



HAL
open science

Etude de l'impact sur pale d'hélicoptère = Study of impact on helicopter blade

Issam Tawk, Jean-François Ferrero, Jean-Jacques Barrau, Pablo Navarro, S. Lemaire

► **To cite this version:**

Issam Tawk, Jean-François Ferrero, Jean-Jacques Barrau, Pablo Navarro, S. Lemaire. Etude de l'impact sur pale d'hélicoptère = Study of impact on helicopter blade. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00390728

HAL Id: hal-00390728

<https://hal.science/hal-00390728>

Submitted on 11 Jun 2009

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.

Etude de l'impact sur pale d'hélicoptère

Study of impact on helicopter blade

I. Tawk¹, J.F. Ferrero², J.J. Barrau², P. Navarro¹, S. Lemaire³

1 : DMSM

Université de Toulouse / ICA / ISAE – 10 av. E.Belin 31055 CEDEX

e-mail : tawk@isae.fr / Navarro@lgmt.ups-tlse.fr

2 : LGMT

Université de Toulouse / ICA / UPS – 118 Rte de Narbonne 31062 CEDEX 4

e-mail : ferrero@isae.fr / barrau@cict.fr

2 : TDMP

Eurocopter Marignane / BDD – Aeroport Marseille Provence 13725 Marignane

e-mail : Sandrine.lemaire@eurocopter.com

Résumé

Le présent article propose une étude de l'impact de structures similaires à des tronçons de pales d'hélicoptère. Ces structures composites complexes, fabriquées au laboratoire sont impactées par une bille en acier de 125 g à des vitesses d'impact variant de 30 à 130 m/s. Les essais sont enregistrés par une caméra rapide qui permet une acquisition de 120000 images/seconde. Cela a permis de mettre en évidence la cinématique de l'impact et de définir la chronologie des différents mécanismes d'endommagements. Un travail de modélisation est aussi présenté. Différentes stratégies de modélisation EF, à l'échelle macroscopique, permettent ainsi de modéliser ces phénomènes avec des densités de maillage qui ne sont pas pénalisantes lors d'un calcul sur une structure réelle.

Abstract

This article presents a study of damage in structures similar to sections of helicopter blades subjected to an impact. These complex composite structures manufactured in the laboratory were impacted by a steel ball of 125 g at impact speeds ranging from 30 to 130 m / s. The tests are recorded by a camera that allows acquisitions of 120,000 fps. This permitted to highlight the kinematics of the impact and to define the sequence of damage's mechanisms. An FE model is also presented. It allows modeling the experimentally observed damage. The mesh density is low and can be used for a calculation on a real structure

Mots Clés : IMPACT, COMPOSITE, PALES, MEF
Keywords : IMPACT, COMPOSITE, BLADES, FEM

1. Introduction

En aéronautique, la sécurité des passagers et la fiabilité des structures sont des aspects essentiels. Toutes améliorations techniques sont donc accompagnées, nécessairement, par une demande de sécurisation de plus en plus exigeante de la part des organismes de certification. La justification de la tenue à l'impact des structures n'est pas nouvelle mais la modélisation de ces phénomènes reste difficile [1], et souvent, les essais expérimentaux remplacent la prédiction. Ces nombreux essais, réalisés forcément en fin de cycle de développement, viennent alourdir les coûts des produits et peuvent même par leur délai de réalisation et surtout lorsque l'essai révèle un défaut de tenue à l'impact, pénaliser lourdement le cycle de développement. Les hélicoptères n'échappent pas à la règle et les pales sont des éléments particulièrement sensibles de la structure. L'objectif de cette étude est de proposer une méthodologie de calcul exploitable industriellement pour l'impact de structures composites complexes telles que des pales d'hélicoptère.

Dans une première partie, des essais d'impact sur des structures similaires à des tronçons de pale sont réalisés pour une large gamme de vitesse. Ces essais permettent de définir la cinématique des mécanismes de dégradation. Dans une deuxième partie, une modélisation des phénomènes observés expérimentalement est proposée. Elle s'appuie sur une approche multi échelle. Des modèles d'endommagement réalistes et utilisables sur des structures industrielles sont proposés.

