HAL
open science

Influence de l'état de surface du trou après perçage sur le comportement en matage de matériaux composite à fibres de carbone unidirectionnelles et résine en époxy

Soraya Catché, Robert Piquet, Frederic Lachaud, Bruno Castanié, A. Bénaben

To cite this version:

Soraya Catché, Robert Piquet, Frederic Lachaud, Bruno Castanié, A. Bénaben. Influence de l'état de surface du trou après perçage sur le comportement en matage de matériaux composite à fibres de carbone unidirectionnelles et résine en époxy. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.97. hal-00598141

HAL Id: hal-00598141

https://hal.science/hal-00598141

Submitted on 4 Jun 2011

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

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

Influence de l'état de surface du trou après perçage sur le comportement en matage de matériaux composite à fibres de carbone unidirectionnelles et résine en époxy

Interaction between surface texture after drilling and bearing behaviour of UD carbon/epoxy structures

Soraya Catché[1, 2], R. Piquet[2], F. Lachaud[2], B. Castanié[3], A. Bénaben[1]

1 : Airbus, 316 Route de Bayonne, 31060 Toulouse cedex 9, France
E-Mail: soraya.catche@airbus.com; audrey.benaben@airbus.com

2 : Institut Clément ADER, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace,
10 Avenue Edouard Belin, 31055 TOULOUSE
E-mail: robert.piquet@isae.fr ; frederic.lachaud@isae.fr

3 : Université de Toulouse, INSA, UPS, Mines d'Albi, ISAE ICA (Institut Clément Ader)
INSA, 135, Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse Cedex
E-Mail: bruno.castanie@insa-toulouse.fr

Résumé

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans le domaine de l'aéronautique. Le perçage est l'opération d'usinage la plus couramment réalisée pour l'assemblage des pièces en composite. L'état de surface de ces perçages est donc important notamment en regard du comportement mécanique des assemblages. Ce travail présente l'influence de l'état de surface des trous après usinage sur la tenue en matage des stratifiés carbone/époxy. L'état de surface du trou est quantifié par le critère de rugosité Ra. De par leur nature hétérogène, les matériaux composites ne présentent pas le même faciès de défauts que les matériaux métalliques. La question qui se pose est de savoir si la rugosité pourrait avoir une influence sur le comportement mécanique des matériaux composites et si ce critère Ra est bien adapté aux composites. Dans un premier temps, l'effet de la rugosité sur le matage des éprouvettes en statique a été investigué. Pour ce faire, des essais de perçage ont été réalisés dans des conditions de perçage variées afin d'obtenir deux qualités de perçage à comparer. Afin d'avoir une vision exhaustive des défauts de rugosité, une procédure fine de mesure de l'état de surface a été mise en place. Une fois les deux qualités de perçage obtenues, des essais de matage ont été réalisés sur ces éprouvettes. Une baisse de la raideur locale des éprouvettes avec un Ra élevé par rapport aux éprouvettes dont le Ra est faible a été constatée. Par la suite, la cinétique d'endommagement par matage liée aux défauts de perçage a pu être établie.

Abstract

Composite materials are finding an increasing number of applications in the aerospace industry. Drilling is the machining operation the most commonly performed for joining composite parts. The holes surface texture is therefore important to control, regarding to mechanical behaviours of the joints.
This work presents the influence of surface texture of a composite material after drilling on its bearing behavior. The hole surface texture is quantified by roughness criterion Ra. Because of their heterogeneous nature, composite materials do not present the same defects patterns as metallic materials. The question that arises is whether the roughness may have an influence on the mechanical behavior of composite materials. As a first step, the effect of roughness on the static bearing behavior of specimens in carbon/epoxy has been investigated. Drilling tests were conducted under various drilling conditions in order to obtain two surface textures. To have a clear vision on the roughness defects, a procedure for measuring the surface quality was established. After obtaining the two drilling qualities, bearing tests were conducted on these specimens. A decrease of the local stiffness of specimens with high Ra compared to the ones with low Ra was found. Then, the bearing damage kinetics linked to the drilling defects has been established.

Mots Clés : Perçage, Rugosité, Essais de Matage
Keywords : Drilling, Roughness, Bearing tests

1. Introduction

Le perçage est l'opération d'usinage la plus couramment réalisée sur les structures composites. En effet, cette opération permet l'assemblage des structures. Le critère permettant de quantifier l'état de surface d'un trou actuellement utilisé est le critère de rugosité Ra issu de la culture métallique. De par la nature hétérogène des matériaux composites, les défauts de perçage ne sont pas cycliques et réguliers comme ceux observés pour les matériaux métalliques. De plus, le lien entre la qualité de

la surface obtenue et la tenue mécanique de la pièce percée n'a pas été clairement établi dans la littérature [1] [2] [3]. En effet, plusieurs auteurs [4] [5] [6] ont étudié l'influence des défauts de perçage en général (délaminages en entrée et sortie, délaminages interlaminaires, fissurations) sur la tenue mécanique des structures percées, mais très peu [7] [8] [9] ont investigué sur l'influence de chacun de ces types de défauts seuls. La question qui se pose est donc celle de savoir si le critère de rugosité Ra est adapté aux matériaux composites. Dans ce travail, l'influence de la rugosité sur la tenue statique en matage de structures composites a été étudiée. Pour ce faire, des essais de perçage ont été réalisés afin d'obtenir les deux configurations de perçage à comparer. Par la suite des essais de matage ½ trou ont été conduits sur ces éprouvettes.

