

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE AÉROSPATIAL
M. Sc. A.

PAR
Victor BOUTITIE

ÉTUDE DE LA QUALITÉ DES PIÈCES, DES EFFORTS DE COUPE ET DES
ÉMISSIONS DE PARTICULES LORS DU DÉTOURAGE ET DU PERÇAGE DES
COMPOSITES ÉPOXY-FIBRES DE CARBONE

MONTREAL, LE 22 FÉVRIER 2016



Victor Boutitie, 2016



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Victor Songmene, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Anh Dung Ngô, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme. Martine Dubé, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ali Bahloul, membre du jury
Chercheur IRSST

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 29 JANVIER 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier mon directeur de recherche Victor Songmene, professeur de génie mécanique, pour son soutien, son encadrement et les connaissances qu'il m'a apportées tout au long de cette recherche. Sans ses conseils, son expérience, et son soutien financier, il m'aurait été très difficile de mener à bien ce mémoire.

Je tiens également à remercier tout particulièrement Simon Joncas pour le savoir qu'il m'a transmis sur la fabrication des plaques de composites et le matériel qu'il a mis à ma disposition. Merci aussi à Éric Marcoux de m'avoir aidé et conseillé efficacement lors de ma campagne de tests.

Je suis aussi reconnaissant à tous les membres du jury d'avoir pris le temps de lire et d'évaluer ce mémoire et d'avoir évalué la soutenance.

Je tiens à remercier ma famille et mes amis qui m'ont soutenu tout au long de cette maîtrise, et sans qui tout ceci n'aurait pas été possible.

ÉTUDE DE LA QUALITÉ DES PIÈCES, DES EFFORTS DE COUPE ET DES ÉMISSIONS DE PARTICULES LORS DU DÉTOURAGE ET DU PERÇAGE DES COMPOSITES ÉPOXY-FIBRES DE CARBONE

Victor BOUTITIE

RÉSUMÉ

Dans l'industrie aéronautique, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés pour leurs propriétés physiques exceptionnelles. Les opérations d'usinage sont cependant nécessaires afin de réaliser des pièces dans de tels matériaux, en accord avec le cahier des charges. Ce sont plus particulièrement les opérations de détournage et de perçage qui prédominent. Avec celles-ci vient le problème des émissions de particules dans l'air, mais aussi la qualité de surface et la productivité qui restent importants dans l'industrie. Ainsi, dans ce mémoire nous nous intéressons à la limitation des émissions de particules tout en gardant la meilleure qualité de coupe possible lors du détournage et du perçage de matériaux composites à matrice organique.

Nous avons donc étudié l'effet de différents paramètres de coupe (géométrie de l'outil, avance, vitesse de coupe et profondeur de coupe) sur les émissions de particules et la qualité de coupe lors du détournage et du perçage d'un stratifié carbone/époxy. Les émissions étudiées se composent de particules inférieures à $2,5\text{ }\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) et particulièrement de particules comprises entre 10 et 400 nm. Les variables des émissions que nous avons prises en compte sont la concentration en nombre, la concentration en surface spécifique et la concentration en masse.

Le matériau choisi pour cette étude est un stratifié de carbone-époxy utilisé en aéronautique (CYCOM 5320-1), de trois épaisseurs différentes (2, 4 et 6 mm) et avec une orientation de fibres de 0/90 degrés. Pour chaque opération, deux types d'outils ont été testés. Pour le détournage une fraise Onsrud 68-010 et une Guhring 3870. Pour le perçage, un foret Onsrud 85-819 et un foret Guhring de série 160.

Il a été trouvé qu'effectivement, tous ces paramètres agissent sur les différentes valeurs mesurées. Ainsi afin d'obtenir le meilleur compromis entre la qualité des pièces, la productivité et les émissions de poussières, les meilleurs outils et paramètres ont été recommandés pour chacune des opérations analysées : détournage et perçage.

Mots clés : composite, carbone-époxy, détournage, perçage, particules, émission.

STUDY OF PART QUALITY, CUTTING FORCES AND PARTICLES EMISSIONS WHEN ROUTING AND DRILLING EPOXY-CARBON FIBRE COMPOSITE

Victor BOUTITIE

ABSTRACT

In the Aérospatiale industry, composite materials are increasingly used for their exceptional physical properties. However, machining operations are required in order to shape parts in these materials, which fulfil specifications. There are two operations that predominate: routing and drilling. With these processes, comes the problem of dust emission, cut quality and productivity which are very important in industry. Thus in this dissertation, we look into the limitation of these particles while keeping a consistent finish when routing or drilling organic matrix composites.

So we have studied the effect of different cutting parameters (tool geometry, feed, cutting speed, depth of cut) on particles emissions and part quality while routing and drilling a carbon-epoxy laminate. The emissions are composed of particles less than 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$) and particularly of particles between 10 and 400 nm. For dust emissions, we looked especially at the concentration in number, in specific area and in mass.

For this study we chose a carbon-epoxy laminate used in aeronautics (CYCOM 5320-1), with three different thickness (2, 4 and 6 mm) and with an orientation of 0/90 degrees for fibers. For each operation, two types of tools are tested. For routing, a mill Onsrud 68-010 and a Guhring 3870. For drilling, a drill Onsrud 85-819 and a Guhring 160 series.

It has been found that all of these parameters have a direct impact on the measured values. In order to machine parts with the best compromise between parts quality, productivity and dust emission, the best tools and parameters are recommended for each machining operations: routing and drilling

Keywords: composite, carbon-epoxy, routing, drilling, particles, emission.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Impact des particules sur la santé et l'environnement	4
1.2.1 Caractérisation des particules	4
1.2.2 Les composites à matrice métallique	5
1.2.3 Les composites à matrice organique	6
1.2.4 Les fluides de coupe.....	6
1.3 Les émissions de particules.....	7
1.3.1 Les appareils de mesure	7
1.3.2 Le tournage	9
1.3.3 Le fraisage.....	10
1.3.4 Le perçage.....	10
1.3.5 Le détournage.....	11
1.4 Les bavures et l'état de surface.....	12
1.5 Les efforts de coupe	14
1.6 Commentaires	15
1.7 Conclusion	16
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL.....	19
2.1 Introduction.....	19
2.2 Choix du matériau.....	19
2.3 Choix des outils	21
2.3.1 Détournage.....	22
2.3.2 Perçage.....	22
2.4 Définition des paramètres et plan d'expérience.....	23
2.5 Description du matériel.....	26
2.5.1 Machine.....	26
2.5.2 Mesure des particules.....	26
2.5.3 Mesure des défauts.....	26
2.5.4 Mesure des forces de coupe	27
2.6 Mise en place des tests.....	27
2.7 Précision des mesures	30
CHAPITRE 3 ÉMISSIONS LORS DU DÉTOURNAGE	31
3.1 Introduction.....	31
3.2 L'outil ($a = 0,02$ mm/tr, $V_c = 50$ m/min et $e = 2$ mm)	31
3.3 L'avance ($V_c = 300$ m/min, $e = 4$ mm)	33
3.4 La vitesse de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $e = 4$ mm)	34
3.5 La profondeur de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $V_c = 300$ m/min)	35

3.6	Dispersion des particules	37
3.6.1	Concentration en nombre.....	37
3.6.1.1	Particules PM _{2,5}	37
3.6.1.2	Particules de taille 10 à 400 nm	38
3.6.2	Concentration en surface.....	39
3.6.2.1	Particules PM _{2,5}	39
3.6.2.2	Particules de taille 10 à 400 nm	39
3.6.3	Concentration en masse	40
3.6.3.1	Particules PM _{2,5}	40
3.6.3.2	Particules de taille 10 à 400 nm	41
3.7	Conclusion	43
CHAPITRE 4 ÉMISSIONS LORS DU PERÇAGE.....		45
4.1	Introduction.....	45
4.2	L'outil (a = 0,02 mm/tr, Vc = 50 m/min et e = 2 mm)	45
4.3	L'avance (Vc = 300 m/min, e = 4 mm)	47
4.4	La vitesse de coupe (a = 0,08 mm/tr, e = 4 mm)	48
4.5	La profondeur de coupe (a = 0,08 mm/tr, Vc = 300 m/min)	50
4.6	Dispersion des particules	51
4.6.1	Concentration en nombre.....	51
4.6.1.1	Particules PM _{2,5}	51
4.6.1.2	Particules de taille 10 à 400 nm	52
4.6.2	Concentration en surface.....	53
4.6.2.1	Particules PM _{2,5}	53
4.6.2.2	Particules de taille 10 à 400 nm	54
4.6.3	Concentration en masse	54
4.6.3.1	Particules PM _{2,5}	54
4.6.3.2	Particules de taille 10 à 400 nm	55
4.7	Conclusion	56
CHAPITRE 5 QUALITÉ DE COUPE		59
5.1	Introduction.....	59
5.2	Les forces de coupe.....	59
5.2.1	Détourage.....	60
5.2.1.1	L'outil (a = 0,02 mm/tr, Vc = 50 m/min et e = 2 mm)	60
5.2.1.2	L'avance (Vc = 300 m/min, e = 4 mm)	61
5.2.1.3	La vitesse de coupe (a = 0,08 mm/tr, e = 4 mm)	62
5.2.1.4	La profondeur de coupe (a = 0,08 mm/tr, Vc = 300 m/min)	63
5.2.2	Perçage.....	64
5.2.2.1	L'outil (a = 0,02 mm/tr, Vc = 50 m/min et e = 2 mm)	64
5.2.2.2	L'avance (Vc = 300 m/min, e = 4 mm)	65
5.2.2.3	La vitesse de coupe (a = 0,08 mm/tr, e = 4 mm)	66
5.2.2.4	La profondeur de coupe (a = 0,08 mm/tr, Vc = 300 m/min)	67
5.3	Défauts de coupe.....	68
5.3.1	Détourage.....	69

5.3.1.1	L'outil ($a = 0,02$ mm/tr, $V_c = 50$ m/min et $e = 2$ mm)	69
5.3.1.2	L'avance ($V_c = 300$ m/min, $e = 4$ mm)	70
5.3.1.3	La vitesse de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $e = 4$ mm)	70
5.3.1.4	La profondeur de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $V_c = 300$ m/min)	71
5.3.2	Perçage	72
5.3.2.1	L'outil ($a = 0,02$ mm/tr, $V_c = 50$ m/min et $e = 2$ mm)	72
5.3.2.2	L'avance ($V_c = 300$ m/min, $e = 4$ mm)	73
5.3.2.3	La vitesse de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $e = 4$ mm)	74
5.3.2.4	La profondeur de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $V_c = 300$ m/min)	75
5.4	Conclusion	76
CONCLUSION		79
RECOMMANDATIONS		83
ANNEXE I GRAPHIQUES COMPLÉMENTAIRES DES CONCENTRATIONS EN SURFACE ET EN MASSE POUR LE DÉTOURAGE		85
ANNEXE II GRAPHIQUES COMPLÉMENTAIRES DES CONCENTRATIONS EN SURFACE ET EN MASSE POUR LE PERÇAGE		91
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		96

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2-1	Caractéristiques du pré-imprégné20
Tableau 2-2	Caractéristiques géométriques des outils21
Tableau 2-3	Paramètres et niveau pour les essais24
Tableau 2-4	Plan d'expérience25

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2-1	Schéma du montage pour la réalisation des plaques de composite20
Figure 2-2	Photo de la fraise Onsrud 68-010 à gauche et Guhring 3870 à droite22
Figure 2-3	Photo du foret Onsrud 85-819 à gauche et Guhring série 160 à droite23
Figure 2-4	Schéma des plaques pour le détournage et nomenclature.....28
Figure 2-5	Schéma des plaques pour le perçage et nomenclature29
Figure 3-1	Concentration en nombre de particules en fonction de l'outil pour le détournage.....32
Figure 3-2	Concentration en nombre de particules en fonction de l'outil pour le détournage33
Figure 3-3	Concentration en nombre de particules en fonction de la vitesse de coupe pour le détournage35
Figure 3-4	Concentration en nombre de particules en fonction de la profondeur de coupe pour le détournage36
Figure 3-5	Dispersion de la concentration en nombre de particules ($PM_{2,5}$) pour le détournage.....37
Figure 3-6	Dispersion de la concentration en nombre de particules (10 – 400 nm) pour le détournage38
Figure 3-7	Dispersion de la concentration en surface des particules ($PM_{2,5}$) pour le détournage.....39
Figure 3-8	Dispersion de la concentration en surface des particules (10 - 400 nm) pour le détournage40
Figure 3-9	Dispersion de la concentration en masse des particules ($PM_{2,5}$) pour le détournage.....41
Figure 3-10	Dispersion de la concentration en masse des particules (10 - 400 nm) pour le détournage42

Figure 4-1	Concentration en nombre des particules en fonction de l'outil pour le perçage.....	46
Figure 4-2	Concentration en nombre des particules en fonction de l'avance pour le perçage.....	47
Figure 4-3	Concentration en nombre de particules en fonction de la vitesse de coupe pour le perçage.....	49
Figure 4-4	Concentration en nombre de particules en fonction de la profondeur de coupe pour le perçage.....	50
Figure 4-5	Dispersion de la concentration en nombre des particules (PM _{2,5}) pour le perçage.....	52
Figure 4-6	Dispersion de la concentration en nombre des particules (10 - 400 nm) pour le perçage	53
Figure 4-7	Dispersion de la concentration en surface des particules (PM _{2,5}) pour le perçage.....	53
Figure 4-8	Dispersion de la concentration en surface des particules (10 - 400 nm) pour le perçage	54
Figure 4-9	Dispersion de la concentration en masse des particules (PM _{2,5}) pour le perçage.....	55
Figure 4-10	Dispersion de la concentration en masse des particules (10 - 400 nm) pour le perçage	56
Figure 5-1	Graphique des forces de coupe lors du détournage	59
Figure 5-2	Graphique des forces de coupe lors du perçage.....	60
Figure 5-3	Forces de coupe en fonction de l'outil pour le détournage	61
Figure 5-4	Forces de coupe en fonction de l'avance pour le détournage.....	62
Figure 5-5	Forces de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour le détournage.....	63
Figure 5-6	Forces de coupe en fonction de la profondeur de coupe pour le détournage.....	64
Figure 5-7	Forces de coupe en fonction de l'outil pour le perçage.....	65
Figure 5-8	Forces de coupe en fonction de l'avance pour le perçage	66

Figure 5-9	Forces de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour le perçage	67
Figure 5-10	Forces de coupe en fonction de la profondeur de coupe pour le perçage	68
Figure 5-11	Photos des mesures des défauts : à gauche le détournage et à droite le perçage	68
Figure 5-12	Défauts de coupe en fonction de l'outil pour le détournage.....	69
Figure 5-13	Défauts de coupe en fonction de l'avance pour le détournage	70
Figure 5-14	Défauts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour le détournage.....	71
Figure 5-15	Défauts de coupe en fonction de la profondeur de coupe pour le détournage.....	72
Figure 5-16	Défauts de coupe en fonction de l'outil pour le perçage	73
Figure 5-17	Défauts de coupe en fonction de l'avance pour le perçage	74
Figure 5-18	Défauts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour le perçage	74
Figure 5-19	Défauts de coupe en fonction de la profondeur de coupe pour le perçage	75

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

MMC	Composite à Matrice Métallique
CFRP	Composite à matrice Plastique Renforcé de Fibres
CNT	Nanotubes de Carbone
CNF	Nanofibres de Carbone
APS	Granulométrie de particules d'aérosol (<i>Aerosol Particle Sizer</i>)
SMPS	Scanner de mobilité des particules (<i>Scanning Mobility Particle Sizer</i>)
PCD	Diamant Polycristallin
PM _{2,5}	Particules de 2,5 µm de diamètre et moins

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

F_d	Facteur de délamination
F_c	Facteur de fibres non coupées
D	Diamètre nominal du trou (mm)
D_{max}	Diamètre maximal des délaminations (mm)
D_{min}	Diamètre minimal délimité par les fibres non coupées (mm)
a	Avance (mm/tr)
e	Profondeur de coupe (mm)
V_c	Vitesse de coupe (m/min)
F_x	Force selon l'axe X de la machine (N)
F_y	Force selon l'axe Y de la machine (N)
F_z	Force selon l'axe Z de la machine (N)
nm	Nanomètre (unité de longueur)
μm	Micromètre (unité de longueur)
mm	Millimètre (unité de longueur)
m	Mètre (unité de longueur)
cm^3	Centimètre cube (unité de volume)
μm^2	Micromètre carré (unité de surface)
nm^2	Nanomètre carré (unité de surface)
mg	Milligramme (unité de masse)
μg	Microgramme (unité de masse)
N	Newton (unité de force)

INTRODUCTION

Dans l'industrie aéronautique, lors de la fabrication de pièces mécaniques, les tolérances demandées aux fournisseurs sont de plus en plus serrées. Ainsi, la mise en forme de ces pièces passe presque tout le temps par une étape d'usinage permettant d'être en accord avec le cahier des charges. Il a été remarqué au fil des années que des poussières sont émises lors de ce processus. Les chercheurs ont noté aussi que ces particules présentent des problèmes pour la santé des personnes travaillant à proximité, mais aussi pour l'environnement. Il s'est donc fait sentir le besoin d'étudier plus précisément les phénomènes et les conséquences en jeu lors de cet usinage.

Avec l'avancée technologique, les appareils de mesures sont devenus plus précis, ce qui nous permet de détecter des particules fines (de l'ordre du micromètre) et ultrafines (de l'ordre du nanomètre). Du fait de leur taille, ces particules peuvent entrer très profondément dans nos poumons ce qui les rend potentiellement dangereuses. On se pose donc la question : comment peut-on limiter au maximum ces particules émises tout en gardant une finition adéquate des pièces en matériaux composites ?

Pour remplir au mieux notre objectif de réduire les poussières tout en limitant les défauts de coupe, nous avons dû poser quelques limites. Il est donc décidé de n'étudier que les deux procédés les plus utilisés : le détournage et le perçage. C'est plus précisément le détournage et le perçage à sec qui seront l'objet de cette recherche à cause des problèmes écologiques que posent les fluides de coupe, mais aussi pour des raisons économiques. De plus, on se concentrera ici sur les matériaux composites à matrice organique, qui sont de plus en plus utilisés dans l'aéronautique. Ce sera plus précisément le comportement (lors de l'usinage) des composites à renforts en fibre de carbone qui sera analysé ici. Le travail réalisé lors de ce mémoire n'a pas été réalisé par des professionnels de la santé et sécurité au travail, ce travail est donc à but exploratoire afin de mettre en évidence les évolutions des émissions lors du perçage et du détournage de matériaux composites époxy – fibre de carbone.

On sait déjà que les paramètres de coupe, la géométrie de l'outil, le revêtement de l'outil et le matériau usiné jouent un rôle fondamental sur la quantité de poussières émises, mais aussi sur la qualité de la surface usinée. Par contre, on suppose qu'une augmentation de ces différents paramètres va augmenter le nombre de particules émises dans l'air, mais ils vont aussi améliorer la qualité de la surface usinée. L'objectif ici est de déterminer les paramètres offrant le meilleur compromis entre émissions de particules réduites et haute qualité de coupe des stratifiés en fibre de carbone.

Ce mémoire s'organise en plusieurs chapitres en commençant par une revue de littérature, suivie de la méthodologie adoptée pour les tests. Ensuite, nous analyserons et commenterons les résultats obtenus concernant les poussières émises lors du détournage, lors du perçage et la qualité de coupe pour en tenter de répondre au mieux à notre problème. Enfin, on conclura ce mémoire et des recommandations seront faites pour de futures recherches dans ce domaine.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Les articles présentés dans cette revue de littérature ont permis de bien appréhender le problème des émissions de particules lors de l'usinage suivant les différentes techniques. Cela permet aussi de faire un état de l'art des recherches qui ont déjà été menées sur les émissions de poussières en usinage.

Les particules visibles à l'œil nu ne sont pas les plus dangereuses, ce sont celles de taille micrométrique (ou fines, < 20 micromètres) et nanométrique (ou ultrafines ; < 100 nanomètre) qui représentent le plus de risques pour la santé et l'environnement. Elles sont d'autant plus dangereuses qu'on ne les voit pas, on a donc tendance à ignorer leur existence. Les articles présentés ici se concentrent principalement sur l'usinage à sec en raison de ses avantages économiques, environnementaux et sur la santé des employés. En effet, l'usinage à sec diminue les petites particules (Zaghbani, *et al.*, 2009), tout en éliminant un fluide potentiellement dangereux pour la santé.

Ainsi quel que soit le procédé d'usinage utilisé, il y a production de poussières (particules de taille inférieure à 20 micromètres (μm)). Il a donc été décidé de rechercher les paramètres de coupe permettant de réduire au maximum ces émissions. Plusieurs études cherchent à mettre en relation la quantité de poussières dans l'air avec l'influence de différents facteurs comme les matériaux, les conditions de coupe, les paramètres de coupe, la géométrie de l'outil et son revêtement. D'autres ont pour but de quantifier l'impact de certains paramètres de coupe sur les bavures et la délamination potentielle des matériaux.

Les deux livres de cette revue de littérature : (Cordebois and Colombié, 2003 ; El-Hofy, 2007) présentent l'usinage d'un point de vue général. Il y est présenté les différents procédés

d'usinage qui existent, les phénomènes qui entrent en jeu dans la qualité finale de la pièce et le mode de formation des copeaux ainsi que les énergies de coupe en fonction des procédés.

L'étude australienne (Schutz and Morris, 2013) offre un point de vue général sur les émissions de particules lors de l'usinage de différents matériaux. Elle a été réalisée afin de montrer que la quantité de poussières émises lors des différents procédés n'est pas négligeable et que cela peut représenter un danger pour l'homme et l'environnement. De plus, cette étude permet d'avoir une base de données sur le type et la quantité de particules émises en fonction du procédé d'usinage utilisé et du matériau.

1.2 Impact des particules sur la santé et l'environnement

1.2.1 Caractérisation des particules

Les poussières étudiées dans les différents articles sont considérées comme étant des particules de moins de 20 μm de diamètre. Les particules fines étant celles de diamètre inférieur à 2,5 μm (Zaghbani, Songmene and Khettabi, 2009) et les ultrafines, celles de diamètre inférieur à 100 nanomètres (nm). Il est à noter que dans des conditions normales, il y a une concentration de particules dans l'air d'environ 2000 à 3000 particules/ cm^3 ($1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ mL}$) (Schutz and Morris, 2013).

Lorsque l'on parle de particules, il y a d'autres grandeurs qui entrent en compte. Premièrement, le diamètre dont on parle est le diamètre aérodynamique (Schutz and Morris, 2013) qui correspond à l'inertie de la particule et son mode de sédimentation. Cette dimension permet de déterminer comment se propagent ces poussières dans l'air ainsi que le temps qu'elles passent en suspension. En effet, c'est dans l'air que ces aérosols représentent un danger pour l'homme, car ils peuvent être inhalés facilement.

Deuxièmement, il existe différentes concentrations qui peuvent être mesurées : la concentration en masse, celle en nombre et celle en surface spécifique. Chacune des trois a ses avantages et ses inconvénients, et il est difficile de trouver laquelle des trois représente le

mieux les dangers pour l'homme et l'environnement. Les deux dernières sont intéressantes, car elles apportent plus de précisions sur les émissions et leur impact biologique sur l'homme. De plus, il a été mentionné que la toxicité des particules peut être quantifiée par leur composition, mais aussi grâce à leur surface spécifique, leur granulométrie et leur solubilité (Ostiguy, 2009 ; Schutz and Morris, 2013). En effet, c'est la surface spécifique qui quantifie l'interaction d'une particule avec une autre surface en contact. Concernant la concentration en nombre, cela apporte une autre information sur la répartition des particules, car pour une même masse, il peut y avoir peu de grandes particules (plusieurs micromètres), mais beaucoup de très petites (quelques nanomètres) qui représentent un plus grand risque.

Enfin, il est important de savoir qu'à masse égale, les nanoparticules sont beaucoup plus toxiques que les particules de plus grande dimension, mais d'une même composition chimique (Ostiguy, 2009). Cela est dû au fait qu'à de telles tailles, les comportements chimiques et physiques des particules sont différents et peuvent changer : en réagissant plus facilement ou plus vite avec son environnement. De plus, on ne connaît pas encore bien leur impact sur la santé ni leurs réactions à l'intérieur du corps humain, ceci crée donc une méfiance accrue envers ces poussières.

1.2.2 Les composites à matrice métallique

Lors de la mise en forme de matériaux composites à matrice métallique (MMC), il est généré plus de poussières que lors de l'usinage des métaux classiques. Cela est dû au fait que ces MMC comprennent des renforts de taille ultrafine et fine dans leur matrice, qui sont libérés lors de l'usinage et qui entraînent avec eux des particules de l'outil et de la matrice (Kremer and El Mansori, 2009).

Un autre problème lié aux renforts contenus dans ces matériaux est qu'ils ont tendance à user prématurément les outils de coupe (Basavarajappa, *et al.*, 2008 ; Songmene, *et al.*, 2013). Ceci a deux conséquences majeures : d'une part, la finition de la pièce sera moins bonne, et d'autre part les émissions de particules vont augmenter. Pour remédier à ce problème, on

peut utiliser des outils avec des revêtements (diamant, carbure de titane), ceux-ci sont très coûteux, mais peuvent quand même être rentables, (Songmene, *et al.*, 2012) car on peut usiner beaucoup plus de pièces avec un même outil avant de devoir le changer.

1.2.3 Les composites à matrice organique

Les matériaux composites, du fait de leur composition, possèdent souvent des nanomatériaux. Lorsque l'on souhaite les mettre en forme, il est donc inévitable d'en libérer un certain nombre dans l'air. Le problème est que non seulement, à cause de leur taille, les particules entrent au plus profond de nos poumons : les bronchioles ; mais aussi du fait de leur composition l'impact sur la santé est très négatif (Ostiguy, 2009 ; Schutz and Morris, 2013).

Les matériaux composites à matrice organique les plus utilisés en industrie sont les composites avec renforts en fibre (ou tube) de carbone, en fibre d'aramide ou en fibre de verre. Les particules que l'on retrouve dans l'air lors de l'usinage de composites à matrice organique sont présentées dans (Schutz and Morris, 2013) : les principaux étant les nanotubes de carbone (CNT) et les nano fibres de carbone (CNF). Ce sont en effet les renforts qui représentent les particules émises les plus fines. Plus l'énergie de coupe est grande, plus les émissions seront importantes (Schutz and Morris, 2013).

Les procédés d'usinage émettant le plus de poussières concernant les matériaux composites sont le perçage et le détournage. Il s'agit aussi des méthodes de mise en forme les plus utilisées, ce qui rend les avancées de la recherche sur le sujet très bénéfiques.

1.2.4 Les fluides de coupe

Dans l'article de (Sutherland, *et al.*, 2000), les auteurs mentionnent que les fluides de coupe sont très utilisés dans l'industrie afin de diminuer l'usure de l'outil, les forces de coupe, la température dans la zone de coupe, mais aussi afin d'améliorer la finition du matériau.

Cependant, les fluides d'usinage possèdent des inconvénients importants. En effet, ces fluides sont généralement très polluants et nocifs pour la santé et l'environnement. Lors de l'usinage, la température de la zone de coupe et la rotation de l'outil (ou de la pièce) vaporisent et atomisent ce liquide tout autour en de très fines gouttes qui peuvent être inhalées (Sutherland, Kulur, King and von Turkovich, 2000). Cela devient donc un problème non seulement pour la sécurité des travailleurs à proximité, mais aussi pour l'environnement du fait du caractère toxique du fluide. Ils sont plus toxiques que les particules de métal seules, mais une exposition à ces deux types d'aérosol mélangés augmente encore plus les chances de contracter un cancer de l'œsophage, des poumons, de l'estomac, du colon...

Un autre inconvénient de ce type d'usinage est le fait que le nombre de particules émises est plus important que pendant l'usinage à sec. De plus, le fluide se mélange aux copeaux ; il est donc plus difficile et coûteux de les recycler.

Enfin, les prix du fluide et de son recyclage représentent une partie non négligeable du coût de la pièce. Afin de rester compétitif au niveau du prix des pièces, une entreprise a donc plus intérêt à usiner à sec (à capacité de coupe égale). Les enjeux dans ce domaine sont importants, il est donc très intéressant pour l'avancée des techniques dans ce domaine de réaliser des recherches sur la qualité des pièces usinées en fonction de la quantité de particules émises dans l'air.

1.3 Les émissions de particules

1.3.1 Les appareils de mesure

Dans la majorité des cas, les émissions de particules sont quantifiées par la concentration en masse (mg/m^3) dans un espace limité autour de la zone d'usinage. Cet espace de plusieurs litres permet d'avoir des mesures plus précises, car les particules se diffusent moins dans l'environnement. Il faut cependant faire attention à quelques détails lors de la réalisation des mesures, car il a été reporté (Schutz and Morris, 2013) que les émissions d'arrière-plan peuvent complètement fausser les mesures sur le procédé d'usinage étudié.

L'appareil le plus utilisé est le Dusttrack (Balout, *et al.*, 2007 ; Khettabi, *et al.*, 2007 ; Khettabi, *et al.*, 2010 ; Songmene, *et al.*, 2008a ; Songmene, *et al.*, 2008b) qui estime la masse des particules grâce à un laser et à la masse volumique du matériau usiné. Pour cela, il aspire un certain débit d'air connu et réglable, qui entraîne les particules devant un faisceau laser pour estimer leur taille. Une fois la taille estimée, il peut en déduire le volume en considérant que les particules sont de forme sphérique. Enfin, grâce à la masse volumique du matériau, la masse de poussière nous est retournée. Cet appareil a comme avantage d'être portable et que même si les particules s'agglomèrent, la mesure reste relativement correcte. Cependant, dû à son approximation sur le volume d'une particule, des erreurs peuvent être engendrées lors de la mesure.

Deux autres appareils sont souvent utilisés dans la littérature : l'*Aerosol Particle Sizer* (APS) pour les particules de 0,5 μm à 20 μm (Khettabi, Songmene and Masounave, 2010 ; Khettabi, *et al.*, 2010 ; Zaghbani, Songmene and Khettabi, 2009) et le *Scanning Mobility Particle Sizer* (SMPS) pour les particules de 2,5 nm à 1000 nm (Djebara, *et al.*, 2012 ; Khettabi, Songmene and Masounave, 2010 ; Khettabi, Songmene, Zaghbani and Masounave, 2010 ; Zaghbani, Songmene and Khettabi, 2009). Ils ont tous les deux l'avantage de mesurer trois concentrations différentes : la concentration en masse, en nombre et en surface spécifique, ce qui paraît important, car les exigences des personnes qui utilisent ces résultats pour quantifier l'impact de ces particules sont différentes. En effet, on ne sait pas encore bien quelle concentration représente le mieux la toxicité des particules sur le corps. Il faut donc être le plus exhaustif que l'on peut.

L'APS permet de mesurer les concentrations de particules de taille fine alors que le SMPS mesure celles de taille ultrafine. L'APS accélère les particules puis détermine leur taux d'accélération qui est directement en relation avec la taille de la particule. Ensuite, les particules passent devant des lasers afin de déterminer leur surface spécifique et leur taille. Par contre, pour les particules inférieures à 0,7 μm sa précision diminue et il vaut mieux utiliser un SMPS. Ce dernier détermine la taille des particules grâce à une technique de

détection de la mobilité électrique (diamètre électrique). Pour cela, l'appareil commence par envoyer une charge électrique à la particule, puis il évalue sa capacité à passer à travers des champs électriques, ce qui détermine les différentes concentrations du nuage de poussière émis dans l'environnement.

1.3.2 Le tournage

Dans les articles portants sur le tournage (Khettabi, Songmene and Masounave, 2010 ; Khettabi, Songmene, Zaghbani and Masounave, 2010 ; Songmene, Khettabi and Kouam, 2012), il est mis en évidence deux plages de vitesses de coupe pour lesquelles les émissions sont faibles. Il s'agit des très faibles et très hautes vitesses de coupe. Cependant uniquement les grandes vitesses de coupe sont conseillées afin de garder une productivité élevée. Ce phénomène est dû au fait que lorsque la vitesse de coupe augmente (à partir de 200 à 300 m/min), les copeaux sont de taille de plus en plus petite. Cela réduit donc la surface de frottement entre le copeau et l'outil, mais aussi la déformation plastique du copeau. Or ce sont ces deux paramètres qui ont l'influence la plus importante sur l'émission des particules.

De plus, il est conseillé dans les articles (Songmene, Khettabi and Kouam, 2012) et (Khettabi, Songmene and Masounave, 2010) d'avoir un angle de coupe proche de 0° afin de limiter le nombre de particules émises, mais aussi pour faciliter l'évacuation des copeaux. En effet, dans certains cas un angle de coupe négatif est meilleur du point de vue des aérosols émis, mais il empêche les copeaux de s'évacuer ce qui peut générer un pic dans les émissions de poussières. Un grand angle de coupe permet cependant de diminuer les forces d'usinage.

L'angle d'incidence à privilégier est de 90° selon les articles (Khettabi, Songmene and Masounave, 2007 ; Songmene, Khettabi and Kouam, 2012). En effet, c'est pour un tel angle d'incidence que l'on remarque un minimum d'émissions. Dans l'article (Khettabi, Songmene and Masounave, 2007), il est présenté un modèle d'émission de particules en fonction du matériau et des paramètres de coupe qui permet de prédire la quantité de particules émises dans le cas du tournage des métaux.

Lors du tournage de composites à matrice métallique (Kremer and El Mansori, 2009), il est important de noter que plus le taux de renfort est grand, plus l'usure de l'outil sera rapide et les concentrations des poussières émises importantes.

1.3.3 Le fraisage

Concernant le fraisage, les constatations sont similaires à celles faites en tournage (Zaghbani, Songmene and Khettabi, 2009). C'est-à-dire que les émissions de particules diminuent lorsque la vitesse de coupe augmente au-dessus d'une certaine valeur (200 à 300 m/min). De plus, il est intéressant de voir que le fraisage lubrifié a été comparé au fraisage à sec. On remarque donc que lors de la lubrification, le nombre de particules émises inférieures à 1 μm sont plus importantes. Or ce sont celles-ci qui sont justement les plus dangereuses. Globalement, le fraisage avec fluide permet de diminuer la quantité de particules émises et d'augmenter leur taille (Bello, *et al.*, 2009).

Plus le copeau est comprimé et déformé lors de l'enlèvement de matière, plus il y aura production de poussières qui sont dues à la déformation plastique que subit le copeau.

1.3.4 Le perçage

Le perçage est le procédé d'usinage le plus utilisé sur les pièces usinées en industrie. L'étude des émissions de poussières pour ce procédé avec pour but de les réduire a donc un fort intérêt. Les articles (Balout, Songmene and Masounave, 2007 ; Songmene, Balout and Masounave, 2008a ; Songmene, Balout and Masounave, 2008b) mettent en évidence une courbe de tendance des émissions de particules, quelles que soient les conditions. Elle est constituée comme suit : elle commence avec un très haut pic correspondant à l'entrée du foret dans le matériau (les deux premiers millimètres), puis elle retombe à une valeur plus faible qui reste constante jusqu'à la fin de l'opération.

