IV-17).

Pour constituer l'échantillon d'entrée, la moyenne des différents signaux d'efforts pendant la phase de coupe à copeau constant a été réalisée pour la totalité des essais de perçage CFRP et aluminium (cf. Figure III-18).

Concernant les paramètres de sortie, les critères de qualité constituant l'échantillon de sortie dépendent du matériau considéré, de la même manière que pour l'établissement des modèles matériaux (cf. IV.2.1.1).

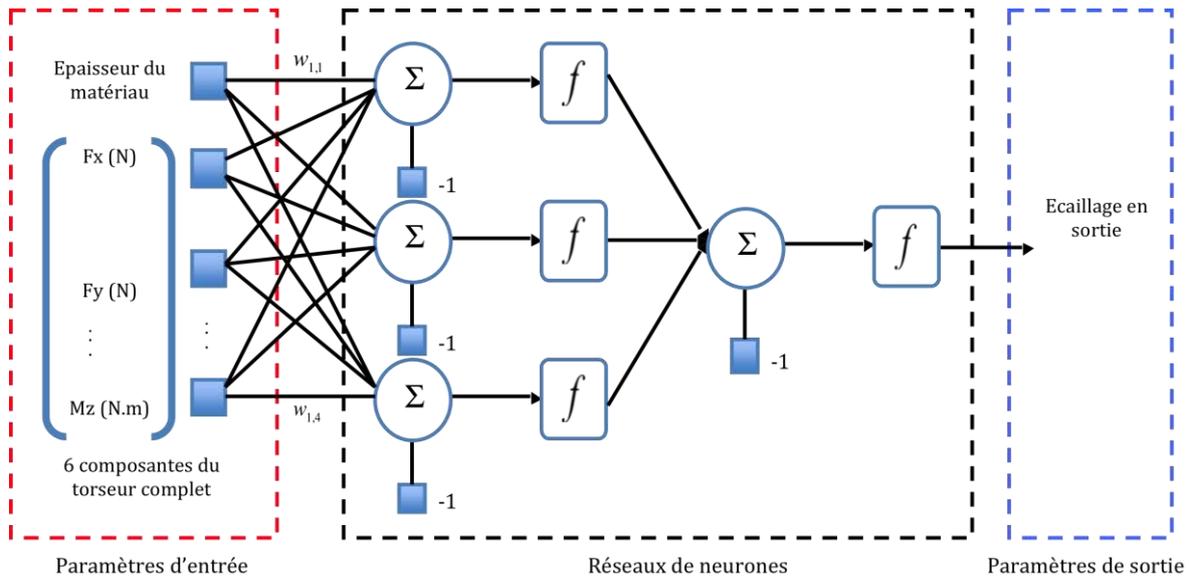


Figure IV-17 : Réseau de neurones permettant de prédire l'écaillage en sortie.

Les paramètres des réseaux de neurones, couple architecture/algorithmes, déterminés précédemment (cf.II.3.2.1) sont conservés pour cette analyse. A chaque critère de qualité est associé un réseau de neurones dont les seuls paramètres variables sont le nombre de neurones sur les deux couches cachées. Pour établir une comparaison pertinente avec les résultats obtenus lors de l'analyse de la prédiction des modèles matériaux (cf. IV.2.1.1), l'étude porte sur la prédiction des défauts dimensionnels pour des perçages réalisés dans les deux matériaux de l'étude (CFRP et aluminium) par les outils 1 et 2. La précision de la prédiction est quantifiée par le calcul de la valeur absolue de l'erreur (Equation II.10). La recherche de la configuration la plus performante est réalisée en faisant varier le nombre de neurones sur les deux couches cachées de 1 à 50.

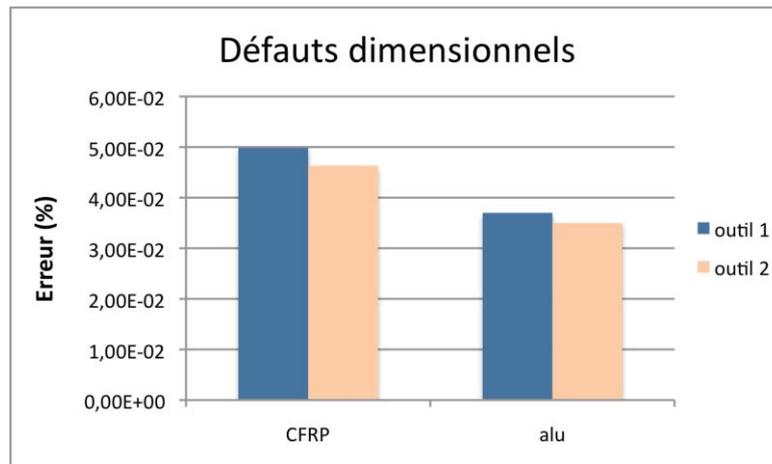


Figure IV-18 : Erreur de prédiction des défauts dimensionnels.

Les résultats obtenus (cf. Figure IV-18) montrent que l'utilisation de la modélisation par les réseaux de neurones pour établir un modèle phénoménologique est pertinente. L'erreur n'excède pas 0,05 %, ce qui, rapporté à un diamètre 6,35 mm représente une

imprécision de  $3,2 \mu\text{m}$  sur la prédiction des défauts dimensionnels. Cette erreur est du même ordre que la précision de la MMT.

Les erreurs de prédiction concernant l'outil 1 sont comparables à celles obtenues précédemment lors de la modélisation globale (cf. Figure IV-3) puisque celles-ci sont de 0,037 et 0,05% pour respectivement l'aluminium et le CFRP.

### IV.3.2. Modèle phénoménologique multi-matériaux

La première étape de la mise en place du modèle phénoménologique multi-matériaux a été réalisée dans le paragraphe précédent (cf. IV.3.1). Cette étape a permis de figer les paramètres des réseaux de neurones modélisant la phénoménologie de la coupe de chacun des matériaux constituant l'empilement (CFRP et aluminium). L'étape suivante consiste à construire le modèle phénoménologique multi-matériaux en reproduisant la séquence d'empilement. Pour cela, les modèles correspondant à chacun des matériaux sont imbriqués dans l'ordre de la séquence (cf. Figure IV-12).

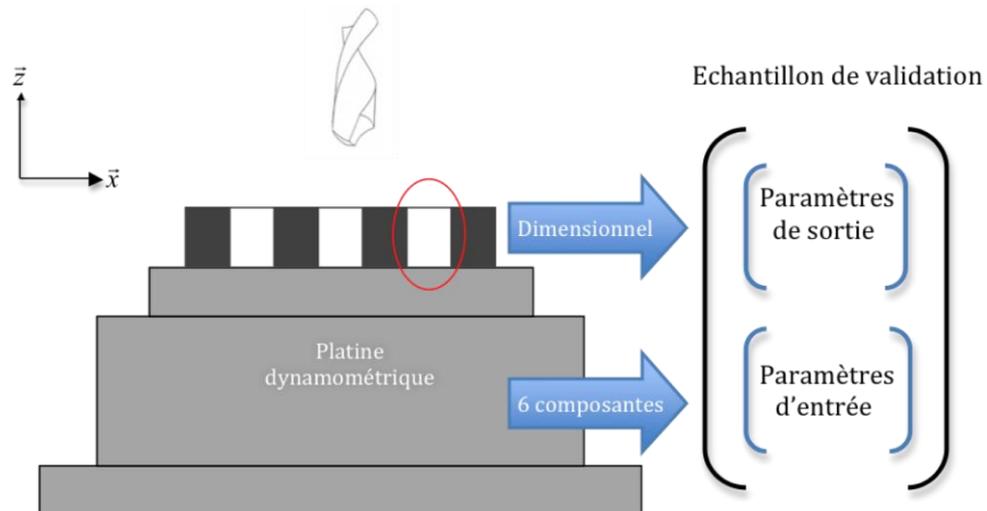
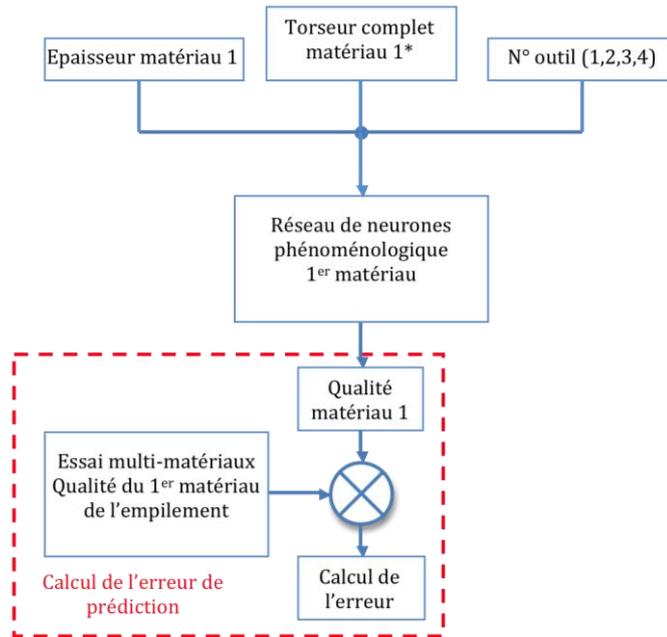


Figure IV-19 : Constitution de l'échantillon de validation

Pour vérifier la précision du modèle, un échantillon de validation associant des défauts dimensionnels au torseur des actions mécaniques est constitué (cf. Figure IV-19). Celui-ci est issu de la campagne d'essais multi-matériaux. De manière comparable à l'élaboration des échantillons d'entraînement des réseaux de neurones, les paramètres de validation sont constitués en réalisant la moyenne des différents signaux d'efforts mesurés pendant la phase de coupe à copeau constant (cf. Figure III-18). Les signaux multi-matériaux sont dissociés selon le matériau de l'empilement percé pour pouvoir valider séparément les réseaux de neurones phénoménologiques correspondant à chacun des matériaux.

Pour calculer l'erreur de prédiction du modèle, chaque paramètre de validation placé en entrée doit être associé au défaut dimensionnel correspondant (cf. Figure IV-20). A l'image de la constitution de l'échantillon d'entrée, ce dernier est quantifié en mesurant les défauts dimensionnels dans chaque matériau de l'empilement séparément (cf. III.4.3.1).



\*Les torseurs complets des matériaux 1 et 2 sont issus de l'analyse des mesures des actions mécaniques de coupe effectuées lors de la campagne d'essais multi-matériaux.

Figure IV-20 : Calcul de l'erreur en sortie du 1<sup>er</sup> matériau du modèle phénoménologique.