2. Analyse de la rugosité des perçages

2.1 Eprouvettes et essais de perçage

Les éprouvettes sont réalisées à partir de nappes unidirectionnelles de carbone / époxy. Deux types de stratification sont étudiés. La première séquence d'empilement est dite quasi-isotrope et a une épaisseur de 4mm, la seconde est dite fortement orientée et a une épaisseur de 5mm. La géométrie des éprouvettes de matage est présentée ci-dessous :

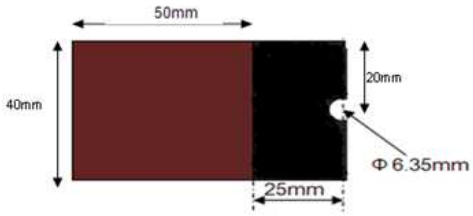


Fig. 1 Géométrie d'une éprouvette de matage ½ trou

Des essais de perçage ont été réalisés sur les éprouvettes présentées ci-dessus avec un foret en carbure de tungstène revêtu de diamant polycristallin de diamètre 6.35mm. La machine utilisée pour ces perçages est un centre d'usinage 3 axes piloté par un directeur à commande numérique. Plusieurs gammes de vitesses d'avance et de fréquences de rotation ont été testées afin de choisir les deux configurations de perçage finales à tester : l'une jugée très dégradante et présentant des Ra très élevés et l'autre jugée peu dégradante avec des Ra faibles.

2.2 Contrôle des trous

2.2.1 Mesure de la rugosité

Les mesures de rugosité ont été réalisées avec un rugosimètre 3D équipé d'un palpeur à contact suivant les génératrices du trou. Afin d'avoir le plus d'informations possibles sur l'état de surface du trou, un outillage (figure 1) a été conçu afin de pouvoir mesurer la rugosité tous les 1.5° d'angle. Deux cent quarante mesures de rugosité sont ainsi faites par trou.

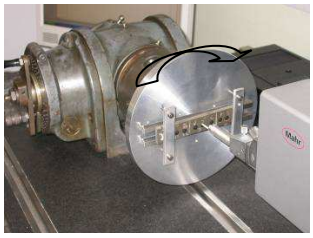


Fig. 2 Outillage de mesure de Rugosité

Un programme de reconstitution de surface a été écrit sous MATLAB et a permis d'obtenir une cartographie en 3D de la paroi du trou. Ce même programme calcule (en appliquant les filtres

normalisés ISO 12085, 13565, 4287, 11562) les paramètres de rugosité et d'ondulation liés à la surface (figure 3).

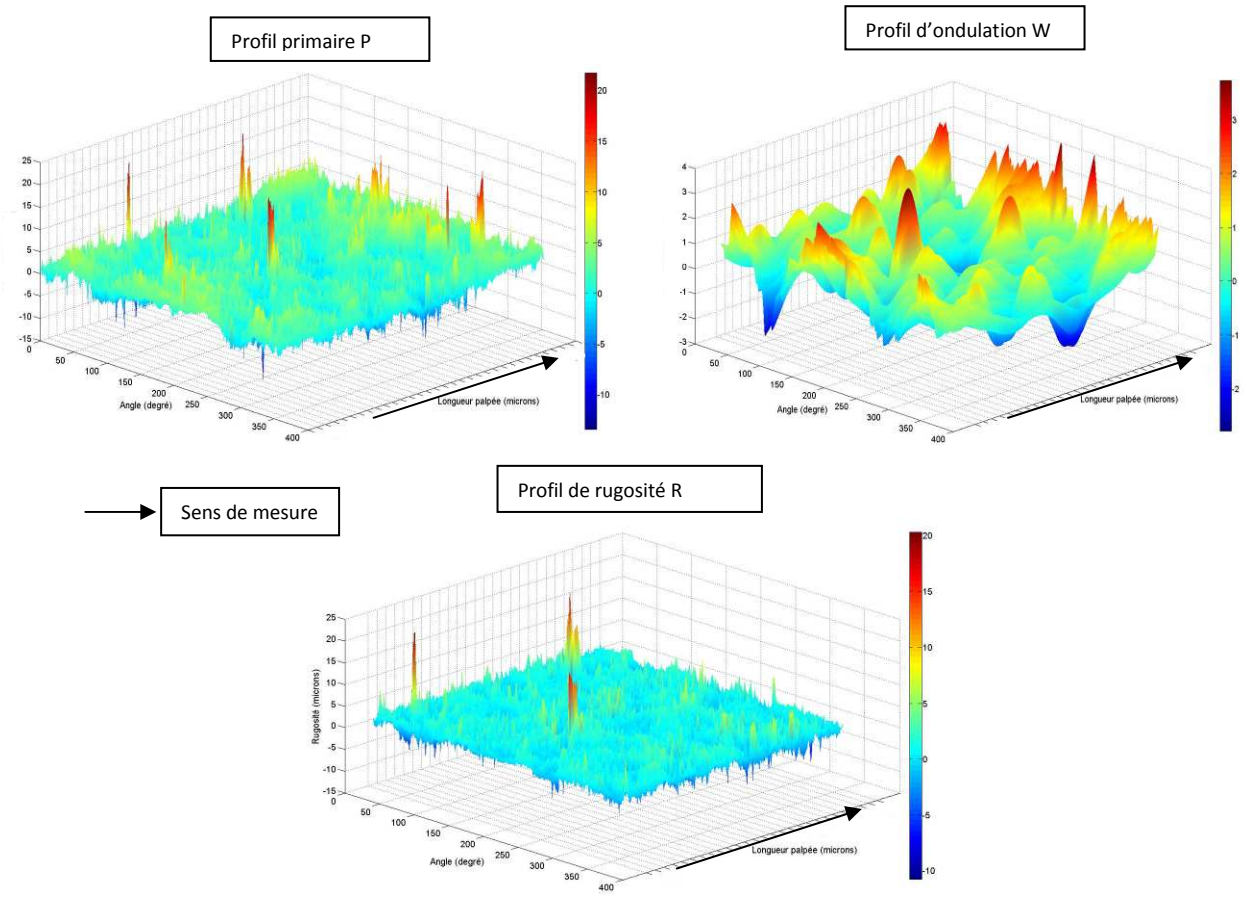


Fig. 3 Trois principaux profils normalisés de Rugosité (µm)

A l'issue des essais de perçage, il a été remarqué que quelles que soit les conditions de perçage appliquées, les schémas de défauts apparaissaient qualitativement identiques. Ces défauts semblent être directement liés à la séquence d'empilement.