Il est aussi montré dans (Songmene, Khettabi and Kouam, 2012) que pour percer une surface brute, la meilleure solution consiste à utiliser une haute vitesse de rotation de la mèche et une

faible avance. Le fait est que l'on peut aussi percer une surface après l'avoir préparée avec un pré-trou ou un pré-fraisage (Songmene, Balout and Masounave, 2008a ; Songmene, Balout and Masounave, 2008b). Un pré-trou donne donc de meilleurs résultats quant à la quantité de particules émises. Une autre technique existe : elle consiste à percer avec une vitesse de rotation variable. De faibles émissions comparables à un pré-trou, voire plus faibles, ont été enregistrées dans ce cas.

Dans l'article s'intéressant aux températures lors de l'usinage (Balout, Songmene and Masounave, 2007), il est exposé que plus la température de la pièce est faible, plus les émissions sont réduites : jusqu'à 95 %. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que le froid rend les matériaux plus fragiles. Inversement, les émissions augmentent fortement avec la température, mais les forces de coupe sont plus faibles. Le désavantage notable d'usiner une pièce qui a été refroidie est l'augmentation des forces de coupes. Il faut donc une puissance plus importante pour percer un même trou et les outils ont tendance à s'user plus rapidement à cause des forces de coupe accrues.

1.3.5 Le détournage

Assez peu d'articles ont été trouvés sur les émissions de particules lors du détournage de matériaux composites à matrice organique. La plus grande partie traite des dommages engendrés sur les pièces lors de ce procédé.

Il est mis en évidence (Haddad, *et al.*, 2014) que la formation des copeaux lors du détournage des matériaux composites à matrice organique est très différente du cas des métaux. Les différents revêtements des outils n'ont pas l'air d'avoir d'importants effets sur la quantité de poussières émises, par contre la géométrie de l'outil a beaucoup d'influence. Des outils avec flutes émettent plus de particules que ceux avec « bavures ». De plus, une augmentation de l'épaisseur des copeaux permet de diminuer le nombre de particules émises.

Il semblerait aussi qu'une combinaison entre une faible vitesse de coupe (150 m/min) et une grande vitesse d'avance (1500 mm/min) permet d'obtenir un minimum de particules émises (Haddad, Zitoune, Eyma and Castanie, 2014). Cependant, la seconde configuration émettant le moins de particules est une haute avance et une haute vitesse de coupe (250 m/min). Lors de l'usinage à très grande vitesse, la tendance semble s'inverser pour l'avance : une plus faible avance entraîne une baisse dans les émissions de particules.

1.4 Les bavures et l'état de surface

L'article de (Aurich, *et al.*, 2009) présente les bavures et les phénomènes qui les influencent. Une bavure apparaît généralement lorsqu'un matériau pénètre dans un autre en générant une déformation plastique. Cependant, il n'existe pas de définition commune à tout le monde pour le moment : chaque industrie utilise sa propre définition ce qui peut compliquer les relations fournisseur-client lors de la définition du cahier des charges d'une pièce.

Le problème qui se pose avec les matériaux composites à matrice organique est le fait que généralement, ils sont fabriqués couche par couche. Ainsi, ils ont tendance à se délaminer lors de leur usinage. Il est donc très important de maîtriser les différents phénomènes influençant la délamination. Un autre problème se pose lorsque les fibres sortent de la matrice lors de l'usinage et ont tendance à plier sous la force de l'outil plutôt qu'à être coupées, ce qui provoque des imperfections de coupe.

L'apparition de bavures et leur enlèvement peuvent représenter jusqu'à 15 % du prix d'une pièce (Aurich, Dornfeld, Arrazola, Franke, Leitz and Min, 2009). L'étude de leur formation et leur limitation ont donc un enjeu économique très important et rentable pour les industriels. En effet, en plus de coûter cher, les bavures demandent du temps supplémentaire pour réaliser une pièce conforme aux exigences.

Lors du perçage, il y a le plus souvent une bavure à l'entrée du foret et une à la sortie. Dans le cas des composites, l'entrée du foret dans la matière peut générer un arrachement des

fibres de la première couche. Lors de la sortie de l'outil, les forces présentes peuvent générer un décollement des dernières couches. Afin d'éviter ce phénomène, il est conseillé de percer avec une faible avance et une grande vitesse de rotation (Gaitonde, *et al.*, 2008 ; Haddad, Zitoune, Eyma and Castanie, 2014 ; Sheikh-ahmad, *et al.*, 2012).

Dans la composition des matériaux composites, il est important de savoir que la matrice et les fibres n'ont pas les mêmes résistances physiques, thermiques et chimiques. Lors de l'usinage de composites à matrice organique, la délamination est due au fait que les fibres (renforts) sont plus résistantes que la matrice ce qui provoque un arrachement des fibres hors de celle-ci. Cependant, on peut aussi assister à une importante dégradation de la matrice lorsque la température de coupe est trop importante. En effet, les fibres sont généralement très résistantes à la température, ce qui n'est pas toujours le cas de la matrice qui peut être brûlée (Haddad, Zitoune, Eyma and Castanie, 2014). La température augmente dans la zone de coupe, plus la distance à usiner est importante et cela détériore la matrice.

De plus, avoir des outils en très bon état permet de limiter la délamination des composites à matrice organique. Pour cela, il faut évaluer la vitesse d'usure de l'outil afin de le changer au bon moment pour garder un fini de surface conforme aux exigences, mais aussi pour être économiquement intéressant (Faraz, *et al.*, 2011 ; Pramanik and Littlefair, 2014 ; Tian, 2014).

L'outil aussi a un impact non négligeable sur la qualité de l'usinage (Davim and Reis, 2003) : si l'on n'utilise pas le bon outil, on risque de produire des pièces avec de plus grandes bavures que souhaité. Il est donc important de choisir des outils avec une composition et une géométrie adaptées au procédé utilisé et au matériau usiné.

Les bavures sont souvent plus importantes lorsque l'outil sort de la pièce, car il crée une déformation plastique du matériau, qui s'étend dans la direction offrant le moins de résistance : absence de matière (Aurich, Dornfeld, Arrazola, Franke, Leitz and Min, 2009).

Il est montré (Tian, 2014) que pour limiter l'apparition de bavures lors de l'usinage, il faut diminuer au maximum les forces de coupe. Tout procédé (cryogénie, par exemple) qui aurait tendance à durcir le matériau, donc augmenter les forces de coupe, facilite la formation des bavures. Il faut cependant faire attention lors de l'usinage des matériaux trop ductiles, car ils ont tendance à se déformer plus facilement de manière plastique et donc à créer des bavures plus importantes.

Il existe de nombreuses méthodes de mesure des bavures (Aurich, Dornfeld, Arrazola, Franke, Leitz and Min, 2009) : les différentes catégories d'appareils de mesure sont les systèmes mécaniques, optiques, électriques. Les mesures de bavures les plus précises sont celles sans contact, car cela ne risque pas de jouer sur la taille de la bavure en appuyant dessus. Pour quantifier la taille des bavures, la méthode la plus abordable est l'observation au microscope afin de déterminer ses différentes mesures : hauteur, largeur, épaisseur de la racine... Ces observations permettent de vérifier l'impact positif ou non des techniques utilisées pour réduire les bavures, mais aussi d'estimer le coût d'ébavurage en fonction de la forme et la taille de la bavure.

1.5 Les efforts de coupe

La connaissance des efforts de coupe permet de mieux comprendre les phénomènes en place lors de l'usinage. Dans son mémoire (Bérubé, 2012) a étudié les forces d'usinage lors du détournage de plaques de composite stratifiées en carbone. Pour cela, il a utilisé un dynamomètre Kistler 9255B sur trois axes.

Les résultats obtenus montrent que les efforts dans le sens de l'avance sont proportionnels à l'avance de l'outil dans la matière. Dans la direction normale à la surface usinée, les efforts de coupe évoluent en fonction de l'avance, mais aussi en fonction de la vitesse de rotation de l'outil. Enfin, dans la direction axiale de l'outil, les forces présentes sont proportionnelles à l'avance et à la vitesse de rotation de l'outil.

Ces résultats nous permettent de mieux considérer les actions en jeu lors du détournage, ainsi que l'effet que pourrait avoir chaque paramètre sur les émissions de poussières. Cela pourrait permettre de mieux comprendre les émissions de particules en fonction des différents paramètres de coupe.

1.6 Commentaires

Lors de la préparation des pièces à percer (Songmene, Balout and Masounave, 2008a ; Songmene, Balout and Masounave, 2008b), les émissions de particules ne sont pas prises en compte dans la quantité de poussières émises. Cela fausse donc les résultats quant aux techniques de préparation afin de limiter les poussières lors du perçage final. D'autant plus que c'est justement lors de l'amorçage du trou que les émissions sont les plus importantes.

Il est assez étrange de constater que les conditions de coupe générant le moins de poussières sont inversées entre le perçage et le détournage. En effet, pour le perçage il est recommandé d'avoir une faible avance et une grande vitesse de coupe (Songmene, Khettabi and Kouam, 2012) alors que pour le détournage, il est recommandé d'avoir une grande avance et une faible vitesse de coupe (Haddad, Zitoune, Eyma and Castanie, 2014). Cependant, lors de l'usinage à haute vitesse de coupe, les conditions générant le moins de poussière semblent rejoindre celles en perçage. Il serait donc bon de vérifier cela concernant le détournage, car un seul des articles trouvés porte sur le sujet contrairement au perçage où plusieurs articles sont d'accord sur le même point.

D'un point de vue général, on remarque que plus les particules sont grosses, moins elles sont présentes en grand nombre dans l'air. Mais du point de vue de la masse, la répartition est relativement constante (Khettabi, Songmene and Masounave, 2010 ; Songmene, Khettabi and Kouam, 2012 ; Zaghbani, Songmene and Khettabi, 2009). Cela signifie que les particules ultrafines sont présentes en beaucoup plus grand nombre que les particules plus grosses.

De plus, les matériaux ductiles ont plus tendance à produire des poussières que les pièces fragiles (Songmene, Khettabi and Kouam, 2012). Cela est dû au fait que lorsque la ductilité augmente, le matériau peut plus facilement se déformer plastiquement. Le fait de refroidir les pièces à l'azote liquide (Balout, Songmene and Masounave, 2007) pour en augmenter la dureté permet effectivement de réduire le nombre de particules émises. Cela peut être une piste non polluante et relativement peu coûteuse de réduction des particules.

La majorité des particules semble provenir de la zone de cisaillement primaire, du frottement de l'outil sur la surface usinée et de l'interface copeau-outil (Kremer and El Mansori, 2009). Cependant, cela est difficile à vérifier, car il n'est pas possible d'isoler une seule zone pour mesurer les émissions qui en émanent. En plus, on ne peut pas stopper les émissions dans une zone précise, elles sont toujours présentes. Du fait de la taille inférieure au micromètre des particules, celles-ci viennent facilement perturber les mesures faites dans un endroit délimité. Les particules sont générées dans différentes zones autour de l'outil : le plan de cisaillement, l'interface copeau-outil, l'interface outil-surface usinée, la surface externe du copeau, l'hélice du foret et l'âme du foret.

L'usinage à sec permet de diminuer le nombre de particules fines et très fines par rapport à un usinage avec fluide de lubrification (Zaghbani, Songmene and Khettabi, 2009).

1.7 Conclusion

D'un point de vue général, tous les auteurs sont d'accord sur le fait que le facteur le plus influant sur les émissions de particules est le matériau usiné : concernant la composition et des propriétés physiques. Les matériaux les plus ductiles émettent une plus grande quantité de particules et de plus petites tailles que les matériaux fragiles. Cependant d'un point de vue industriel, il est très rare de pouvoir changer de matériau pour une pièce. Il faut donc trouver d'autres facteurs pour minimiser les poussières émises lors de l'usinage.

La géométrie de l'outil a aussi une influence importante sur la génération de poussières. Il est montré que pour limiter au maximum le nombre de particules émises, il faut usiner avec un angle d'incidence proche de 90° et un angle de coupe proche de 0° . De plus, un revêtement de l'outil de grande dureté et de faible rugosité permet d'obtenir un meilleur fini de la pièce et une durée de vie de l'outil plus importante.

Enfin, les paramètres de coupe les plus importants sont la vitesse de coupe, l'avance, et la profondeur de coupe. Afin de produire le moins de poussières possible, il est conseillé d'usiner le matériau avec une grande vitesse de coupe, mais une faible avance et une profondeur de passe relativement faible. Ceci permet en plus de garder une bonne productivité, d'obtenir une rugosité faible et moins de bavures.

Généralement, les stratégies de réduction des émissions de particules ont l'avantage de réduire les coûts et d'améliorer la qualité d'usinage de la pièce. Cela représente donc de nombreux avantages pour les industriels.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

2.1 Introduction

L'objectif de ces tests est de trouver le meilleur compromis possible entre la limitation des émissions de particules et la qualité de coupe obtenue. Pour cela, nous avons choisi de faire varier les paramètres suivants : la géométrie de l'outil, l'avance, la vitesse de coupe, et la profondeur de coupe. Les résultats obtenus grâce à ces essais permettront de tirer des conclusions sur la ou les valeurs conseillées des différents paramètres.

Dans ce chapitre, le matériau étudié est détaillé ainsi que le plan expérimental avec les différentes variables et leurs niveaux. Le montage expérimental utilisé est décrit ainsi que les appareils de mesure qui nous permettront de mener à bien cette campagne de test.

2.2 Choix du matériau

Le choix du matériau sur lequel les essais seront réalisés est primordial, car, comme il a été mentionné dans la revue de littérature, c'est celui-ci qui influence le plus les émissions de poussières. Nous avons donc choisi un laminé de fibres de carbone et époxy, car il est très utilisé en aéronautique.

Les plaques de composite sont fabriquées à partir de fibre de carbone pour les renforts et une matrice époxy. Le matériau utilisé pour la fabrication est du pré-imprégné CYCOM 5320-1 utilisé dans le secteur aéronautique. Ses caractéristiques tirées de (Cytec, 2012) sont récapitulées dans le Tableau 2-1. L'orientation est donnée par un tissage de type satin de $[0^\circ/90^\circ]$ avec un taux de fibre de 66 % environ.

Tableau 2-1 Caractéristiques du pré-imprégné

Sollicitation		Contrainte (Mpa)	Module (Gpa)	Coefficient poisson
0°	Traction	392	22,7	0,344
	Compression	252	20,8	-
90°	Traction	12	1,4	-
	Compression	45	1,4	-
90°/0°	Traction	190	11,9	-
	Compression	167	10,9	-
	Cisaillement	110	5,2	-

Afin de fabriquer des plaques de composite à partir de pré-imprégné, il a fallu suivre une méthode spécifique pour réaliser le montage de la Figure 2-1 :

- choisir une plaque en aluminium pour mouler,
- appliquer un agent de démoulage sur la zone où la plaque se trouvera,
- délimiter la zone avec un scotch double face spécial pour faire le vide par la suite,
- mettre un premier tissu de finition afin d'obtenir une surface propre,
- réaliser son empilement de pré-imprégné,
- mettre à nouveau un tissu de finition,
- déposer un plastique perforé qui permettra l'élimination de l'excédent de résine,
- ajouter un tissu absorbant afin d'absorber la résine et de faciliter la mise sous vide,
- enfin mettre le plastique qui sert pour le vide en le fixant sur le scotch (attention aux fuites).

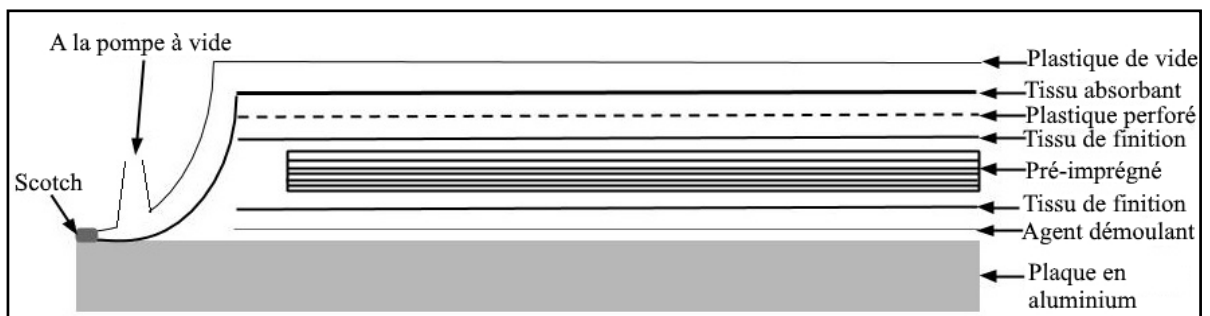


Figure 2-1 Schéma du montage pour la réalisation des plaques de composite

Par la suite, on fait le vide et vérifie qu'il n'y a pas de fuites. Enfin, on prépare le four pour réaliser le cycle de chauffe qui va sceller les plis ensemble. Le cycle se décompose ainsi :

- une première montée en température à 1 °C/min de 20 °C jusqu'à 93 °C ~ 100 °C,
- maintien de la température pendant quatre heures,
- deuxième rampe de montée en température à 1 °C/min jusqu'à 143 °C ~ 150 °C,
- maintien de la température pendant deux heures,
- refroidissement à la température ambiante à 2 °C/min.

Il est à noter que le vide est maintenu pendant toute la durée du cycle de chauffe et de refroidissement. Ceci afin d'éviter toute déformation de la plaque de composite avec l'évolution de la température.

La fabrication du composite a été réalisée pour des plaques de 2, 4 et 6 mm d'épaisseur. Afin de ne pas gâcher de la matière, de grandes plaques ont été fabriquées puis découpées à l'aide d'une scie à diamant, en nombre et taille voulus. Les plis de pré-imprégné ont été empilés afin d'obtenir une orientation globale de $[0^\circ/90^\circ]$.

2.3 Choix des outils

Pour le choix des outils, on s'est basé sur les outils spécialisés pour les composites, car d'après les articles du domaine, les autres outils s'usent trop vite. Pour cela, nous avons voulu observer la différence entre deux géométries d'outils différentes, en se basant sur les résultats des travaux de (Bérubé, 2012). Ainsi nous avons choisis deux fraises pour le détournage et deux forets pour le perçage; les géométries sont détaillées dans le Tableau 2-2.

Tableau 2-2 Caractéristiques géométriques des outils

Outil	Flutes	Angle hélice	Angle de pointe	Diamètre (mm)	Opération
Onsrud 68-010	2	0°	180°	9,525	Détournage
Guhring 3870	3	0°	180°	12,7	
Onsrud 85-819	2	30°	85°	7,938	Perçage
Guhring 160	2	40°	80°	7,938	

2.3.1 Détourage

La fraise Onsrud possède un revêtement en diamant polycristallin (PCD) et possède deux flutes droites. Le diamètre de l'outil est de 3/8 po soit 9,525 mm. La Figure 2-2 à gauche est une photo de la fraise Onsrud à deux flutes.

La fraise Guhring possède un revêtement en diamant polycristallin (PCD) et possède 3 flutes droites. Le diamètre de l'outil est de 1/2 po soit 12,7 mm. La Figure 2-2 à droite est une photo de la fraise Guhring à trois flutes.

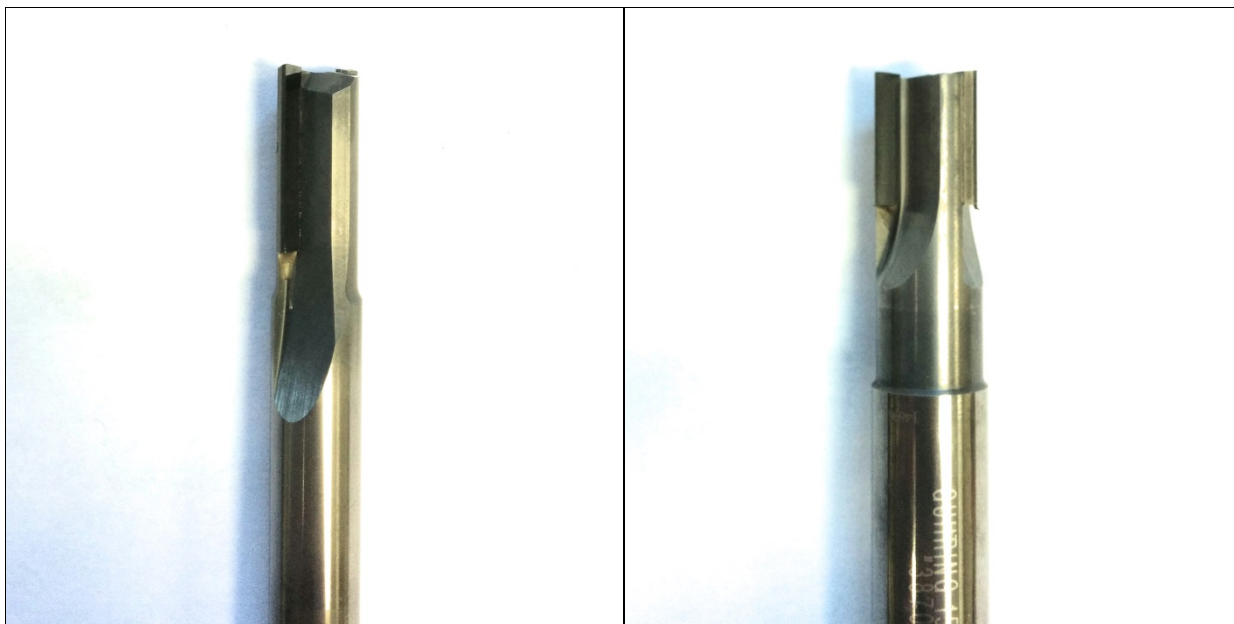


Figure 2-2 Photo de la fraise Onsrud 68-010 à gauche et Guhring 3870 à droite

2.3.2 Perçage

Le foret Onsrud possède un revêtement au carbure, deux flutes hélicoïdales et a une pointe spéciale pour percer les matériaux composites. Le diamètre de l'outil est de 5/16 po soit 7,938 mm. La Figure 2-3 à gauche est une photo du foret Onsrud à deux flutes.

Le foret Guhring possède un revêtement au diamant et possède deux flutes hélicoïdales. Le diamètre de l'outil est de 5/16 po soit 7,938 mm. La Figure 2-3 à droite est une photo du foret Guhring à deux flutes.

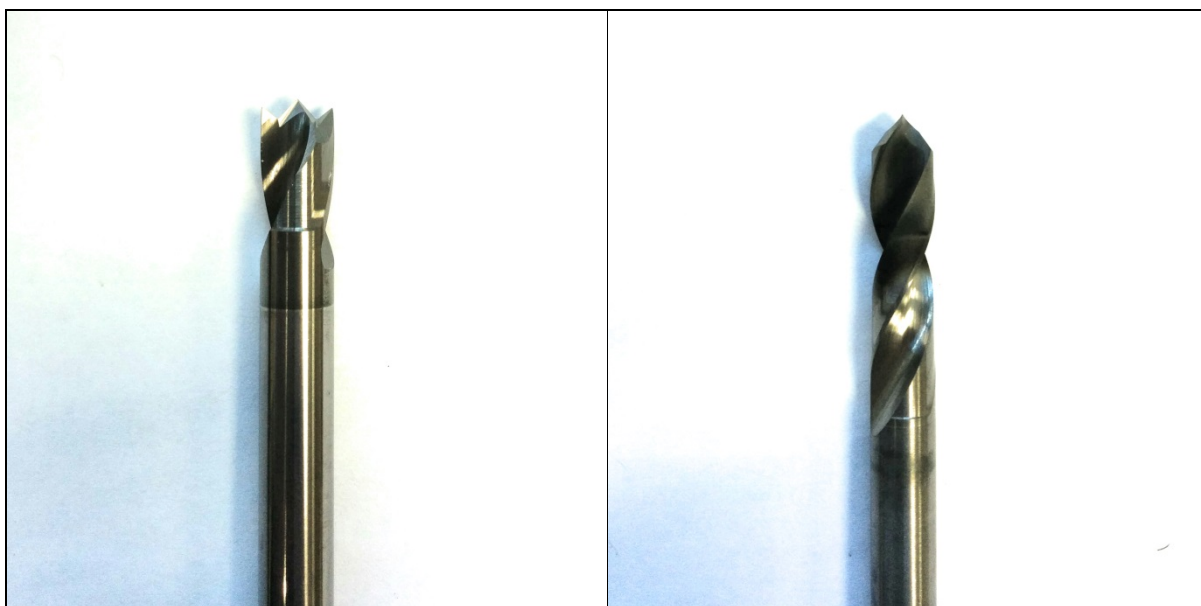


Figure 2-3 Photo du foret Onsrud 85-819 à gauche et Guhring série 160 à droite

2.4 Définition des paramètres et plan d'expérience

Le plan d'expérience est réalisé dans l'objectif de ne faire varier qu'un paramètre à la fois afin de mettre en évidence l'impact de chacun. De plus, nous avons choisi les procédés de détournage et de perçage, car ce sont les plus utilisés en industrie. Ce sont aussi eux qui posent le plus de problèmes du point de vue des émissions de particules. Nous avons pris le plus de niveaux de chaque paramètre afin de pouvoir réaliser des courbes de tendances plus représentatives. Le nombre de niveaux choisi est donc de six, répartis dans le Tableau 2-3 sauf pour les épaisseurs où seulement trois niveaux sont pris en compte.

Tableau 2-3 Paramètres et niveau pour les essais

Facteur	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	Niveau 6
Vitesse de coupe (m/min)	50	100	200	300	500	600
Avance (mm/tr)	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12
Épaisseur plaque (mm)	2	4	6	x	x	x
Outil	A	B	x	x	x	x

Nous avons voulu observer les phénomènes lors de basses vitesses de coupe afin d'avoir une bonne comparaison avec les autres niveaux à haute vitesse de coupe. Concernant l'avance, comme la littérature conseille une avance faible, nous avons choisi de commencer celle-ci à 0.02 mm/tr. Afin d'avoir une comparaison avec des avances bien plus importantes, nous la faisons évoluer jusqu'à 0.12 mm/tr. Pour les différents outils utilisés, ils ont été choisis, car ils sont spécialisés pour ce genre de matériaux. Ainsi, le plan d'expérience du Tableau 2-4 sera suivi pour les tests.

Tableau 2-4 Plan d'expérience

Test	vitesse de coupe	avance	épaisseur	outil	commentaire	
1 & 1'	50	0,02	2	A & B	tout au minimum	Détourage
2 & 2'	600	0,12	6	A & B	tout au maximum	
3	300	0,02	4	A	avance	
4	300	0,04	4	A	avance	
5	300	0,06	4	A	avance	
6	300	0,08	4	A	avance	
7	300	0,1	4	A	avance	
8	300	0,12	4	A	avance	
9	50	0,08	4	A	vitesse de coupe	
10	100	0,08	4	A	vitesse de coupe	
11	200	0,08	4	A	vitesse de coupe	
12 = 6	300	0,08	4	A	vitesse de coupe	
13	500	0,08	4	A	vitesse de coupe	
14	600	0,08	4	A	vitesse de coupe	
15	300	0,08	2	A	épaisseur	
16 = 6	300	0,08	4	A	épaisseur	
17	300	0,08	6	A	épaisseur	
20 & 20'	50	0,02	2	A & B	tout min	Perçage
21 & 21'	600	0,12	6	A & B	tout max	
22	300	0,02	4	A	avance	
23	300	0,04	4	A	avance	
24	300	0,06	4	A	avance	
25	300	0,08	4	A	avance	
26	300	0,1	4	A	avance	
27	300	0,12	4	A	avance	
28	50	0,08	4	A	vitesse de coupe	
29	100	0,08	4	A	vitesse de coupe	
30	200	0,08	4	A	vitesse de coupe	
31 = 25	300	0,08	4	A	vitesse de coupe	
32	500	0,08	4	A	vitesse de coupe	
33	600	0,08	4	A	vitesse de coupe	
34	300	0,08	2	A	épaisseur	
35 = 25	300	0,08	4	A	épaisseur	
36	300	0,08	6	A	épaisseur	

Il est à noter que le paramètre de la profondeur de coupe correspond à l'épaisseur des plaques de composite que ce soit lors du perçage ou du détourage, car une seule passe est réalisée.

2.5 Description du matériel

2.5.1 Machine

Pour réaliser ces essais, nous avons à notre disposition une fraiseuse trois axes Huron K2x10 de puissance 40 kW. Elle permet des vitesses de rotation de l'outil allant jusqu'à 28 000 tr/min, ce qui nous permet de réaliser nos essais à très haute vitesse. De plus, elle possède un système d'aspiration qui permet d'enlever les poussières en suspension dans l'air avant de récupérer la pièce. Ce genre de système s'avère indispensable quand on usine des matériaux composites afin de protéger l'opérateur et l'environnement de travail.

2.5.2 Mesure des particules

Les deux appareils utilisés sont l'APS et le SMPS. Ils permettent de mesurer les particules allant de 10 nm à 20 μm . Leur fonctionnement est décrit dans la revue de littérature. Tous deux permettent de mesurer au moins trois concentrations : en nombre, en surface et en masse. L'APS permet de mesurer les particules fines, nous l'utilisons avec un débit de 3 l/min et une densité de 1,31 g/cm³. Le SMPS mesure les particules ultrafines, nous l'utilisons avec un débit de 0,6 l/min et une densité de 1,31 g/cm³. Nous avons choisi d'écarter le DustTrak des appareils utilisés, car il ne permet de mesurer que la concentration en masse des particules fines.

2.5.3 Mesure des défauts

Deux types de défauts seront pris en compte : les délaminations, ainsi que les fibres non coupées. Les délaminations correspondent à un arrachement de matière de la pièce, alors que les fibres non coupées sont des fibres pas complètement coupées qui dépassent de la pièce finale. La mesure de ces deux types de défauts passe par un microscope optique grâce auquel des photos seront prises et sur lesquelles des mesures pourront être faites.

Afin de quantifier au mieux les délaminations, un facteur de délamination (F_d) est introduit pour le perçage. Il s'agit du diamètre maximum de délamination (D_{max}) divisé par le diamètre nominal (D) du trou, tiré de (Davim and Reis, 2003). Ce facteur est très utile, car il permet de quantifier la taille de la surface délaminée en fonction de la taille nominale du trou.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad (2.1)$$

De manière analogue, pour quantifier les fibres non coupées, on introduit le facteur F_c qui est le rapport du diamètre nominal (D) divisé par le diamètre minimum, qui est décrit par les fibres non coupées (D_{min}).

$$F_c = \frac{D}{D_{min}} \quad (2.2)$$

2.5.4 Mesure des forces de coupe

Les forces de coupe seront elles aussi enregistrées à l'aide d'un dynamomètre trois axes Kistler 9255B (Kistler, 2009). Ceci permet une meilleure compréhension des résultats obtenus en fonction des forces appliquées pendant l'usinage. Ce dynamomètre permet de mesurer des forces allant de -20 kN à 20 kN dans le plan de coupe et de -10 kN à 40 kN sur l'axe vertical.

2.6 Mise en place des tests

Pour les tests, la même configuration que celle de (Bérubé, 2012) sera utilisée. C'est-à-dire un dynamomètre, sur lequel est fixé un support en aluminium et enfin la plaque à détourer ou à percer. Cette dernière doit être préparée avec un certain nombre de trous pour la fixation, mais aussi pour faciliter le cheminement de l'outil.

Les échantillons sont au nombre de 25 par plaque et possèdent des conditions de coupe différentes sur chacun de leurs bords. Cela est dû à la stratégie de coupe utilisée : nous avons décidé de découper des échantillons en lignes et colonnes, comme illustré à la Figure 2-4.

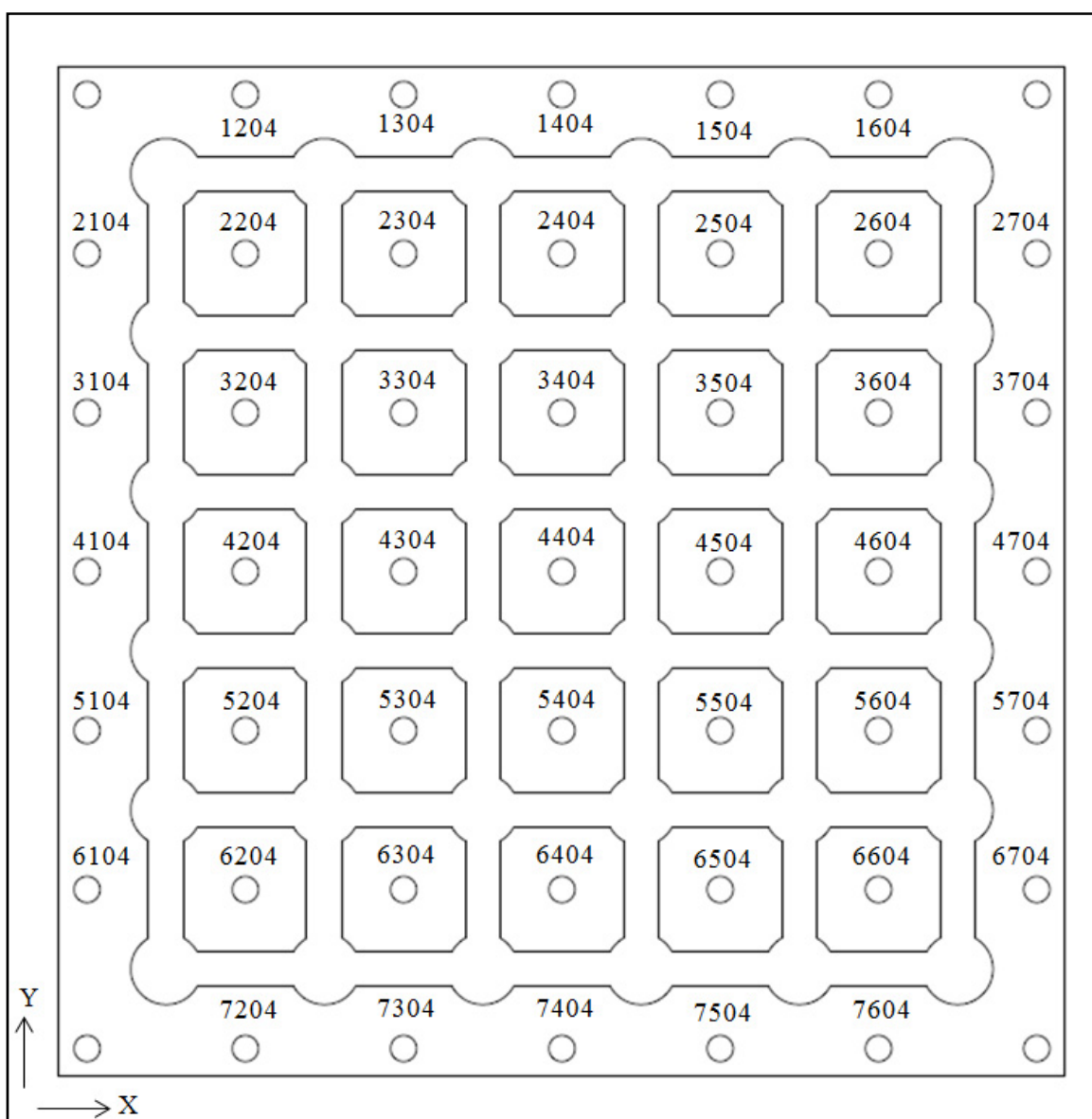


Figure 2-4 Schéma des plaques pour le détourage et nomenclature
Figure tirée de (Bérubé, 2012)

La notation des échantillons se réalise comme suit : ##### avec le premier numéro correspondant à la ligne, le second à la colonne et les deux derniers à la plaque usinée. Ainsi

l'échantillon 3404 est situé à la ligne trois et la colonne quatre de la plaque numéro quatre. De plus comme les conditions de coupe seront différentes sur chaque côté, ceux-ci ont été numérotés en partant du côté nord et en tournant dans le sens horaire. Lors des essais, une mesure est lancée pour chaque échantillon. Ainsi sur chaque ligne (ou colonne), il y a cinq mesures réalisées. De plus, le détournage est toujours réalisé tel que pour les colonnes, on avance dans la direction des Y décroissants et pour les lignes, dans la direction des X croissants. Connaissant le sens de rotation de l'outil, on peut aussi déduire quel côté est en opposition et lequel est en avalant.