2. Etude expérimentale

2.1 Description des éprouvettes

Les tronçons de pales sont réalisés à partir d'un moule en aluminium constitué de deux demi-coquilles réalisées par électroérosion. Le profil symétrique correspond au profil d'une pale de rotor arrière. Les tronçons sont réalisés avec les dimensions suivantes: la longueur de corde est de 185 mm, la longueur développée de 378,2 mm, la hauteur maximale de 22 mm et la longueur de 285 mm (Figure 1).

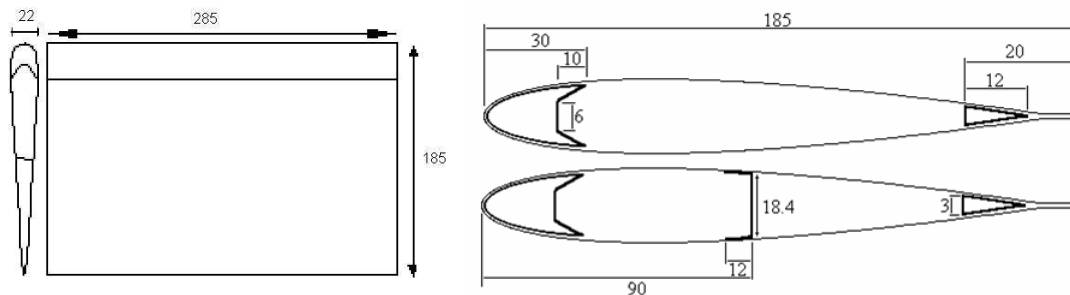


Figure 1 : Définition géométrique des éprouvettes

Schématiquement, la structure (Figure 2) est composée d'un longeron principal en verre-époxy unidirectionnel aussi appelé roving qui forme la principale partie du bord d'attaque, d'une peau composite hybride verre-époxy et carbone-époxy (2 tissus de carbone à $\pm 45^\circ$ et un tissu de verre à $0/90^\circ$), d'une nervure en carbone, d'une âme en mousse polyuréthane qui permet de stabiliser les peaux en flambage, et d'une protection en acier inoxydable qui recouvre le bord d'attaque.

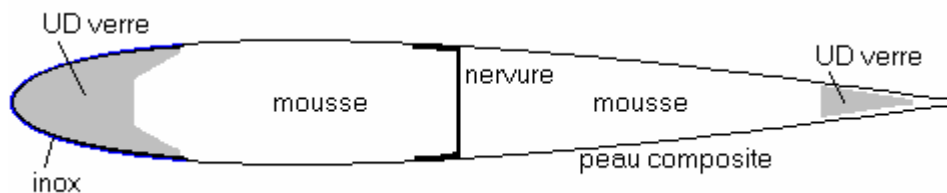


Figure 2 : Section des éprouvettes et matériaux utilisés

2.2 Dispositif d'essai

Les essais sont réalisés à l'aide d'un canon à gaz comprimé conçu au laboratoire. Deux réservoirs de 6 litres chacun sont reliés à un tube de 3 mètres de long et d'un diamètre intérieur de 40 mm. Ce dispositif permet la réalisation d'impacts grande vitesse pouvant aller jusqu'à environ 150 m/s, pour un projectile d'environ 125g. Les projectiles sont des billes d'acier de 30 mm de diamètre, d'une masse de 110 g. Ces billes sont stabilisées à l'intérieur du tube du canon par un support en mousse polyuréthane. La vitesse

d'impact est régulée par le contrôle de la pression dans les deux réservoirs. L'éprouvette est positionnée dans un caisson de sécurité.