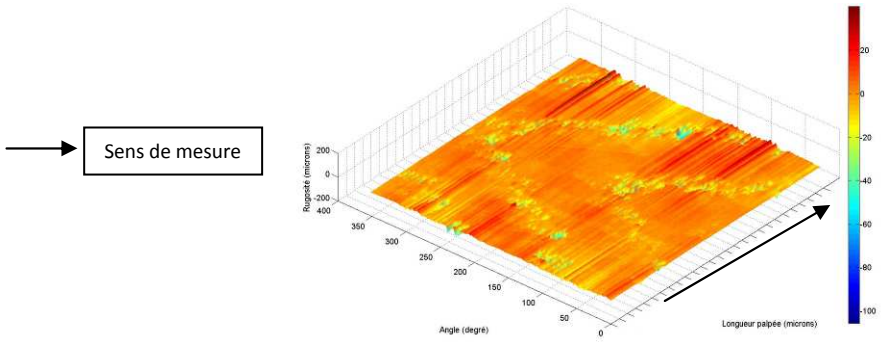


Fig. 4 Exemple de profil primaire d'un trou avec un schéma de défauts en « V »

La conclusion qui a pu être tirée de ces cartographies est que la localisation des défauts n'est due ni aux conditions de coupe ni à l'outil utilisé.

2.2.2 Analyses micrographiques

Afin de comprendre les mécanismes d'endommagement liés au perçage, des observations des trous au MEB (microscope électronique à balayage) ont été réalisées.

De précédents travaux de thèse tels que ceux de L. Surcin [10] ont mis en évidence le comportement des fibres sous l'arête de coupe en fonction de l'angle qu'elles font avec la direction de la vitesse de coupe.

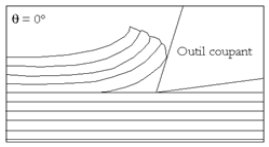
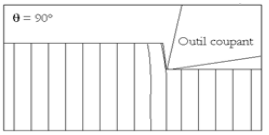
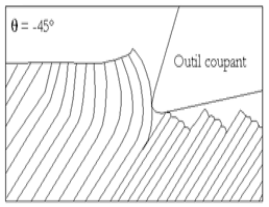
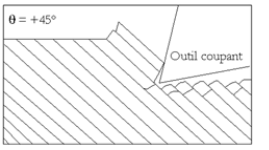
En effet, lorsque les fibres sont orientées à 0° par rapport à la direction de la vitesse de coupe, elles subissent une sollicitation de compression, de flexion voir même de flambage en amont de l'arête de coupe. Des décohésions fibre/ matrice sont observées et les fibres sont « déchaussées » et on constate l'apparition de délaminages.	
Lorsqu'elles sont orientées à 90° par rapport à la direction de la vitesse de coupe, elles sont sollicitées en flexion maximale puis cisaillées proprement.	
Lorsqu'elles sont orientées à -45° par rapport à la direction de la vitesse de coupe, les fibres sont sollicitées en flexion puis cisaillement. Néanmoins, ce fléchissement est limité par les fibres se trouvant derrière les premières et ainsi de suite. Lorsque la limite de la résistance des fibres au fléchissement est atteinte, l'ensemble finit par céder. On observe alors des arrachements de paquets de fibres. Ces arrachements apparaissent sous forme de « trous » au MEB.	
Lorsqu'elles sont orientées à +45° par rapport à la direction de la vitesse de coupe, les fibres sont cisaillées et l'état de surface apparaît très rugueux.	

Fig. 5 Orientation de la direction de la vitesse de coupe par rapport aux fibres [10]

Pour comprendre les mécanismes d'endommagement liés au perçage, il est nécessaire de distinguer deux repères différents :

- Le repère du stratifié
- Le repère direction de la vitesse de coupe

La direction de la vitesse de coupe change durant l'opération de perçage (voir figure ci-dessous). De cette façon, suivant cette direction, l'angle entre les fibres et la direction de la vitesse de coupe varie pendant le perçage.