Pour les opérations de perçage, la préparation des plaques de composites se limitera au perçage des trous de fixation de la plaque. Ensuite; le perçage se déroulera colonne par colonne, comme illustré sur la Figure 2-5, en commençant par le perçage du trou situé à la colonne une et ligne une.

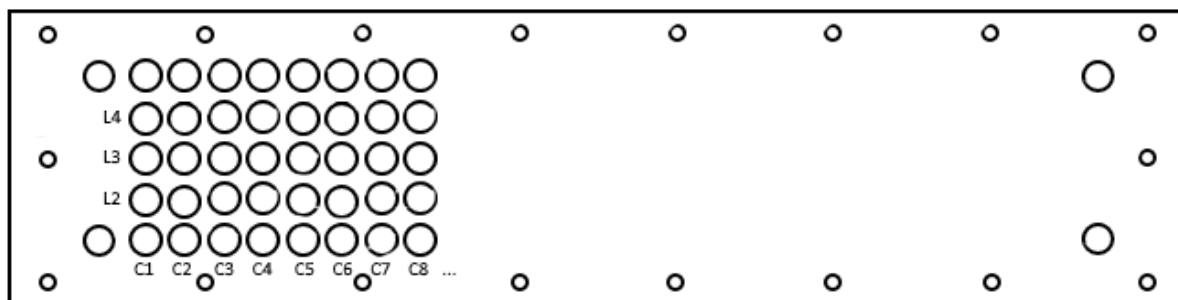


Figure 2-5 Schéma des plaques pour le perçage et nomenclature

Les trous seront repérés par leur numéro de ligne et de colonne, chaque colonne correspondant à des paramètres de coupe différents (les mesures sont réalisées cinq fois pour une même configuration de paramètres).

Une première mesure sera réalisée « à vide » afin d'évaluer la quantité de particules présentes naturellement dans l'air du laboratoire. Puis les mesures seront réalisées comme suit : on lance les mesures avec les différents appareils quelques secondes avant de commencer à usiner, on continue la mesure au moins 40 secondes après la fin de la coupe. Ensuite, on déclenche l'aspiration de la machine afin de se débarrasser plus rapidement des particules

puis on arrête l'aspiration et l'on recommence une autre série de mesure. L'aspiration est mise en marche pendant 40 secondes et le temps entre deux mesures est de deux minutes afin d'être sûr que le taux de particules redevienne celui dans des conditions initiales.

- Positionner l'outil à 1 mm au-dessus du trou à percer ;
- faire une remise à zéro des quartz de la table dynamométrique ;
- lancer les mesures du SMPS et APS ;
- lancer l'acquisition des forces ;
- lancer le perçage/détourage ;
- arrêter l'acquisition des forces et attendre la fin de la mesure des mesures de particules (1 min) ;
- déclencher l'aspiration et attendre au moins 40 s.

2.7 Précision des mesures

Afin de prendre en compte la répétabilité de nos résultats, cinq essais avec les mêmes paramètres seront réalisés à chaque fois. La valeur prise en compte pour l'analyse est la moyenne de ces essais. De plus, l'écart type sera aussi évalué afin de quantifier la confiance que l'on peut donner à la moyenne prise en compte. Ainsi, les graphes seront tracés avec la moyenne des cinq essais, les écarts types de chaque valeur et une courbe de tendance seront tracés afin de faciliter l'interprétation.

Chaque appareil ayant ses propres incertitudes de mesure, les résultats présentés ici ne représentent pas à 100 % la réalité. Cependant grâce à la qualité des appareils à notre disposition, on s'approche suffisamment de la réalité pour pouvoir interpréter et tirer des conclusions réalistes de nos résultats.

CHAPITRE 3

ÉMISSIONS LORS DU DÉTOURAGE

3.1 Introduction

Dans cette partie sont présentés et analysés les résultats des émissions de particules obtenus lors des essais de détournage. Pour les particules fines, les émissions sont très faibles, voire inexistantes, au-dessus de $2,5\ \mu\text{m}$. On s'intéressera donc qu'à ces dernières, que l'on appellera « $\text{PM}_{2,5}$ ». Pour les particules ultrafines et au-delà, nous avons pu mesurer les diamètres allant de 10 à 400 nm. Comme il n'y a pas encore d'appellation connue de ce côté-là, on les appellera particules ultrafines de taille comprise entre 10 et 400 nm.

Concernant les graphiques, vu la similarité de ceux-ci représentant les différentes concentrations, nous choisissons présenter ici que les concentrations en nombre. Les graphiques représentant les concentrations en surface et en masse en fonction de l'évolution des paramètres seront mis en ANNEXE I.

3.2 L'outil ($a = 0,02\ \text{mm/tr}$, $V_c = 50\ \text{m/min}$ et $e = 2\ \text{mm}$)

On peut voir sur la Figure 3-1 que les $\text{PM}_{2,5}$ sont présentes en faible nombre : de l'ordre de 10^1 alors que la valeur de concentrations de particules dans l'air ambiant est généralement de l'ordre de 10^3 . Concernant les 10 à 400 nm, on remarque qu'elles sont présentes en bien plus grand nombre : de l'ordre de 10^6 . On note aussi que pour les deux géométries d'outil, les émissions de particules sont proches.

Les remarques concernant les concentrations en surface et les concentrations en masses (Figure-A I-1 et Figure-A I-2 en annexe) sont les mêmes. En effet, les valeurs pour les $\text{PM}_{2,5}$ sont très faibles, ce qui ne nous permet pas de savoir si ces émissions sont représentatives de la réalité. Et pour les 10 – 400 nm, les émissions sont bien supérieures mais les écarts types entre les mesures ne nous permettent pas de différencier les émissions en fonction de l'outil.

L'impact des géométries d'outils n'est donc pas significatif sur les émissions de particules dans notre cas.

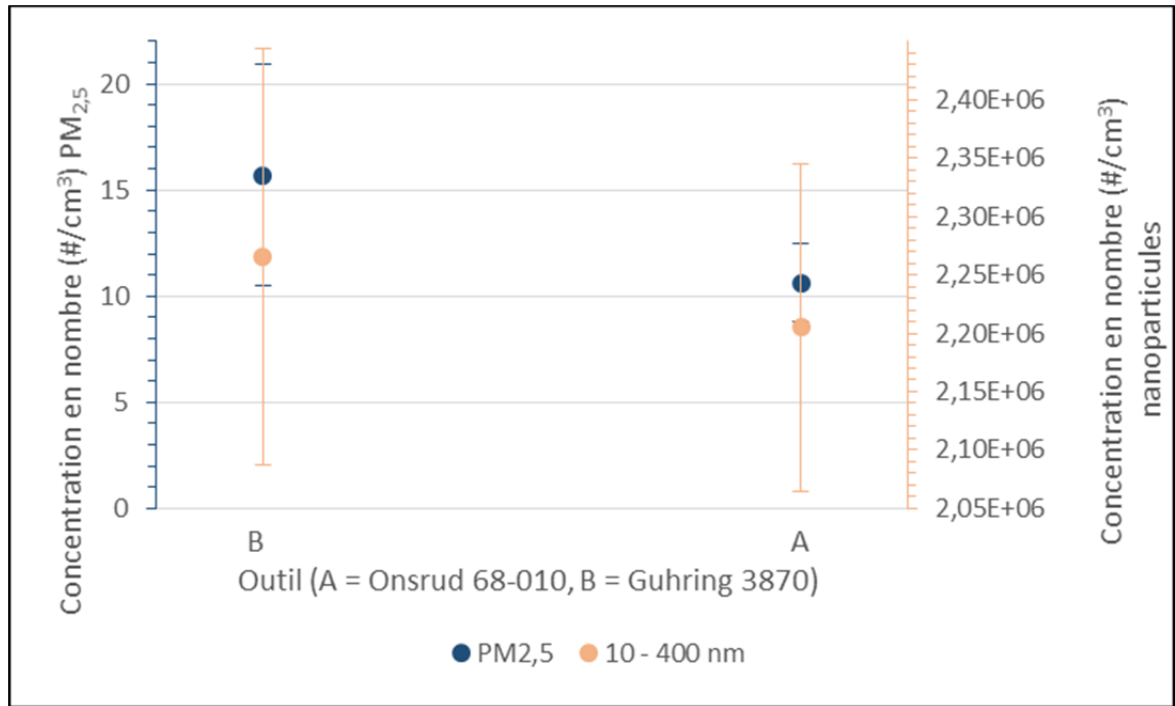


Figure 3-1 Concentration en nombre de particules en fonction de l'outil pour le détourage

Pour expliquer le peu de différence de concentration entre les deux outils, on a vu que la fraise A possède deux flutes alors que l'outil B en possède trois. Ceci fait une différence au niveau de la coupe, mais certainement pas suffisante à ce niveau pour mettre en évidence une différence d'émission de particules. Cependant, le fait d'avoir une flute de plus réduit la zone de dégagement des copeaux. Ceci peut empêcher les particules de se dégager correctement et donc limiter les émissions dans l'environnement. Ainsi la quantité de particules produite n'est pas forcément réduite, mais leur émission dans l'air pourrait l'être. Il faudrait vérifier cela sur des durées d'usinage beaucoup plus longues.

De plus, comme l'outil A possède une dent de moins, il s'échauffe plus vite et s'use certainement plus vite. Il serait donc intéressant d'étudier ce phénomène avec des outils plus usés, pour voir si face à une même utilisation l'une des deux géométries se démarque ou non.

3.3 L'avance ($V_c = 300$ m/min, $e = 4$ mm)

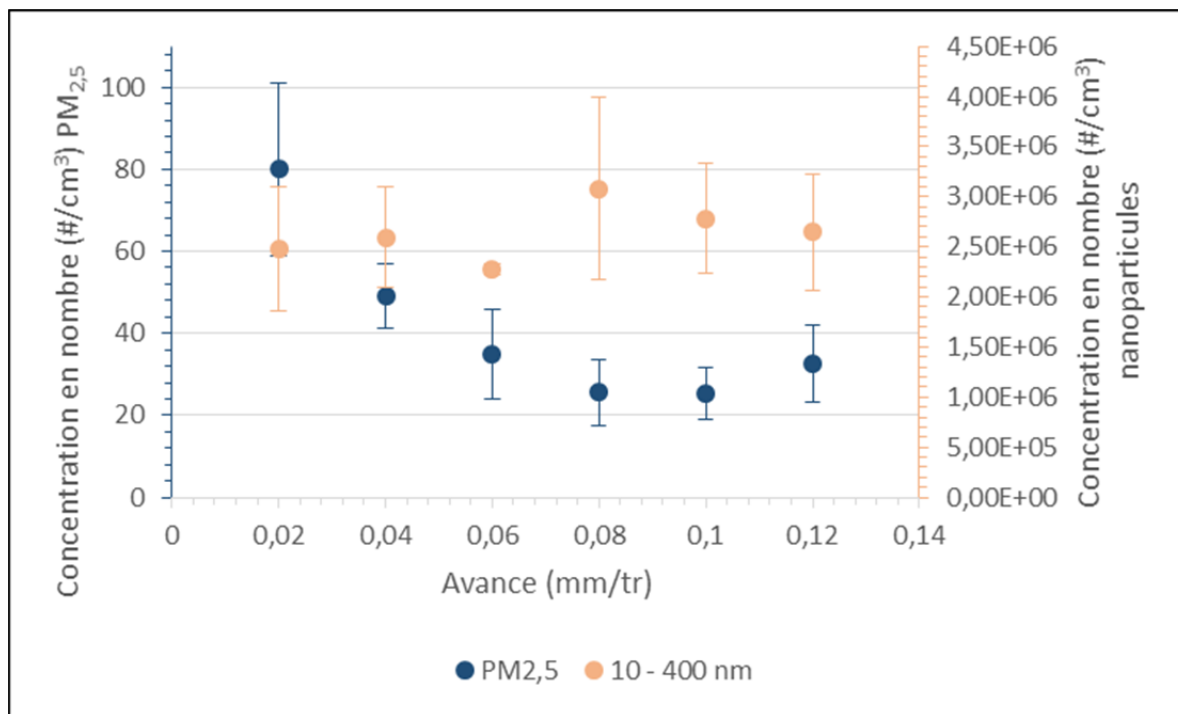


Figure 3-2 Concentration en nombre de particules en fonction de l'outil pour le détournage

Sur la Figure 3-2, on remarque que comme précédemment, la quantité de PM_{2,5} mesurée est assez faible. Cependant il y a un minimum d'émission pour les PM_{2,5} correspondant à une avance de 0,08 à 0,1 mm/tr. Les avances inférieures à 0,06 mm/tr ne sont pas optimales, car génèrent beaucoup plus de particules : jusqu'à 3,18 fois plus. Encore une fois on peut tout de même se poser la question de la validité de ces mesures au vu du faible nombre mesuré.

Pour les particules ultrafines et jusqu'à 400 nm, les émissions de l'ordre de 10^6 sont relativement constantes. Cependant, les écarts entre les différentes vitesses de coupe sont faibles : le plus grand rapport est de 1,35 entre l'avance de 0,06 mm/tr et l'avance plus importante de 0,08 mm/tr.

Concernant les concentrations en surface et en masse, les constats sont les mêmes que pour la concentration en nombre comme on peut le voir en annexe aux Figure-A I-3 et Figure-A I-4.

Les émissions fines et ultrafines sont différentes en fonction de l'avance. En effet, ce paramètre de coupe semble avoir plus d'impact sur les $PM_{2,5}$ que sur les particules plus petites entre 10 et 400 nm.

3.4 La vitesse de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $e = 4$ mm)

Sur la figure ci-dessous, les émissions minimales ont été obtenues pour des vitesses de coupe de 50 m/min à 200 m/min pour les $PM_{2,5}$ et les 10 – 400 nm. Notons qu'au-delà de cette vitesse, à partir de 300 m/min, les émissions augmentent énormément, jusqu'à être plus de 5 fois supérieures. De plus, les valeurs d'émission des $PM_{2,5}$ sont encore une fois très faible par rapport aux valeurs en conditions normales trouvées dans la littérature, ce qui donne peu de confiance dans les résultats obtenus. Les 10 à 400 nm sont encore une fois très présentes et comme pour les particules fines, les émissions augmentent avec la vitesse de coupe. La valeur la plus élevée étant environ 6 fois supérieure à la plus faible.

Les concentrations de particules en surface spécifique et en masse (Figure-A I-5 et Figure-A I-6 en annexe) ont des tendances similaires à ce qui a été observé pour la concentration en nombre. Ainsi, on peut dire que la vitesse de coupe a un impact significatif sur les émissions de particules car elle a tendance à faire augmenter les différentes concentrations lorsque l'ont atteint des vitesses supérieures à 200 m/min. Les différences des concentrations de particules entre 50 et 200 m/min sont cependant peu significatives, donc utiliser une vitesse de 200 m/min permettrait de limiter les émissions mais aussi de gagner en productivité. Cela peut s'expliquer par le fait que cette vitesse est proche de l'intervalle conseillé pour cet outil (de 244 à 305 m/min). De ce fait, comme on est proche des conditions de coupe optimales, on ne brûle pas la matrice, et on arrache moins les fibres de carbone. Par conséquent, les particules émises sont moins importantes. On remarque dans ce cas-ci que de bonnes conditions de coupe pourraient être compatibles avec une faible émission de particules, cela sera à vérifier avec la suite des mesures réalisées dans ces travaux.

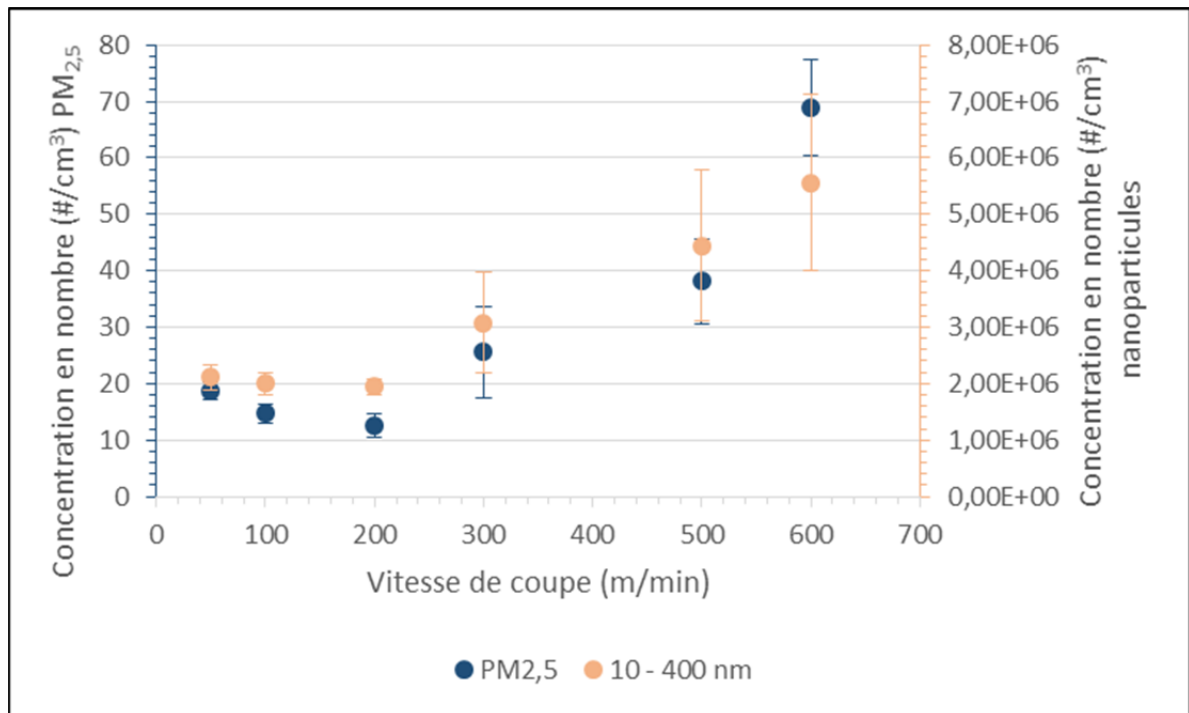


Figure 3-3 Concentration en nombre de particules en fonction de la vitesse de coupe pour le détournage

Ce type d'émissions en fonction de la vitesse de coupe confirme ce qu'il a été vu dans la littérature pour les matériaux fragiles. C'est-à-dire de faibles émissions à basse vitesse de coupe, puis une augmentation très rapide de ces émissions avec la vitesse de coupe.

3.5 La profondeur de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $V_c = 300$ m/min)

Sur la figure ci-dessous les émissions de particules PM_{2,5} ont l'air d'augmenter avec l'épaisseur de la plaque à détourer, mais ne sont pas proportionnelles à celle-ci. Les valeurs d'émissions restent quand même faibles.

Pour les 10 – 400 nm, les émissions pour les différentes profondeurs ont des écarts types tels qu'il est difficile de tirer une tendance représentative de la réalité. En effet, les émissions semblent être maximales pour une profondeur de 4 mm mais cela n'est pas significatif par rapports aux deux autres profondeurs.

Les concentrations en surface et en masse (Figure-A I-7 et Figure-A I-8 en annexe) ont les mêmes tendances que la concentration en nombre. Les valeurs des $PM_{2,5}$ étant très faibles par rapport à celles des 10 – 400 nm.

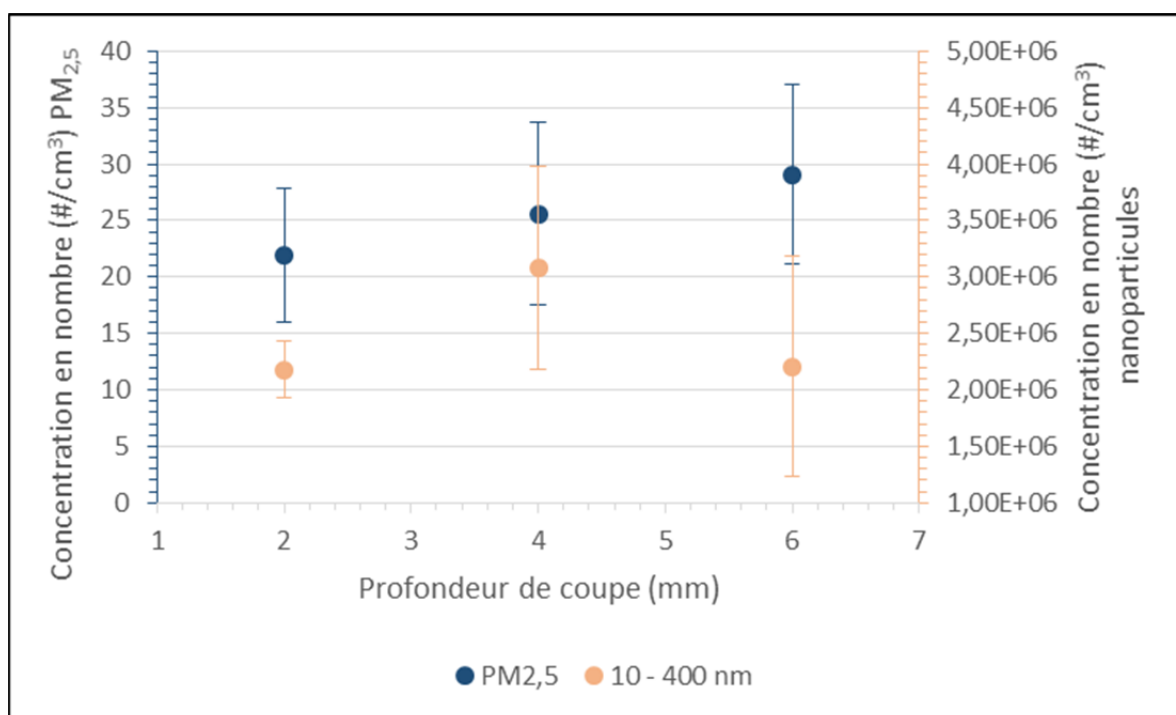


Figure 3-4 Concentration en nombre de particules en fonction de la profondeur de coupe pour le détourage

Pour les particules fines $PM_{2,5}$, on voit que les émissions semblent de plus en plus élevées avec la profondeur de coupe. Cela peut s'expliquer par le fait que plus il y a de matière coupée, plus il y a de copeaux et donc de poussières. Par contre pour les particules ultrafines et jusqu'à 400 nm, on remarque que les émissions correspondantes à une profondeur de coupe de 4 mm paraissent supérieures aux deux autres. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le détourage à une profondeur de 4 mm s'est effectué en dernier. En effet, l'outil commençait peut-être à s'user, ce qui s'est manifesté par une hausse des émissions ultrafines. Globalement la profondeur de coupe a assez peu d'impact sur les émissions de particules, en tout cas ce n'est pas suffisamment significatif pour en tirer une profondeur de détourage idéale concernant les émissions.

3.6 Dispersion des particules

3.6.1 Concentration en nombre

3.6.1.1 Particules $PM_{2,5}$

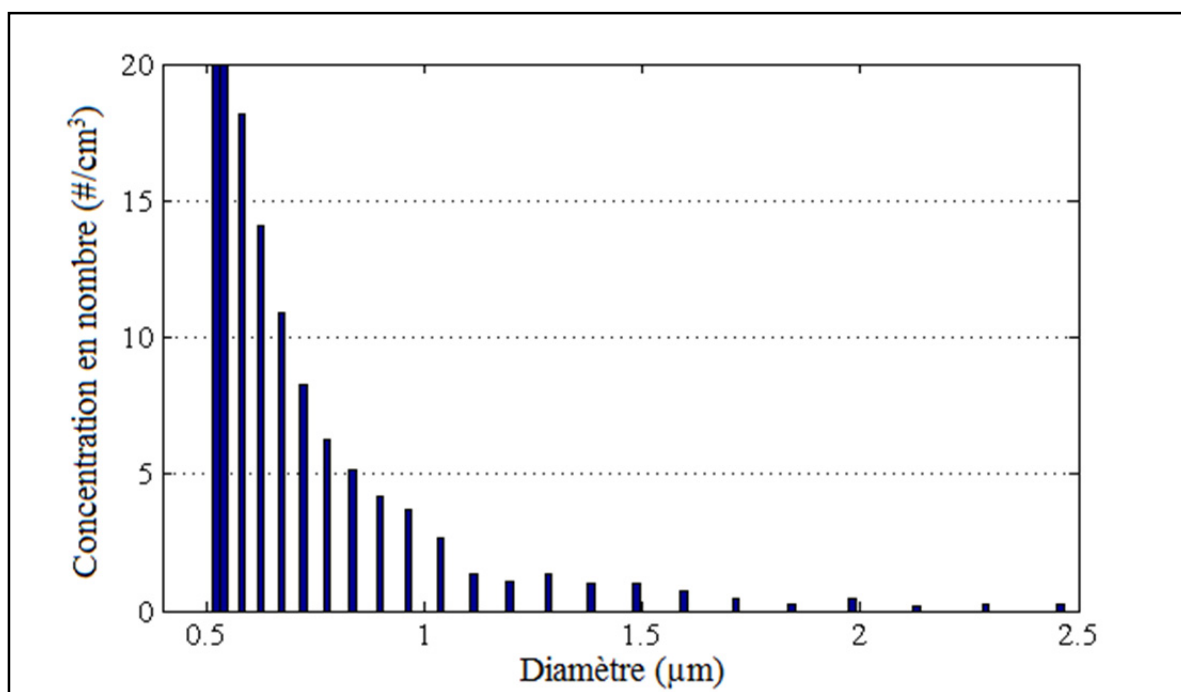


Figure 3-5 Dispersion de la concentration en nombre de particules ($PM_{2,5}$) pour le détourage

Sur la Figure 3-5 on remarque bien que la concentration en nombre mesurée pour les différentes tailles de particules est assez faible. Cependant, on peut noter une concentration plus élevée pour un diamètre inférieur ou égal à $0,6 \mu m$. Puis la concentration chute très rapidement, pour atteindre une valeur presque nulle vers un diamètre de $2,5 \mu m$. La forte valeur au début correspond aux diamètres inférieurs à $0,523 \mu m$. Cela est normal, car elle regroupe toutes les concentrations des diamètres inférieurs mais on voit bien ici que les particules les plus présentes sont celles de plus petit diamètre.

Il faut encore une fois faire attention avec ces résultats car vu la faible concentration mesurée, on ne peut pas être certain que les tendances observées soient représentatives de la réalité dans le cas des $PM_{2,5}$.

3.6.1.2 Particules de taille 10 à 400 nm

La concentration en nombre pour les particules de 10 à 400 nm sur la figure ci-dessous chute rapidement et se stabilise à une valeur de 8×10^5 particules/cm³ à partir d'un diamètre de particule de 100 nm. Ce sont donc bien les particules ultrafines qui sont les plus présentes ici, or ce sont aussi les plus dangereuses. Au-delà, la concentration en fonction du diamètre des particules se stabilise, ce qui montre que la concentration de l'étude des particules doit se focaliser sur les particules inférieures à 100 nm.

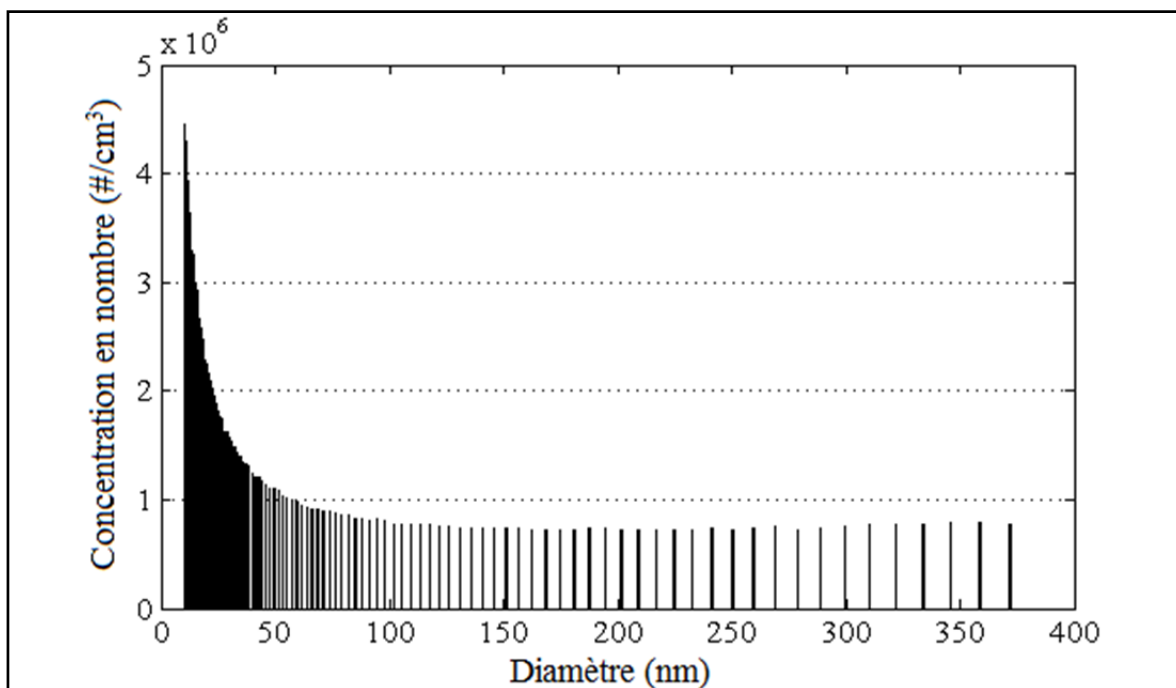


Figure 3-6 Dispersion de la concentration en nombre de particules (10 – 400 nm) pour le détourage

3.6.2 Concentration en surface

3.6.2.1 Particules $PM_{2,5}$

Sur la Figure 3-7 on remarque une forte concentration pour un diamètre de $0,6 \mu m$ et moins. Au delà, la concentration en surface diminue pour se stabiliser à une concentration de 2 à $3 \mu m^2/cm^3$ à partir d'un diamètre de $1 \mu m$. Au-dessus de $2,5 \mu m$ de diamètre, la concentration devient négligeable. On note que la concentration en surface suit un peu la concentration en nombre, avec une diminution avec le diamètre des particules mais légèrement moins prononcée. De plus, entre 1 et $2,5 \mu m$, différences de concentrations sont assez faibles.

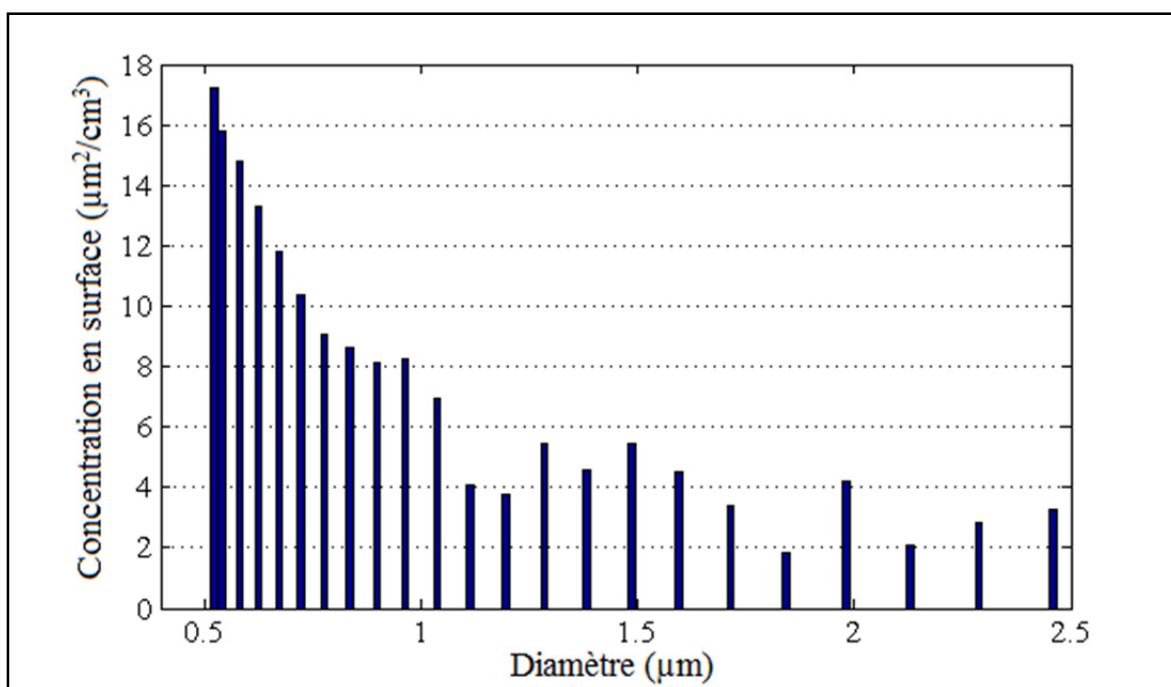


Figure 3-7 Dispersion de la concentration en surface des particules ($PM_{2,5}$) pour le détournage

3.6.2.2 Particules de taille 10 à 400 nm

Pour les 1 à – 400 nm, la concentration en surface spécifique sur la Figure 3-8 est très faible jusqu'aux diamètres de 50 nm, où la concentration augmente de manière exponentielle. On remarque que la tendance observée ici est l'inverse celle de la concentration en nombre.