Une analyse de la précision du modèle phénoménologique multi-matériaux a été entreprise pour différentes séquences d'empilement CFRP/alu, percées par l'outil 1. Le calcul de l'erreur, présenté sur la figure IV-20, est effectué deux fois consécutivement en sortie des réseaux de neurones de chacun des matériaux.

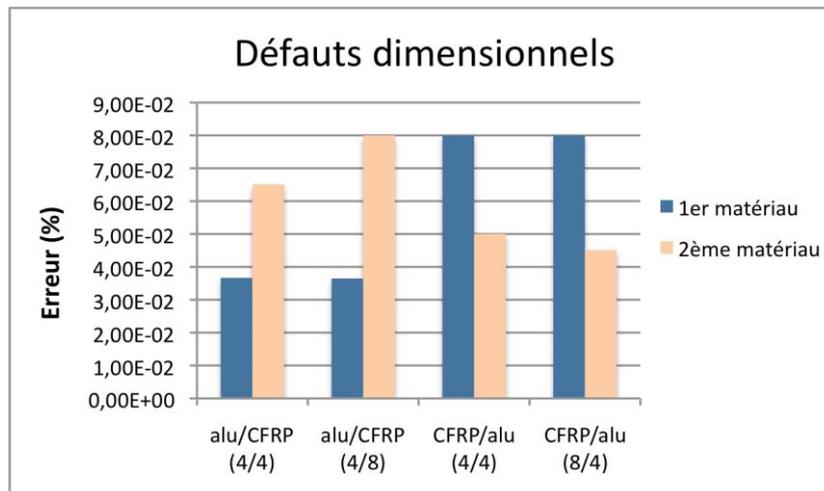


Figure IV-21 : Erreur de prédiction pour différentes séquences d'empilement.

Les résultats montrent que l'erreur maximale observée pendant l'analyse n'excède pas 0,08% soit une imprécision sur la prédiction des défauts dimensionnels de l'ordre de 5 µm (cf. Figure IV-21). Cette erreur maximale est constatée lors de la prédiction des défauts dans le CFRP pouvant s'expliquer par le fait que les signaux d'efforts, sont beaucoup plus bruités dans ce matériau que dans l'aluminium, altérant la convergence de l'algorithme.

L'analyse de la performance du modèle global multi-matériaux a montré précédemment un accroissement de l'erreur de prédiction des défauts dimensionnels du deuxième matériau de l'empilement (cf. IV.2.2). Ce phénomène peut être dû à la mauvaise prise en compte de l'usure de l'outil consécutive au perçage par celui-ci du premier matériau de la séquence. Une des conséquences de l'usure de l'outil étant l'augmentation des actions mécaniques de coupe, ce paramètre est donc pris en compte indirectement par le modèle. La prédiction des défauts dimensionnels dans le second matériau de l'empilement par le modèle phénoménologique ne subit donc pas l'influence du passage de l'outil dans le premier matériau. Ces hypothèses sont confirmées par les résultats de l'analyse présentés sur la figure IV-21.

#### IV.4. Mise en place de la surveillance d'un perçage multi-matériaux

Le début du chapitre a présenté dans un premier temps la mise en place du modèle global multi-matériaux par une méthodologie "réseau de neurones". Ce modèle permet de prédire la qualité du perçage d'un multi-matériaux donné à partir de paramètres d'entrée tels que :

- ◆ les conditions de coupe ( $N$  et  $f$ ),
- ◆ la séquence d'empilement (ordre et épaisseur des matériaux),
- ◆ l'usure de l'outil définie par le rayon d'acuité d'arête.

L'analyse réalisée dans le paragraphe précédent (cf. IV.4.3) a montré qu'il était possible d'adapter ce type de modélisation à la mise en place d'un modèle phénoménologique, en modifiant les paramètres d'entrée. Ces derniers sont les six composantes du torseur des actions mécaniques de coupe mesurées à l'aide d'une platine dynamométrique.

La signature d'un foret étant identifiée par l'analyse des actions mécaniques de coupe engendrées par cet outil lors d'un perçage, le suivi des efforts de coupe peut donc mettre en avant des perturbations du processus d'usinage. Ces perturbations peuvent être de deux natures [Chér 03] :

- ◆ prévisibles telle que l'usure de l'outil,
- ◆ aléatoires telles qu'un bris d'outil ou un serrage défectueux.

La mise en place d'un système de surveillance performant peut permettre, selon le type de perturbations, de sécuriser le processus de fabrication, garantir la qualité des pièces et atteindre une pleine productivité. Différentes actions peuvent être menées par :

- ◆ des actions préventives en surveillant la dérive régulière de certains indicateurs (usure),

- ◆ des actions réflexes pour interrompre rapidement le processus lors de la détection d'incidents importants.

Selon le type d'action à mener, plusieurs types de surveillance peuvent être mis en place :

- ◆ une surveillance hors usinage permettant par exemple, dans le cadre de cette étude d'évaluer les défauts dimensionnels d'un perçage suite à sa réalisation,
- ◆ une surveillance pendant l'usinage permettant de détecter l'apparition d'une anomalie lors de l'opération de perçage. Elle permet une intervention rapide de l'opérateur pour minimiser les dégâts induits par ces aléas.

#### IV.4.1. Mise en place d'une surveillance hors usinage

Les travaux réalisés précédemment sur l'établissement d'un modèle phénoménologique peuvent servir de fondation à la mise en place d'une surveillance indirecte hors usinage de la qualité d'un perçage multi-matériaux. De manière similaire à cette dernière, le modèle permet d'associer les différents critères de qualité caractérisant le perçage d'un empilement, aux actions mécaniques de coupe.

La mise en place d'un système de surveillance dans le cadre d'une opération de perçage multi-matériaux, nécessite l'obtention d'une prédiction de la qualité du perçage réalisé dans un temps relativement bref de manière à pouvoir éventuellement modifier les réglages ou les outils du processus. Comme nous l'avons vu précédemment, un grand nombre de travaux ont utilisé les réseaux de neurones dans le cadre de la mise en place d'un système de surveillance hors usinage du fait de la rapidité et la flexibilité de leurs mises en œuvre [Ston 95] [Diml 00] [Begō 05] [Pand 06] [Pand 08].

Ce type de surveillance hors ligne permet une évaluation précise de l'état des géométries produites mais n'autorise pas la réalisation d'interventions réflexes. L'architecture du modèle phénoménologique permet de réaliser une surveillance indirecte de la qualité du perçage, celle-ci étant prédite à partir des actions mécaniques de coupe. Dans cette étude, deux outils de mesure sont utilisés pour quantifier ces efforts :

- ◆ la platine dynamométrique 6 composantes,
- ◆ l'oscilloscope de la commande numérique Heidenhain® de l'UGV.

La platine dynamométrique n'autorise l'analyse des signaux qu'une fois l'acquisition des efforts terminés. Cette contrainte est compatible dans le cadre de la mise en place d'une surveillance hors usinage mais elle est réhivitoire lorsqu'il s'agit d'une surveillance "en ligne". Si l'on replace cette étude dans un contexte de production industrielle, l'utilisation d'une platine dynamométrique n'est pas viable du fait des contraintes de mise en œuvre. Elle engendre également une modification des caractéristiques dynamiques du système usinant en modifiant notamment sa rigidité et son amortissement.

L'analyse des signaux de l'oscilloscope de la commande numérique réalisée précédemment (cf. III.3.2) a montré qu'il était possible de corréler la mesure des courants d'alimentation du moteur d'avance en z et du moteur broche avec respectivement l'effort  $F_z$  et le moment  $M_z$  (cf. Figure IV-22). Ces derniers ne nécessitent pas la mise en place d'une instrumentation supplémentaire et présentent l'avantage d'être exploitable en temps réel.

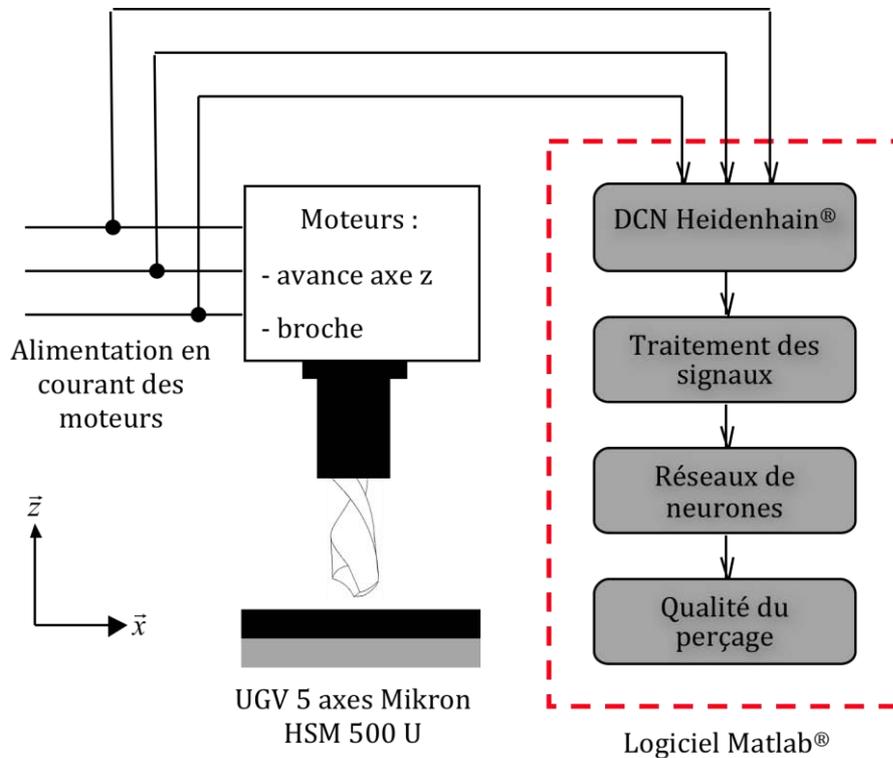


Figure IV-22 : Mise en place d'une surveillance d'un perçage multi-matériaux.

Selon le type d'application, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour mettre en place la surveillance hors usinage. Le choix de celles-ci va dépendre de la diversité des matériaux et des séquences concernées. Plus ce nombre est important, plus il est intéressant d'utiliser une méthodologie similaire à celle utilisée pour mettre en place le modèle phénoménologique. Cette méthode nécessite la réalisation d'un minimum de 8 perçages (cf. II.4.2.2) pour chacun des matériaux de l'empilement pris indépendamment. Dans le cas de figure où l'application concerne un seul ordre d'empilement voire une seule séquence (ordre et épaisseur figés), la mise en place d'une surveillance nécessite l'utilisation d'un seul réseau de neurones. Un seul échantillon de minimum 8 essais est donc nécessaire, permettant de diviser par deux le nombre d'essais à réaliser.