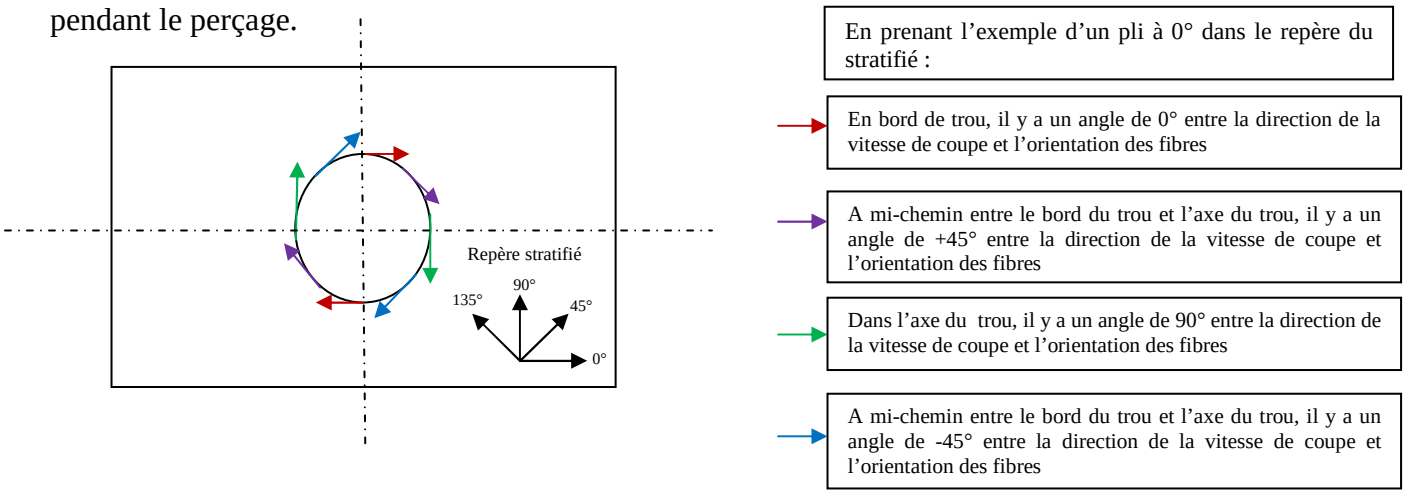


Fig. 6 Variation du vecteur « direction de la vitesse de coupe »

Les défauts de perçage les plus importants sont les arrachements de fibres que l'on constate lorsque celles-ci sont orientées à -45° par rapport à la vitesse de coupe. La figure qui suit illustre ces défauts.

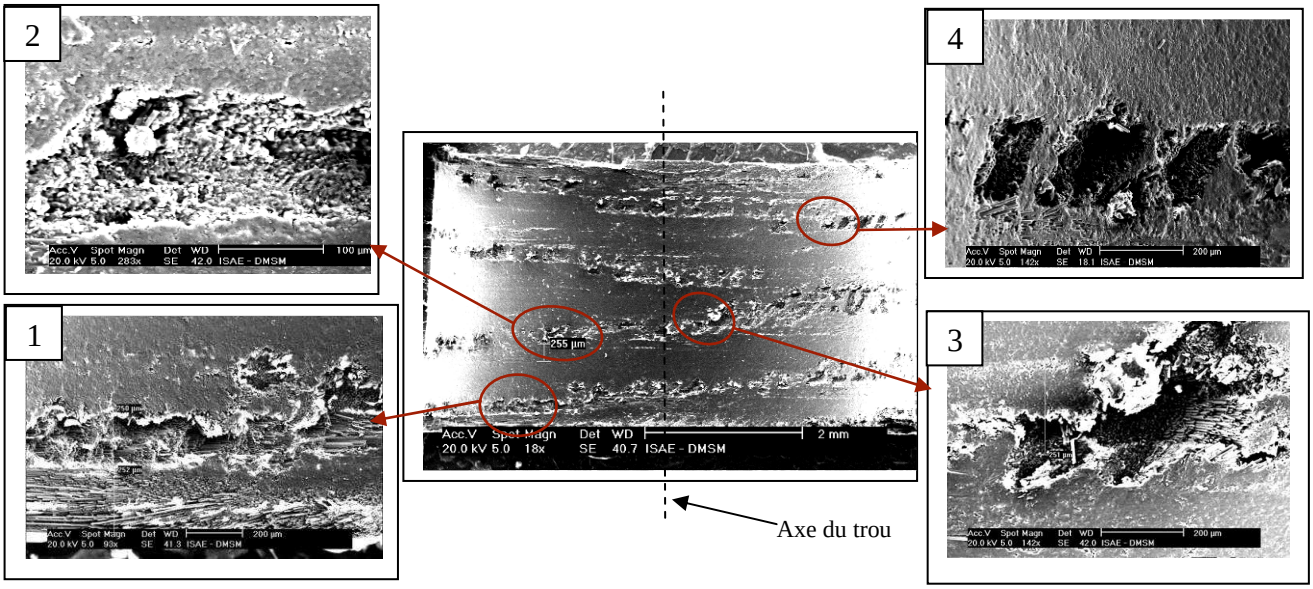


Fig. 7 Coupes microscopiques des défauts de paroi les plus importants

1 : Cette figure représente un arrachement localisé sur un pli à 0° dans le repère du stratifié. Cet arrachement est localisé à mi-chemin du bord du ½ trou et de l'axe du trou car à cet endroit, la direction de la vitesse de coupe est à -45° par rapport à ces fibres.
2 : Cette figure représente un amas de fibres mal coupées localisé sur un pli à 90° dans le repère du stratifié. Ce défaut est localisé à mi-chemin du bord du ½ trou et de l'axe du trou car à cet endroit, la direction de la vitesse de coupe est à 45° par rapport à ces fibres. L'état de surface est rugueux, mais reste néanmoins meilleur que celui qu'on observe sur les figures 1, 3 et 4.
3 : Cette figure représente un arrachement de fibres localisé sur un pli à -45° dans le repère du stratifié. Ce défaut apparaît très près de l'axe du trou car à cet endroit, la direction de la vitesse de coupe est à -45° par rapport à ces fibres.
4 : Cette figure représente un arrachement localisé sur un pli à 90° dans le repère du stratifié. Cet arrachement est localisé à mi-chemin du bord du ½ trou et de l'axe du trou car à cet endroit, la direction de la vitesse de coupe est à -45° par rapport à ces fibres.

Ces observations au MEB ont aussi permis de faire des comparaisons avec les cartographies reconstituées sous MATLAB.