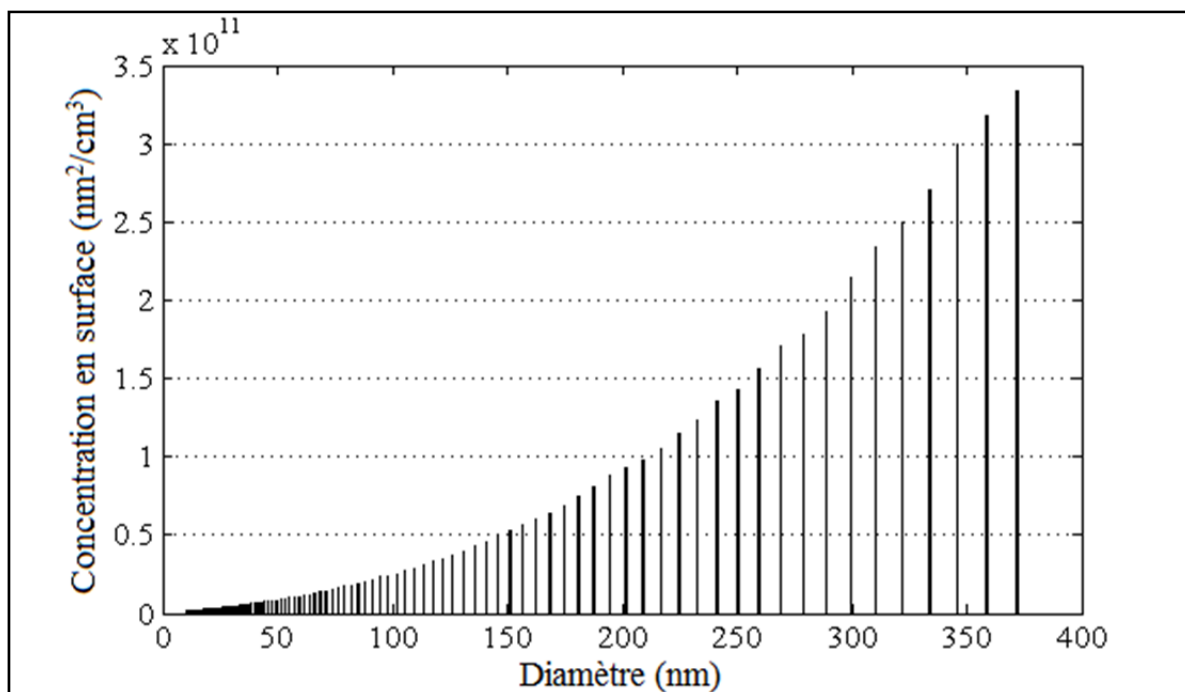


Figure 3-8 Dispersion de la concentration en surface des particules (10 - 400 nm) pour le détournement

3.6.3 Concentration en masse

3.6.3.1 Particules PM_{2,5}

La concentration en masse ci-dessous est plus régulière que les autres, en effet elle est quasiment constante pour les PM_{2,5} en fonction du diamètre. Cela s'explique par le fait que plus la particule est grande, plus sa masse est importante. Ainsi, comme le nombre de particules émises décroît avec le diamètre, il est logique de voir que la masse reste relativement constante.

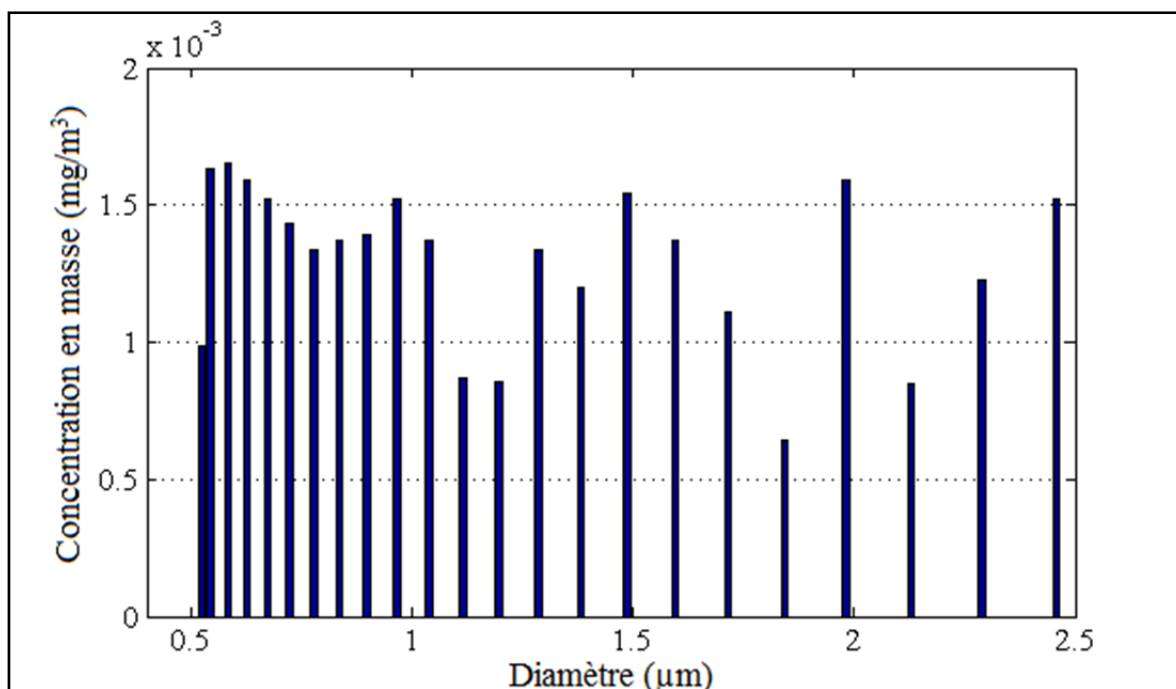


Figure 3-9 Dispersion de la concentration en masse des particules (PM_{2,5}) pour le détournage

3.6.3.2 Particules de taille 10 à 400 nm

La Figure 3-10, illustre bien la dangerosité des particules ultrafines. On a vu précédemment que ce sont de loin les particules les plus présentes en nombre. Or quand on s'intéresse à la concentration en masse, on remarque que les particules inférieures à 100 nm sont presque inexistantes. Ainsi, si l'on ne prend que le temps de mesurer les émissions de particules en masse dans un atelier, on ne se rendra pas compte du danger qui est présent.

De plus, les standards d'émissions actuels sont basés sur une concentration en masse des particules. Or on vient de voir que les particules ultrafines, qui sont aussi les plus dangereuses pour la santé, sont presque invisibles dans cette grandeur par rapport aux autres. Il serait peut être bon de voir si baser les normes d'émissions sur la concentration en nombre ne serait pas plus précis pour quantifier les particules émises dans l'air.

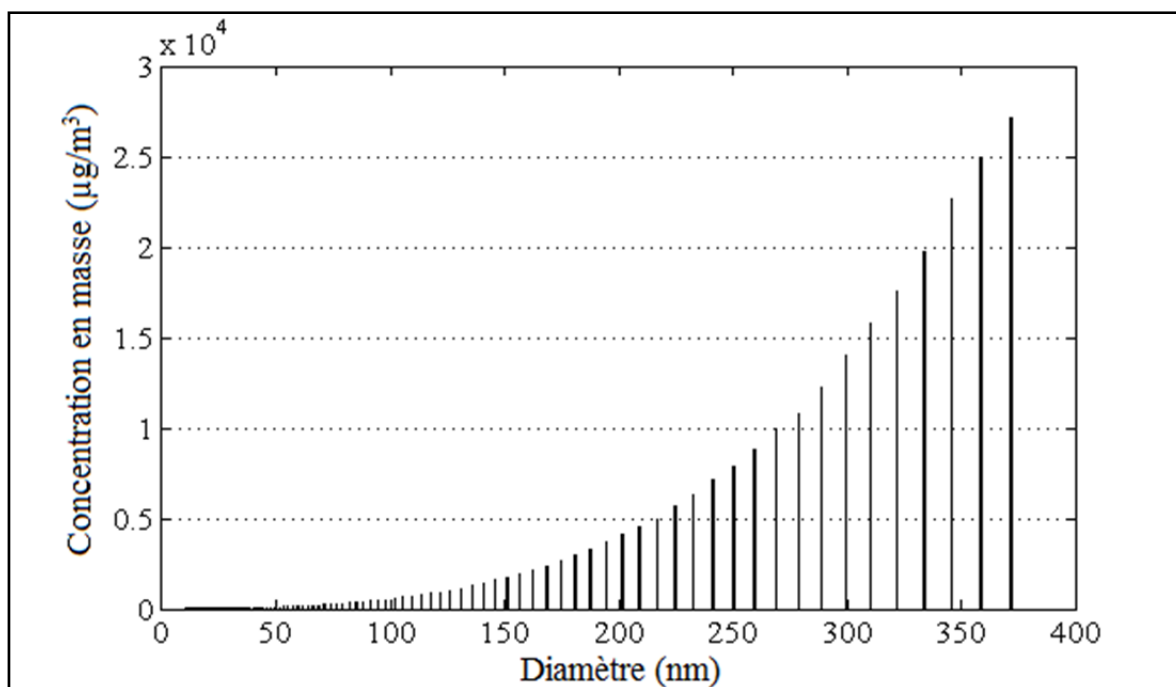


Figure 3-10 Dispersion de la concentration en masse des particules (10 - 400 nm) pour le détournage

La dispersion des particules de l'ordre du micromètre, sont inexistantes ou négligeables au-dessus de 2,5 µm. Cela est peut-être dû au fait que comme ces particules sont plus grosses, elles ont été moins facilement aspirées par l'appareil de mesure. On remarque en effet que pour les faibles diamètres la concentration est élevée, et que plus le diamètre augmente, plus la concentration diminue. Il est probable que ces particules se soient déposées sur la pièce et au fond de la machine formant les copeaux. On note aussi qu'à l'instar de la concentration en nombre, la concentration en surface spécifique diminue rapidement avec le diamètre alors que la concentration en masse reste relativement constante. Pour la surface, cela s'explique par le fait que plus une particule est petite, plus sa surface spécifique est grande. Pour la masse qui a une tendance constante, cela est cohérent avec le fait que le nombre de particules émises diminue quand leur taille augmente.

Pour les particules ultrafines et jusqu'à 400 nm, elles sont présentes en plus grand nombre et surtout pour un diamètre inférieur à 100 nm. Ceci est dû au fait que l'on découpe du carbone qui est connu pour libérer des particules ultrafines lorsqu'on l'usine. La concentration en

masse augmente ce qui est logique car la concentration en nombre se stabilise autour de 8×10^5 particules/cm³ pour les particules de plus en plus grandes.

Entre les PM_{2,5} et les 10 – 400 nm, on remarque que les concentrations en nombre diminuent toutes les deux avec le diamètre. Par contre pour la surface spécifique et pour la masse, les deux domaines des particules ne semblent pas évoluer dans le même sens.

3.7 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre qu'afin de détourner dans les conditions les plus favorables pour la santé de l'Homme, il est préférable d'utiliser les paramètres de coupe suivants :

- les géométries d'outil sont équivalentes,
- l'avance a peu d'impact significatif,
- la vitesse de coupe entre 50 et 200 m/min,
- et la profondeur de coupe a elle aussi assez peu d'impact sur les émissions.

Nous avons aussi vu que les particules les plus présentes sont celles comprises entre 10 nm et 100 nm. Et concernant les mesures de l'APS, il est possible que le flux n'ai pas été assez important pour réaliser des mesures suffisantes et que les particules se sont déposées au fond de la machine.

CHAPITRE 4

ÉMISSIONS LORS DU PERÇAGE

4.1 Introduction

Dans cette partie sont présentés et analysés les résultats des émissions de particules obtenus pour les essais de perçage. Les remarques sont les mêmes que pour le détournage, c'est-à-dire : pour les particules fines, les émissions sont très faibles, voire inexistantes, au-dessus de $2,5\ \mu\text{m}$. On s'intéressera donc qu'à ces dernières, que l'on appellera « $\text{PM}_{2,5}$ ». Pour les particules ultrafines, nous avons pu mesurer les diamètres allant de 10 à 400 nm. Comme il n'y a pas encore d'appellation connue de ce côté-là, on les appellera donc « 10 – 400 nm ».

Concernant les données obtenues pour les 10 – 400 nm (SMPS), il semble y avoir eu des problèmes avec l'appareil de mesure, car elles ne sont pas très élevées. Cela est sûrement dû au fait que le temps de perçage d'un trou est trop faible (maximum une seconde) pour que l'appareil puisse réaliser des mesures convenables.

Concernant les graphiques, vu la similarité de ceux-ci représentant les différentes concentrations, nous choisissons présenter ici que les concentrations en nombre. Les graphiques représentant les concentrations en surface et en masse en fonction de l'évolution des paramètres seront mis en ANNEXE II.

4.2 L'outil ($a = 0,02\ \text{mm/tr}$, $V_c = 50\ \text{m/min}$ et $e = 2\ \text{mm}$)

Sur la Figure 4-1 on remarque tout d'abord que la concentration en nombre dans ce cas-ci est très faible, et ce pour les deux grandeurs de particules. En effet elle se situe à un ordre de grandeur de 10^1 alors que les valeurs en conditions normales sont autour de 10^3 particules/ cm^3 . La quantité de particules mesurée étant peu significative, on peut se demander si les concentrations présentées sont représentatives de la réalité.

On note que sur la figure suivante, les émissions lors de l'utilisation de l'outil de géométrie B sont 1,5 fois supérieures à celles de l'outil A pour les $PM_{2,5}$. Dans le domaine des particules ultrafines et jusqu'à 400 nm, c'est la géométrie d'outil A qui semble produire le plus de poussière, de 2 à 4,6 fois plus que l'outil B. Comme les particules ultrafines sont plus dangereuses pour l'Homme, il faut porter une attention particulière à limiter au maximum les émissions des 10 – 400 nm.

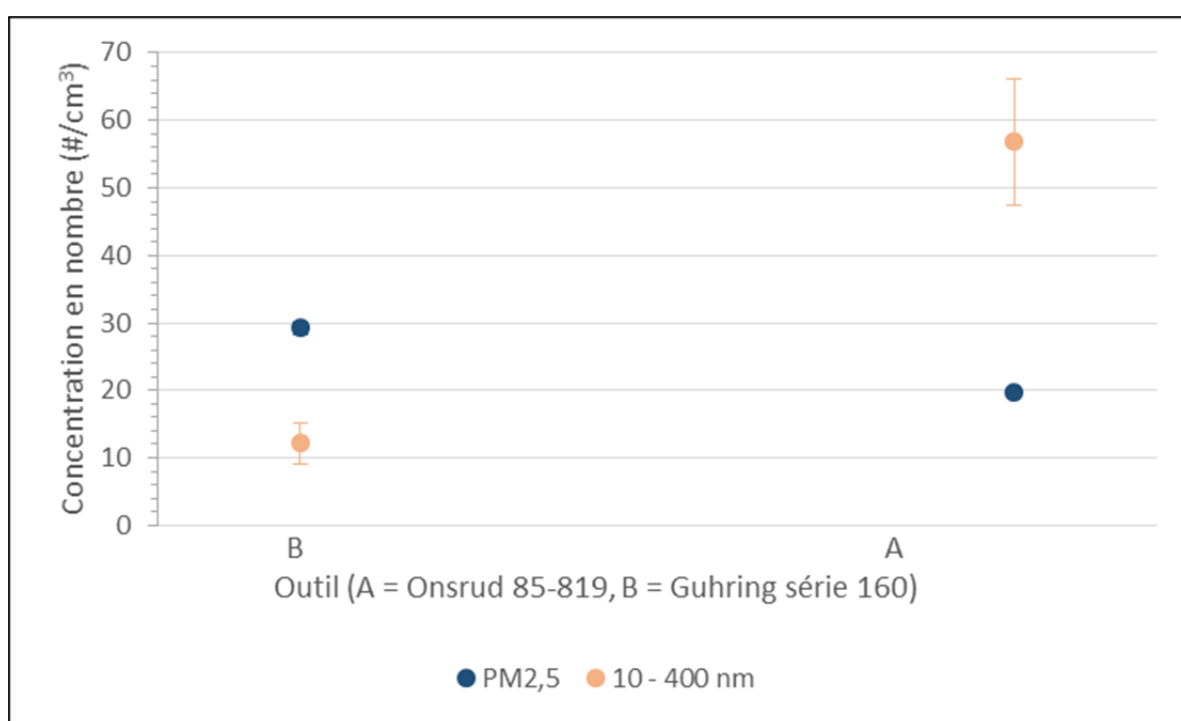


Figure 4-1 Concentration en nombre des particules en fonction de l'outil pour le perçage

Les observations faites sur les graphes des concentrations en surface et en masse (Figure-A II-1 et Figure-A II-2 en annexe) sont très similaires aux précédentes, c'est-à-dire que l'écart entre les outils pour les $PM_{2,5}$ est plus faible que pour les 10 – 400 nm.

L'impact de la géométrie des outils sur les émissions ne peut pas être confirmé actuellement car les différentes valeurs mesurées ne sont pas représentatives. Il faudrait donc dans d'autres travaux réaliser des essais pour confirmer ou infirmer les tendances observées ici.

4.3 L'avance ($V_c = 300$ m/min, $e = 4$ mm)

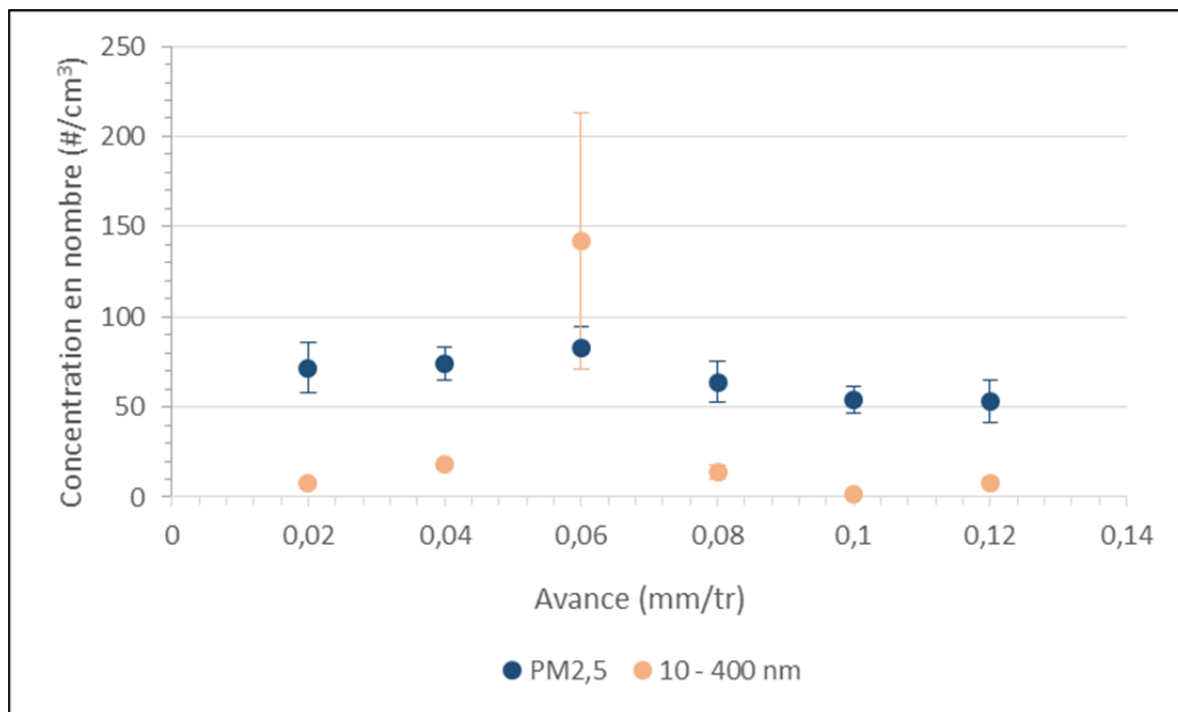


Figure 4-2 Concentration en nombre des particules en fonction de l'avance pour le perçage

Concernant les PM_{2,5} sur la figure ci-dessus, on remarque que la concentration en nombre est relativement constante avec une très légère augmentation à 0,06 mm/tr. Après cette avance, la concentration semble diminuer légèrement, mais ce n'est pas significatif. De plus, là aussi la valeur des concentrations mesurées est faible pour les PM_{2,5} et les 10 – 400 nm.

Pour les 10 – 400 nm, on remarque que ces particules sont en quantité négligeable, sauf à une avance de 0,06 mm/tr où elles semblent très présentes : la valeur est environ 8 fois supérieure aux précédentes. Il se peut cependant que ce point soit une valeur absurde dans les mesures, cela pourrait être confirmé par l'incertitude qui est assez importante en ce point. L'autre possibilité est qu'il s'agisse d'un paramètre de coupe très défavorable à éviter absolument. Cependant, cela doit être confirmé du fait des faibles émissions observées en général.

Du côté des concentrations en surface et en masse, les observations faites sur les 10 – 400 nm sont identiques (Figure-A II-3 et Figure-A II-4 en annexe). Pour les $PM_{2,5}$ il semble que les concentrations diminuent à partir de 0,06 mm/tr de manière plus prononcée que pour la concentration en nombre. En dessous de cette avance, les différences de concentrations ne sont pas significatives.

Si on décide d'ignorer le point d'émissions à 0,06 mm/tr, on peut dire que l'avance semble avoir que peu d'impact sur les particules émises lors du perçage. En effet, les différences entre les valeurs mesurées sont assez faibles ce qui ne permet pas de différencier les avances. Une conclusion semblable a été observée pour le détournage concernant les 10 – 400 nm.

4.4 La vitesse de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $e = 4$ mm)

Sur la Figure 4-3, les $PM_{2,5}$ ont tendance à augmenter en fonction de la vitesse de coupe, comme il a été noté dans le cas du détournage. Entre 50 et 200 m/min, les concentrations mesurées sont très proches, par contre à des vitesses supérieures, le nombre de particules émises est jusqu'à 8 fois supérieur. Cependant encore une fois les émissions sont limitées en nombre ce qui ne permet pas d'être absolument sûr des tendances observées.

En s'intéressant aux 10 – 400 nm, on remarque que les émissions sont peu écartées entre les différentes vitesses de coupe. À 300 m/min, la concentration mesurée est légèrement plus importante que lors du perçage aux autres vitesses mais les valeurs étant très faibles, ce n'est pas représentatif. Le nombre de particules émises est aussi assez proche de zéro, ainsi la confiance donnée à ces résultats est très faible.

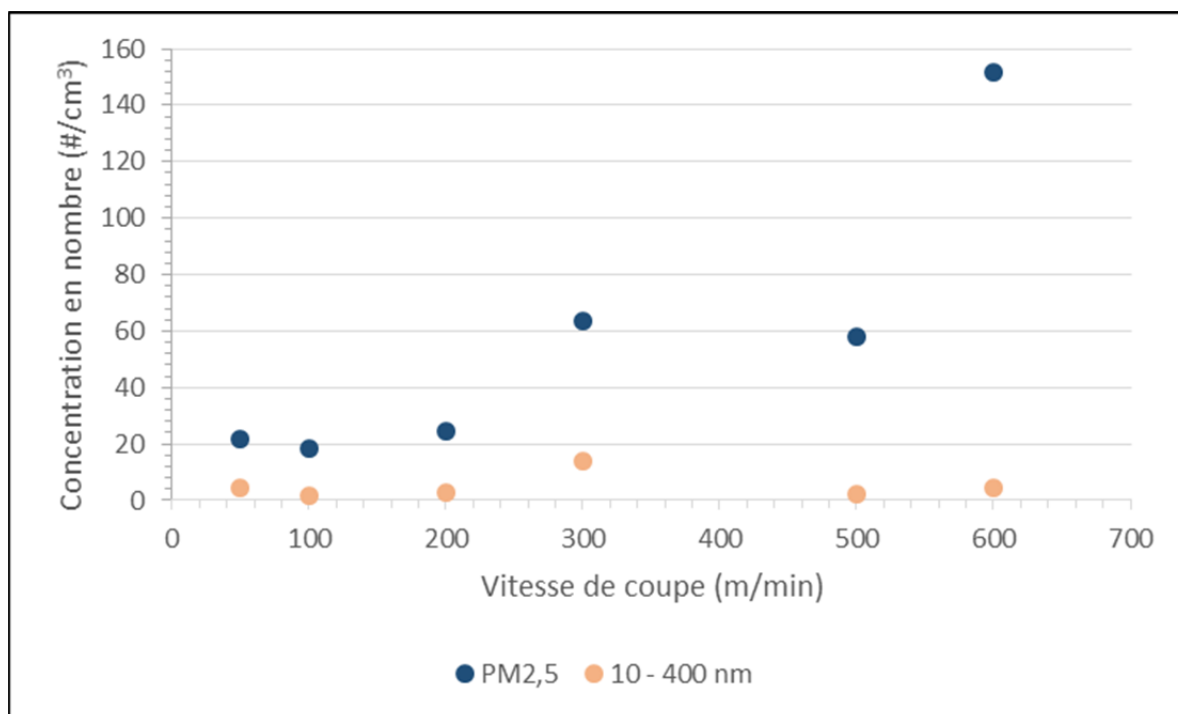


Figure 4-3 Concentration en nombre de particules en fonction de la vitesse de coupe pour le perçage

Concernant les concentrations en surface et en masse (Figure-A II-5 et Figure-A II-6 en annexe), les remarques sont semblables. En effet les concentrations pour les $PM_{2,5}$ augmentent avec la vitesse de coupe au-dessus de 200 m/min. Les 10 – 400 nm ont tendance à augmenter aussi avec la vitesse de coupe supérieure à 200 m/min. Toutefois, il faut faire attention car les écarts types à partir de 300 m/min sont très importants, ce qui laisse l'interprétation hasardeuse et on ne peut pas être sûr de cette augmentation.

Concernant cette partie, on remarque que le minimum d'émission de particules se situe pour une vitesse de coupe située entre 50 et 200 m/min pour les particules fines. Pour les ultrafines et jusqu'à 400 nm, les émissions sont presque inexistantes. L'intervalle qui minimise les émissions est aussi en partie dans les valeurs conseillées (90 à 120 m/min), ce qui montre qu'en plus de réaliser une coupe de bonne qualité, les particules émises semblent être limitées.

Il est aussi intéressant de remarquer qu'à une vitesse de 300 m/min il y a une augmentation des concentrations pour les deux domaines, ce qui laisse supposer qu'à cette vitesse, les conditions de coupe ne sont plus optimales. De plus considérant l'importance de l'écart type pour les vitesses supérieures ou égales à 300 m/min, on ne peut pas tirer des conclusions en lesquelles nous avons confiance sur ces vitesses.

4.5 La profondeur de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $V_c = 300$ m/min)

La concentration de particules $PM_{2,5}$ émises lors du perçage est relativement constante, en effet le rapport entre les différentes vitesses ne dépasse pas 1,2. De plus, les écarts types sont assez importants pour que les trois valeurs soient considérées comme confondues.

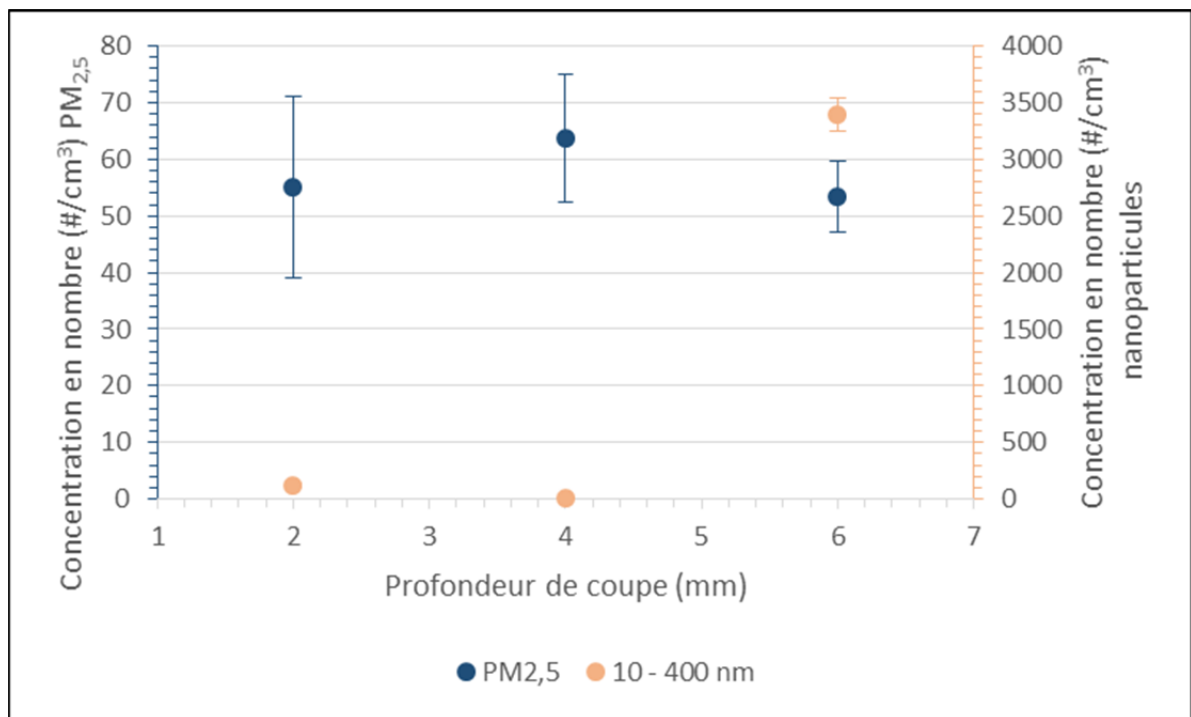


Figure 4-4 Concentration en nombre de particules en fonction de la profondeur de coupe pour le perçage

Pour les particules de 10 - 400 nm, on voit bien ici que les mesures n'ont pas pu être effectuées correctement. La concentration en nombre pour les profondeurs de 2 et 4 mm ne sont pas significatives car proches de 0 particules/ cm^3 . À 6 mm, on remarque qu'il y a une

concentration de $3,5 \cdot 10^3$ particules/cm³ ce qui est plus proche du nombre de particules présentes naturellement dans l'air. Cependant au regard des mesures précédentes, la confiance donnée dans cette valeur est assez faible.

En s'intéressant à la concentration en surface et celle en masse (Figure-A II-7 et Figure-A II-8 en annexe), on remarque que les constats sont relativement les mêmes que précédemment : les écarts entre chaque profondeur pour les PM_{2,5} sont faibles, ainsi on peut les considérées comme confondues. Et pour les 10 à 400 nm, les valeurs mesurées pour les deux profondeurs les plus faibles sont quasiment nulles et à 6 mm, cela se rapproche plus des valeurs mesurées dans l'air ambiant.

Ainsi, nous pouvons dire que la profondeur de coupe ne semble pas avoir d'influence sur les émissions de particules en PM_{2,5}, et concernant les 10 – 400 nm, les deux valeurs les plus faibles sont non significatives, on ne peut donc pas tirer de tendance sur l'impact de ce paramètre sur les émissions.

4.6 Dispersion des particules

4.6.1 Concentration en nombre

4.6.1.1 Particules PM_{2,5}

Le maximum des émissions se situe pour des particules de diamètre inférieur à 0,7µm, puis la concentration diminue fortement jusqu'à être négligeable à partir d'un diamètre de 2,5 µm. On remarque aussi que les émissions sont assez faibles en nombre, ce qui ne permet pas d'être sûr que cela soit représentatif des émissions en réalité.

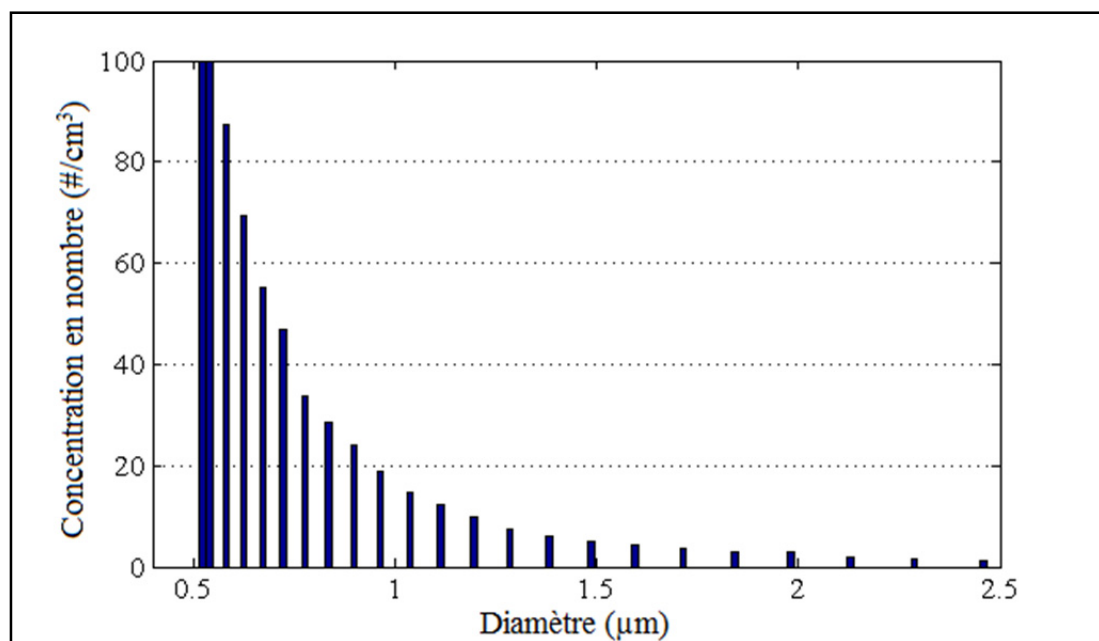


Figure 4-5 Dispersion de la concentration en nombre des particules (PM_{2,5}) pour le perçage

4.6.1.2 Particules de taille 10 à 400 nm

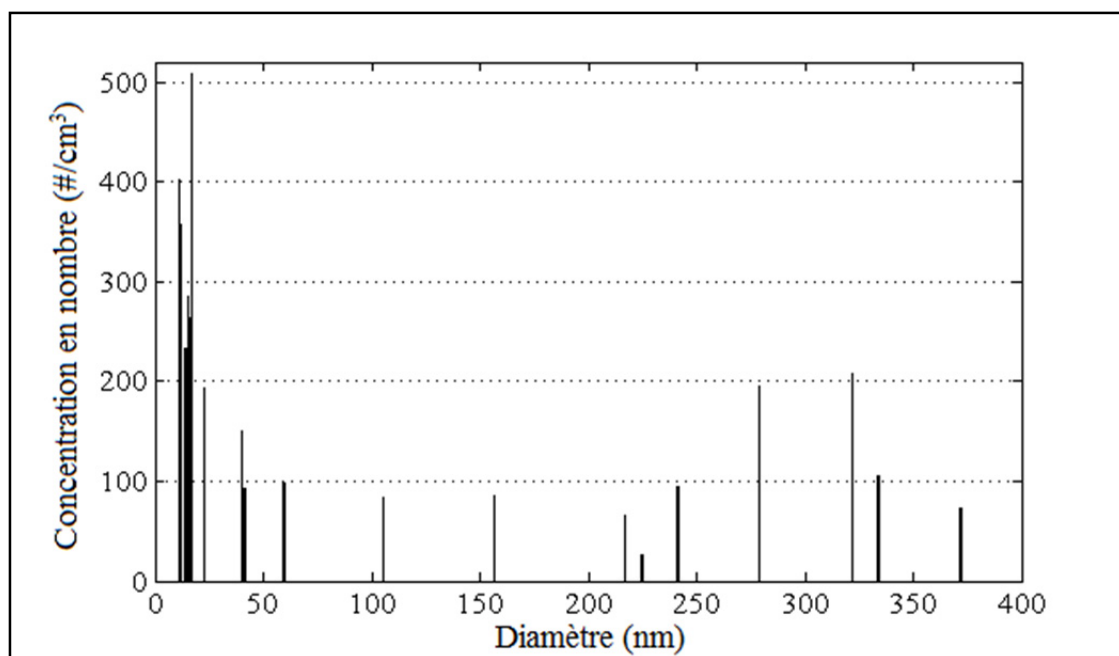


Figure 4-6 Dispersion de la concentration en nombre des particules (10 - 400 nm)
pour le perçage

La concentration en nombre semble importante pour les particules ultrafines, cependant il y a peu de valeurs de concentrations en fonction du diamètre, en effet les graphes sont clairsemés, on remarque donc que les mesures n'ont pas pu être réalisées correctement.