Pour comparer la précision offerte par ces deux méthodes, l'étude s'intéresse à l'erreur de prédiction de la qualité dimensionnelle d'un perçage multi-matériaux selon la méthodologie mise en place pour différentes séquences d'empilement.

#### IV.4.1.1. Méthode générale

Cette méthode, par son architecture, présente notamment l'intérêt de pouvoir s'adapter aux deux sens de perçage d'un empilement multi-matériaux CFRP/aluminium.

L'architecture de celle-ci est similaire à celle du modèle phénoménologique (cf. Figure IV-16). Elle est constituée de deux réseaux de neurones mis en série permettant la prédiction de la qualité de chacun des matériaux de l'empilement (cf. Figure IV-23). Les signaux issus de l'oscilloscope ne peuvent être implantés directement en entrée du réseau. Un traitement en amont de l'implantation consiste à :

- ◆ filtrer les signaux avec un filtre Butterworth [Butt 30],
- ◆ décomposer les signaux multi-matériaux en deux signaux correspondant au passage de l'outil dans chacun des matériaux,
- ◆ réaliser la moyenne des signaux lors de la phase de coupe à copeau constant.

Cette opération est nécessaire car les réseaux de neurones sont entraînés par un échantillon constitué de signaux ayant subi un traitement similaire.

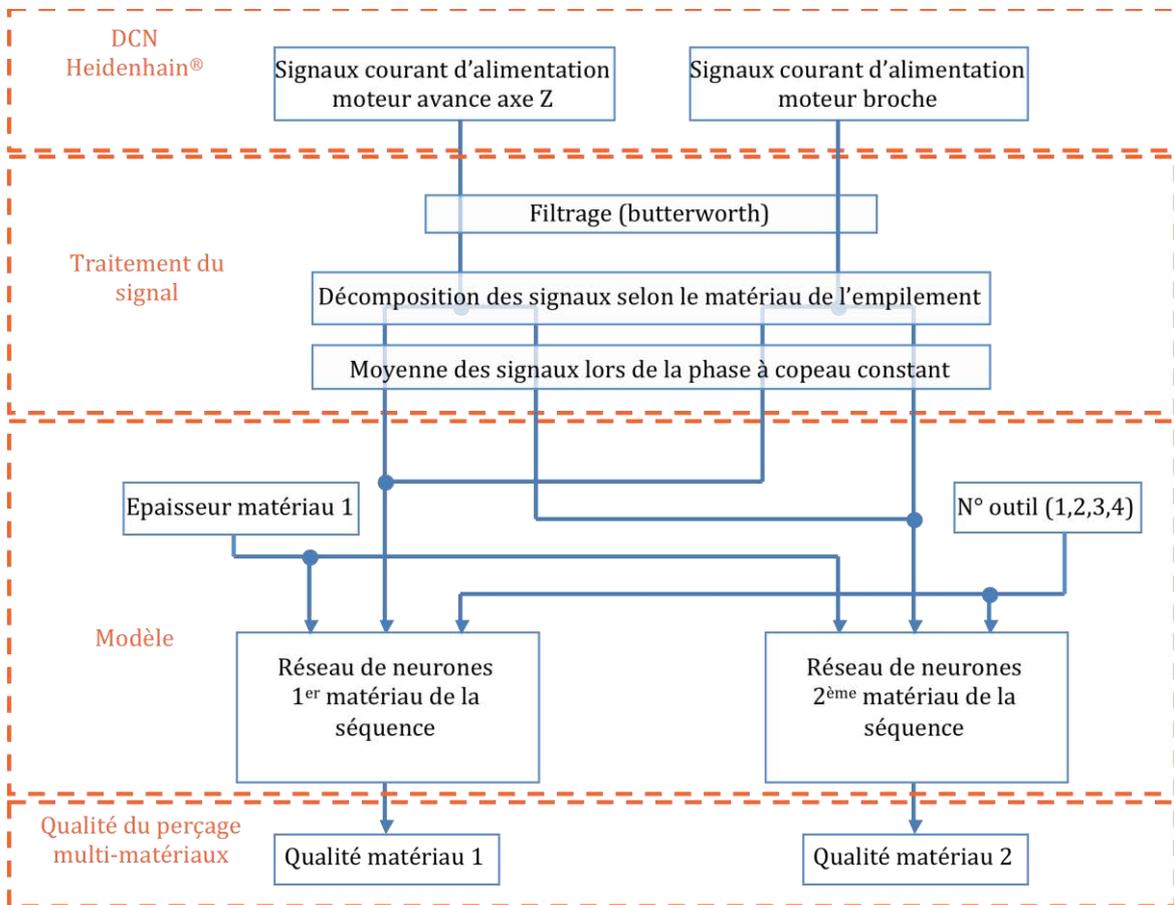


Figure IV-23 : Architecture du système de surveillance.

Avant de mettre en place le système de surveillance par la méthode générale, il est nécessaire, au préalable, de vérifier la valeur de l'erreur de prédiction des réseaux de neurones le constituant. Ces réseaux sont similaires à ceux établis lors de la mise en place du modèle phénoménologique. Mais contrairement à ces derniers, la qualité du perçage en sortie du réseaux n'est pas liée en entrée aux torseurs complets mesurés par la platine mais aux signaux des courants d'alimentation de l'axe z et de la broche (cf. Figure IV-24).

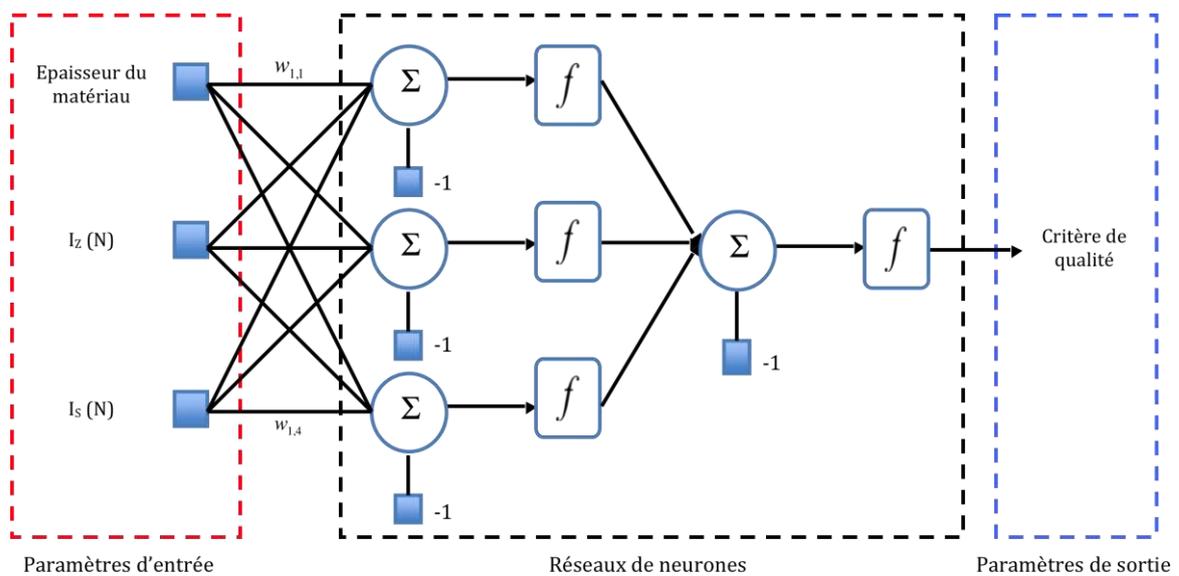


Figure IV-24 : Réseau de neurones du système de surveillance.

L'analyse de la performance des réseaux consiste à déterminer l'erreur de prédiction (Equation II.10) de la qualité des perçages réalisés avec un même outil (outil 2) dans les deux matériaux constituant l'empilement multi-matériaux. Concernant l'architecture du réseau, le couple architecture/algorithmes utilisé depuis le début de ce chapitre est conservé. Le seul paramètre variable reste le nombre de neurones sur les deux couches cachées. Le réseau le plus performant est déterminé en faisant varier ce nombre de 1 à 50 sur chacune des deux couches cachées.

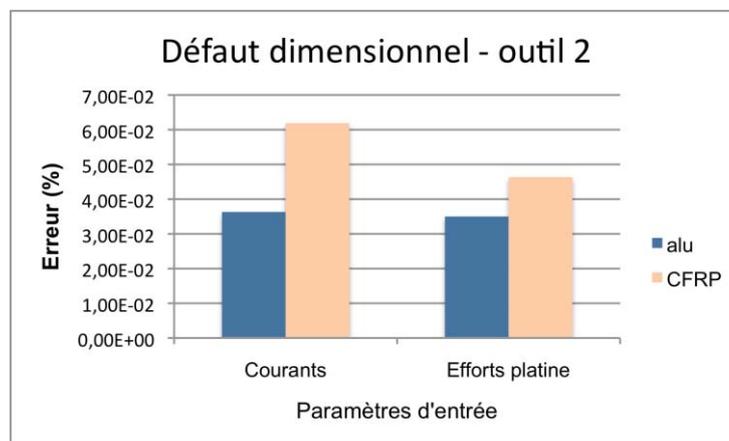


Figure IV-25 : Erreur de prédiction des défauts dimensionnels.

Les résultats montrent que l'erreur de prédiction obtenue est légèrement supérieure à celle observée en sortie du modèle phénoménologique (cf. Figure IV-25). Cet écart peut s'expliquer par la nature différente des paramètres d'entrée de l'échantillon d'entraînement. Bien que l'étude des signaux des courants d'alimentation des moteurs d'avance en z et de broche (cf. III.3.2) ait montré qu'une bonne corrélation pouvait être réalisée avec, respectivement, l'effort  $F_z$  et le moment  $M_z$ , une partie importante des informations renseignées par le torseur complet n'est pas prise en compte dans le modèle du système de

surveillance. Les travaux réalisés par S. Laporte [Lapo 05] ont montré que les composantes radiales (efforts et moments) jouent un rôle prépondérant dans la qualité finale d'un perçage. L'analyse de l'évolution de l'axe central associé au torseur complet des actions mécanique de coupe en perçage et notamment son enveloppe sur un tour, permet d'établir une excellente corrélation avec le diamètre final moyen de l'alésage.

La valeur de l'erreur maximale est de l'ordre de 0,06%, dans le cas du perçage CFRP, soit une erreur de 4  $\mu\text{m}$  sur la prévision du diamètre nominal percé. Les réseaux de neurones correspondant à chacun des matériaux étant établis, l'architecture globale du système de surveillance peut alors être constituée (cf. Figure IV-23). La précision de celui-ci est analysée en plaçant en entrée du système, les signaux traités issus des essais multi-matériaux. La qualité des perçages réalisés pendant ces essais est quant à elle comparée aux valeurs de sortie du système pour déterminer l'erreur de prédiction (cf. Figure IV-26).