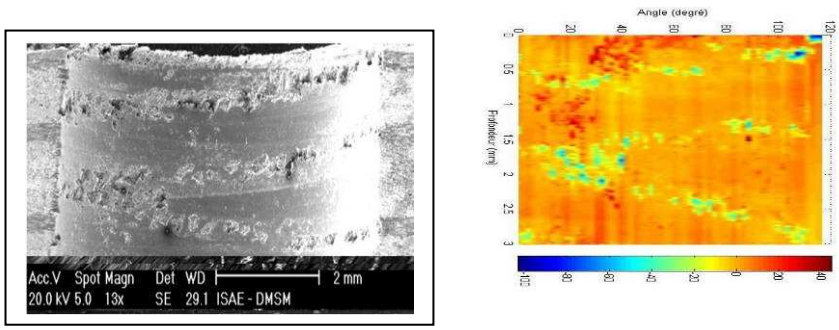


Fig. 8 Comparaison entre coupe microscopique et cartographie de rugosité

On retrouve le schéma de défauts en « V » observé précédemment.

3. Essais Mécaniques

Des essais statiques de matage ½ trou ont été réalisés sur ces éprouvettes. Cinq éprouvettes par configuration de perçage et par type de drapage ont été testées. Les essais ont été conduits sur une machine de traction/compression statique INSTRON de 100KN. L'intérêt de ce type d'essai est que

l'on s'affranchit des effets de flexion et rotation du boulon [11]. On réalise ainsi un matage pur de la surface à tester.

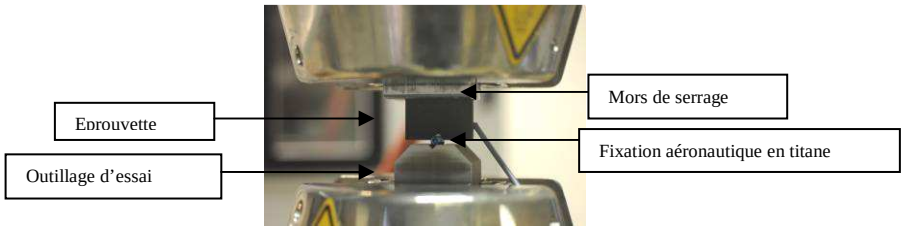


Fig. 9 Dispositif d'essai

L'outillage d'essai a été réalisé en acier de nuance 35NCD16 afin qu'il soit très résistant. Le boulon utilisé est en titane. La courbe ci-dessous représente le comportement général en matage d'éprouvettes :

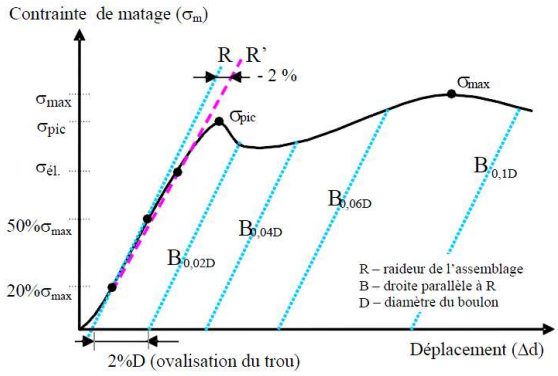


Fig. 10 Courbe type d'un essai de matage [11]

- La contrainte de matage au pic (σ*pic*) si la courbe présente un pic, ou la contrainte de matage maximale (σmax) jusqu'à une ovalisation du trou de 10% La raideur (*R*) est calculée entre 20% et 50% de la contrainte σ*pic* ou σ*max*
- La limite élastique (σ*él*) est calculée à la valeur de la contrainte de matage pour laquelle la chute de la raideur (*R'*) est de l'ordre de 2% par rapport à la raideur initiale (*R*);
- Les contraintes de matage pour différents niveaux d'ovalisation du trou : à 2% du diamètre initial du trou (σ2%D), à4% (σ4%D), à 6% (σ6%D) ou à 10% (σ10%D).

Les résultats d'essai montrent pour les éprouvettes de la stratification quasi-Isotrope (4mm) une chute de raideur significative de 8.8% environ des éprouvettes percées dans des conditions dégradantes par rapport à celles percées dans des conditions non dégradantes. L'effort de matage au pic semble peu influencé par l'état de surface du trou. Il chute d'environ 2.5% pour ce type de stratification. La figure ci-dessous présente l'allure moyenne des courbes de matage pour chacune des conditions de perçage appliquées.

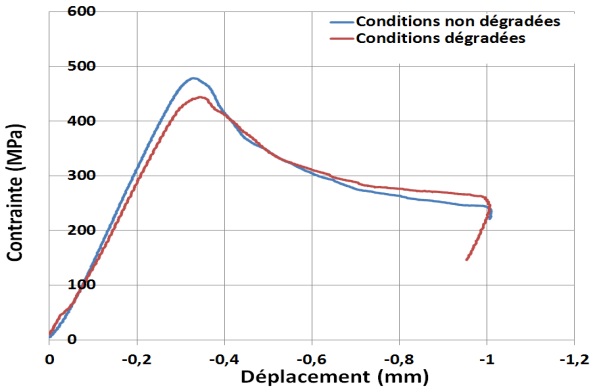


Fig. 11Courbe de matage pour les stratifiés Quasi-Isotropes

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs moyennes (par conditions de perçage) de contraintes à différents pourcentages de déformation du trou ainsi que les raideurs et les contraintes maximales de matage.