4.6.2 Concentration en surface

4.6.2.1 Particules $PM_{2,5}$

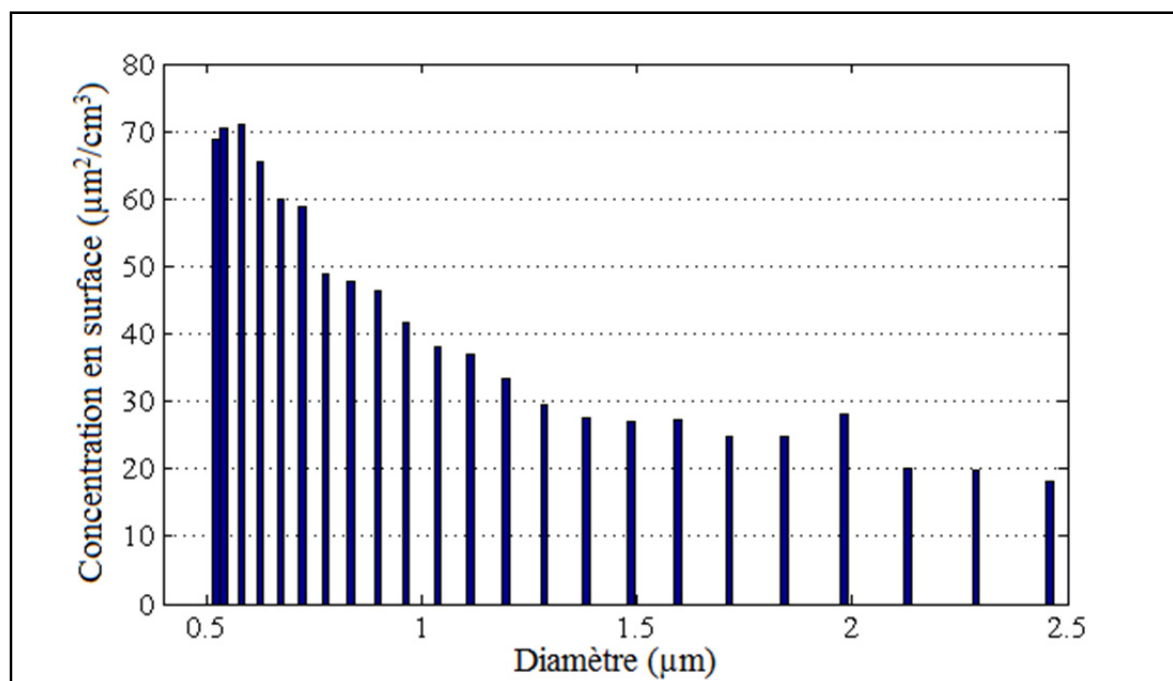


Figure 4-7 Dispersion de la concentration en surface des particules ($PM_{2,5}$)
pour le perçage

La concentration en surface diminue lorsque le diamètre des particules augmente. On remarque que la pente de la concentration en surface est moins importante à partir de 1,5 µm. La concentration est presque nulle pour les diamètres supérieurs à 2,5 µm.

4.6.2.2 Particules de taille 10 à 400 nm

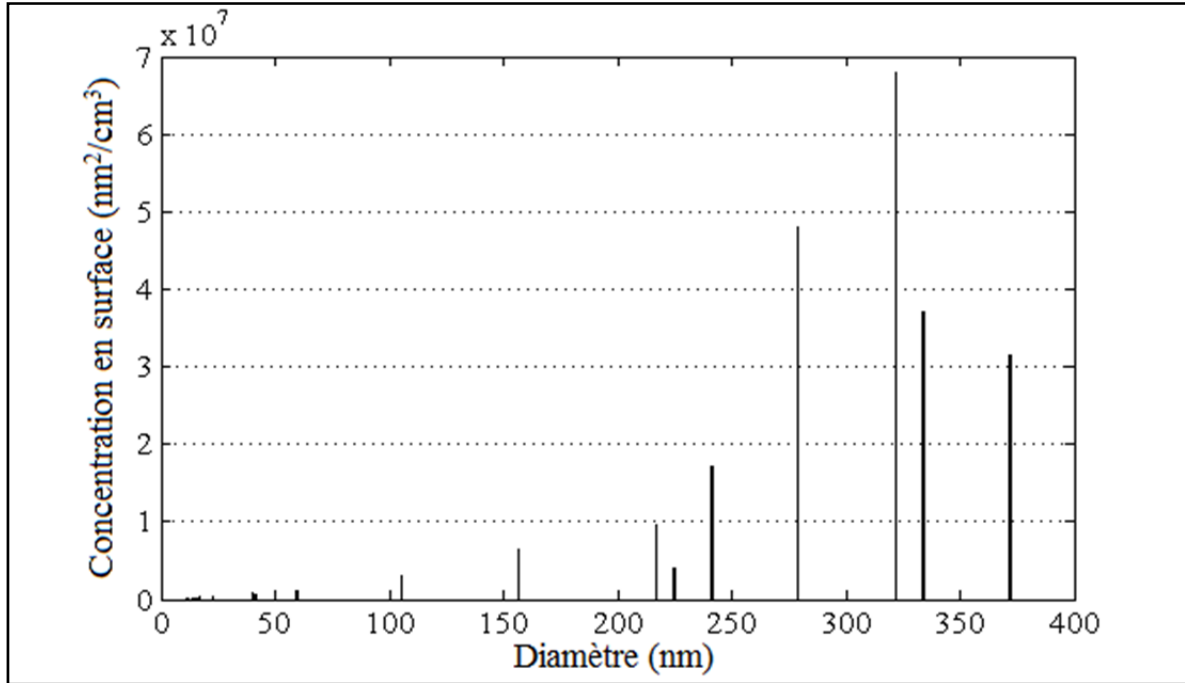


Figure 4-8 Dispersion de la concentration en surface des particules (10 - 400 nm) pour le perçage

Cette concentration en surface est faible voire presque nulle jusqu'à un diamètre d'environ 100 nm, où elle augmente rapidement, ce qui montre que les particules sont très présentes en nombre mais assez peu lors de la concentration en surface. Cela forme globalement un pic de concentration en surface entre 200 nm et 400 nm, cependant vu le faible nombre de valeurs mesurées, il faudrait vérifier ces observations.

4.6.3 Concentration en masse

4.6.3.1 Particules PM_{2,5}

La concentration en masse est la plus constante et tourne autour de 0,008 mg/m³, cependant, les émissions sont négligeables au-dessus de 2,5 µm de diamètre. Cela vient du fait que la concentration en nombre de particules diminue constamment avec l'augmentation de leur taille. Or plus la particule est grande, plus sa masse l'est étant donné qu'elle dépend de son

volume. C'est pour cela que même si le nombre de particules diminue, leur masse en fonction de leur taille reste relativement constante.

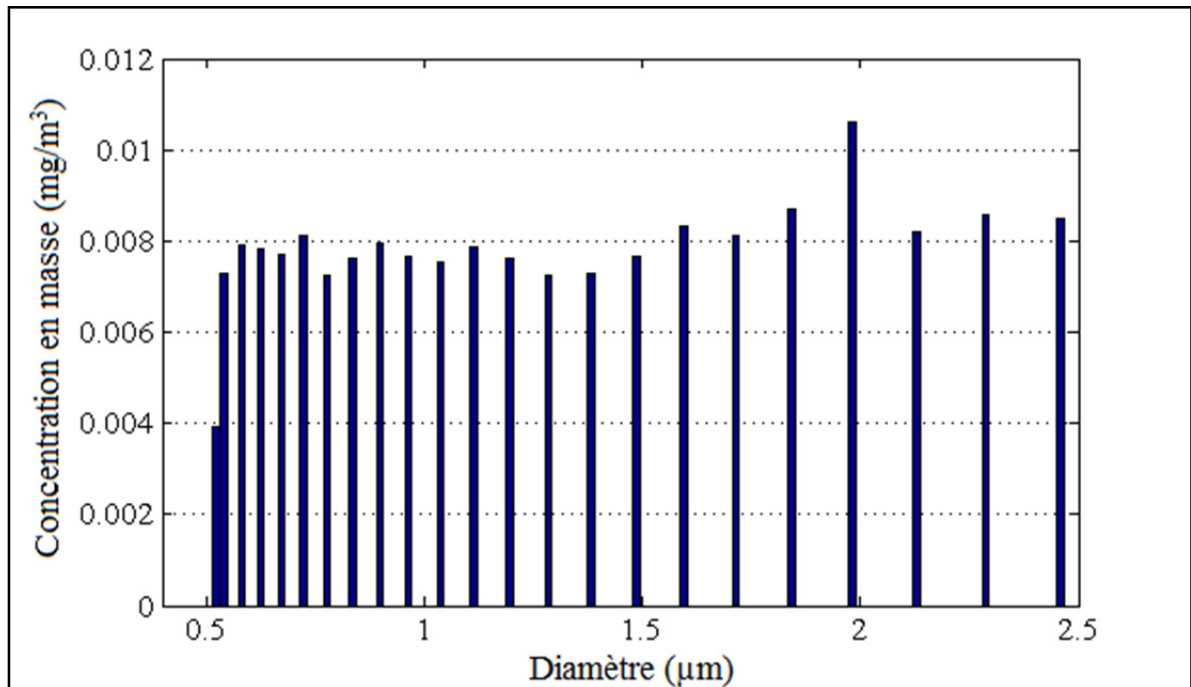


Figure 4-9 Dispersion de la concentration en masse des particules (PM_{2,5}) pour le perçage

4.6.3.2 Particules de taille 10 à 400 nm

Cette concentration est faible et constante jusqu'à un diamètre d'environ 100 nm, ou elle monte en flèche. Cela forme un pic entre 200 nm et 400 nm pour la concentration en masse. Ici aussi on peut observer la dangerosité des particules ultrafines étant donné qu'elles sont très présentes en nombre, mais lorsque l'on regarde la concentration en surface, elles sont quasiment inexistantes.

Globalement, on remarque que les émissions de particules sont assez groupées : entre 250 nm et 1 μm de diamètre se trouve une grande partie des particules. On remarque comme pour le détournage que les concentrations pour des particules supérieures à 2,5 μm sont inexistantes : elles composent certainement les copeaux retrouvés après l'usinage. De plus, il y a aussi un

pic très important pour la concentration en nombre des particules inférieures à 100 nm de diamètre. Ce pic est 2,5 fois plus important que celui entre 250 et 350 nm de diamètre.

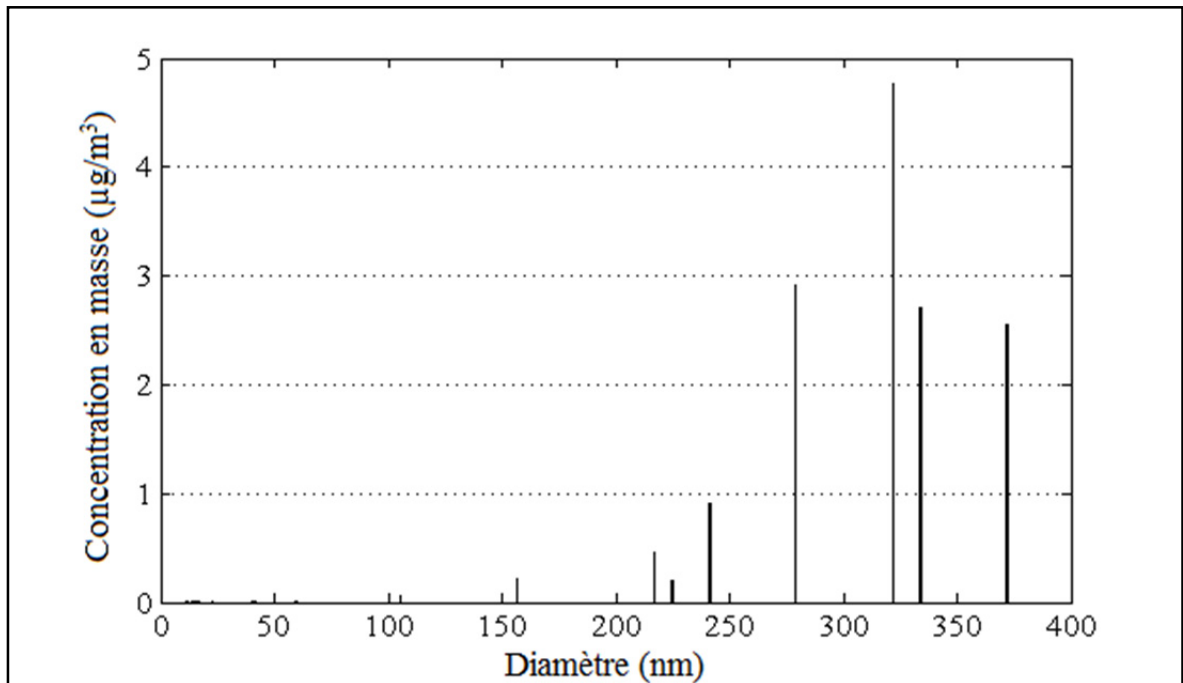


Figure 4-10 Dispersion de la concentration en masse des particules (10 - 400 nm) pour le perçage

4.7 Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre qu'afin de percer dans des conditions les plus favorables pour la santé de l'Homme, il est préférable d'utiliser les paramètres de coupe suivants :

- Les valeurs mesurées ne permettent pas de prendre de décisions sur l'outil,
- l'avance ne semble pas avoir d'influence,
- la vitesse de coupe conseillée est de 50 m/min, à 200 m/min
- les valeurs obtenues en fonction de la profondeur ne permettent pas de tirer de conclusion représentative.

Nous avons aussi vu que les particules les plus présentes sont les particules ultrafines, mais aussi celles comprises entre 200 nm et 2,5 µm. Par contre, comme on a pu l'observer pour le

détourage, les particules ultrafines sont quasiment invisible lorsque l'on regarde la concentration en surface et la concentration en masse. Les particules de 200 nm à 2,5 μm étant assez présentes dans les trois concentrations. Notons tout de même que les mesures réalisées sont assez faibles par rapport aux concentrations mesurées normalement dans l'air ambiant, on se pose donc la question de l'exactitude de ces mesures. Il serait intéressant de les vérifier dans des travaux futurs.

CHAPITRE 5

QUALITÉ DE COUPE

5.1 Introduction

Dans cette partie, nous présentons et analysons les résultats des mesures de forces dans un premier temps, puis les résultats des mesures de défauts. Le détourage est réalisé dans le plan (X, Y) et les défauts se limitent à des fibres non coupées. Le perçage est réalisé selon l'axe Z et les défauts analysés sont ceux autour de la surface de sortie de l'outil.

5.2 Les forces de coupe

Pour les forces de coupe, nous avons obtenu les courbes brutes sur les deux figures ci-dessous, pour le détourage (outil A, $a = 0,02$ mm/tr, $V_c = 50$ m/min et $e = 2$ mm) puis pour le perçage (outil B, $a = 0,02$ mm/tr, $V_c = 50$ m/min et $e = 2$ mm).

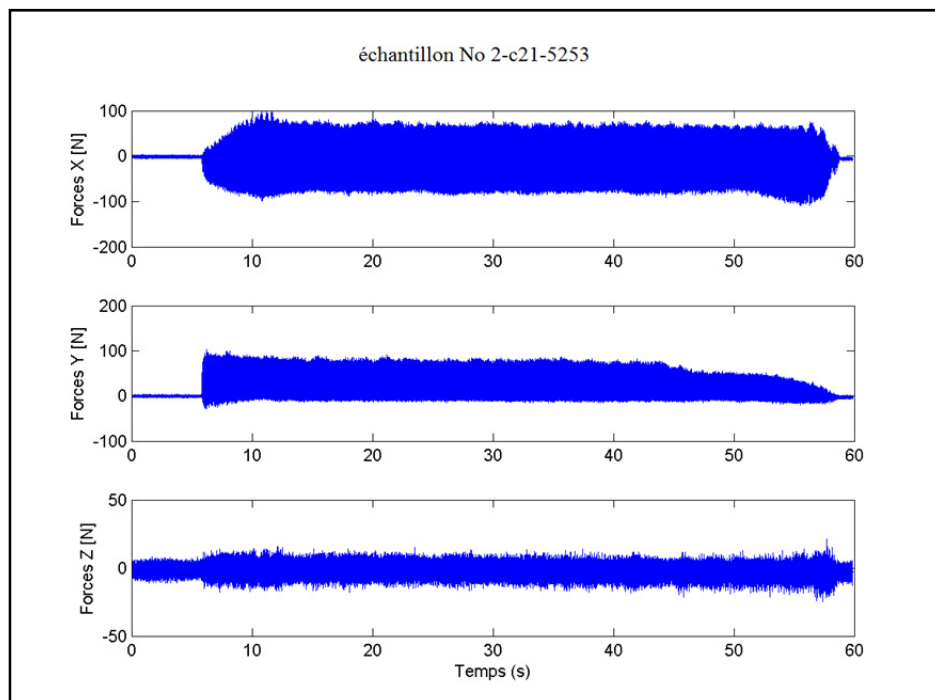


Figure 5-1 Graphique des forces de coupe lors du détourage

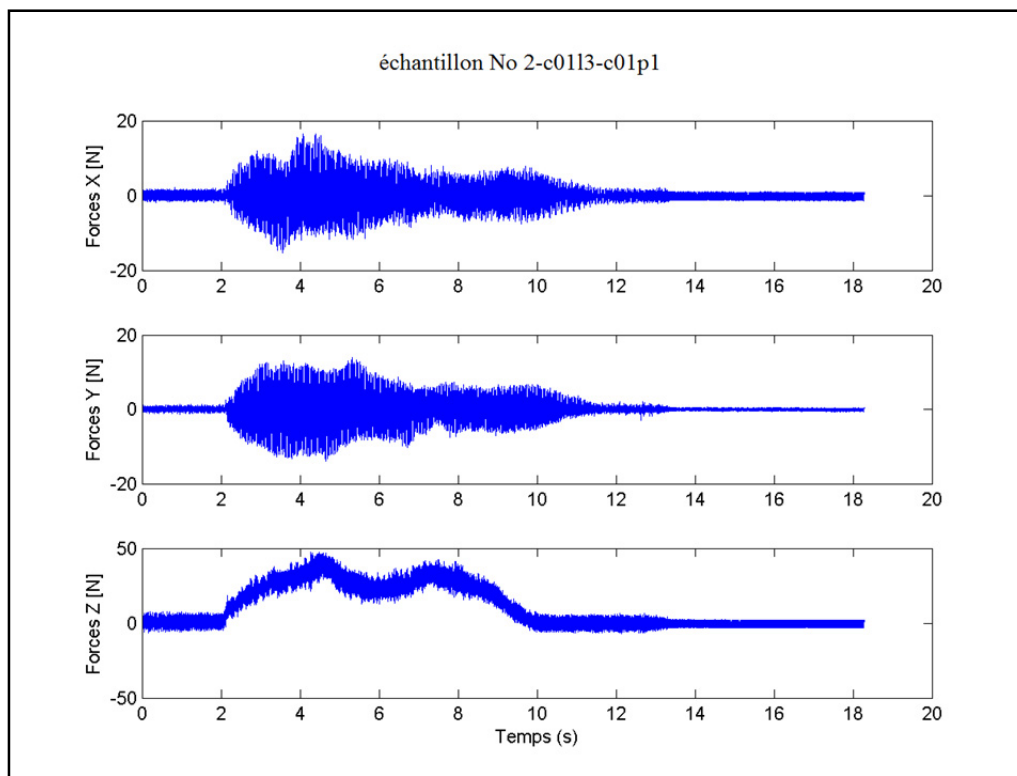


Figure 5-2 Graphique des forces de coupe lors du perçage

5.2.1 Détourage

Concernant le détourage, afin d'alléger les informations sur les graphiques, nous avons choisi de prendre en compte les forces F_z et F_{xy} au lieu de prendre les forces F_x et F_y .

5.2.1.1 L'outil ($a = 0,02$ mm/tr, $V_c = 50$ m/min et $e = 2$ mm)

Sur la Figure 5-3 la force prédominante est dans le plan (X, Y), qui correspond au plan de découpe. On remarque aussi lors du détourage avec l'outil A (Onsrud) ou l'outil B (Guhring), que les forces dans le plan de coupe ne sont pas très différentes. En effet, on note une légère diminution de la force F_{xy} de l'ordre de 5 % pour l'outil A, mais aussi une augmentation pour la force en Z de l'ordre de 34 % pour ce même outil, qui restent peu significatives. Lorsque l'on compare leur norme, on constate que ces deux outils sont équivalents, car l'outil B engendre des forces à peine 3 % plus importantes que l'outil A. L'outil à privilégier afin de minimiser les forces est donc l'outil A.

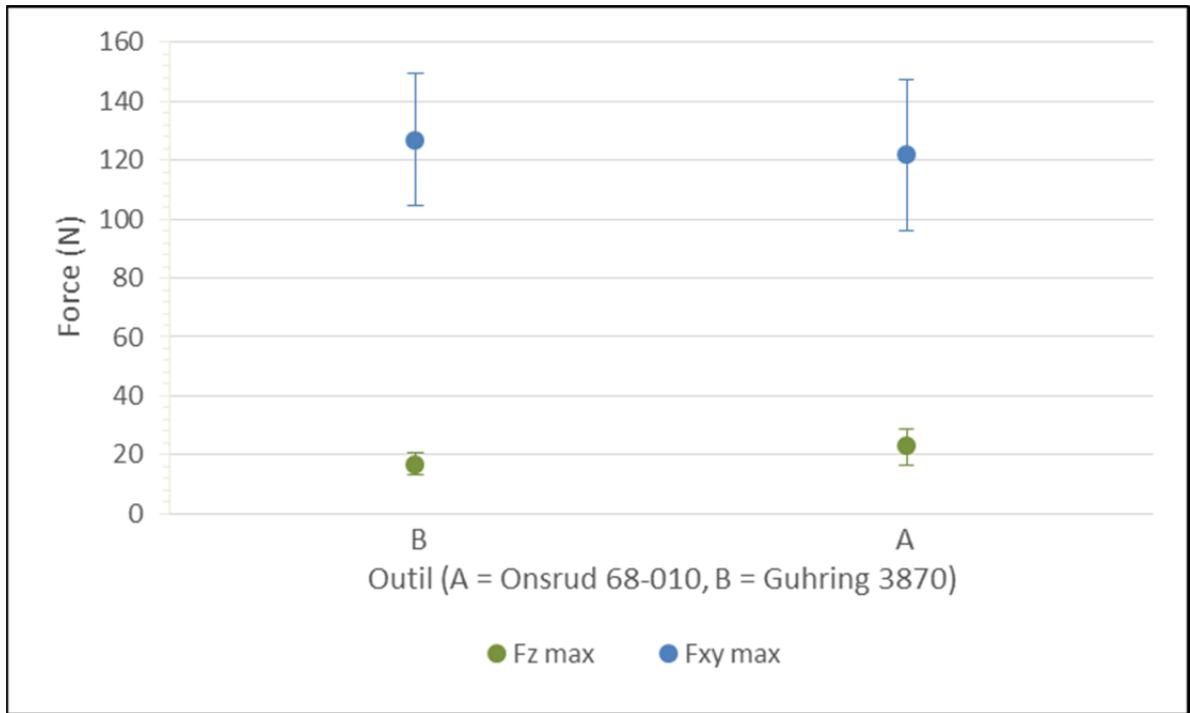


Figure 5-3 Forces de coupe en fonction de l'outil pour le détournage

5.2.1.2 L'avance ($V_c = 300 \text{ m/min}$, $e = 4 \text{ mm}$)

Sur la Figure 5-4 la force la plus élevée est F_{xy} , qui est dans le plan de l'avance. Pour les forces dans les directions XY et Z il y a une augmentation de leur valeur avec l'avance, respectivement de 65 %, 86 % et 152 %. Ceci s'explique par le fait qu'avancer plus vite à une vitesse de rotation constante oppose plus de résistance, donc demande plus de force. La courbe de la force en XY semble atteindre une asymptote vers 700 N. L'avance à privilégier du point de vue des forces de coupe est donc la plus faible, soit 0,02 mm/tr.

Lorsque l'on compare ces résultats avec ceux des émissions, on remarque que les comportements ne sont pas les mêmes. En effet, ici les courbes sont croissantes d'un bout à l'autre, alors que pour les particules émises, les $PM_{2,5}$ diminuent avec l'avance et les particules de 10 à 400 nm sont relativement constantes. Il faut donc aller voir du côté de la qualité de la coupe afin de vérifier si des forces plus importantes ne changent pas la qualité de surface.

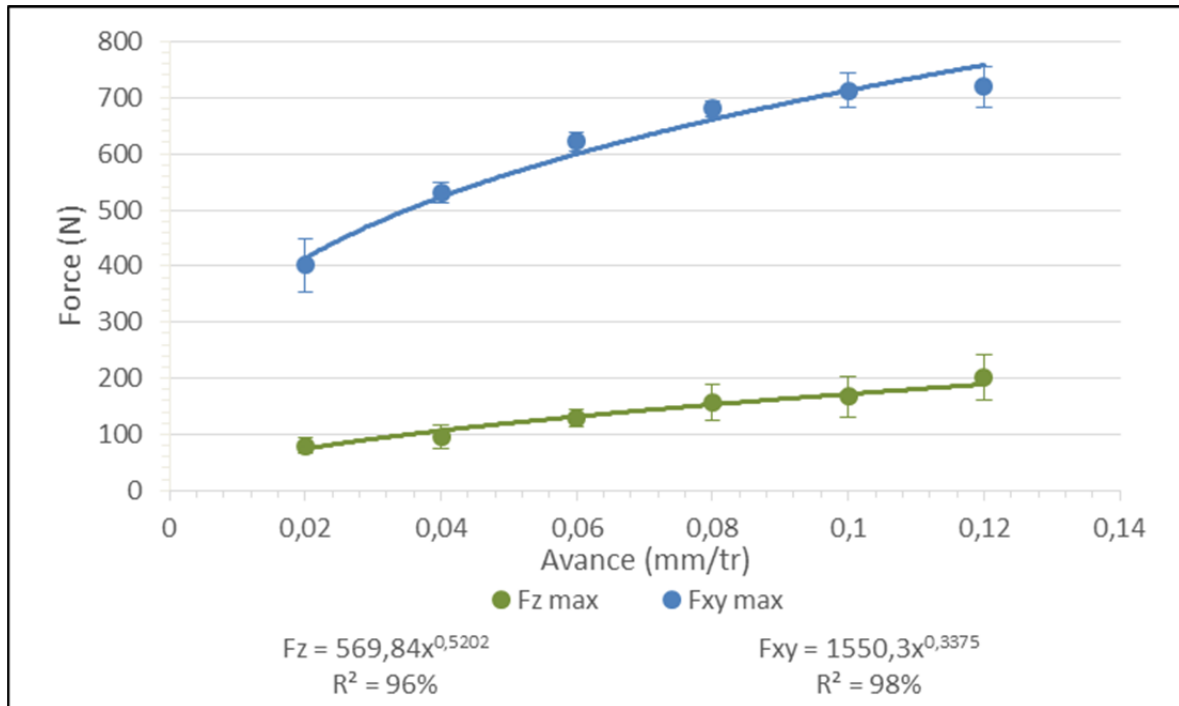


Figure 5-4 Forces de coupe en fonction de l'avance pour le détourage

5.2.1.3 La vitesse de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $e = 4$ mm)

Concernant les essais en fonction de la vitesse de coupe, ils ont été réalisés avec une avance dans la direction X. On le voit très bien sur la Figure 5-5 car c'est la force en XY qui prédomine. On remarque que plus la vitesse de coupe augmente, plus les forces augmentent. Concernant F_z , on remarque qu'au-dessus de 300 m/min il y a une forte augmentation qui peut être due au dégagement des copeaux qui est plus difficile à de telles vitesses. Cela suit la tendance des courbes d'émission, car à partir de 300 m/min, les émissions augmentent beaucoup plus rapidement. La vitesse de coupe idéale pour limiter les forces de coupe est donc de 50 m/min.

En comparant ces courbes avec celles des émissions de particules, on remarque qu'elles ont toutes une tendance à croître. Cependant, pour une vitesse de 600 m/min, les forces semblent diminuer légèrement alors que les concentrations en particules augmentent énormément.

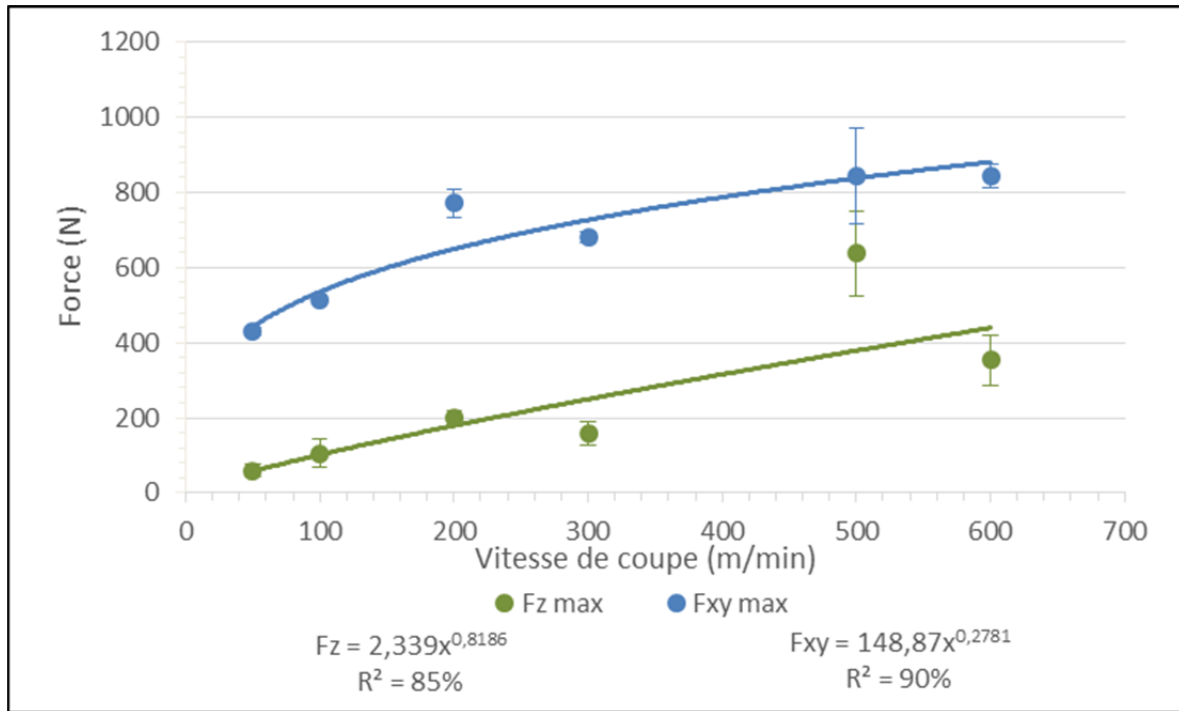


Figure 5-5 Forces de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour le détourage

5.2.1.4 La profondeur de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $V_c = 300$ m/min)

Sur la figure ci-dessous, la coupe a été réalisée avec une avance de 0,08 mm/tr dans la direction Y. On remarque en effet que les forces en XY sont plus élevées. De plus, il y a une forte augmentation des forces de 15 % (pour Fz) à plus de 200 % (pour Fxy), quand on passe de 2 mm à 4 mm de profondeur. Cependant, pour une profondeur de 6 mm on note une légère diminution pour Fxy et Fz de la force de coupe. La différence entre les deux est tellement faible que l'on peut les considérer comme constantes.

Lorsque l'on compare les tendances des forces à celles des concentrations de particules, on remarque qu'elles sont similaires : les forces augmentent entre 2 et 4 mm, mais se stabilisent par la suite.