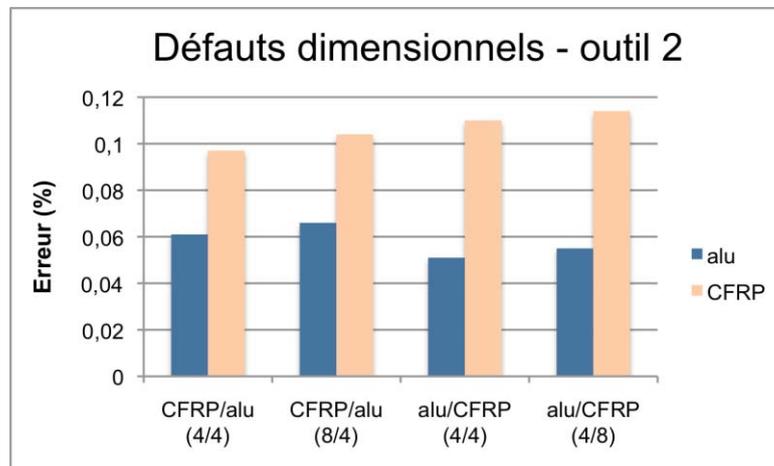


Figure IV-26 : Erreur de prédiction par la méthode générale.

La précision du modèle est comparable à celle obtenue en sortie du modèle phénoménologique multi-matériaux. La tendance est similaire bien que l'erreur soit légèrement supérieure, en partie due au fait que la précision des réseaux de neurones constituant le modèle soit inférieure à celle des réseaux du modèle phénoménologique. Cette méthode, de par son architecture, présente l'avantage de pouvoir s'adapter à un grand nombre de configurations d'empilements. Cette volonté de s'adapter à un nombre de séquence important peut se faire au détriment de la performance du réseau. La contrainte appliquée au modèle de pouvoir prédire la qualité dans les deux sens de perçage de l'empilement a conduit à une architecture constituée de deux réseaux de neurones dont la position dépend de la séquence d'empilement. Ces réseaux sont entraînés de manière à pouvoir prédire la qualité du perçage d'un matériau pour différentes épaisseurs de celui-ci. Industriellement, le perçage multi-matériaux peut, selon les applications, être réalisé toujours dans le même sens. Dans ce cas, la mise en place d'un système de surveillance peut être réalisée à partir d'une méthode spécifique adaptée à un seul sens de perçage. La suite de l'étude va s'attacher à présenter cette méthode, à étudier ses performances et à la comparer à la méthode générale.

IV.4.1.2. Méthode spécifique

Dans le cadre d'applications industrielles, la mise en place d'un système de surveillance est très souvent dédiée à un outil et une opération d'usinage, diminuant le domaine de validité dans lequel doit se situer le modèle. Lorsque le sens de perçage de l'empilement ne varie pas, une simplification de l'architecture du modèle peut être opérée. Celle-ci permet d'engendrer des gains en précision et rapidité de convergence. Le modèle est alors constitué d'un seul réseau de neurones associant aux courants broches et moteurs, la qualité du perçage réalisé pour les deux matériaux constituant l'empilement (cf. Figure IV-27).

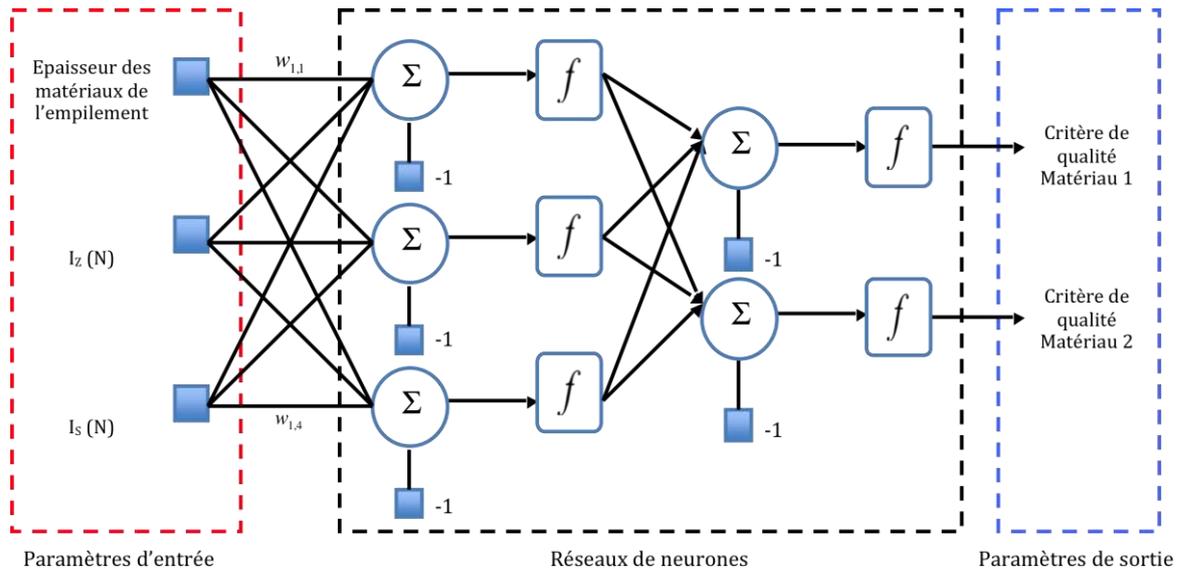


Figure IV-27 : Architecture de la méthode spécifique.

L'entraînement du réseau est réalisé par l'intermédiaire d'un échantillon de perçages multi-matériaux. Les matériaux constituant l'empilement sont perçés dans le même ordre en faisant varier les épaisseurs des deux couches. Pour analyser la performance de ce dernier, un échantillon de validation est constitué à partir des essais au centre de chaque épaisseur. L'étude est réalisée pour les deux sens de perçage, aluminium vers CFRP et CFRP vers aluminium. Contrairement à la méthode générale, où la modification du sens de perçage dans le modèle est obtenue simplement en modifiant un paramètre d'entrée, la méthode spécifique nécessite la réalisation de deux campagnes d'essais multi-matériaux et l'entraînement de deux réseaux.

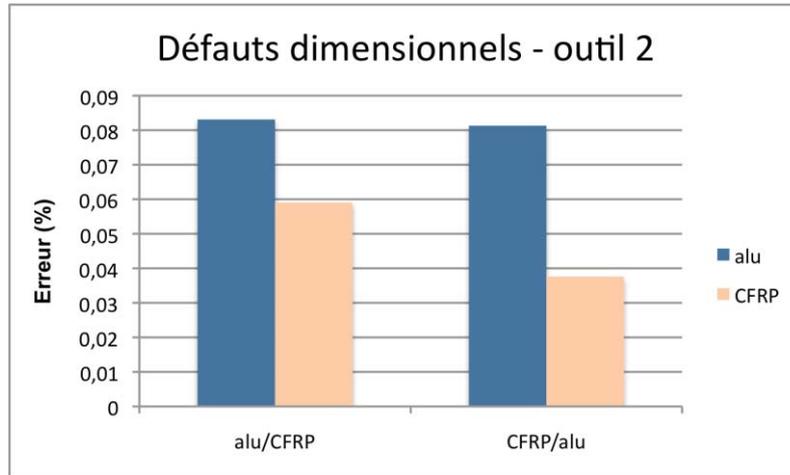


Figure IV-28 : Erreur de prédiction par la méthode spécifique.

Les résultats (cf. Figure IV-28) ne présentent pas une continuité par rapport aux résultats précédents (cf. Figure IV-26). L'aluminium dont la prédiction des défauts dimensionnels était jusqu'à présent plus performante que celle du CFRP présente, dans ce cas, une erreur supérieure, respectivement de 50 et 100%, pour les deux séquences étudiées Al/CFRP et CFRP/Al. Les résultats sont cependant globalement tout à fait satisfaisants, l'erreur maximale est de l'ordre de 0,08% soit une imprécision sur la prédiction du diamètre nominal d'environ 5  $\mu\text{m}$ .

#### IV.4.1.3. Comparaison des deux méthodes

Les deux paragraphes précédents ont présenté deux méthodes permettant de mettre en place un système de surveillance d'un perçage multi-matériaux. Les différences importantes au niveau de l'architecture des deux modèles se répercutent sur les résultats et la quantité d'essais à réaliser. Le tableau suivant (cf. Figure IV-29) présente les avantages et les inconvénients de chacune des méthodes.

	Méthode générale	Méthode spécifique
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Prédiction des deux sens de perçage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Meilleure précision</li> <li>◆ Mise en place aisée</li> <li>◆ Convergence plus rapide</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Deux fois plus d'essais à réaliser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Domaine de validité limité</li> </ul>

Figure IV-29 : Avantages et inconvénients des deux méthodes de modélisation.

La mise en place d'une surveillance d'usinage ayant pour but d'augmenter la productivité et garantir la sécurité des pièces, les critères de précision et de rapidité sont donc prépondérant dans le choix d'un système de surveillance. Vis à vis de ces critères, la méthode spécifique semble la plus adaptée, sa précision étant supérieure à la méthode générale (cf. Figure IV-30). De par son architecture simple, elle est également plus simple à mettre en œuvre, requiert un nombre d'essais deux fois moins important et converge plus rapidement.

La méthode générale est quant à elle plus flexible et peut être avantageuse lors de la surveillance du perçage de séquences d'empilement très variées.

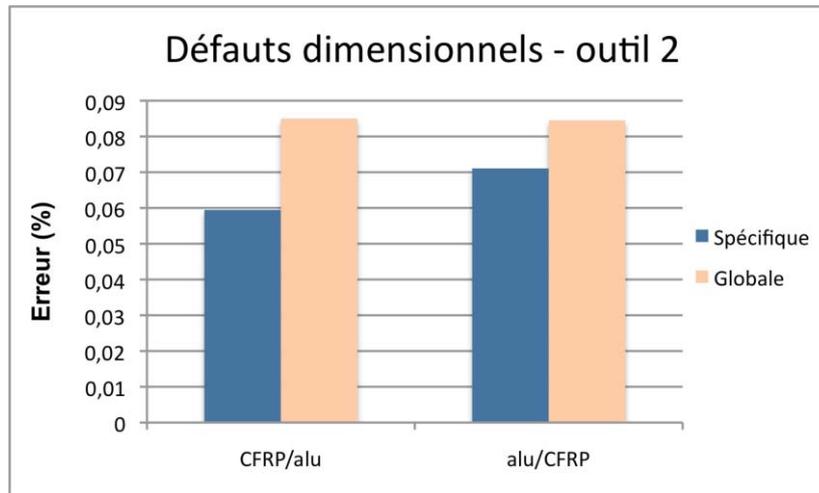


Figure IV-30 : Moyenne de l'erreur de prédiction en fonction de la méthode de modélisation.