Tableau 1 Valeurs des points caractéristiques des courbes de matage pour le stratifié Quasi-Isotrope

Eprouvettes non dégradées	Moyenne	Ecart-type	Dispersion (%)
Raideur (KN/mm)	44,96	1,09	2,42
B 0,005D (MPa)	467,69	21,37	4,57
Contrainte max (MPa)	488,89	24,92	5,09
B 0,02D (MPa)	421,23	40,57	9,63
B 0,04D (MPa)	351,88	26,11	7,42
B 0,06D (MPa)	306,03	17,27	5,64
B 0,1D (MPa)	255,43	7,98	3,12

Eprouvettes dégradées	Moyenne	Ecart-type	Dispersion (%)
Raideur (KN/mm)	41,01	2,08	5,07
B 0,005D (MPa)	460,71	13,82	3,001
Contrainte max (MPa)	476,28	13,08	2,74
B 0,02D (MPa)	397,97	17,17	4,31
B 0,04D (MPa)	332,68	12,84	3,86
B 0,06D (MPa)	301,84	18,33	6,07
B 0,1D (MPa)	261,73	18,64	7,12

On peut remarquer que les plus grandes dispersions des résultats apparaissent à partir de B0.02D pour les éprouvettes à faible Ra. Cette observation peut s'expliquer par le fait qu'à partir de 2% de déformation du trou, le pic de matage est dépassé et on entre dans une phase de forte non-linéarité due aux endommagements importants et complexes subis par les éprouvettes. Les éprouvettes dégradées semblent présenter moins de dispersion. Ceci pourrait être dû à des mécanismes de rupture différents initiés par les défauts de perçage (qui sont assez répétables). Cette hypothèse reste à démontrer par de la modélisation numérique.

Afin d'évaluer la mesure dans laquelle les conditions de perçage influencent ces valeurs, un test de statistique de Student a été réalisé sur les deux lots d'éprouvettes présentés ci-dessus. Ce test permet avec un risque de 5%, d'évaluer la probabilité qu'une hypothèse soit vérifiée. L'hypothèse qui a été posée dans notre cas est la suivante : la dégradation des conditions de perçage n'a aucun effet sur les performances mécaniques des éprouvettes. Si la probabilité de cette hypothèse est inférieure à 5%, alors l'hypothèse n'est pas vérifiée, dans le cas contraire, on peut considérer qu'elle l'est. Le test de Student prend en compte les dispersions (écart-type) des populations comparées et le nombre d'essais réalisés. Le tableau ci-dessous regroupe les différentes valeurs de ces probabilités (p-valeur).

Tableau 2 Résultats du test de Student pour les éprouvettes de la stratification Quasi-Isotrope

Toutes Eprouvettes	P-valeur
Raideur (KN/mm)	0.46%
B 0,005D (MPa)	27.9%
Contrainte max (MPa)	17.7%
B 0,02D (MPa)	14.36%
B 0,04D (MPa)	9.7%
B 0,06D (MPa)	35%
B 0,1D (MPa)	15%

Au vu des résultats du tableau, on constate qu'il y a bien une influence des conditions de coupe sur la raideur des éprouvettes.
On observe les mêmes tendances pour les éprouvettes de la stratification fortement orientée (5mm). La chute de raideur enregistrée pour les éprouvettes dont les Ra sont élevés par rapport à celles dont les Ra sont faibles est en moyenne d'environ 3%. L'effort de matage au pic chute de 5,5% en moyenne pour les éprouvettes dont le Ra est élevé. La figure ci-dessous présente l'allure moyenne des courbes de matage pour chacune des conditions de perçage appliquées.

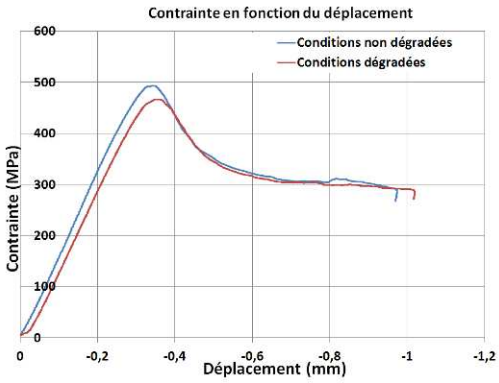


Fig. 12 Courbe de matage pour les stratifiés fortement orientés

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs moyennes (par conditions de perçage) de contraintes à différents pourcentages de déformation du trou ainsi que les raideurs et les contraintes maximales de matage.

Tableau 3 Valeurs des points caractéristiques des courbes de matage de la stratification fortement orientée

Eprouvettes non dégradées	Moyenne	Ecart-type	Dispersion (%)
Raideur (KN/mm)	51,84	0,84	1,63
B 0,005D (MPa)	490,20	20,28	4,13
Contrainte max (MPa)	499,98	17,75	3,55
B 0,02D (MPa)	437,45	20,84	4,76
B 0,04D (MPa)	351,88	26,11	7,42
B 0,06D (MPa)	319,69	17,75	5,55
B 0,1D (MPa)	301,56	25,78	8,55

Eprouvettes dégradées	Moyenne	Ecart-type	Dispersion (%)
Raideur (KN/mm)	50,40	0,65	1,30
B 0,005D (MPa)	462,79	9,69	2,09
Contrainte max (MPa)	472,73	10,91	2,308
B 0,02D (MPa)	415,71	22,95	5,52
B 0,04D (MPa)	338,82	17,63	5,20
B 0,06D (MPa)	308,64	14,7	4,76
B 0,1D (MPa)	295,001	14,57	4,93

Le test statistique de Student réalisé sur ces éprouvettes donne les résultats du tableau ci-dessous :

Tableau 4 Résultats du test de Student pour les éprouvettes de la stratification Fortement Orientée

Toutes Eprouvettes	P-valeur
Raideur (KN/mm)	0,92%
B 0,005D (MPa)	1,79%
Contrainte max (MPa)	1,18%
B 0,02D (MPa)	7,79%
B 0,04D (MPa)	39,04%
B 0,06D (MPa)	15,80%
B 0,1D (MPa)	31,86%

Au vu des résultats du tableau, on constate qu'il y a bien une influence l'état de surface sur la raideur, la contrainte maximale de matage ainsi que la contrainte d'ovalisation à 0.5% des éprouvettes.