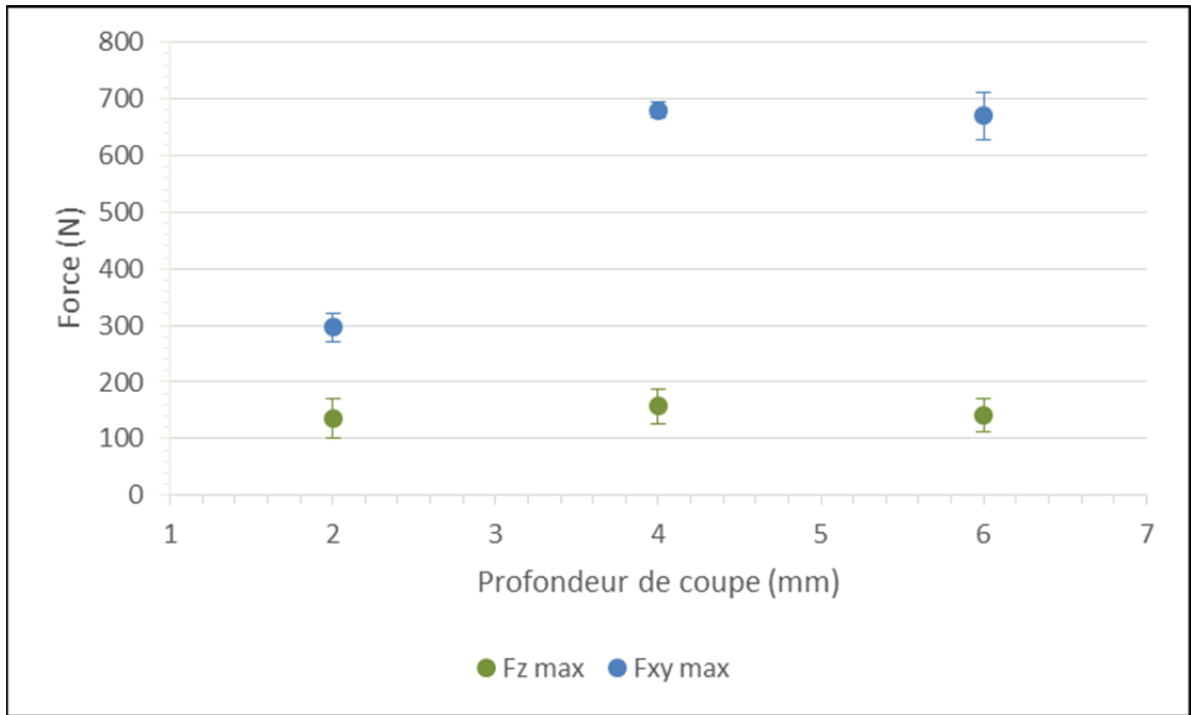


Figure 5-6 Forces de coupe en fonction de la profondeur de coupe pour le détournage

5.2.2 Perçage

Concernant le perçage, les forces dans le plan F_x et F_y sont quasiment égales. Afin d'alléger les informations sur les graphiques, nous avons choisi de prendre en compte la force F_{xy} à la place des forces F_x et F_y .

5.2.2.1 L'outil ($a = 0,02$ mm/tr, $V_c = 50$ m/min et $e = 2$ mm)

Sur la figure ci-dessous, la force la plus élevée est F_z , en effet il s'agit d'un perçage vertical. On note que l'outil A engendre une force en Z 115 % plus élevée que l'outil B. On peut supposer que cela est dû à sa pointe spéciale qui est censée percer avec une plus grande qualité les composites. Cette géométrie n'est donc pas optimale du point de vue des forces de coupe. Concernant la force F_{xy} , on remarque qu'elle est quasiment constante et plus faible que la précédente, ce qui est attendu d'une opération de perçage.

Lors de l'analyse des émissions de particules, nous avons vu que les deux géométries semblent équivalentes. Si l'on allie ces résultats, la géométrie de l'outil B semble plus adaptée d'un point de vue global. Ainsi il faudra vérifier au niveau de la qualité de surface si l'outil A est meilleur ou non, comme il est annoncé être spécial pour ce genre d'usinage.

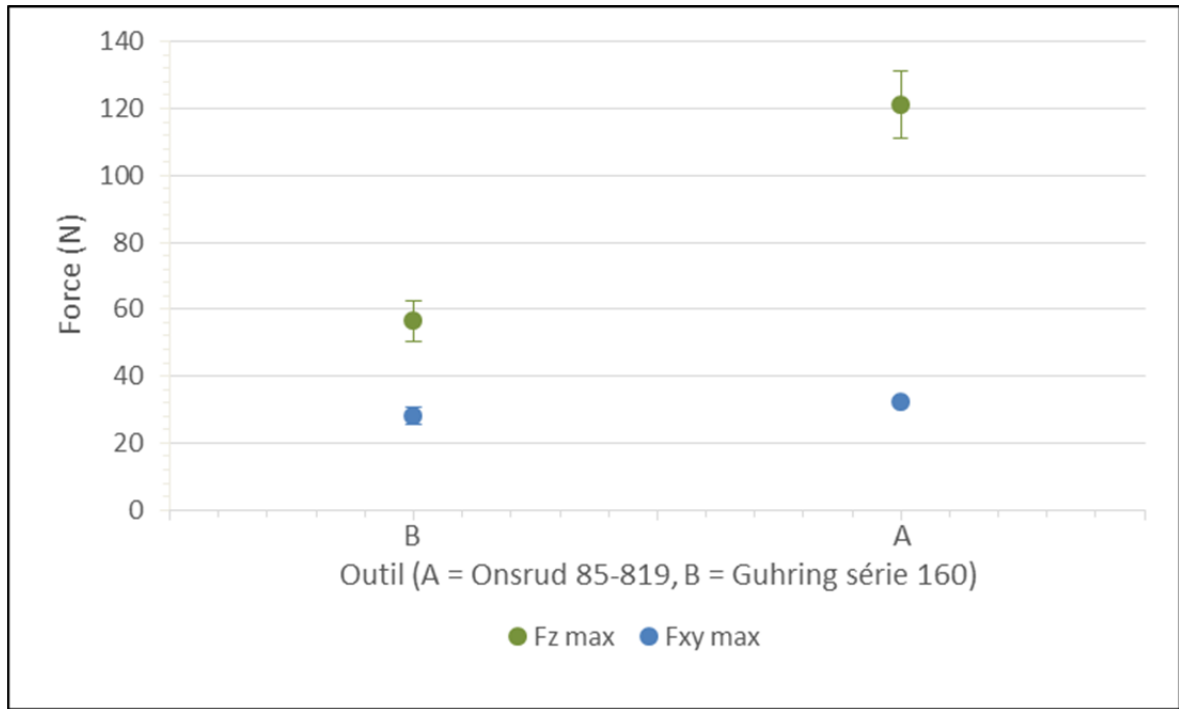


Figure 5-7 Forces de coupe en fonction de l'outil pour le perçage

5.2.2.2 L'avance ($V_c = 300 \text{ m/min}$, $e = 4 \text{ mm}$)

Sur la Figure 5-8, on remarque encore que la force F_{xy} est relativement faible par rapport à celle dans la direction Z. De plus, la force F_z croît lorsque l'avance augmente en passant de 348 N à 965 N. Ceci s'explique par le fait que lorsque l'on augmente l'avance à vitesse constante, la résistance opposée est plus importante donc il faut de force pour percer. On remarque que la force F_{xy} est très légèrement croissant, cela est dû au fait que l'avance augmente. De plus, les courbes d'émissions ont tendance à décroître alors que pour les forces elles sont croissantes. Ici encore, l'avance la plus faible est à privilégier du côté des forces, soit 0,02 mm/tr.

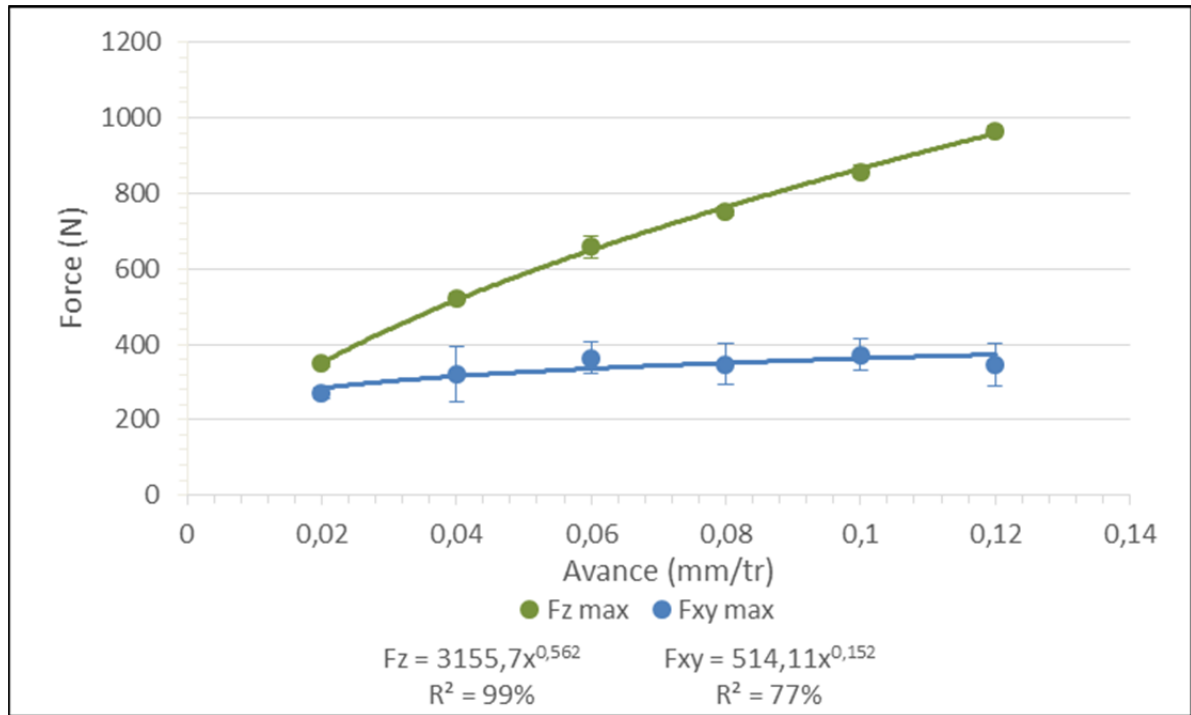


Figure 5-8 Forces de coupe en fonction de l'avance pour le perçage

5.2.2.3 La vitesse de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $e = 4$ mm)

Sur la Figure 5-9, les forces ont une tendance croissante lorsque la vitesse de coupe s'élève. À la vitesse la plus faible, F_{xy} est très faible (environ 40 N) alors que F_z atteint déjà 560 N. Entre 200 et 300 m/min, il y a une diminution de 30 à 50 N des forces F_z et une légère augmentation de F_{xy} , cela est peut-être dû à une zone de défaut dans le composite..

Pour les émissions de particules, il y a aussi une anomalie dans la courbe pour une vitesse de 300 m/min. Cependant, les valeurs des forces n'expliquent pas les valeurs des concentrations nettement supérieures à cette vitesse. Ici, la vitesse optimale est de 50 m/min.

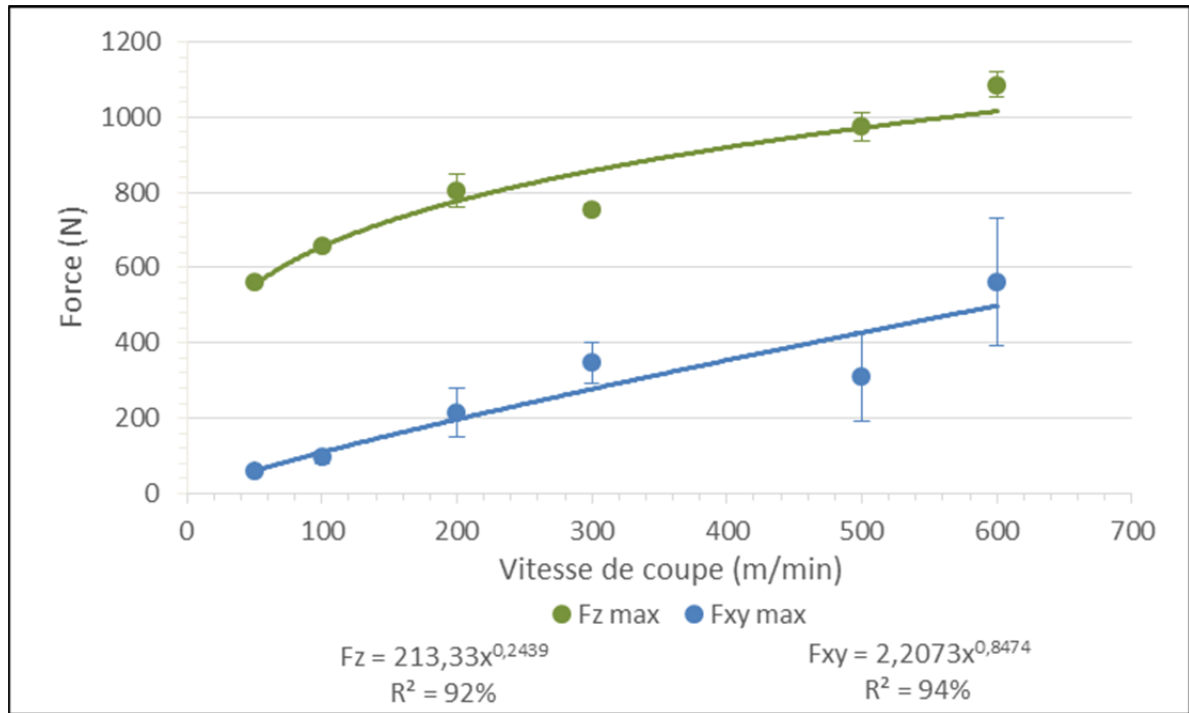


Figure 5-9 Forces de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour le perçage

5.2.2.4 La profondeur de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $V_c = 300$ m/min)

Concernant l'évolution de la force en fonction de la profondeur de coupe ci-dessous, la tendance est la même que pour le détournage. C'est-à-dire qu'il y a une forte augmentation des forces entre 2 et 4 mm de profondeur, puis les forces se stabilisent entre 4 et 6 mm.

Lorsque l'on compare l'évolution des forces avec celles des concentrations de particules, il n'y a pas de points communs. En effet lors de la concentration des particules, on observe que pour les particules ultrafines entre 2 et 4 mm de profondeur, il n'y a pas grand changement et les concentrations explosent entre 4 et 6 mm. Pour les $PM_{2,5}$, les concentrations sont relativement proches, quelle que soit la profondeur.

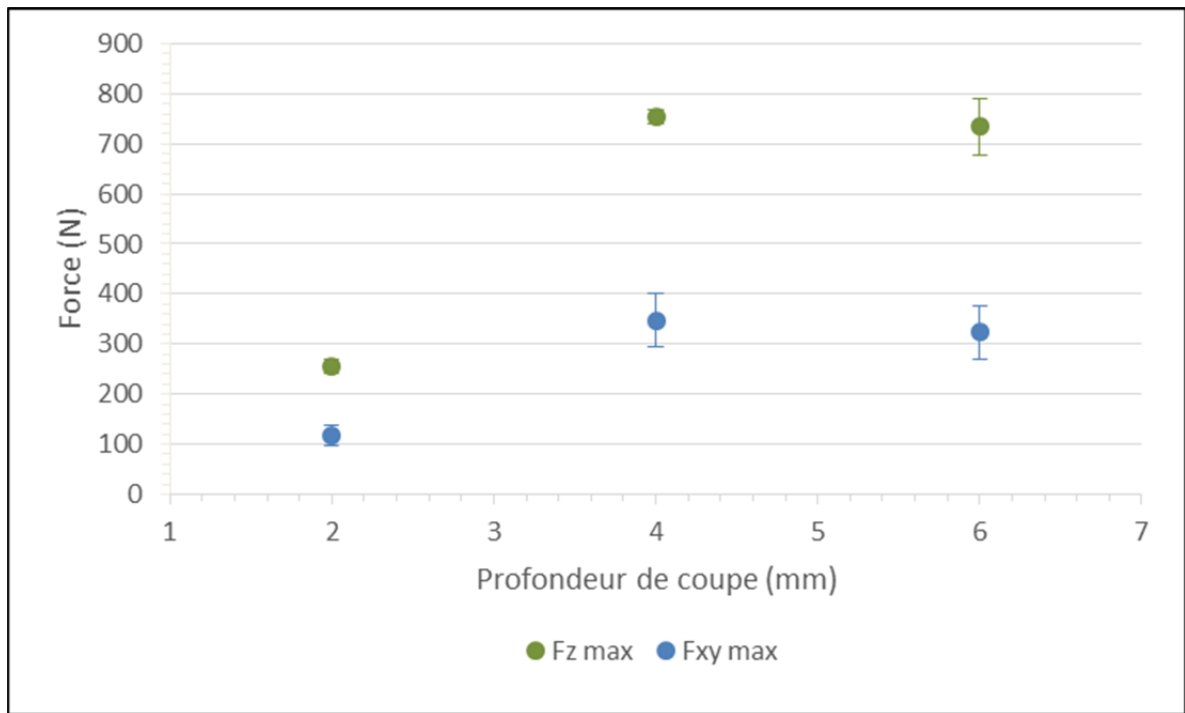


Figure 5-10 Forces de coupe en fonction de la profondeur de coupe pour le perçage

5.3 Défauts de coupe

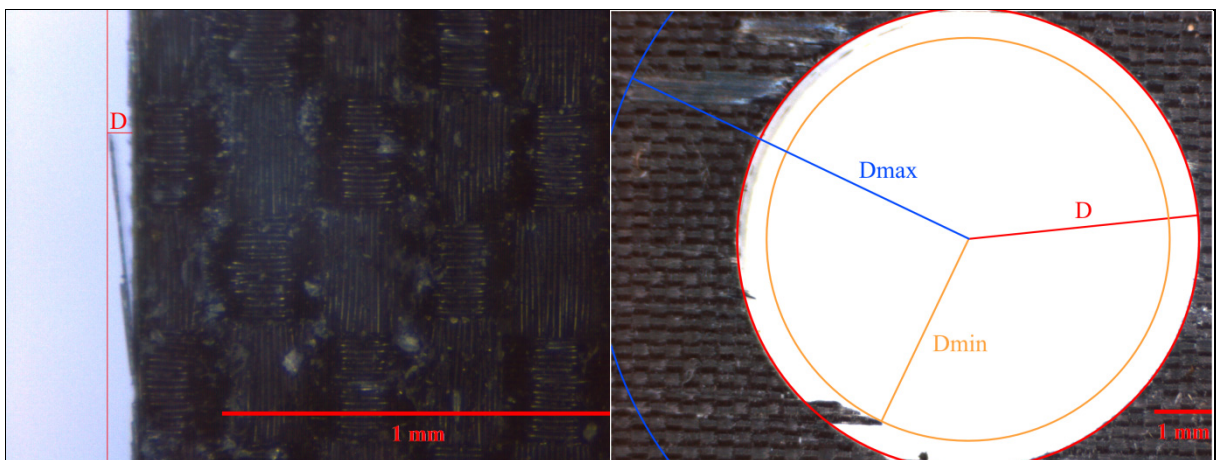


Figure 5-11 Photos des mesures des défauts : à gauche le détourage et à droite le perçage

Pour quantifier ces défauts, nous avons utilisé un microscope optique afin de prendre des clichés de ceux-ci comme illustré sur la Figure 5-11. Puis connaissant l'échelle, nous avons pu mesurer les différentes imperfections sur la photo. Pour le détourage, les défauts mesurés

correspondent à la distance maximale (perpendiculaire au bord de l'échantillon) à laquelle la fibre est arrachée de la matrice. Et pour le perçage, on mesure trois diamètres différents : le diamètre nominal (D), le diamètre maximal (Dmax) décrit par les délaminations et le diamètre minimal (Dmin) décrit par les fibres non coupées.

5.3.1 Détourage

5.3.1.1 L'outil ($a = 0,02 \text{ mm/tr}$, $V_c = 50 \text{ m/min}$ et $e = 2 \text{ mm}$)

La figure ci-dessous met en évidence le fait que les défauts sont relativement les mêmes que l'on utilise l'outil A ou B. De plus, on remarque que les défauts de coupe peuvent être jusqu'à 70 % plus importants en opposition qu'en avalant, mais cela reste à confirmer étant donné les écarts types.

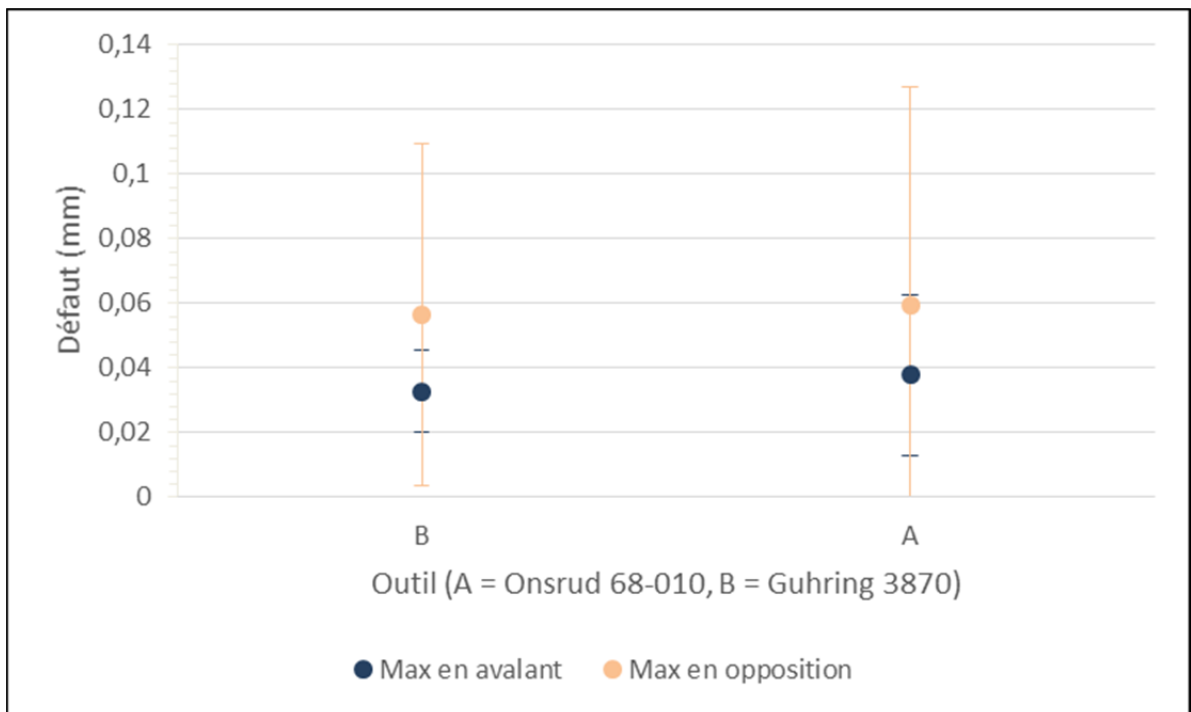


Figure 5-12 Défauts de coupe en fonction de l'outil pour le détourage

5.3.1.2 L'avance ($V_c = 300$ m/min, $e = 4$ mm)

Sur la Figure 5-13, la tendance de la courbe des défauts en avalant semble croissante. On remarque cependant que pour les deux courbes, les écarts types sont assez importants ici nous empêchant d'interpréter ces courbes de façon exacte. Cela peut aussi être dû au fait que l'avance impacte peu les défauts.

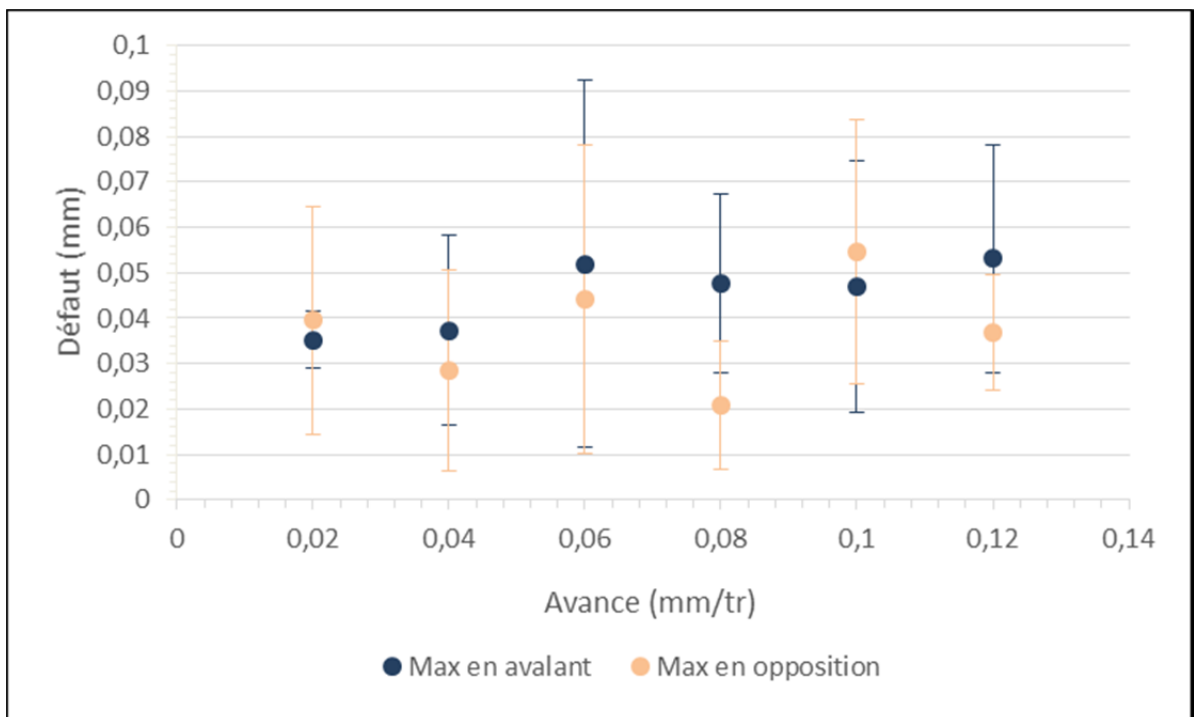


Figure 5-13 Défauts de coupe en fonction de l'avance pour le détournage

5.3.1.3 La vitesse de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $e = 4$ mm)

Sur la Figure 5-14, on remarque qu'aux vitesses de coupe inférieures ou égales à 300 m/min, les défauts en avalant semblent globalement plus importants qu'en opposition. À de plus grandes vitesses, les écarts entre les deux se resserrent. Ici aussi les écarts entre chaque mesure ne permettent pas de déterminer une tendance concrète de l'évolution des défauts avec la vitesse de coupe.

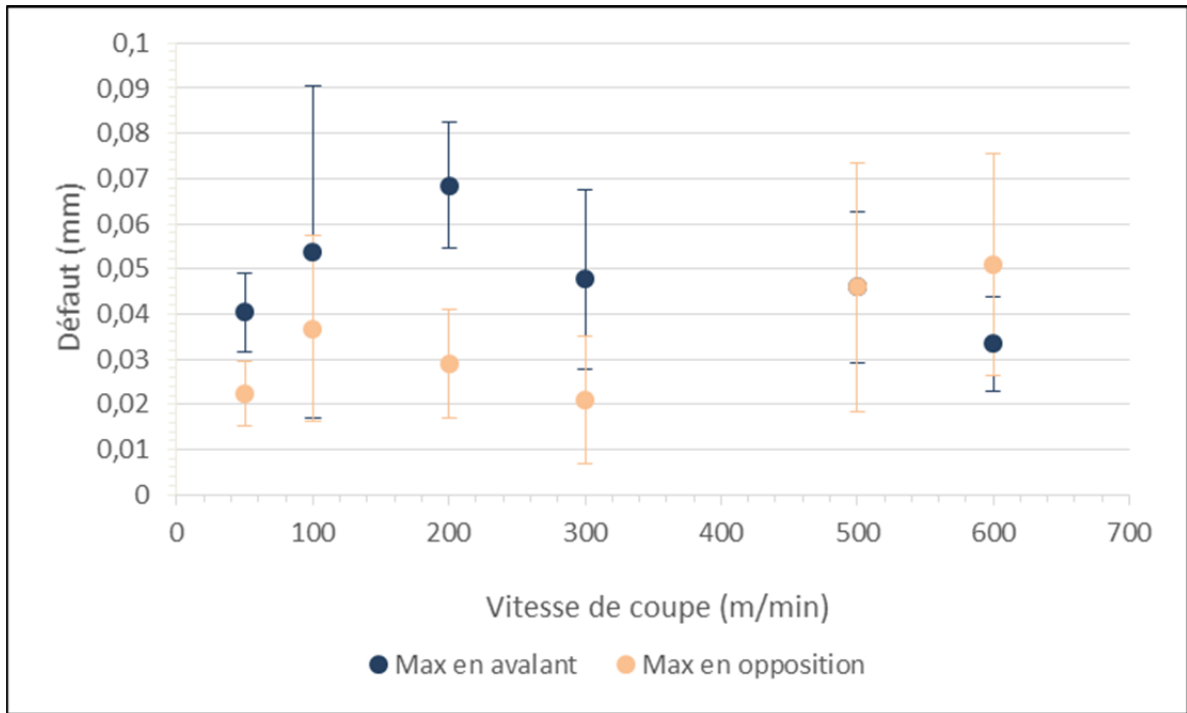


Figure 5-14 Défauts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour le détournage

5.3.1.4 La profondeur de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $V_c = 300$ m/min)

Concernant les défauts en fonction de la profondeur de coupe, sur la figure ci-dessous, on note encore une fois que les écarts types sont importants. On note cependant que comme les mesures précédente, la taille des défauts est très limitée : de l'ordre de 10^{-2} mm. En effet, on ne les voit presque pas à l'œil nu et ils sont assez peu nombreux sur le bord coupé. Cela permet de dire que les outils utilisés lors des essais semblent adaptés pour limiter les imperfections lors du détournage.

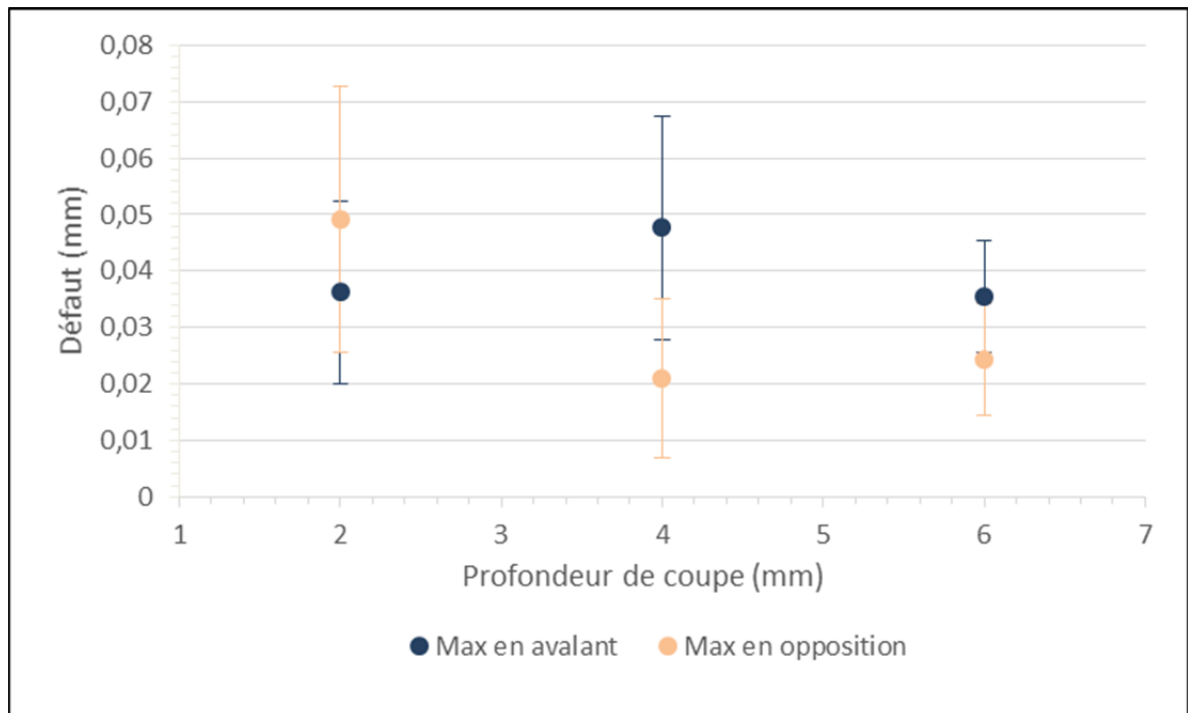


Figure 5-15 Défauts de coupe en fonction de la profondeur de coupe pour le détournage

5.3.2 Perçage

5.3.2.1 L'outil ($a = 0,02$ mm/tr, $V_c = 50$ m/min et $e = 2$ mm)

La Figure 5-16 met en évidence que l'outil B semble limiter les délaminations par rapport aux fibres non coupées. De plus, on remarque que quel que soit l'outil utilisé, le rapport des fibres non coupées est relativement le même. Cependant concernant les délaminations lors du perçage avec l'outil A on remarque d'importants écarts types (seulement deux trous sur cinq présentaient un délaminage), ce qui ne nous permet pas de tirer de conclusions quant à l'impact de cet outil sur le délaminage. Cela peut venir du fait que le carbone présentait une zone de défaut structurel à cet endroit, ce qui a donc facilité de type d'imperfection. Enfin, les ratios sont faibles, ce qui montre que les délaminations et les fibres non coupées sont assez limitées.

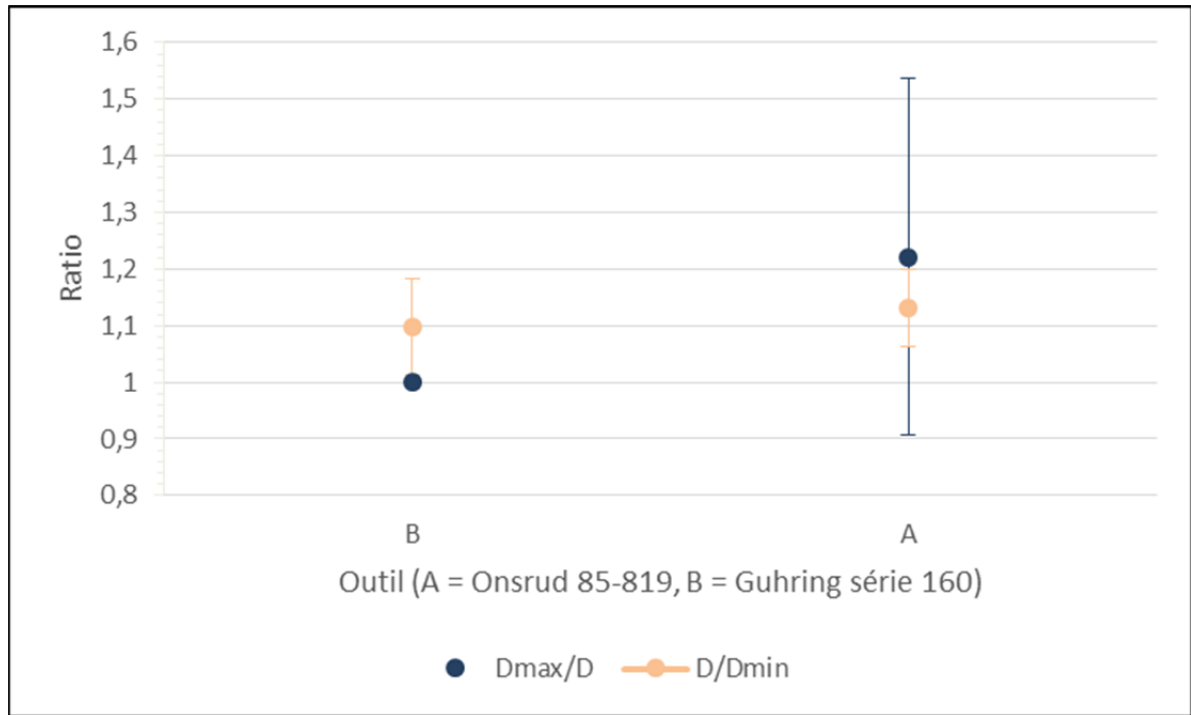


Figure 5-16 Défauts de coupe en fonction de l'outil pour le perçage

5.3.2.2 L'avance ($V_c = 300 \text{ m/min}$, $e = 4 \text{ mm}$)

Sur la figure ci-dessous, on remarque que $D_{\max}$ et $D_{\min}$ semblent diminuer légèrement lorsque l'avance augmente. Cela signifie qu'une avance importante permettrait de diminuer la délamination mais entraînerait aussi un plus grand nombre de fibres non coupées. De plus, le diamètre de délamination maximal semble se stabiliser à partir de $0,06 \text{ mm/tr}$ vers un rapport de 1,6. On note aussi que les délaminations entraînent des défauts plus présents car le rapport est toujours supérieur d'au moins 18 % à celui des fibres non coupées. Or les délaminations sont plus gênantes car il s'agit d'un défaut intérieur à la pièce, ce qui peut l'amener directement au rebut, alors que des fibres non coupées peuvent se rattraper.