#### IV.4.2. Mise en place d'une surveillance pendant l'usinage

Ce type de surveillance permet de superviser le bon déroulement de la coupe. Lorsque la vitesse de réaction du modèle est suffisante elle permet de mener des actions réflexes en cas d'évènements tels qu'un bris d'outil ou un serrage défectueux. La mise en place d'un système de surveillance pendant l'usinage n'a pas été étudiée dans cette thèse, sa mise en œuvre étant plus longue et complexe que celle d'une surveillance hors usinage. Cette problématique fait partie des perspectives de recherches s'inscrivant dans la continuité de cette thèse.

### IV.5. Conclusions

Ce chapitre a présenté différentes applications possibles des réseaux de neurones dans le domaine du perçage multi-matériaux. L'utilisation de ces derniers a permis de mettre en place :

- ◆ un modèle multi-matériaux,
- ◆ un modèle phénoménologique,
- ◆ un système de surveillance hors usinage.

Ces applications sont le dernier maillon d'une démarche détaillée pas à pas dans les chapitres précédents. Celles-ci permettent de faire le lien entre la qualité du perçage multi-matériaux et les paramètres d'entrée du modèle, déterminés en fonction de la problématique de l'étude. Dans ce chapitre, l'analyse s'est principalement intéressée à la description de l'architecture des différents modèles et à la détermination de leurs erreurs de prédiction.

Le modèle multi-matériaux permet de prédire la qualité du perçage d'un empilement pour un outil donné à partir des conditions de coupe. En fonction de la séquence d'empilement, l'architecture du modèle est constituée de plusieurs modèles mono-matériaux mis en série correspondant aux différentes couches de l'empilement dans l'ordre de la séquence. La caractérisation du perçage d'un multi-matériaux a montré que le comportement de celui-ci ne pouvait se résumer à l'analyse séparée des couches le constituant. Pour augmenter la précision de la prédiction, l'ajout d'un paramètre d'usure de l'outil permet de mieux prendre en compte les conséquences du passage du foret dans le premier matériau, sur la qualité du deuxième matériau. Pour ce faire, l'état d'usure est pris en compte en entrée et en sortie de chacun des modèles mono-matériaux.

Ces derniers sont des modèles "boîtes noires" constitués à partir de l'entraînement d'un réseau de neurones. Les analyses ont montré que la précision de ces modèles dépend des matériaux concernés. La modélisation du perçage de l'aluminium présente une erreur de prédiction plus faible que celle du CFRP. Cette différence peut s'expliquer par la présence d'un bruit de mesure, bien plus important sur les signaux issus du perçage de ce dernier, dû à la nature fibreuse du matériau.

L'étape suivante consiste à mettre en série les modèles matériaux en respectant la séquence d'empilement. Ainsi, en intégrant en entrée l'usure initiale de l'outil, son évolution est prédite en sortie du premier modèle matériau puis intégrée en entrée du second modèle. En sortie, les différents critères de qualité sont quantifiés dans chacune des couches traversées.

Lorsqu'une acquisition des efforts de coupe est réalisée pendant les essais, il est possible de mettre en place un modèle phénoménologique liant ces derniers à la qualité du perçage réalisé. Pour pouvoir prédire la qualité du perçage dans les différentes couches de l'empilement, et ce, pour différentes configurations, une architecture composite, similaire à celle du modèle multi-matériaux a été privilégiée. A la différence de ce dernier, la prise en compte du passé de l'outil n'est pas assurée par l'intégration d'un paramètre représentatif de l'usure du foret. Les études précédentes ayant montré l'influence de la modification de la géométrie de l'outil sur l'intensité des efforts de coupe (cf. III.3.1.2), la prise en compte est donc indirectement réalisée à travers l'intégration des efforts de coupe en entrée du modèle. Une analyse a été entreprise pour vérifier la précision du modèle pour différentes séquences d'empilement. Les résultats obtenus sont satisfaisants, l'erreur maximale constatée n'excède pas 0,08% soit une imprécision sur la prédiction des défauts dimensionnels de l'ordre de 5  $\mu\text{m}$ .

Pour rapprocher cette étude des problématiques industrielles, un système de surveillance du perçage multi-matériaux peut être mis en place à partir des travaux réalisés sur le modèle phénoménologique. L'intégration en entrée du réseau des signaux issus de l'oscilloscope de la commande numérique permet, dès la fin du perçage, de pouvoir obtenir la qualité du trou dans les deux matériaux de l'empilement. De cette manière, il est ainsi possible

de mettre en place un système de surveillance hors usinage permettant de mener des actions préventives en surveillant la dérive régulière de certains critères de qualité.

Pour cela, deux méthodes ont été élaborées selon les configurations des perçages surveillées :

- ◆ la méthode générale pouvant s'adapter à toutes les configurations de perçages,
- ◆ la méthode spécifique développée pour une séquence d'empilement.

La méthode générale est particulièrement indiquée dans le cadre de la mise en place d'une surveillance appliquée à différentes séquences d'empilement. De par son architecture composite, ce modèle présente l'avantage d'être flexible. L'inconvénient est que cette flexibilité va au détriment de la précision. L'erreur de prédiction de cette méthode est dans le cadre de cette étude 20 à 40% supérieure à celle obtenue par la méthode spécifique dont le domaine de validité se cantonne à une seule séquence d'empilement.

Le tableau suivant résume les spécificités de chaque modèle ainsi que leurs précisions respectives (cf. Figure IV-31).

Modèle		Paramètres d'entrée	Paramètres de sortie	Validité	Erreur (%) <sup>(1)</sup>
Global		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ configuration (épaisseurs, séquence)</li> <li>◆ avance par tour <math>f</math></li> <li>◆ fréquence de rotation <math>N</math></li> <li>◆ usure initiale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ qualité du perçage</li> <li>◆ usure finale</li> </ul>	Toutes les configurations possibles	0,032/0,011
Phénoménologique		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ configuration (épaisseurs, séquence)</li> <li>◆ Torseur complet des actions mécaniques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ qualité du perçage</li> </ul>	Toutes les configurations possibles	0,08/0,045
Surveillance	générale	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ configuration (épaisseurs, séquence)</li> <li>◆ intensité du courant du moteur d'avance en z</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ qualité du perçage</li> </ul>	Toutes les configurations possibles	0,096/0,06
	spécifique	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ intensité du courant du moteur broche</li> </ul>		Une seule configuration	0,038/0,081

(1) comparaison réalisée pour un empilement CFRP/alu d'épaisseurs (4/4) mm.

Figure IV-31 : Tableau récapitulatif des modèles mis en place.

## V. Conclusion Générale



## V.1. Conclusions

Ce travail a eu pour but de mettre en place une modélisation expérimentale du perçage d'un multi-matériaux. Celle-ci permet d'estimer la qualité du perçage d'un empilement pour un outil donné et les conditions de coupe qui lui sont associées. Pour ce faire, les critères de qualité associés au procédé ont été dans un premier temps caractérisés. Différentes techniques expérimentales ont été développées pour quantifier ces paramètres. La réalisation de la campagne d'essais et la mesure de l'ensemble des critères ont permis la constitution des échantillons d'entrée et de sortie alimentant le modèle. La précision du modèle a été validée par l'intermédiaire d'un échantillon de vérification obtenu à partir d'essais extraits de la campagne expérimentale.

### V.1.1. Démarches expérimentales

La constitution des échantillons d'entrée/sortie a été nécessaire à la mise en place des modèles. L'étude bibliographique a permis d'introduire les différents critères ainsi que les méthodes de quantification associées.

Pour des raisons économiques, une partie des techniques expérimentales nécessaires à la réalisation de la campagne d'essais a dû être développée à partir d'outils dont la fonction première a été détournée. C'est notamment le cas du rugosimètre 3D Altisurf 500<sup>®</sup> qui permet de réaliser la microtopographie d'un échantillon pour quantifier sa rugosité ou sa planéité. Les différentes fonctionnalités de cet appareil ont été utilisées pour mesurer l'acuité d'arête de coupe, l'endommagement du composite et la hauteur de bavure.

Concernant cette dernière, une dérive a été observée au cours de la campagne. L'analyse a montré que l'épaisseur percée est un facteur important dans l'évolution de la valeur de ce paramètre. La hauteur de bavure est étroitement liée à la température de l'outil et du matériau (Al) en sortie de perçage.

L'acuité d'arête de coupe, quant à elle, croît quasi linéairement avec l'augmentation de l'usure de l'outil. L'étude a montré que l'évolution du critère  $V_b$  au cours de la campagne d'essais n'est pas significative pour caractériser l'usure de l'outil. Le choix s'est donc porté vers l'utilisation du rayon d'acuité de l'arête de coupe principale du foret. La corrélation de ce dernier avec les actions mécaniques de coupe confirme la pertinence du choix de ce paramètre comme indice d'usure de l'outil.

Pour établir cette corrélation, les efforts de coupe ont été mesurés au cours du perçage avec deux outils :

- ◆ une platine dynamométrique à 6 composantes,
- ◆ l'oscilloscope de la commande numérique Heidenhain<sup>®</sup> ITNC 530.

La platine dynamométrique permet l'acquisition des six composantes du torseur des actions mécaniques de coupe. Une superposition des efforts  $F_z$  et  $M_z$  a été réalisée avec

respectivement, les signaux de l'intensité des courants d'alimentation des moteurs de broche et d'avance selon  $z$ . Celle-ci a permis de corrélérer les deux signaux et de valider les mesures issues de l'oscilloscope.

L'analyse des actions mécaniques a permis l'identification de la signature comportementale de l'outil ainsi que ses paramètres influents. Les résultats ont montré que la vitesse d'avance, l'usure de l'outil et la nature du revêtement sont des paramètres prépondérants dans l'évolution de la valeur des actions mécaniques.

La qualité du perçage a été caractérisée par la mesure des défauts dimensionnels et géométriques du trou. Les résultats de l'analyse ont encore une fois montré l'influence de l'usure de l'outil sur la valeur de ces critères. Différents phénomènes ont pu être observés notamment pour le défaut dimensionnel. Ce dernier évolue de différentes manières selon la nature du matériau percé :

- ◆ une augmentation du diamètre du trou percé dans l'aluminium due à la formation d'une arête rapportée,
- ◆ une diminution du diamètre du trou percé dans le CFRP due à la mauvaise coupe des fibres après la baisse d'acuité d'arête de l'outil.