4. Discussion

La figure ci-dessous présente l'état de surface de deux éprouvettes avant l'essai de matage. Celle de gauche représente une éprouvette dont le Ra est faible et celle de droite, une éprouvette dont le Ra est élevé.

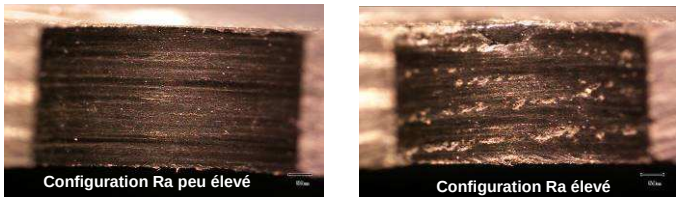


Fig. 13 Paroi de deux trous percés dans les deux configurations choisies

Des photos de ces éprouvettes ont été prises à différents stades des essais. La courbe ci-dessous représente le comportement global des éprouvettes.

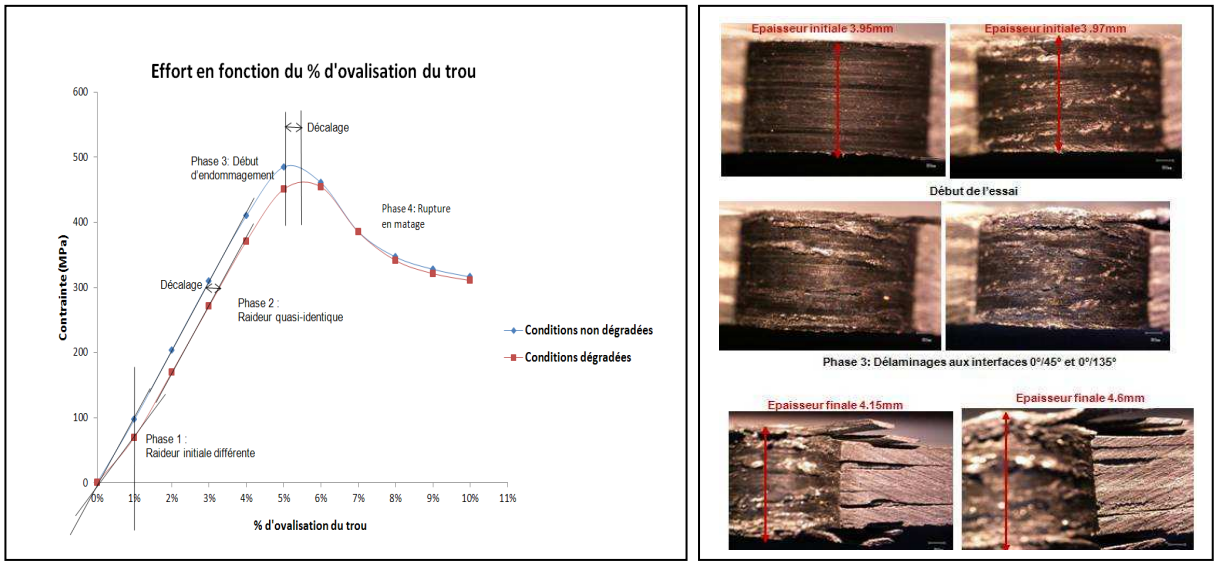


Fig. 14 Explication de la cinétique d'endommagement par matage liée aux défauts de perçage

En début d'essai, on remarque une différence de raideur importante entre les deux lots d'éprouvettes. Cette différence ne peut être due à la mise en place de l'essai car une précharge de 0.5KN a été appliquée en début d'essai. Elle peut néanmoins être expliquée par les cartographies de ces trous et confirmée par des observations au MEB. En effet, des fibres ont fléchi sous l'arête de coupe et ont été mal coupées, elles dépassent de la surface usinée. Ce « déchaussement » des fibres a déjà été constaté par P.Ghidossi [12] dans ses travaux de thèse. Ce phénomène apparaît lorsque les fibres sont orientées à 45° par rapport à la direction de la vitesse de coupe (figure 5).
Sur la figure ci-dessous, on peut remarquer sur la cartographie de gauche que les points rouges correspondent à des valeurs positives d'amplitude de défauts. Un de ces points a été observé au MEB et la photo de droite en est le résultat. On voit clairement des fibres dépasser de la surface du trou.