Globalement, l'avance paraît avoir plus d'impact sur les fibres non coupées que sur les délaminations. En effets, le rapport F_c évolue plus que le rapport F_d et est minimal entre $0,02$ et $0,06 \text{ mm/tr}$. Concernant F_d , le minimum de se rapport est situé entre $0,06$ et $0,1 \text{ mm/tr}$.

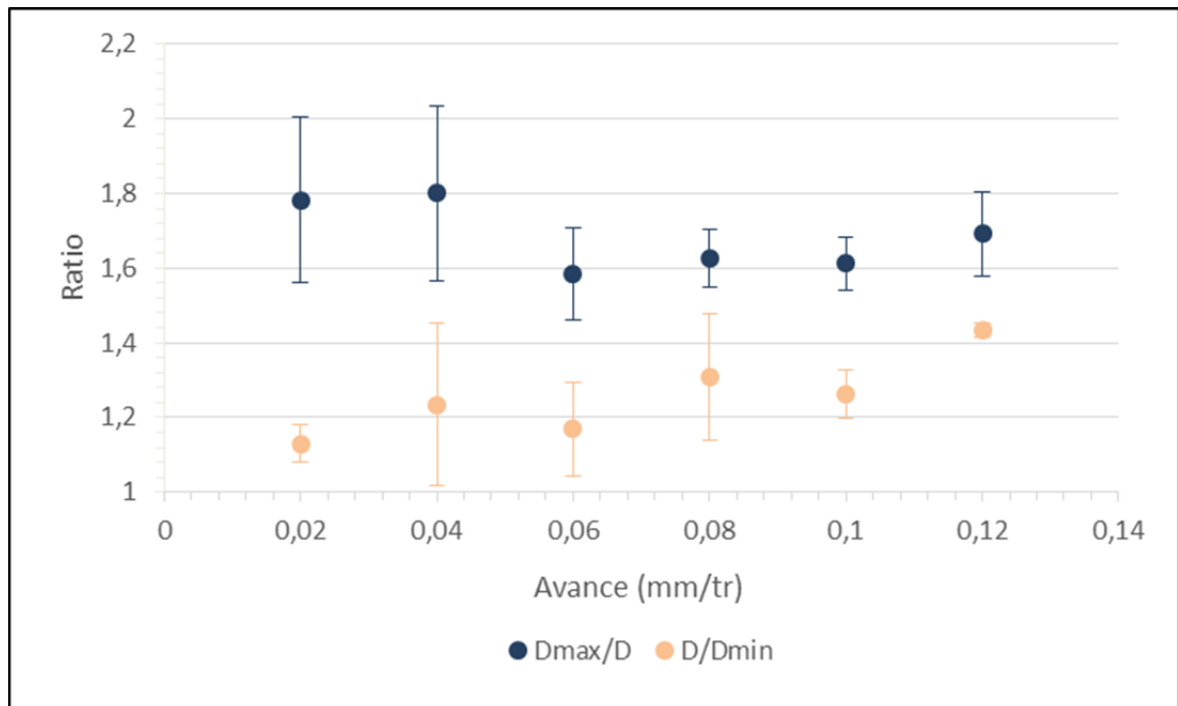


Figure 5-17 Défauts de coupe en fonction de l'avance pour le perçage

5.3.2.3 La vitesse de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $e = 4$ mm)

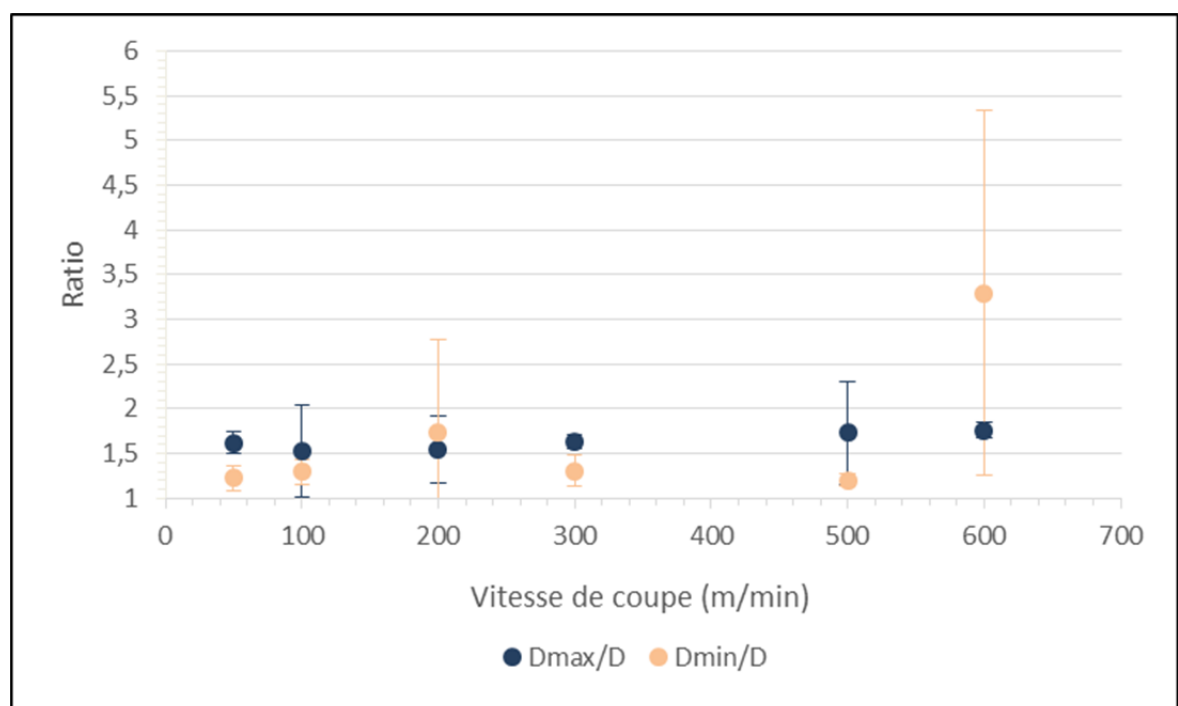


Figure 5-18 Défauts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour le perçage

Du côté de la vitesse de coupe, on remarque qu'elle n'a pas d'impact significatif sur la délamination du composite étant donné que le rapport augmente légèrement avec la vitesse : d'environ 1,5 à 1,8. Concernant les fibres non coupées, elles sont assez peu présentes en dessous de 500 m/min (rapport proche de 1). Il y a deux valeurs notables à 200 et 600 m/min pour lesquelles le rapport est plus important respectivement de 32 % et 174 %, mais les écarts types de ces mesures le sont aussi. Les défauts semblent être minimisés pour des vitesses allant de 50 à 300 m/min car les écarts entre les différentes valeurs sont assez faibles.

5.3.2.4 La profondeur de coupe ($a = 0,08$ mm/tr, $V_c = 300$ m/min)

Pour les ratios en fonction de la profondeur de coupe, on remarque que les tendances sont similaires à celles des précédentes parties. La différence entre les valeurs à 4 et 6 mm est assez faible (jusqu'à 23 %) qu'entre 2 et 4 mm (2 %) de profondeur. Encore une fois, les délaminations sont plus importantes que les fibres non coupées.

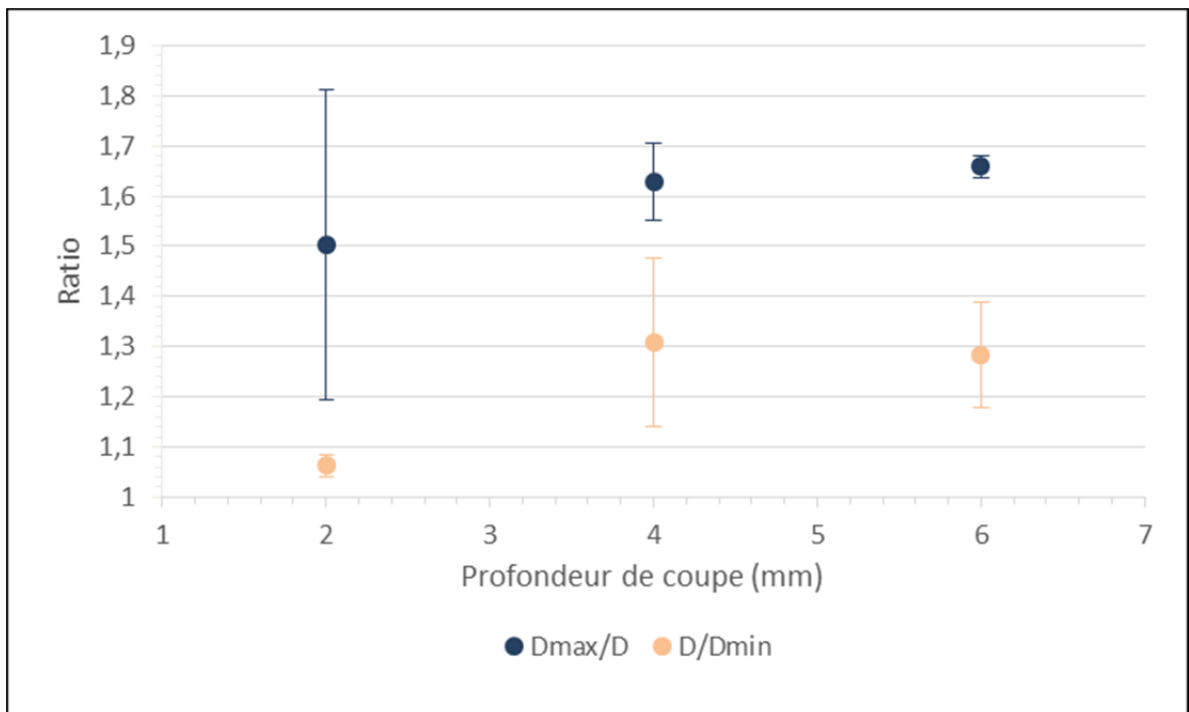


Figure 5-19 Défauts de coupe en fonction de la profondeur de coupe pour le perçage

5.4 Conclusion

Nous avons vu dans cette section que pour usiner dans des conditions permettant d'obtenir des forces de coupes les plus faibles, il faut privilégier les paramètres de coupe suivants :

- outils équivalents pour le détournage et géométrie B (outil Guhring) pour le perçage,
- avance de 0,02 mm/tr,
- vitesse de coupe de 50 m/min,
- profondeur de coupe de 2 mm.

D'autre part, pour minimiser les défauts de coupe, les paramètres suivants sont conseillés :

- outils équivalents,
- l'avance a peu d'impact pour le détournage et pour le cas du perçage, une valeur entre 0,02 et 0,06 mm/tr,
- vitesse de coupe entre 50 et 300 m/min pour les deux procédés,
- la profondeur a un impact peu significatif pour le détournage et 2 mm pour le perçage.

Après avoir déterminé pour chaque type de données les paramètres optimaux, il est temps de trouver un compromis entre toutes ces valeurs afin d'obtenir le moins de poussières possible lors de l'usinage tout en limitant au maximum les défauts de coupe. Pour cela, les valeurs mesurées sont étudiées et l'on privilégie dans l'ordre : les émissions de particules, puis les défauts et enfin les forces de coupe.

En commençant par le paramètre de géométrie de l'outil, on remarque que globalement, les deux types sont équivalents dans le cas du détournage et du perçage. Seulement, pour le perçage, la géométrie de l'outil B permet de limiter les forces, on conseillera donc ce foret si l'on souhaite minimiser les forces de coupe. Concernant l'avance, nous avons vu que son impact sur les émissions et les défauts est pas significatif. Par contre pour les forces de coupe, on remarque qu'il est préférable d'usiner avec une avance la plus faible possible. Ainsi on proposera plutôt d'utiliser une faible avance comme 0,02 mm/tr par exemple. En s'intéressant à la vitesse de coupe, que ce soit pour le détournage ou le perçage, elle semble

avoir un impact assez significatif sur les différentes valeurs mesurées. Ainsi on conseillera plutôt une faible vitesse de coupe allant de 50 m/min à 200 m/min. Enfin, concernant la profondeur de coupe, les résultats obtenus sont malheureusement assez peu significatifs, ne nous permettant pas de pouvoir privilégier une profondeur spécifique.

En comparant les différents résultats entre le perçage et le détourage, on remarque que le perçage engendre beaucoup plus de défauts visibles à l'œil nu que le détourage. Ceci s'explique par le fait que les forces sont plus importantes lors du perçage (de 30 à 400 N), et la force prédominante est perpendiculaire aux plis du stratifié, ce qui facilite la délamination.

CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons étudié l'effet de différents paramètres d'usinage (géométrie de l'outil, avance, vitesse de coupe, profondeur de coupe) sur les émissions de particules et la qualité de coupe lors du détournage et du perçage d'un stratifié carbone/époxy. Pris individuellement, nous avons tenté de trouver le paramètre optimal dans chaque situation. Puis nous avons pu déterminer un compromis entre tous ces paramètres afin d'usiner en émettant le moins de poussières possible, tout en gardant la meilleure qualité de coupe réalisable. Cependant, lors du perçage notamment, les valeurs d'émissions mesurées ne sont pas bonnes du fait du très court temps de perçage. De plus, les concentrations de $PM_{2,5}$ sont assez faibles et donc peu représentatives de la réalité, pour les deux opérations d'usinage.

Nous avons donc déduit des résultats des émissions de particules lors du détournage que les géométries des outils semblent équivalentes à ce niveau. L'avance a assez peu d'impact sur les 10 à 400 nm mais il est conseillé des avances plus grandes pour limiter les $PM_{2,5}$. Mais ces dernières sont en nombre non significatifs ce qui ne permet pas d'être sûr que cela est représentatif de la réalité. Les basses vitesses de coupe sont à privilégier pour limiter les émissions. Et la profondeur de coupe semble ne pas avoir d'impact sur les émissions de particules.

Concernant le perçage, les mesures de particules sont assez peu significatives du fait du faible temps de perçage. Cela ne nous permet donc pas de différencier les géométries d'outil ou encore les profondeurs de coupe. Par contre, il semble que l'avance n'a pas d'effet sur les émissions un peu comme dans le cas du détournage, et que les vitesses de coupes qui minimisent les émissions sont les plus basses. Encore une fois, ces résultats sont à vérifier avec d'autres mesures.

Le type de particules les plus présentes pour le détournage sont les particules ultrafines. Concernant le perçage, la différence de concentration en nombre entre ces deux domaines de

particules est plus faible, cela venant du fait que les mesures n'ont pas pu se faire correctement à cause du temps de perçage trop court.

Concernant les forces de coupe lors du détournage et du perçage, l'augmentation de la valeur des différents paramètres engendre des forces plus élevées. Du point de vue de la géométrie des outils, les fraises semblent équivalentes mais les forets ne le sont pas, en effet la géométrie d'outil B permet de garder des forces plus faibles. De plus, les forces lors du perçage sont plus importantes que pendant le détournage. Donc si l'on doit faire des calculs pour la puissance nécessaire lors de ces deux procédés, il suffit de les faire pour la pire situation qui est le perçage.

Nous avons aussi pu déterminer un modèle des efforts en fonction de différents paramètres. Ainsi, le modèle des forces en Z pour le détournage est fonction de puissance par rapport à l'avance et la vitesse de coupe. Pour les forces en X et Y, que ce soit pour l'avance ou la vitesse de coupe, les modèles sont aussi des fonctions de puissance. Pour le perçage, le modèle de la force en Z vis-à-vis de l'avance et de la vitesse de coupe est fonction de puissance. Concernant la force F_{xy} , il s'agit encore une fois d'une fonction de puissance relativement à l'avance et à la vitesse de coupe. Cependant concernant le modèle lors de l'avance, son R^2 est assez faible (77%) par rapport aux autres courbes.

Pour les défauts de coupe pendant le détournage, on remarque que globalement les écarts types sont importants, ce qui ne permet pas de tirer des conclusions poussées sur leur évolution en fonction des paramètres de coupe. Cependant, les défauts semblent plus restreints en opposition de coupe qu'en avalant. Augmenter l'avance ou la vitesse de coupe revient à grossir les défauts. Pour le perçage, les délaminations sont plus conséquentes en taille que les fibres non coupées. Ces délaminations sont aussi un problème bien plus complexe à régler que des fibres non coupées car ils sont internes à la pièce contrairement aux fibres non coupées. Les défauts sont légèrement plus importants avec l'augmentation des différents paramètres de coupe.

Plus généralement, nous avons trouvé pour le détournage que les paramètres suivants sont les plus appropriés :

- outil : ils n'ont pas un impact significatif sur les valeurs mesurées,
- avance : une faible avance est conseillée entre 0,02 et 0,06 mm/tr,
- vitesse de coupe : une faible valeur est conseillée entre 50 m/min et 200 m/min,
- profondeur de coupe : l'impact relevé n'est pas assez significatif pour préférer une profondeur de coupe.

Pour le perçage, nous conseillons les paramètres suivants :

- outil : ils sont équivalents sauf pour les forces de coupe où la géométrie B est préférable,
- avance : une valeur assez faible de 0,02 à 0,06 mm/tr,
- vitesse de coupe : une valeur de 50 à 100 m/min,
- profondeur de coupe : l'impact de ce paramètre n'est pas suffisamment significatif pour en tirer des conclusions.

L'utilisation de ces paramètres semble donc optimale afin de pouvoir détourner ou percer des stratifiés de carbone/époxy dans les meilleures conditions possibles. Cependant, ce ne sont pas forcément les paramètres qui permettent une productivité élevée.

Afin de supprimer le danger auquel sont confrontés les employés, il est préférable de l'éliminer à la source. Cependant, même en faisant varier les paramètres de coupe, les émissions semblent rester au-dessus des limites fixées par les normes. Il est donc encore aujourd'hui préférable de porter des équipements de protection individuel ou de travailler en vase clos afin de protéger de telles particules en attendant que la recherche dans le domaine avance plus.

RECOMMANDATIONS

Cette étude peut être améliorée et complétée, voici quelques recommandations :

- étudier plus précisément les émissions de particules avec un aspect sécurité et santé du travail, notamment faire plus de mesures et sur des temps plus long afin de pouvoir donner des tendances d'émissions plus réelles. Et se focaliser plus sur les particules ultrafines (< 100 nm) qui semblent être les plus présentes et les plus dangereuses.
- Étudier l'effet des paramètres dans des valeurs qui n'ont pas été testées ici. Par exemple, nous nous sommes limités à de faibles avances, il serait donc intéressant d'observer le comportement du matériau avec des valeurs de paramètres supérieures.
- Étudier plus avec d'autres méthodes le fini de surface. Il serait bon d'observer plus précisément les défauts de coupe, et observer la surface usinée avec un grossissement plus important ce qui permettrait d'avoir une idée plus précise de l'impact de l'outil sur le stratifié de fibres de carbone-époxy.
- Essayer d'usiner différents composites et différentes orientations de fibres. Dans ce mémoire, un seul type de fibre et d'orientation ont été pris en compte. Afin de compléter cette étude, il serait bon de varier l'orientation des fibres et différents types de fibres et matrices.
- Étudier le comportement à l'usure des outils. L'usure des outils engendre des défauts plus importants et diminue la qualité de coupe. Dans notre cas, nous ne les avons pas assez utilisés pour remarquer une quelconque baisse de qualité. Mettre en rapport la vitesse d'usure et la qualité de coupe serait intéressant.

ANNEXE I

GRAPHIQUES COMPLÉMENTAIRES DES CONCENTRATIONS EN SURFACE ET EN MASSE POUR LE DÉTOURAGE

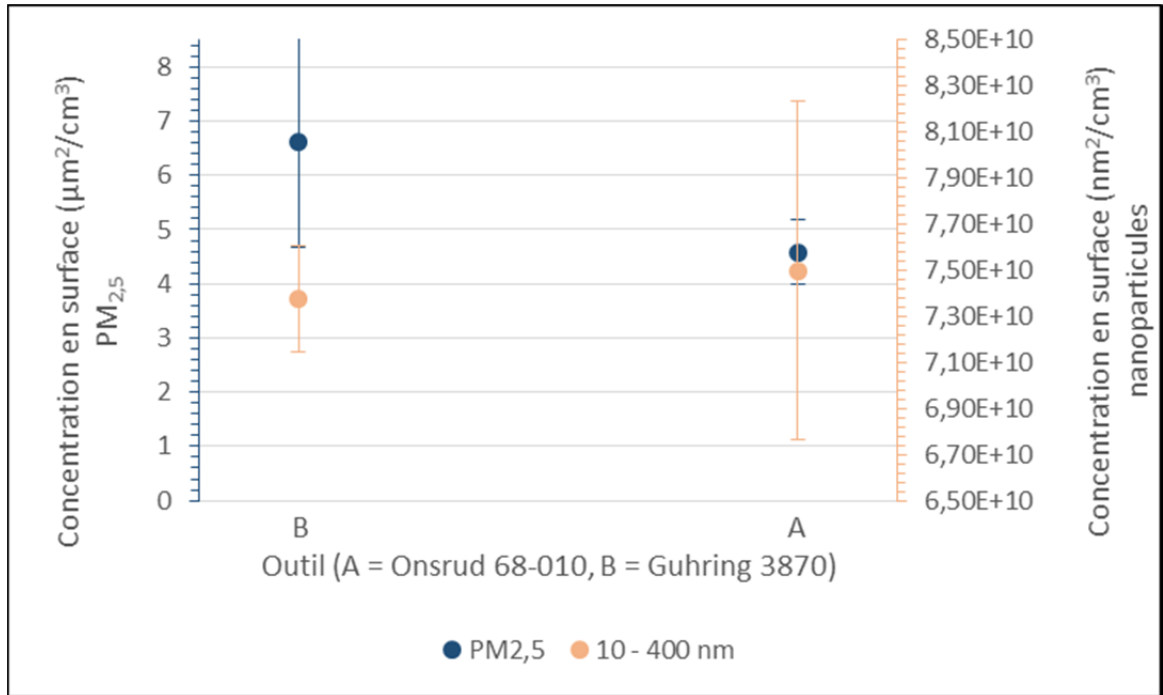


Figure-A I-1 Concentration en surface des particules en fonction de l'outil pour le détournage

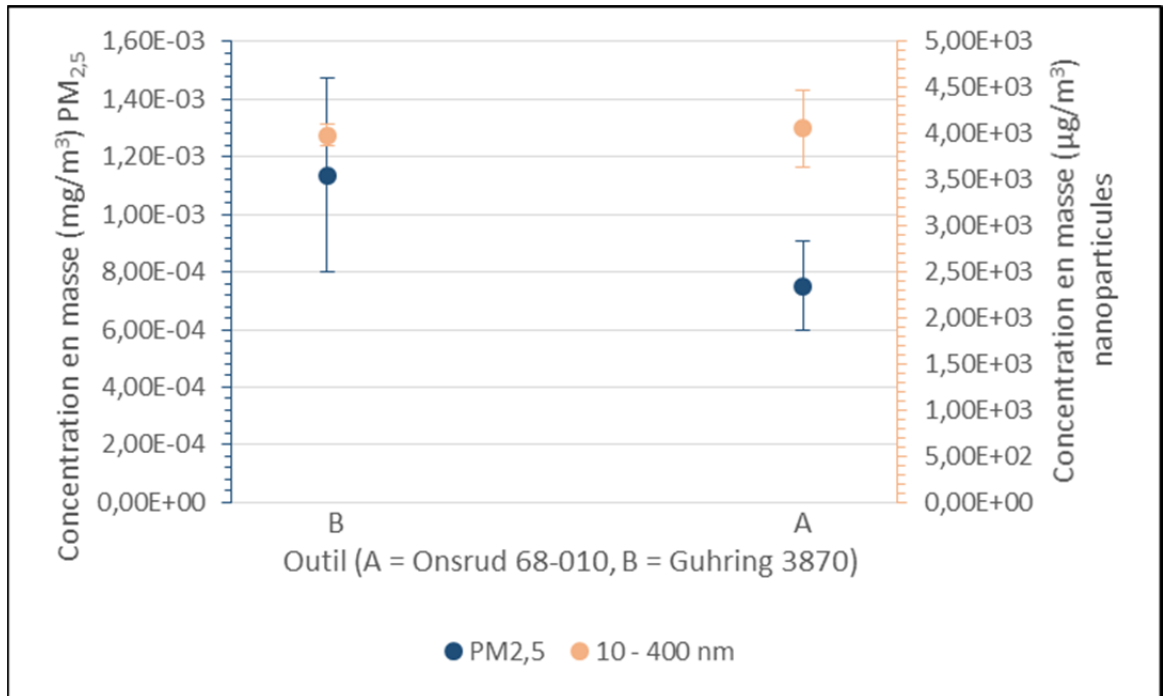


Figure-A I-2 Concentration en masse des particules en fonction de l'outil pour le détourage

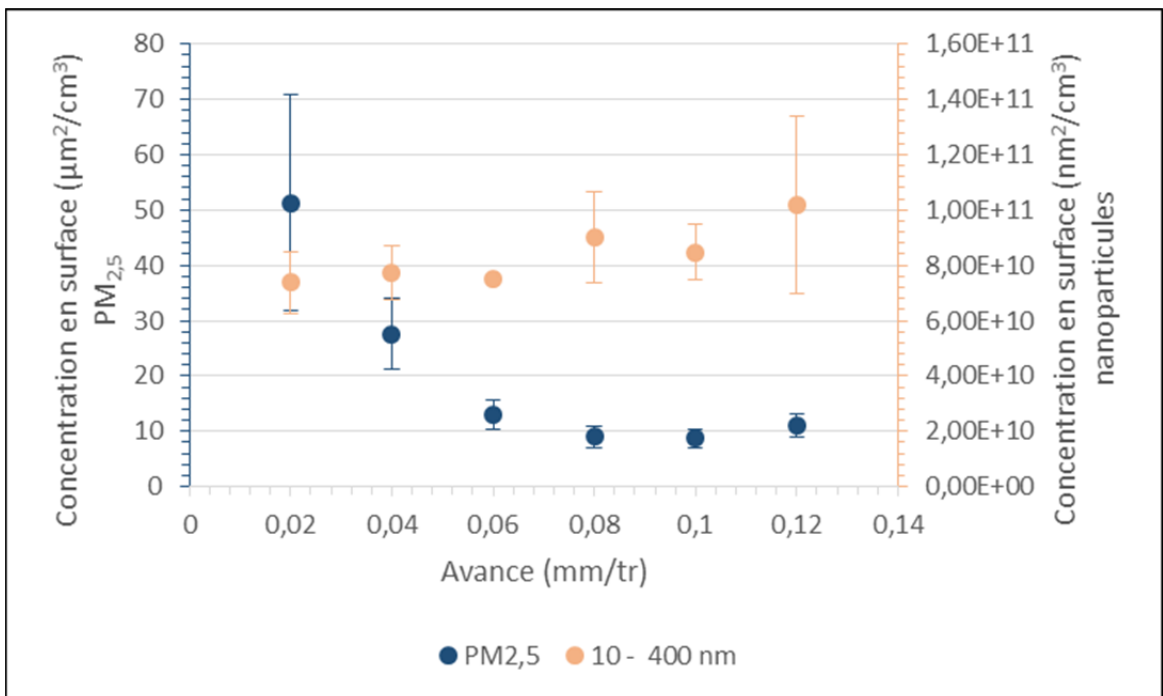


Figure-A I-3 Concentration en surface des particules en fonction de l'avance pour le détourage

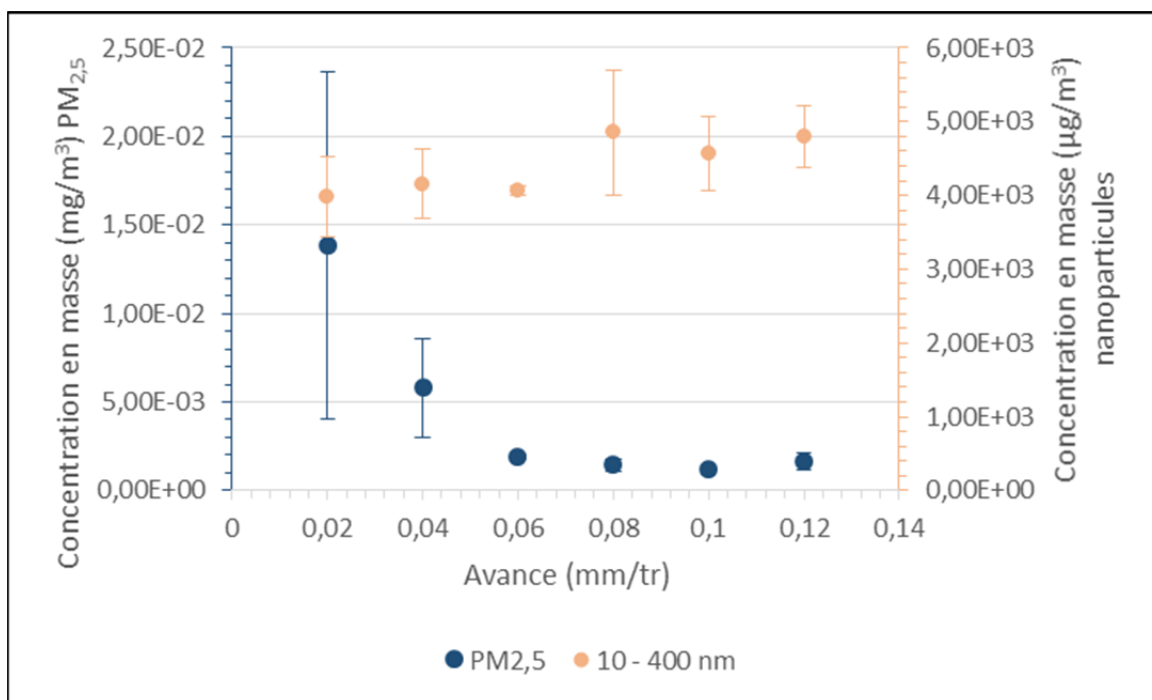


Figure-A I-4 Concentration en masse des particules en fonction de l'avance pour le détourage

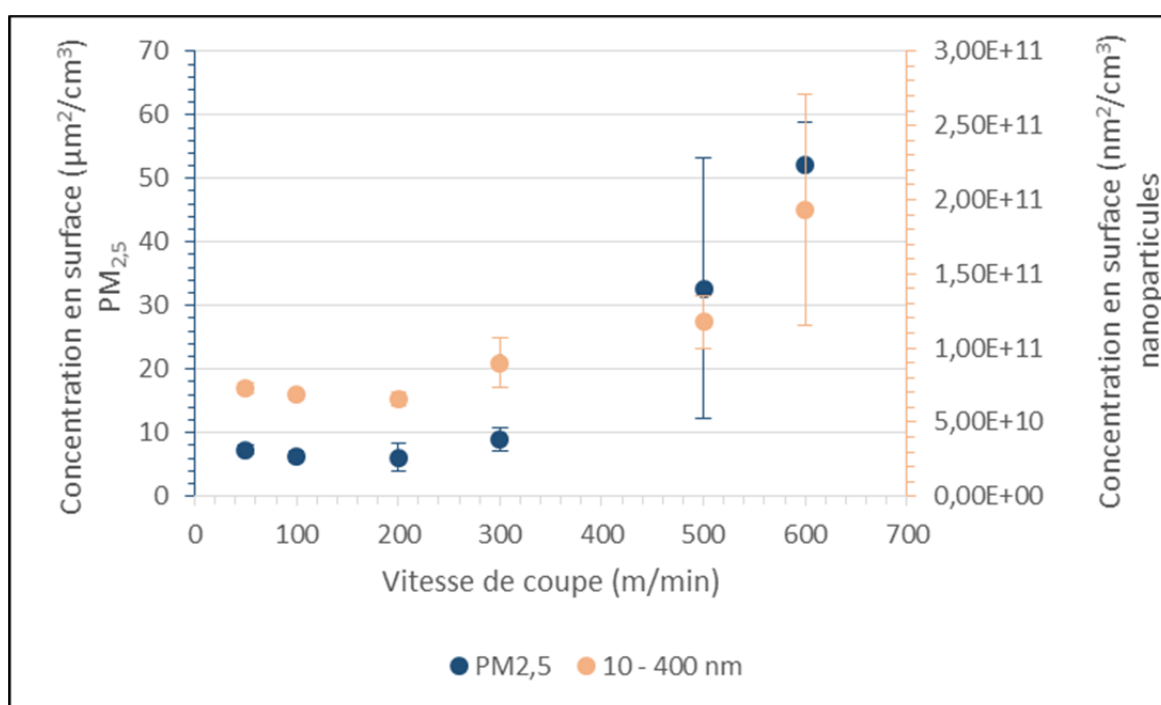


Figure-A I-5 Concentration en surface des particules en fonction de la vitesse de coupe pour le détourage