Les différentes analyses réalisées ont permis de mettre en évidence l'influence de l'évolution de l'acuité d'arête de l'outil sur la valeur des critères de qualité du perçage multi-matériaux. L'intégration de ce paramètre est donc indispensable pour établir un modèle pertinent.

### V.1.2. Modèle global

Une fois les paramètres d'entrée et de sortie du problème identifiés et quantifiés, le modèle global peut alors être mis en place. Celui-ci a pour but de prédire la qualité d'un perçage multi-matériaux et l'usure finale de l'outil à partir des conditions de coupe et de l'usure initiale.

Le choix de la modélisation employée est guidé par les difficultés engendrées par l'aspect tridimensionnel de la coupe et le confinement de l'outil. La géométrie complexe du foret caractérisée par la variation des angles de coupe selon la distance à l'axe du foret, ainsi que l'important gradient de vitesse de coupe  $V_c$  le long de l'arête principale entraînent une variation importante des conditions thermomécaniques de formation du copeau. A la complexité de la géométrie de l'outil, s'ajoute le comportement anisotrope du CFRP.

L'ensemble de ces considérations nous a conduits à orienter l'étude vers une approche expérimentale. Cette démarche permet, sans entrer dans la théorie de la coupe, de mettre en place un modèle à partir des résultats d'une campagne d'essais. Cette modélisation dite "boîte noire" a été développée à l'aide des réseaux de neurones.

Contrairement aux modèles multilinéaires couramment utilisés dans ce type de démarche, les réseaux de neurones permettent la mise en place d'un modèle non linéaire par

apprentissage. Ce dernier est réalisé en alimentant le réseau avec un échantillon professeur associant un jeu de paramètres d'entrée à un jeu de paramètres de sortie.

Différentes architectures et algorithmes ainsi que leurs paramètres associés ont été présentés puis analysés. Un certain nombre d'associations architecture/algorithme ont été comparées pour déterminer la plus performante. Le couple optimal est constitué d'une architecture composée de deux couches cachées entraînées par un algorithme du gradient conjugué.

À partir des échantillons d'entrée/sortie constitués et des résultats précédents, le modèle global a pu être mis en place. Celui-ci est constitué de plusieurs modèles mono-matériaux mis en série pour reconstruire la séquence d'empilement correspondante. Ces derniers sont issus de l'entraînement d'un réseau de neurones par un échantillon constitué à partir d'essais de perçage d'un des matériaux de l'empilement.

L'analyse de la précision du modèle a été quantifiée par l'erreur d'entraînement. Celle-ci est définie comme étant la valeur absolue du pourcentage d'erreur entre la sortie du modèle et la valeur cible. Cette dernière est issue d'un échantillon d'essais au centre, non inclus à l'échantillon d'entraînement.

Les résultats ont montré que la précision des modèles dépendait de la nature du matériau concerné. Les bruits de mesure plus importants engendrés lors du perçage d'un CFRP altèrent la convergence du modèle. Par conséquent, la précision obtenue en sortie des modèles mono-matériaux aluminium est nettement supérieure aux modèles CFRP. Les analyses ont également montré l'influence de la position du matériau dans la séquence d'empilement sur la précision de la prédiction. Un matériau placé en deuxième position de l'empilement voit son erreur augmentée par rapport à celle mesurée lorsqu'il est en première position. Ces résultats peuvent être notamment imputés à une mauvaise prise en compte des phénomènes parasites survenus pendant les perçages tels que l'usure de l'outil, la formation d'une arête rapportée ou l'importante élévation de température. Ce dernier phénomène n'a pas pu être intégré aux paramètres d'entrée/sortie du modèle du fait des difficultés engendrées par l'insertion des mesures thermiques à la procédure expérimentale.

### V.1.3. Système de surveillance

Pour rapprocher cette étude des problématiques industrielles, un système de surveillance du perçage multi-matériaux a été mis en place. Ce système intégré en sortie de l'oscilloscope de la commande numérique, permet la prédiction hors ligne de la qualité du perçage dès la fin de l'acquisition du signal. Il permet de mener des actions préventives en surveillant la dérive régulière de certains critères de qualité.

Avant de mettre en place le système, un modèle phénoménologique a été établi. Celui-ci permet de prédire la qualité du perçage réalisé dans les deux matériaux à partir du torseur complet des actions mécaniques de coupe correspondantes.

La précision obtenue en sortie de ce modèle est comparable à celle obtenue en sortie du modèle global. D'autre part, l'augmentation de l'erreur de prédiction observée précédemment pour le deuxième matériau de l'empilement, n'est pas constatée dans ce cas de figure. Contrairement au modèle global, pour lequel l'usure est prise en compte par l'intermédiaire d'un paramètre intégré au modèle, celle-ci est indirectement prise en compte dans le modèle phénoménologique. En effet, l'évolution de la valeur des actions mécaniques est étroitement liée à l'usure de l'outil. Cette dernière est donc indirectement intégrée via le torseur complet des actions mécaniques.

Pour établir le système de surveillance, une modification des paramètres d'entrée est nécessaire. Les actions mécaniques déterminées par les mesures issues de la platine dynamométrique six composantes, sont dans ce cas remplacées par les valeurs des courants d'alimentation des moteurs de broche et d'avance en z.

Deux méthodes ont été développées pour adapter la modélisation aux différentes problématiques industrielles. La première, appelée méthode générale, est directement issue du modèle phénoménologique. De par son architecture constituée de deux modèles mono-matériaux, cette méthode offre de la flexibilité au système de surveillance. Elle peut effectivement s'adapter à un grand nombre de séquences en ajustant simplement la position des modèles mono-matériaux dans le modèle.

La deuxième méthode, appelée méthode spécifique, limite quant à elle le domaine de validité du modèle en se cantonnant à une seule séquence d'empilement. L'architecture n'est alors plus constituée de deux modèles mono-matériaux mais d'un seul modèle multi-matériaux. Cette modification entraîne une augmentation de la précision du modèle de 20 à 40% selon l'empilement considéré.

## V.2. Perspectives

Les travaux réalisés dans cette étude proposent une méthodologie destinée à mettre en place un modèle expérimental de perçage multi-matériaux par les réseaux de neurone. La grande flexibilité permise par l'utilisation des réseaux de neurones pourrait permettre de servir de point de départ à de futurs travaux.

Les points nécessitant un approfondissement, voire des développements vont être introduits dans les paragraphes suivants.

### V.2.1. Démarches expérimentales

La précision en sortie du modèle est étroitement liée à celle des mesures des différents paramètres d'entrée/sortie du réseau de neurones. Comme nous l'avons vu précédemment, un certain nombre de points peuvent être améliorés concernant les démarches expérimentales. C'est notamment le cas de la quantification de l'acuité d'arête.

Dans le cadre de cette étude, l'acuité de l'arête de coupe principale de l'outil a été mesurée à l'aide du palpeur mécanique d'un rugosimètre 3D Altimet 500<sup>®</sup>. L'obtention de la valeur de l'acuité nécessite un nombre important d'opérations et ralentit significativement la réalisation des essais. Pour obtenir un échantillon cohérent, les mesures doivent être réalisées toujours sur la même section de l'arête de coupe principale et normalement par rapport à la direction de celle-ci. Même avec une extrême minutie, il est très difficile de satisfaire ces deux conditions avec le montage utilisé dans cette étude.

L'acquisition récente par le laboratoire LGM<sup>2</sup>B, d'un microscope numérique de nouvelle génération permettra l'observation, l'enregistrement et la mesure directement sur site de l'acuité de l'arête principale de l'outil. La caméra haute définition reliée au moniteur assure la construction de l'image 3D de l'arête principale de l'outil. L'analyse de cette dernière par le logiciel de traitement de l'image associé, permet le positionnement des trois mesures de l'acuité de manière très précise, améliorant par conséquent la répétabilité de la mesure.

### V.2.2. Modèle global

Les réseaux de neurones présentent l'avantage d'être aisément modifiables. L'enrichissement a posteriori de l'échantillon d'entraînement permet, en conservant la même architecture du réseau, d'affiner le modèle ou d'étendre son domaine de validité. Cette extension peut être réalisée pour différents paramètres tels que :

- ◆ les matériaux de l'empilement,
- ◆ les conditions de coupe,
- ◆ les diamètres ou les épaisseurs percés,
- ◆ la géométrie des forets.

La diminution de l'erreur de prédiction peut également passer par l'étude d'algorithmes plus complexes ou la modification de l'architecture du réseau. L'étude s'est jusqu'alors cantonnée aux algorithmes de descente de gradient et du gradient conjugué car ces derniers offrent un bon compromis facilité de mise en œuvre/précision en sortie. Il est de toute évidence possible d'améliorer la précision du réseau, mais cette diminution de l'erreur ne sera pas significative par rapport à l'investissement consenti (temps d'apprentissage, modification de l'architecture et temps de calculs).

D'autre part, l'augmentation de la précision de la mesure des différents critères de qualité peut améliorer la convergence de l'algorithme et par conséquent, diminuer l'erreur de prédiction. Nous avons vu précédemment (cf. V.2.1) que cette augmentation pouvait être associée au remplacement de l'outil de mesure ou à l'amélioration du processus expérimental.

La démarche proposée dans cette étude offre la possibilité de s'adapter à d'autres paramètres et par conséquent à d'autres procédés. Elle n'est en aucun cas exclusivement dédiée au procédé de perçage. Sa transposition à un autre procédé nécessite toutefois une révision de l'architecture du modèle qui est, quant à elle, construite pour une problématique de perçage multi-matériaux.

---

### V.2.3. Système de surveillance

Cette étude a proposé deux méthodes permettant la mise en place d'une surveillance hors ligne du perçage multi-matériaux. Une démarche détaillée pas à pas a été élaborée assurant l'établissement d'un modèle en réalisant un nombre réduit d'essais.

La prochaine étape dans ce domaine est la mise en place d'une surveillance en ligne du procédé. Elle permettra la réalisation d'actions réflexes permettant d'interrompre rapidement le processus d'usinage lors de la détection d'un aléa (bris d'outils, etc.). Ce système nécessite l'intégration en temps réel des entrées du modèle. Une modification du processus d'acquisition ainsi que de l'architecture du modèle doit par conséquent être réalisée.