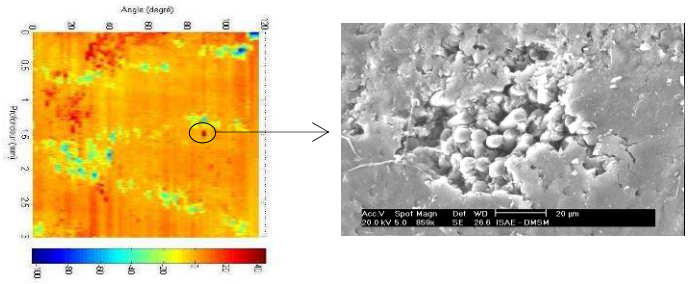


Fig. 15 Fibres mal coupées apparaissant à la surface du trou

Ces fibres mal coupées peuvent expliquer la différence de raideur observée en début d'essai. En effet, plus les conditions d'usinage sont dégradées, plus les amplitudes de défauts sont importantes (que ce soit en positif ou en négatif). En début d'essai, ces fibres sont donc écrasées et comprimées. La surface portante du boulon est très faible en début d'essai pour des éprouvettes dégradées, d'où la raideur très faible observée en phase 1.
Une fois que toutes les fibres dépassant de la paroi du trou ont été écrasées, on constate une reprise de raideur (phase 2). Cette raideur est néanmoins plus faible pour les éprouvettes dégradées que pour les éprouvettes non dégradées. Cette chute de raideur peut être expliquée par le fait que les arrachements de paquets de fibres ont créé des microcavités sur la paroi du trou (voir figure 7). En effet, ces microcavités réduisent la surface portante du boulon. Cette surface portante est plus importante pour les éprouvettes non dégradées car les microcavités y sont quasi-inexistantes. Ceci explique la différence de raideur et la baisse de la contrainte maximale de matage pour les éprouvettes dégradées.
La phase 3 représente le début de l'endommagement des éprouvettes. On peut constater qu'on retrouve le décalage induit par la phase 1 au niveau du pic de matage. Ce décalage signifie qu'au

pic de matage, les éprouvettes dégradées ont subi une ovalisation du trou plus importante que les éprouvettes non dégradées. Ce qui signifie que pour un chargement quasi-identique, les éprouvettes dégradées se déforment plus que les éprouvettes peu dégradées. Les photos prises en cours d'essai tendent à confirmer ce raisonnement. On peut constater qu'en phase 3, l'éprouvette dont le Ra est élevé est plus endommagée que l'éprouvette à faible Ra.
En fin d'essai (phase 4), les éprouvettes dont le Ra est élevé sont plus déformées que les éprouvettes dont le Ra est faible. En effet, le gonflement est plus accentué pour les éprouvettes dégradées.

5. Conclusions

Une étude dans le but d'établir l'influence de la rugosité des perçages sur la tenue mécanique statique en matage a été réalisée. Les cartographies de trou réalisées sous MATLAB permettent d'avoir une vision exhaustive des défauts de rugosité liés au perçage. Les coupes micrographiques permettent de cerner la nature (arrachements de fibres, brûlure de résine etc…) de ces défauts et complètent ainsi les cartographies du rugosimètre.
Des analyses microscopiques (binoculaire) à différents moments de l'essai ont permis d'expliquer les mécanismes d'endommagement liés aux défauts de perçage. En effet, une déformation plus importante au niveau du pic de matage et en fin d'essai a pu être constatée pour les éprouvettes dont le Ra est élevé par rapport aux éprouvettes à faibles Ra. Ce phénomène a été mis en évidence par les courbes d'essai.
Cette étude a permis de démontrer que l'état de surface du trou a une influence sur la raideur et sur la contrainte maximale de matage en statique des éprouvettes composites percées. En effet, une baisse de raideur de 8.8 % et une baisse de la contrainte maximale de matage de 2.5% ont été observées pour les éprouvettes à fort Ra par rapport à celles dont le Ra est faible (pour la stratification QI). Pour les éprouvettes de la stratification fortement orientée, une baisse de la raideur de 3% et une baisse de la contrainte maximale de matage de 5.5% ont été observées pour les éprouvettes à fort Ra par rapport à celles dont le Ra est faible.
Des modèles éléments finis prenant en compte les surfaces mesurées au rugosimètre seront développés par la suite. Des essais de fatigue sur assemblages seront réalisés plus tard afin d'évaluer l'influence de l'état de surface des trous sur la durée de vie de ces assemblages.

Références

[1] V. Krishnaraj, S. Vijayarangan, A Ramesh Kumar « Effect of drilling parameters on mechanical strength in drilling glass fibre reinforced plastic » International journal of computer applications in technology 2007, vol. 28, n° 1 (117 p.), pp. 87-93.
[2] Z. Hamdoun, **L.Guillaumat**, **J-L. Lataillade** « Influence of the drilling quality on the fatigue compression behaviour of carbon epoxy laminates », International Journal of Fatigue 28 (2006) 1–8.
[3] A. Paoletti « The influence of drilling parameters and hole damage on GFRP composites fatigue strength »
[4] W**. Koenig** et **P. Grass**, «Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets», Annals of the C.I.R.P. n° 38, pp. 119-124, 1989.
[5] E. Persson, I. Eriksson et **L. Zackrisson**, « Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates », Composites Part A, vol. 28, pp. 141-151, 1997.
[6] Wen-Chou Chen « Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber reinforced plastic composite laminates »
[7] P. Guegan, « Contribution à la qualification de l'usinage de matériaux composites à matrice organique », Thèse de l'école centrale de Nantes, 1994.
[8] L. M. Durão, **A.G. Magalhães**, **J.M.R.S. Tavares**, **A. T. Marques** « Analyzing objects in images for estimating the delamination influence on load carrying capacity of composite laminates ».
[9] Davim J. Paulo; J. Campos Rubio; A. M Abrao « A novel approach based on digital image analysis to evaluate the Delamination factor after drilling composites laminates » Composites science and technology **ISSN** 0266-3538 **CODEN** CSTCEH 2007, vol. 67, n°9, pp. 1939-1945
[10] L. Surcin, « Contribution à l'étude théorique et expérimentale du perçage de plaques composites minces », Thèse de l'Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2005.
[11] G. Gohorianu « Interaction entre les défauts d'usinage et la tenue en matage d'assemblages boulonnés en Carbone/Epoxy », Thèse de l'Université Paul Sabatier, 2008.
[12] P. Ghidossi « Contribution à l'étude de l'effet des conditions d'usinage d'éprouvettes en composites à matrice polymère sur leur réponse mécanique », Thèse de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, Chalons en Champagne 2003.