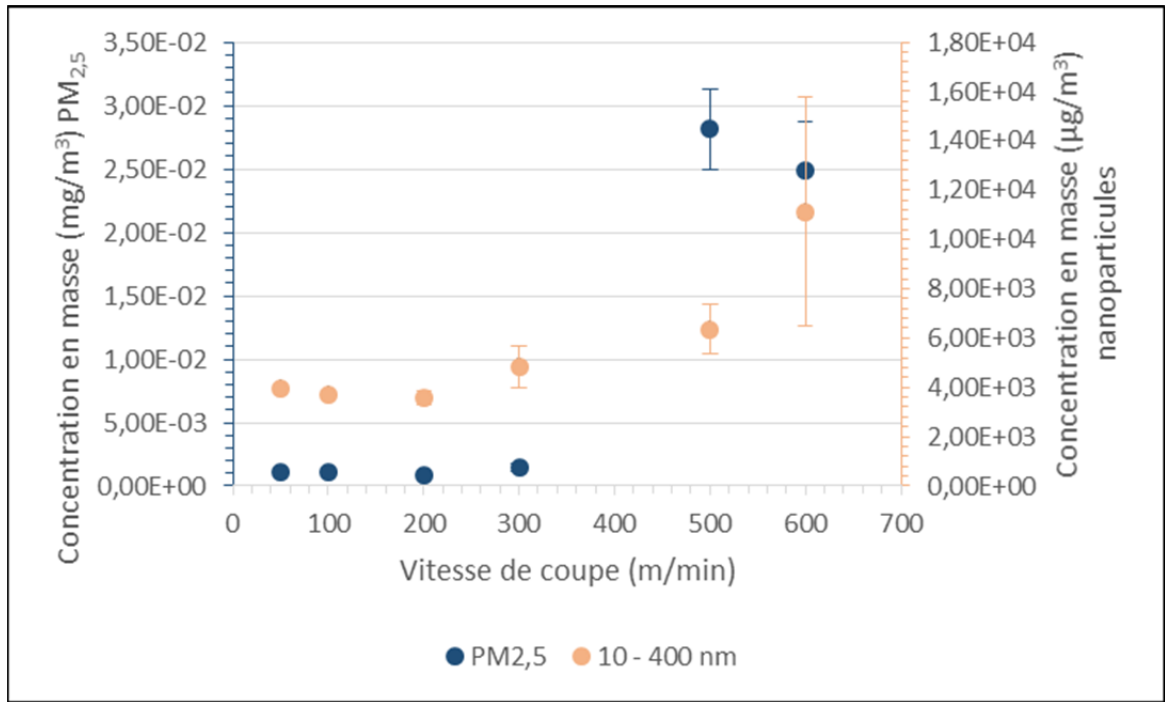


Figure-A I-6 Concentration en masse des particules en fonction de la vitesse de coupe pour le détourage

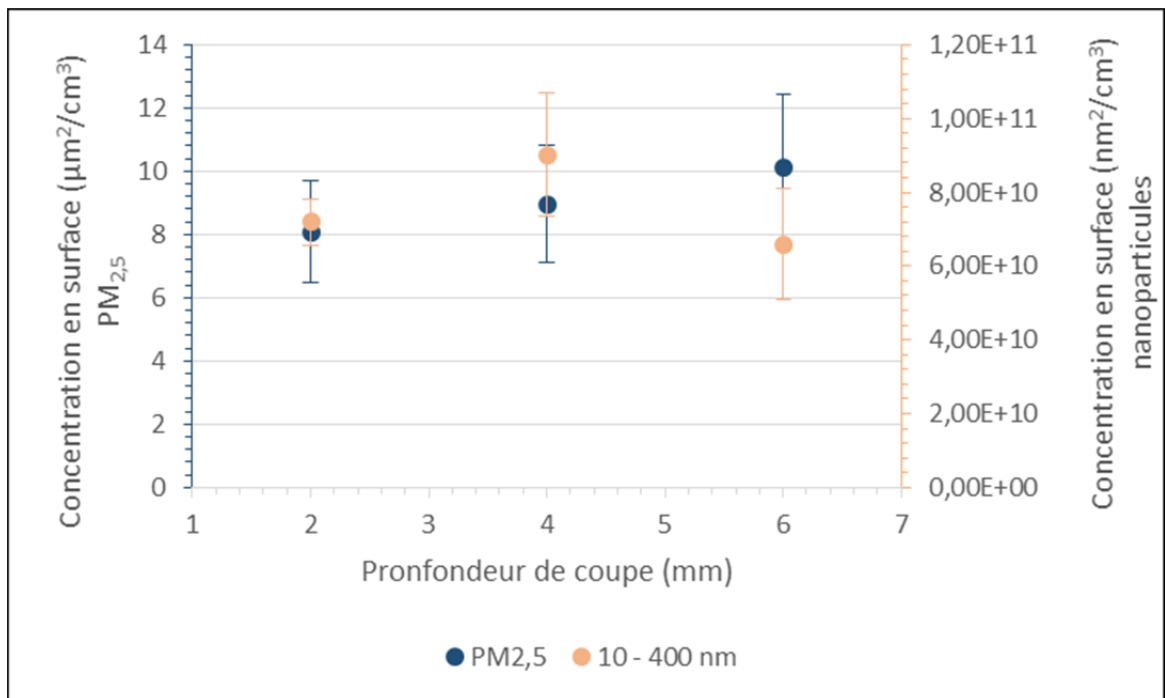


Figure-A I-7 Concentration en surface des particules en fonction de la profondeur pour le détourage

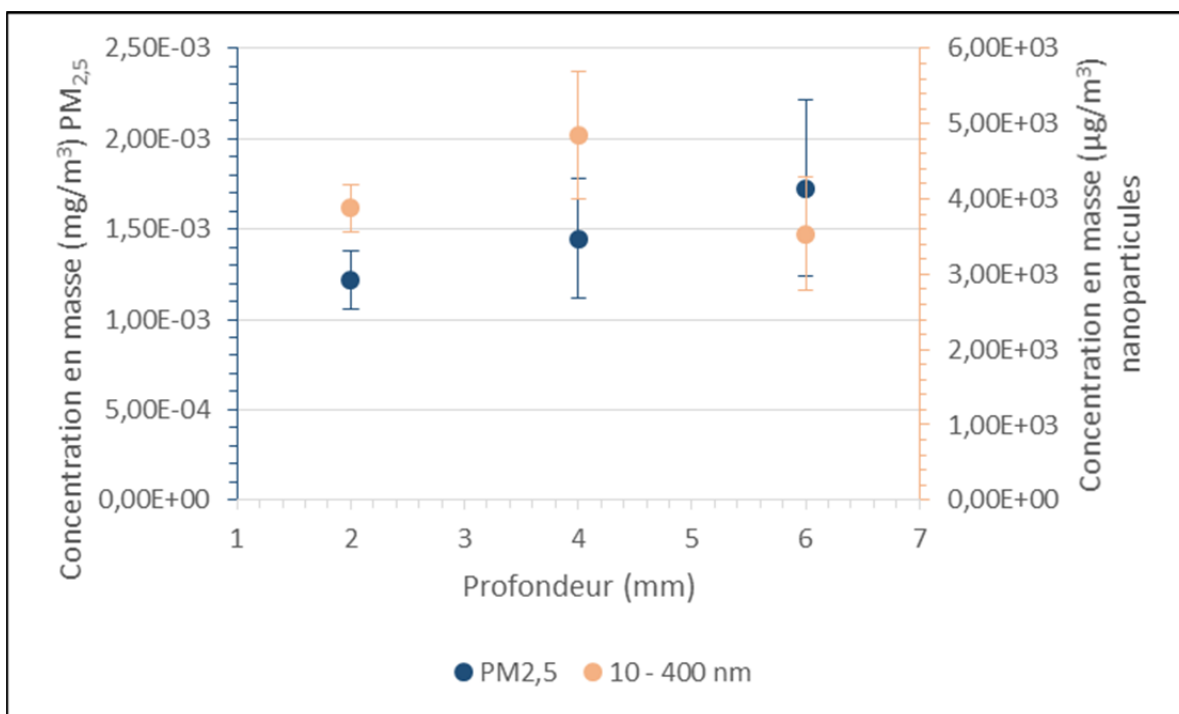


Figure-A I-8 Concentration en masse des particules en fonction de la profondeur pour le détournage

ANNEXE II

GRAPHIQUES COMPLÉMENTAIRES DES CONCENTRATIONS EN SURFACE ET EN MASSE POUR LE PERÇAGE

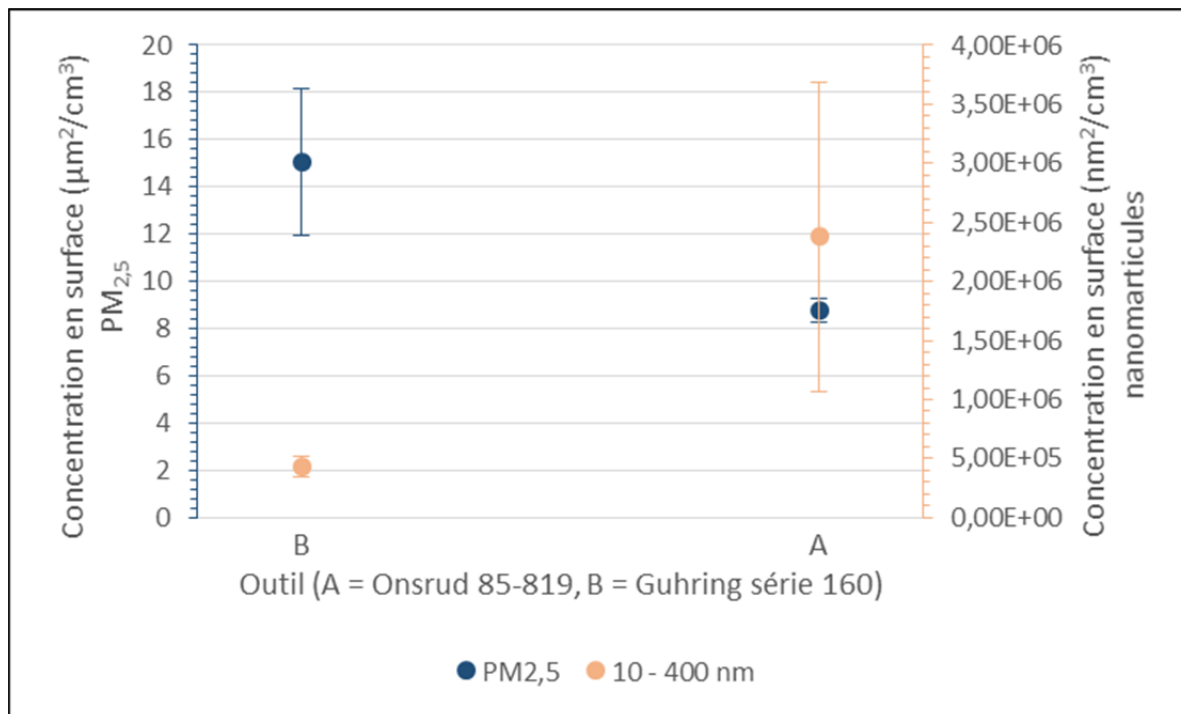


Figure-A II-1 Concentration en surface des particules en fonction de l'outil pour le perçage

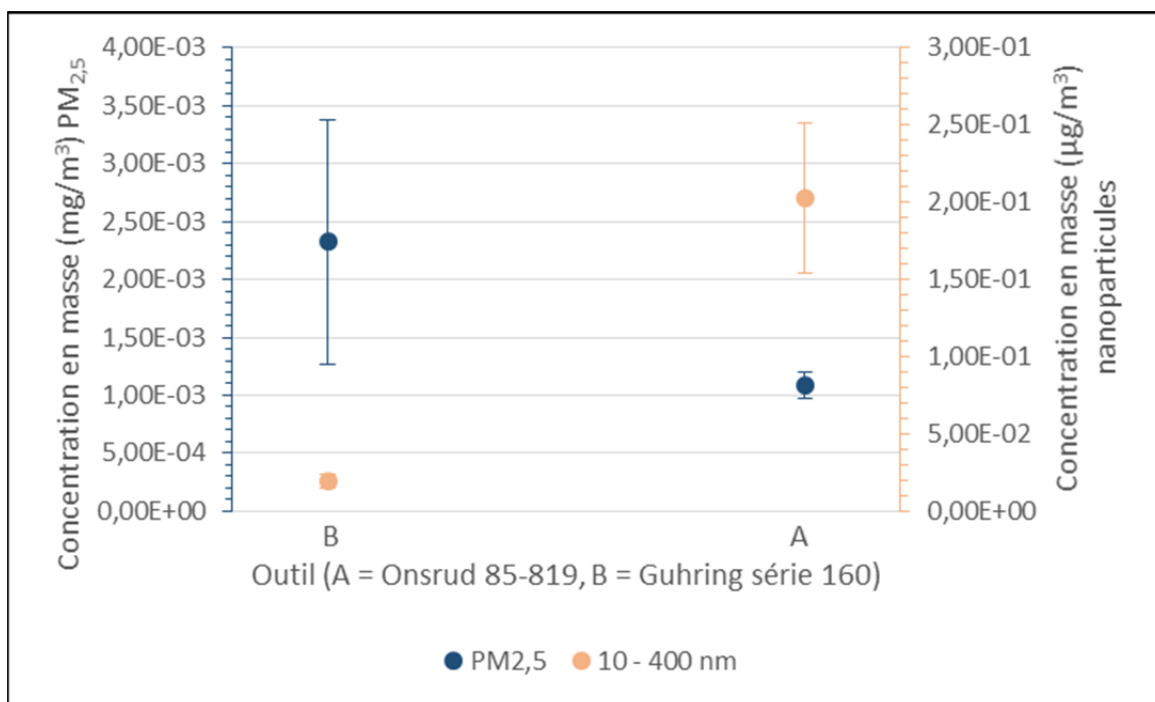


Figure-A II-2 Concentration en masse des particules en fonction de l'outil pour le perçage

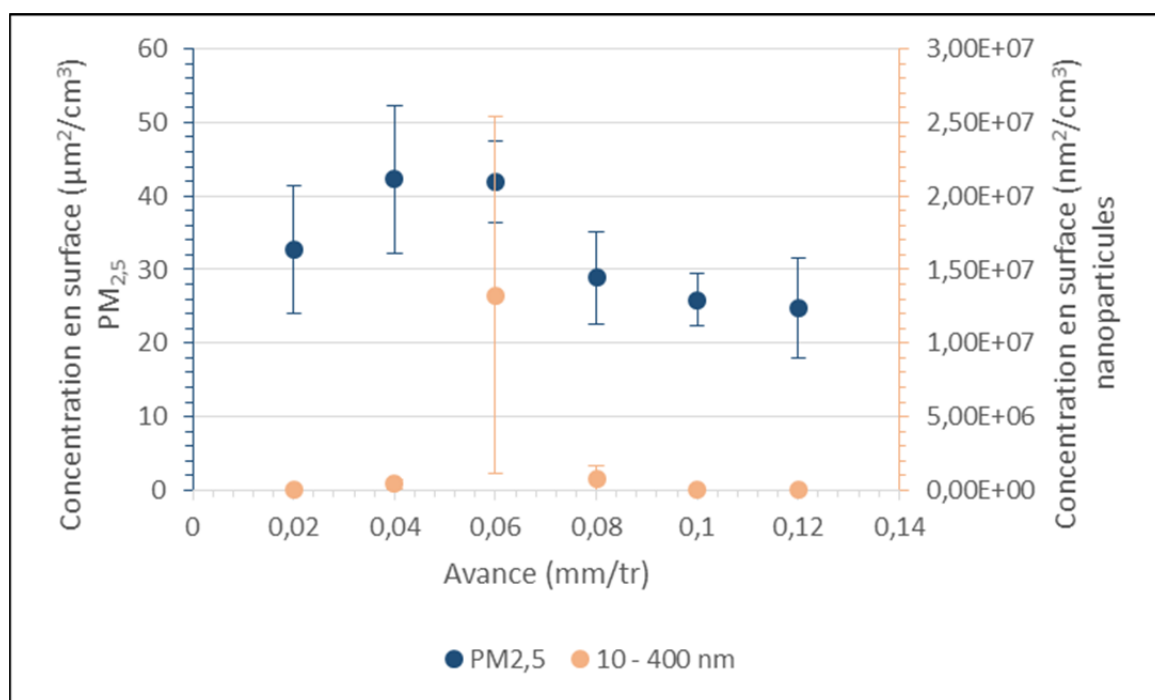


Figure-A II-3 Concentration en surface des particules en fonction de l'avance pour le perçage

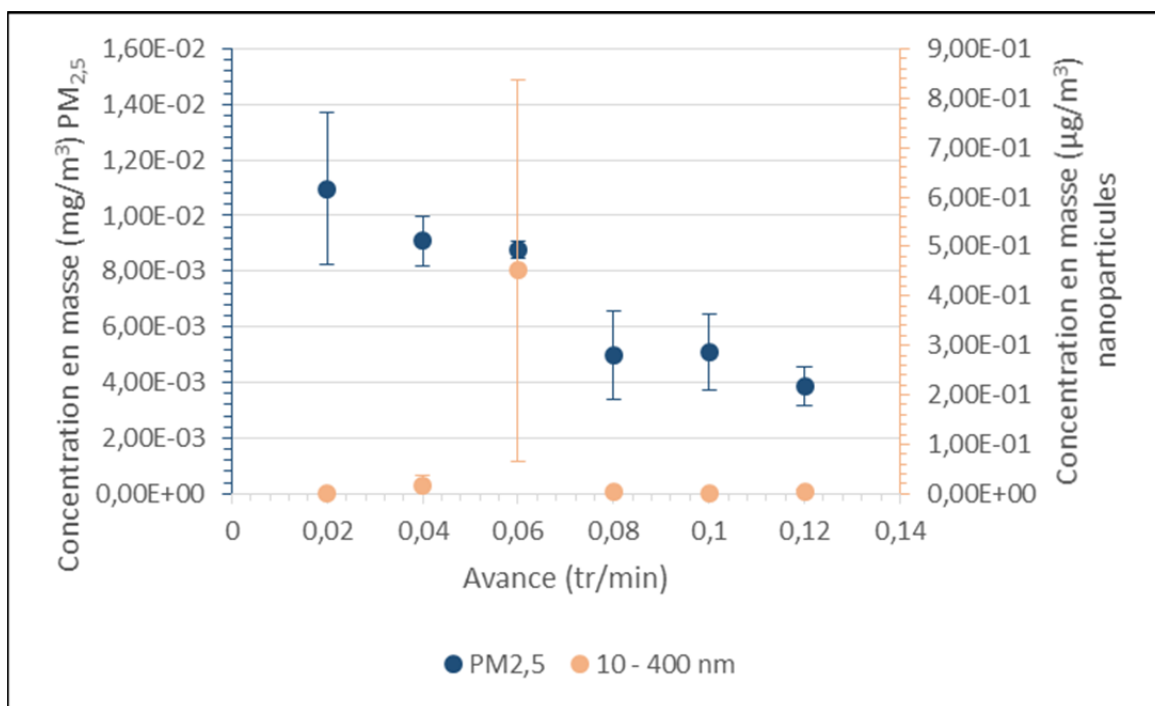


Figure-A II-4 Concentration en masse des particules en fonction de l'avance pour le perçage

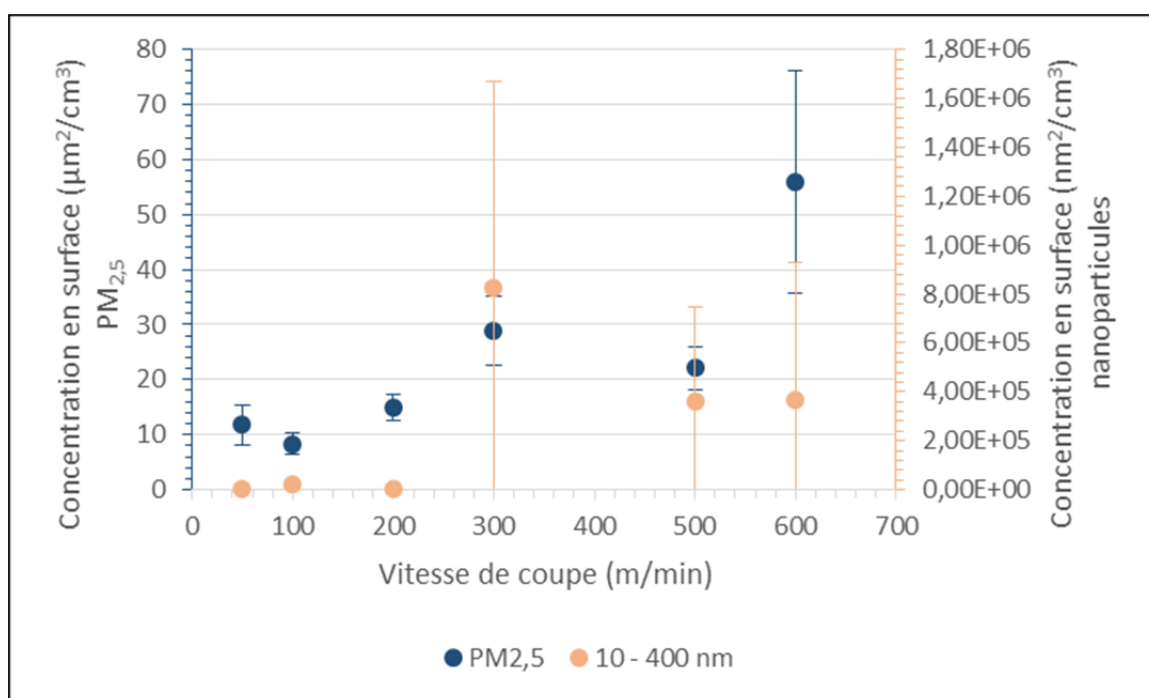


Figure-A II-5 Concentration en surface des particules en fonction de la vitesse de coupe pour le perçage

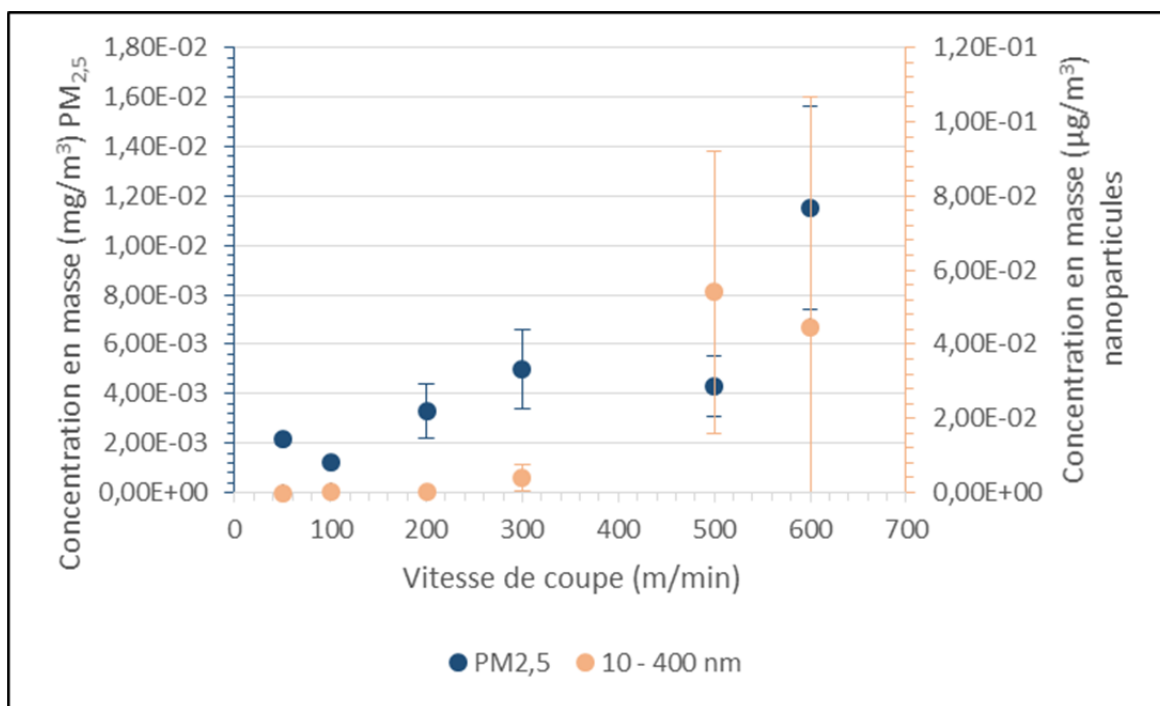


Figure-A II-6 Concentration en masse des particules en fonction de la vitesse de coupe pour le perçage

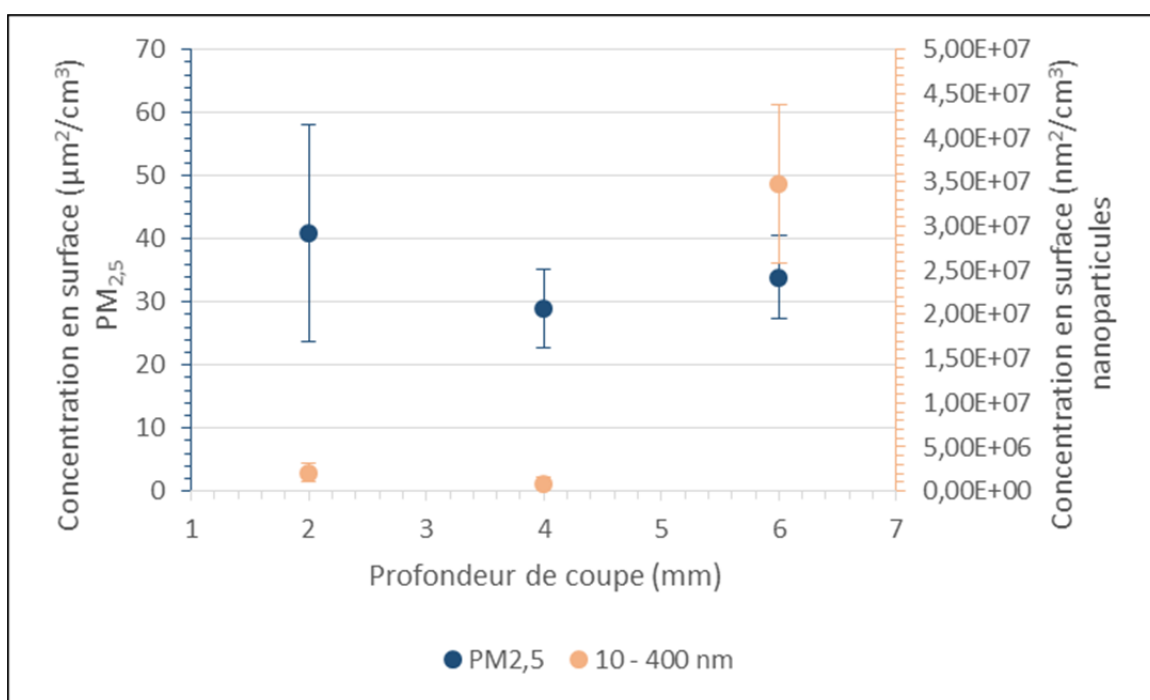


Figure-A II-7 Concentration en surface des particules en fonction de la profondeur pour le perçage

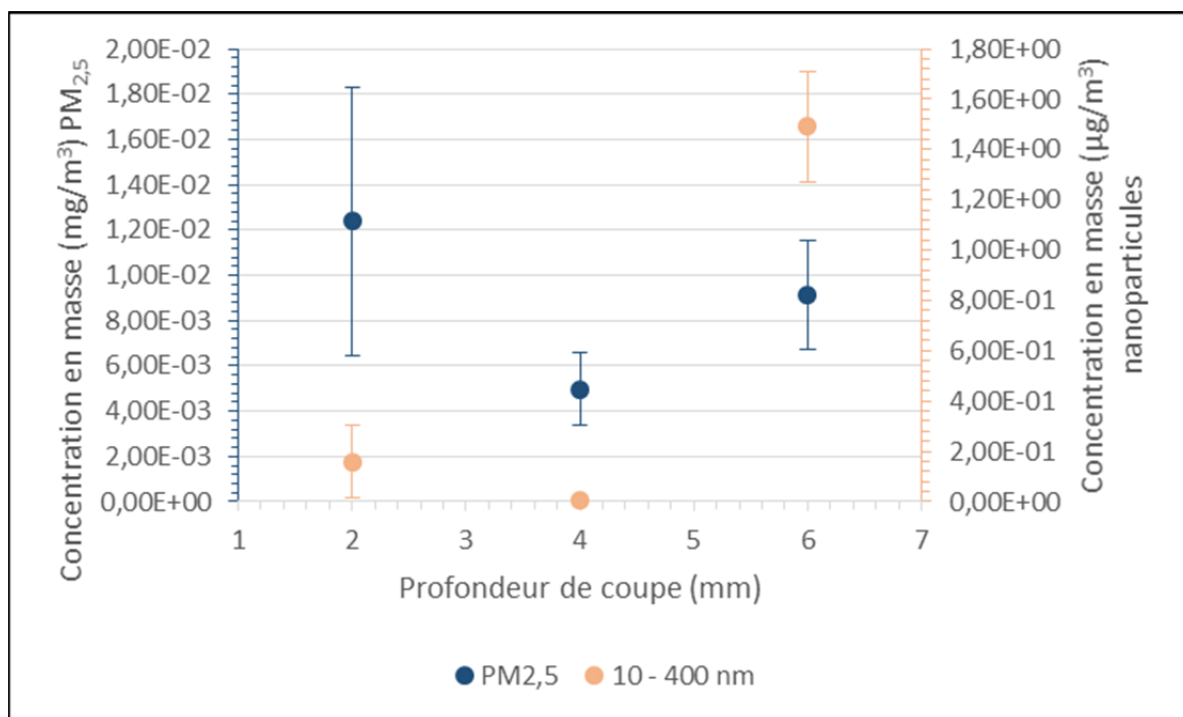


Figure-A II-8 Concentration en masse des particules en fonction de la profondeur pour le perçage

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aurich, J. C., *et al.* 2009. « Burrs—Analysis, control and removal ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 2, p. 519-542.
- Balout, B., *et al.* 2007. « An Experimental Study of Dust Generation During Dry Drilling of Pre-Cooled and Pre-Heated Workpiece Materials ». *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 9, No. 1, p. 23-34.
- Basavarajappa, S., *et al.* 2008. « Drilling of hybrid aluminium matrix composites ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, No. 11, (Février), p. 1244-1250.
- Bello, Dhimiter, *et al.* 2009. « Exposure to nanoscale particles and fibers during machining of hybrid advanced composites containing carbon nanotubes ». *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 11, No. 1, (Janvier), p. 231-249.
- Bérubé, Sébastien. 2012. « Usinage en détournage de laminés composites carbone/époxy ». *Maitrise Génie mécanique*, Montréal, 214 p.
- Cordebois, Jean-Pierre and Michel Colombié. 2003. « Chapitre 5 : La coupe des matériaux ». In *Fabrication par usinage*, p. 181-246. « », Paris : Dunod.
- Cytec. 2012. « CYCOM 5320-1 Epoxy Resin System ». Technical data sheet. 12 p. p. http://www.cytec.com/sites/default/files/datasheets/CYCOM_5320-1_031912.pdf. Consulté le 21 avril 2015.
- Davim, J. P. and Pedro Reis. 2003. « Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments ». *Composite Structures*, Vol. 59, No. 4, p. 481-487.
- Djebara, Abdelhakim, *et al.* 2012. « An Experimental Investigation on Ultrafine Particules Emission During Milling Process Using Statistical Analysis ». *International Journal of Advances in Machining and Forming Operations*, Vol. 4, No. 1, (January - June), p. 15-37.
- El-Hofy, Hassan. 2007. *Fundamentals of machining processes : conventional and nonconventional processes*, Boca Raton, Flor. : CRC/Taylor & Francis, 452 p.
- Faraz, Ali, *et al.* 2011. « Experimental Investigations on Drilling GFRP Epoxy Composite Laminates Using Specialized and Conventional Uncoated Cemented Carbide Drills ». *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, No. 4, p. 609-617.

- Gaitonde, V. N., *et al.* 2008. « Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites ». *Journal of Materials Processing Tech.*, Vol. 203, No. 1, p. 431-438.
- Haddad, Madjid, *et al.* 2014. « Study of the surface defects and dust generated during trimming of CFRP: Influence of tool geometry, machining parameters and cutting speed range ». *Composites Part A*, Vol. 66, No. (Novembre), p. 142-154.
- Khettabi, R., *et al.* 2007. « Effect of tool lead angle and chip formation mode on dust emission in dry cutting ». *Journal of Materials Processing Tech.*, Vol. 194, No. 1, p. 100-109.
- Khettabi, Riad, *et al.* 2010. « Effects of Speeds, Materials, and Tool Rake Angles on Metallic Particle Emission During Orthogonal Cutting ». *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 6, (Août), p. 767-775.
- Khettabi, Riad, *et al.* 2010. « Modeling of Particle Emission During Dry Orthogonal Cutting ». *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 6, (Août), p. 776-789.
- Kistler. 2009. « Kistler 9255B ». Technical data sheet. p. <http://web.sensor-ic.com.8000/ZLXIAZAI/KISTLER/000-148e-12.09.pdf>. Consulté le 3 novembre 2015.
- Kremer, A. and M. El Mansori. 2009. « Influence of nanostructured CVD diamond coatings on dust emission and machinability of SiC particle-reinforced metal matrix composite ». *Surface & Coatings Technology*, Vol. 204, No. 6, p. 1051-1055.
- Ostiguy, C. 2009. « A good practice guide for safe work with nanoparticles : the quebec approach ». In *Journal of Physics : Conference Series*. (Manchester, Septembre), p. 012037. Manchester : IOP Science.
- Pramanik, Alokesh and Guy Littlefair. 2014. « Developments in Machining of Stacked Materials Made of CFRP and Titanium/Aluminum Alloys ». *Machining Science and Technology*, Vol. 18, No. 4, p. 485-508.
- Schutz, Jurg A. and Howard Morris. 2013. *Investigating the Emission of Nanomaterials from Composites and Other Solid Articles during Machining Processes*. Canberra : Safe work Australia, 65 p.
- Sheikh-ahmad, Jamal, *et al.* 2012. « Machining Damage in Edge Trimming of CFRP ». *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 27, No. 7, p. 802-808.

- Songmene, V., *et al.* 2012. « Dry high-speed machining: a cost effective and green process ». *International Journal of Manufacturing Research*, Vol. 7, No. 3, p. 229-256.
- Songmene, V., *et al.* « Machining performance of a graphitic SiC-aluminium matrix composite ». In *Proceedings of the 37th International MATADOR 2012 Conference*. p. 127-130. :
- Songmene, Victor, *et al.* 2008a. « Clean Machining: Experimental Investigation on Dust Formation - Part I : Influence of Machining Parameters and Chip Formation ». *International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing*, Vol. 14, No. 1, p. 1-16.
- Songmene, Victor, *et al.* 2008b. « Clean Machining: Experimental Investigation on Dust Formation - Part II: Influence of Machining Strategies and Drill Condition ». *International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing*, Vol. 14, No. 1, p. 17-33.
- Sutherland, J. W., *et al.* 2000. « An Experimental Investigation of Air Quality in Wet and Dry Turning ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 49, No. 1, p. 61-64.
- Tian, Xia. 2014. « Investigation of drilling performance in cryogenic drilling on CFRP composite laminates ». Master of Science Mechanical engineering, Lexington, 115 p.
- Zagbani, Imed, *et al.* 2009. « Fine and ultrafine particle characterization and modeling in high-speed milling of 6061-T6 aluminum alloy ». *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 18, No. 1, p. 38-48.