---

## Références

- [Abrã 05]** Abrão A. M., Faria P. E., Campos Rubio J. C., Reis P., Paulo Davim J., Drilling of fiber reinforced plastics: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, 186 (2007) 1-7, 2007.
- [Abu 03]** Abu-Mahfouz I., Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43 (2003) 707-720, 2003.
- [Air 10]** Beauclair N., Des investissements à la hauteur des défis industriels, *Air & Cosmos*, n°2216, p.26, 2010.
- [Bagu 99]** Bagur F., *Matériaux pour outils de coupe*, Technique de l'ingénieur, 1999.
- [Balz 10]** Balzers, BALINIT® HARDLUBE - get a grip on machining reliability [en ligne], disponible sur : [http://www.balzers.com/global/pdf\\_brochures/english/Z112E\\_0311.pdf](http://www.balzers.com/global/pdf_brochures/english/Z112E_0311.pdf) (consulté le 17.04.10).
- [Beal 72]** Beale E.M.L., A derivation of conjugate gradients, in F.A. Lootsma, *Numerical methods for nonlinear optimization*, London: Academic Press, 1972.
- [Begõ 05]** Peña B., Aramendi G., Rivero A., Lopez de lacalle L. N., Monitoring of drilling for burr detection using spindle torque, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45 (2005) 1614-1621, 2005.
- [Bonn 10]** Bonnet C., *Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2010.
- [Box 71]** Box G.E.P., Hunter W.G., Hunter J.S., *Statistics for experimenters*, John Wiley and Sons, New York, 453 pages, 1971.
- [Bren 73]** Brent R.P., *Algorithms for Minimization Without Derivatives*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1973.
- [Brink 02]** Brinksmeier E., Janssen R., Drilling of Multi-Layer composite materials consisting of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP), Titanium and aluminium alloys, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 51, Issue 1, 87-90, 2002.
- [Butt 30]** Butterworth S., On the Theory of Filter Amplifiers, *Wireless Engineer*, Vol. 7 (1930), pp. 536-541.
- [Capr 94]** Capriano G., Tagliaferri V., Damage development in drilling glass fibre reinforced plastics, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 35, No. 6, pp. 817-829, 1995.
- [Cape 02]** Capello E., Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148 (2004) 186-195, 2002.
- [Chak 05]** Chakraborty D., Artificial neural network based delamination prediction in laminated composites, *Materials and Design*, Vol. 26 (2005) 1-7, 2005.
- [Char 92]** Charalambous C., Conjugate gradient algorithm for efficient training of artificial neural networks, *IEEE Proceedings*, Vol. 139, 3 (1992) 301-310, 1992.
-

- [Chen 96]** Chen W-C., Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 37, No. 8, pp. 1097-1108, 1997.
- [Chér 03]** Chérif M., Modélisation générique des efforts de coupe en fraisage pour la CFAO et la surveillance de l'usinage, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2003.
- [Chér 08]** Chérif M., Legrand P., Sensorless monitoring of CFRP drilling, *Journal of proceedings of the International Conference on Manufacturing Systems (ICMaS)*, pp. 275-278, 2008.
- [Coué 93]** Couétard Y., "Capteur de forces à deux voies et application à la mesure d'un torseur de forces". Brevet français, 1993.
- [Corn 98]** Cornet A., Deville J. P., *Physique et ingénierie des surfaces*, EDP sciences, 1998.
- [Darg 06]** Dargnat F., Modélisation semi-analytique par approche énergétique du procédé de perçage de matériaux monolithiques, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, spécialité Mécanique, n° 3216, 2006.
- [Dasc 06]** Dasch J. M., Ang C. C., Wong C. A., Cheng Y. T., Weiner A. M., Lev L. C., Konca E., A comparison of five categories of carbon-based tool coatings for dry drilling of aluminium, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200 (2006) 2970-2977, 2006.
- [Demu 10]** Demuth H., Beale M., Hagan M., *Neural Network Toolbox™ 6, User's Guide*, The MathWorks, 2010.
- [Den 83]** Dennis J.E., Schnabel R.B., *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1983.
- [Diml 00]** Dimla Sr. D. E., Lister P. M., On-line metal cutting tool condition monitoring. II : tool-state classification using multi-layer perceptron neural networks, *International Journal of Machine Tools & manufacture*, Vol. 40 (2000) 769-781, 2000.
- [Drey 02]** Dreyfus G., Martinez J.-M., Samuelides M., Gordon M. B., Badran F., Thiria S., Hérault L., *Réseaux de neurones – Méthodologie et applications*, Eyrolles, 2002.
- [Durã 05]** Durão L. M. P., de Moura M. F. S. F., Marques A. T., Numérical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates, *Composites*, 2005.
- [Durv 02]** Braga D. U., Diniz A. E., Miranda G. W. A., Coppini N. L., Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminium-silicon alloys, Vol. *Journal of Materials Processing Technology* 122 (2002) 127-138, 2002.
- [Fanc 01]** Fanchon J. L., *Guide des sciences et technologies industrielles*, Edition AFNOR Nathan, 2001.
- [Fara 09]** Fara A., Biermann D., Weinert K., Cutting edge rounding : An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49 (2009) 1185–1196, 2009.
- [Fern 05]** Fernandes M., Cook C., Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part I: Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46 (2006) 70-75, 2005.

- [Fern2 05]** Fernandes M., Cook C., Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part II: empirical modelling of maximum thrust force, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46 (2006) 76-79, 2005.
- [Flet 64]** Fletcher R., Reeves C.M., Function minimization by conjugate gradients, *Computer Journal*, Vol. 7, (1964) 149-154, 1964.
- [Gay 05]** Gay D., *Matériaux composites (5<sup>ème</sup> édition révisée)*, Edition Hermès science, 2005.
- [Giro 02]** Girot F., Géhin D., Dry drilling of aluminium alloys for aeronautics, *Mécanique & Industries*, Vol. 3 (2002) 301-313, 2002.
- [Gueg 94]** Guegan P., Contribution à la qualification de l'usinage de matériaux composites à matrice organique, Thèse de doctorat, Ecole Centrale Nantes, n°ED82-73, 1994.
- [Guil 05]** Guillaumat L., Hamdoun Z., Reliability model of drilled composite materials, *Composite Structures*, Vol. 74 (2006) 467-474, 2005.
- [Goul 06]** Gouleau S., Garnier S., Furet B., Faisabilité du perçage d'empilages multi-matériaux de type aluminium/composites, Assises MUGV, 2006.
- [Goup 96]** Goupy J., *la méthode des plans d'expériences*, Dunod, 1996.
- [Hag 96]** Hagan M.T., Demuth H.B., Beale M.H., *Neural Network Design*, Boston, MA: PWS Publishing, 1996.
- [Hany 05]** Hanyu H., Kamiya S., Murakami Y., Kondoh Y., The improvement of cutting performance in semi-dry condition by the combination of DLC coating and CVD smooth surface diamond coating, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200 (2005) 1137-1141, 2005.
- [Hex 10]** Hexcel, HexPly Prepreg Selector Tool [en ligne], disponible sur : <http://www.hexcel.com/Products/Selector+Guides/HexPlySelGuide.htm?sg=HexPly+Prepreg> (consulté le 16.05.10).
- [Hoch 03]** Hocheng H., Tsao C.C., Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 140 (2003) 335-339, 2003.
- [Hoch 06]** Hocheng H., Tsao C.C., Effects of spécial drill bits on drilling-induced delamination of composite materials, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46 (2006) 1403-1416, 2006.
- [Horn 89]** Hornik K., Stinchcombe M., White H., Multilayer feedforward networks are universal approximators, *Neural Networks*, Vol. 2, 359-366, 1989.
- [Jins 00]** Kim J., Min S., Dornfeld D. A., Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41 (2001) 923-936, 2000.
- [Karn 08]** Karnik S. R., Gaitonde V. N., Campos Rubio J. Esteves Correia A., Abrão A. M., Paulo Davim J., Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using neural network model, *Materials and Design*, Vol. 29 (2008) 1768-1776, 2008.

- [Kell 01]** Kelly J. F., Cotterell M. G., Minimal lubrication machining of aluminium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120 (2002) 327-334, 2002.
- [Ken 02]** Ken Lauderbaugh Saunders L., A finite element model of exit burrs for dilling of metals, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40 (2003) 139-158, 2002.
- [Ken 08]** Ken Lauderbaugh Saunders L., Analysis of the effects of proces parameters on exit burrs in drilling using a combined simulation and experimental approach, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209 (2009) 1909–1919, 2008.
- [Kim 04]** Kim D., Ramulu M., Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks, *Composite Structures*, Vol. 63 (2004) 101-114, 2004.
- [Köni 89]** König W., Graß P., Quality definition and assessment in drilling of Fibre Reinforced Thermosets, *Annales du CIRP*, Vol. 38/1/1989, p. 119-124.
- [Lapo 05]** Laporte S., Comportement et endommagement de l'outil en perçage à sec : application aux assemblages aéronautiques, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, spécialité Mécanique, n° 3088, 2005.
- [Lee 05]** Lee K., Dornfeld D. A., Micro-burr formation and minimization through proces control, *Precision Engineering*, Vol. 29 (2005) 246-252, 2005.
- [Lesh 93]** Leshno, M., Lin, V. Y., Pinkus, A., Schocken, S., Multilayer feedforward networks with a non polynomial activation function can approximate any function, *Neural Networks*, Vol. 6 (6), 861-867, 1993.
- [Lin 95]** Lin S. C., Chen I. K., Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed, *Wear*, 194 (1996) 156-162, 1995.
- [McCu 43]** McCulloch W., Pitts W., A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, p.115-133, 1943.
- [Merc 45]** Merchant E., Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting an type 2 chip, *Journal of Applied Physics*, Vol. 16, 1945.
- [Moll 93]** Moller M.F., A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning, *Neural Networks*, Vol. 6, p. 525-533, 1993.
- [Mono 10]** Monogram Aerospace Fasteners, Wedgelock : temporary fastening systems & drilling aids [en ligne], disponible sur : [www.monogram aerospace.com/](http://www.monogram aerospace.com/) (consulté le 21.04.10).
- [Noua 03]** Nouari M., List G., Girot F., Coupard D., Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys, *Wear*, Vol. 255 (2003) 1359-1368, 2003.
- [Noua 05]** Nouari M., List G., Girot F., Géhin D., Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45 (2005) 1436-1442, 2005.
- [Oxle 88]** Oxley P. L. B., Modelling machining processes with a view to their optimization, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, p.103-119, 1988.

- 
- [Pand 06]** Panda S. S., Singh A. K., Chakraborty D., Pal S. K., Drill wear monitoring using back propagation neural network, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172 (2006) 283-290, 2006.
- [Pand 08]** Panda S. S., Chakraborty D., Pal S. K., Flank wear prediction using back propagation neural network and radial basis function network, *Applied Soft Computing*, Vol. 8 (2008) 858-871, 2008.
- [Pari 04]** Parizeau M., Réseaux de neurones, cours à l'université de Laval, 2004.
- [Patr 07]** Patra K., Pal S. K., Bhattacharyya K., Artificial neural network based prédiction of drill flank wear from motor current signals, *Applied Soft Computing*, Vol. 7 (2007) 929-935, 2007.
- [Peig 10]** Peigne G., Tomasi R., Usinage de l'aluminium [en ligne], disponible sur : <http://www.ugv-alu-composites.com/francais/html/documents/4%20Usinage%20de%20l'aluminium.pdf> (consulté le 30.05.10).
- [Piqu 99]** Piquet R., Ferret B., Lachaud F., Swider P., Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/expoxy plate using special drills, *Composites, Part A* 31 (2000) 1107-1115, 1999.
- [Ramu 99]** Ramulu M., Young P., Kao H., Drilling of graphite/bismaleimide composite material, *ASM International*, vol. 8 (1999) 330-338, 1999.
- [Ramu 01]** Ramulu M., Branson T., Kim D., A study on the drilling of composite and titanium stacks, *Composites Structures*, Vol. 54 (2001) 67-77, 2001.
- [Rech 02]** Rech J., Contribution à la compréhension des modes d'actions tribologiques et thermiques des revêtements en usinage. Application au cas du taillage de dentures à la fraise-mère à grande vitesse, *Arts et Métiers ParisTech*, n°2002-23, 2002.
- [Rodr 06]** Rodrigo Panosso Zeilmann, Walter Lindolfo Weingaertner, Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant, *Journal of Materials Processing Technology* 179 (2006) 124-127, 2006.
- [Roud 06]** Roudgé M., Etude de la réalisation de perçages dans un composite aéronautique Carbone/époxy, rapport de stage de Master 2 recherche Mécanique et Ingénierie, Université Bordeaux I, LGM<sup>2</sup>B, 2006.
- [Rume 86]** Rumelhart D.E, Hinton G.E., Williams R.J., Learning internal representations by error propagation, D.E. Rumelhart and J. McClelland editors, *Parallel Data Processing*, The M.I.T. Press, Vol.1, Chapter 8, pp. 318-362, 1986.
- [Sand 10]** Sandvik Coromant, Hole making application guide [en ligne], disponible sur : <http://www.sandvik.coromant.com/fr> (consulté le 20.04.10).
- [Sang 01]** Min S., Kim J., Dornfeld D. A., Development of a drilling burr control chart for low alloy steel, AISI 4118, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 112 (2001) 4-9, 2001.
- [Sant 96]** Santanu Das, Chattopadhyay A. B., Murthy A. S. R., Force parameters for on-line tool wear estimation : a neural network approach, *Neural Network*, Vol. 9, 1639-1645, 1996.
-

- [Scal 85]** Scales L.E., *Introduction to Non-Linear Optimization*, New York: Springer-Verlag, 1985.
- [Seif 06]** Seiffert U., Training of large-scale feed-forward neural networks, 2006 International Joint Conference on Neural Networks Sheraton Vancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, BC, Canada, July 16-21, 2006.
- [Sing 08]** Singh I., Bhatnagar N., Viswanath P., Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study, *Materials and Design*, Vol. 29 (2008) 546-553, 2008.
- [Spri 90]** Ciriscioli P. R., Springer G. S., *Smart autoclave cure of composites*, Lancaster : Technomic, 1990.
- [Ster 10]** Sterling Carbide, Special Order Tools For Machining Aerospace Composites [en ligne], disponible sur : [http://www.sterlingcarbide.com/composites\\_menu.htm](http://www.sterlingcarbide.com/composites_menu.htm) (consulté le 07.01.10).
- [Ston\_95]** Stone R., Krishnamurthy K., A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 36, No. 9, pp. 985-1003, 1996.
- [Sung1 01]** Ko S. L., Lee J. K., Analysis of burr formation in drilling with a new-concept drill, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113 (2001) 392-398, 2001
- [Sung2 01]** Ko S. L., Chang J. E., Development of drill geometry for burr minimization in drilling, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 52, Issue 1, 45-48, 2001.
- [Sung 03]** Ko S. L., Chang J. E., Yang G. E., Burr minimizing scheme in drilling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 140 (2003) 237-242, 2003.
- [Surc 05]** Surcin L., Contribution à l'étude théorique et expérimentale du perçage de plaques composites minces, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier – Toulouse III, spécialité Génie Mécanique, 2005.
- [Tagu 86]** Taguchi G., *Introduction to quality engineering. Designing quality into products and processes*. Kraus International Publication, White Plains, New-York (1986).
- [Tsao 03]** Tsao C. C., Hocheng H., The effects of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43 (2003) 1087-1092, 2004.
- [Tsao 04]** Tsao C. C., Hocheng H., Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite materials, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004.
- [Tsao 06]** Tsao C. C., Hocheng H., Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite using Taguchi analysis and neural network, *International of Materials Processing Technology*, 2007.
- [Tsao 07]** Tsao C. C., Hocheng H., Effect of tool wear on delamination in drilling composite materials, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007.
- [Tsao1 08]** Tsao C.C., Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 206 (2008) 405-411, 2008.
-

**[Tsao2 08]** Tsao C.C., Experimental study of drilling composite materials with step-core drill, Materials and Design, Vol. 29 (2008) 1740-1744, 2008.

**[Vepr 99]** Veprek S., The search for novel superhard materials, Journal of Vacuum Science and Technology A, Vol. 17 (1999), issue 5, 2401-2424, 1999.

**[Wiki 10]** Clément Adler, Wikipédia – L'encyclopédie libre [en ligne], disponible sur : [http://www.bu.u-bordeaux1.fr/site/guide\\_ref\\_bib.pdf](http://www.bu.u-bordeaux1.fr/site/guide_ref_bib.pdf) (consulté le 05.05.10).

**[Zito 04]** Zitoun R., Analyse des conditions d'usinage lors de perçage de structures composites fibres longues en carbone/époxy, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier – Toulouse III spécialité Génie Mécanique, 2004.

**[Zito 10]** Zitoun R., Krishnaraj V., Collombet F., Study of drilling of composite materials and aluminium stacks, Composite Structures, Vol. 92 (2010) 1246–1255, 2010.

---

---



## **Résumé :**

Les développements récents dans le domaine de la science des matériaux sous l'impulsion notamment des industries aéronautiques, aérospatiales, navales et automobiles ont entraîné l'utilisation croissante des matériaux composites tels que les composites à fibres de carbone. Dans certaines applications pour lesquelles des matériaux comme les aciers ou les titanes étaient jusqu'à présent utilisés, apparaissent maintenant des assemblages hybrides comme l'empilage sandwich CFRP/aluminium alliant les performances associées à l'alliage d'aluminium et un gain de masse permis par l'utilisation des composites. Dans le domaine aéronautique, les structures constituées de ces multi-matériaux et assemblées mécaniquement nécessitent la réalisation de très nombreux perçages. La forte valeur ajoutée des assemblages aéronautiques, rendent l'opération de perçage fortement critique.

La mise en place d'un modèle prédictif du perçage multi-matériaux, prenant en compte la globalité des aspects qualitatifs du procédé, revêt dans ce cas un enjeu technico économique important. La modélisation proposée, basée sur la théorie des Réseaux de Neurones, permet de prédire la qualité du perçage de chaque matériau en tenant compte de l'évolution de la dégradation de l'outil. Le modèle multimatériaux est constitué de modèles mono-matériau séquencés selon l'ordre des matériaux usinés

L'établissement du modèle, ou apprentissage, est réalisé à partir d'une base de donnée de perçages mono-matériau et multi-matériaux. Ces données sont constituées de mesures des différents critères de qualité, des efforts et d'un critère caractérisant l'usure de l'outil.

Une analyse de différents algorithmes et de plusieurs architectures a permis de développer un modèle robuste et fiable. Les performances de celui-ci ont été comparées avec la méthode des plans d'expériences et ses capacités d'extrapolations ont été mises en évidence.

En fixant ces paramètres, différentes études ont également été menées pour déterminer l'erreur en sortie des modèles mono-matériau puis multi-matériaux. Les résultats montrent que la précision de ces modèles dépend des matériaux concernés. La modélisation du perçage de l'aluminium présente une erreur de prédiction plus faible que celle du CFRP. Cette erreur peut s'expliquer par la présence d'un bruit de mesure plus important sur les signaux issus du perçage de ce dernier matériau, dû à l'orientation des différents plis percés.

En utilisant une démarche similaire, un système de surveillance hors ligne du perçage multi-matériaux est ensuite proposé. Deux méthodes ont été développées: une méthode globale permettant de s'adapter à un grand nombre d'empilements et une méthode dédiée, plus précise, mais dont le domaine de validité se cantonne à une seule séquence.

## **Mots clés :**

Perçage – Multi-matériaux – CFRP - Réseaux de neurones – Modélisation – Surveillance hors ligne

## **Abstract:**

Recent developments in the field of materials science engineering under the impulse of aeronautical, aerospace, naval and automotive industries have resulted in the increasing use of composite materials such as composites carbon fiber. In some applications where materials as steel or titanium were used, appear now the hybrid assemblies as CFRP/aluminum stack combining performance associated with aluminum alloy and a mass gain allowed by the use of composites In aeronautics, structures consisting of multimaterial and assembled mechanically require the completion of many holes. The high added value of aeronautical assemblies, make the drilling highly critical.

The establishment of a predictive model of drilling of multi-materials, taking into account the whole of the qualitative aspects of the process, in this case is a significant technical and economic challenge. The proposed modeling, based on the theory of neural networks allows predicting the quality of the bore of each material taking into account the evolution of the tool wear. The model multi-material consists of single-material block models according to the order of materials machined. The building of the model, or learning, is made from a database of in mono-material and multimaterial drilling. These data consist in measurements of different quality criteria, cutting forces and a criterion characterizing the tool wear.

An analysis of different algorithms and several architectures has allowed developing a robust and reliable model. Its performance was compared with the DOE method and these capabilities of extrapolations have been highlighted. By fixing these parameters, various studies were also conducted to determine the output error of mono material models and multimaterial model. The results show that the accuracy of these models depends on the materials concerned. The modeling of drilling of aluminum has a prediction error lower than that of CFRP. This error can be explained by the presence of a measurement noise more important for the drilling of this material, due to the orientation of the various plies drilled.

Using a similar approach, an offline monitoring system of multimaterial drilling was then developed. Two methods have been developed: the overall method adapted to a large number of stack and the dedicated one, more accurate, but with a range of validity confined to a single sequence.

## **Key words :**

Drilling - Multimaterial – CFRP - Neural networks - Modeling - Offline monitoring