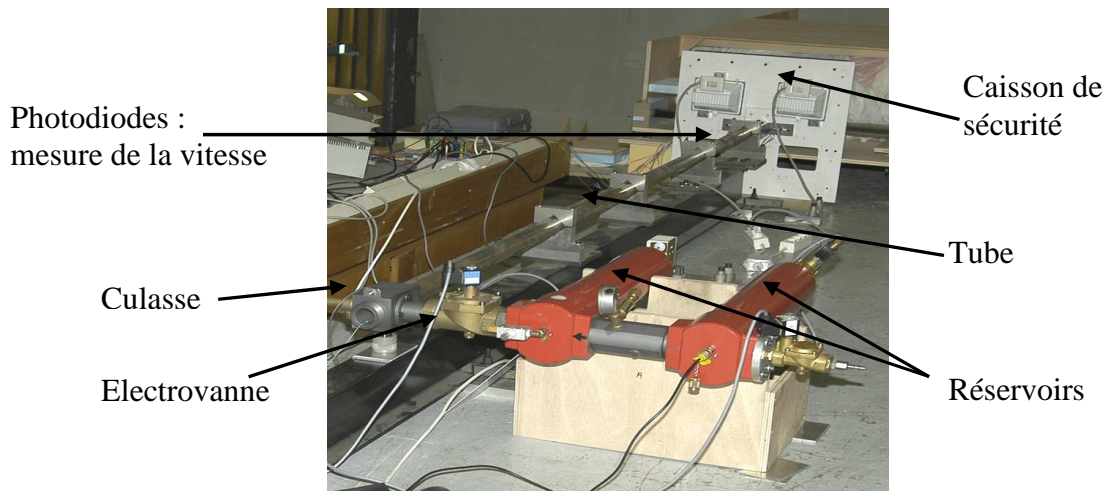


Figure 3 : Canon pour impact à haute vitesse

Une caméra rapide Fastcam Photron est utilisée pour enregistrer les essais. Cette caméra permet de filmer à des vitesses allant jusqu'à 120 000 images par seconde. Les vitesses utilisées pendant les essais sont de 12000 et de 30000 images par seconde.

2.3 Résultats des essais expérimentaux

L'objectif de cette étude expérimentale est d'étudier l'endommagement de la pale de référence en fonction de l'énergie d'impact. Ainsi, 8 essais ont été réalisés avec des vitesses allant de 20m/s à 137m/s.

Pale	Caractéristiques caméra	Caractéristiques projectile	Caractéristiques essai
Essai 1 Masse: 437,7 g	Résolution: 512 x 384 pixels Vi = 12000 i/s	Masse totale : 121,3 g	Vitesse : 18.34 m/s. Energie : 20.42 J
Essai 2 Masse: 440,19 g	Résolution: 512 x 384 pixels Vi = 12000 i/s	Masse totale : 124,6 g	Vitesse: 49,52 m/s Energie: 152,77 J
Essai 3 Masse: 440 g	Résolution: 512 x 384 pixels Vi = 12000 i/s	Masse totale : 122 ,7 g	Vitesse: 62,02 m/s Energie: 235,98 J
Essai 4 Masse : 431,6 g	Résolution: 512 x 384 pixels Vi = 12000 i/s	Masse totale : 121,5 g	Vitesse : 70,71 m/s Energie: 303,74 J
Essai 5 Masse: 421 g	Résolution: 256 x 256 pixels Vi = 30000 i/s	Masse totale : 122,4 g	Vitesse: 94,45 m/s Energie: 545,95 J
Essai 6 Masse : 431 g	Résolution: 256 x 256 pixels Vi = 30000 i/s	Masse totale : 121 g	Vitesse : 119 m/s Energie: 855J
Essai 7 Masse: 439.2 g	Résolution: 256 x 256 pixels Vi = 30000 i/s	Masse totale : 121,7 g	Vitesse : 128 m/s. Energie : 997 J
Essai 8 Masse: 440,4 g	Résolution: 256 x 256 pixels Vi = 30000 i/s	Masse totale : 121 g	Vitesse: 137 m/s Energie: 1144 J

Tableau 1 : Caractéristiques des essais effectués dans la première série d'impact

Le tableau 1 résume les caractéristiques des tirs de la série d'essais. Le niveau d'énergie varie entre 20 et 1144J. La masse de la pale est de 430 ± 10 g. La masse du projectile varie entre 121g et 125g. Pour les vitesses d'impact inférieures à 70m/s, on a utilisé la caméra avec 12000i/s. Pour les vitesses d'impact supérieures, la caméra a été utilisée avec 30000i/s.

La vidéo permet de calculer les vitesses du projectile avant et après impact ainsi que la vitesse de la pale après impact pour en déduire les énergies mises en jeu lors d'un essai.

Sur la figure 4, on présente les images prises par la caméra rapide pendant l'essai 5. La vitesse d'impact est de 94.45m/s. Au début de l'impact, le projectile rentre en contact avec le bord d'attaque de la structure. On observe une flexion globale très importante du bord d'attaque ainsi qu'un gonflement important résultant

de la pénétration du projectile dans le longeron. La flexion diminue ensuite lorsque la pale se met en mouvement. La déformée finale du bord d'attaque est moins importante que lors de l'impact. Ce phénomène s'explique par le retour élastique de la structure.

Ces images montrent clairement la formation et la propagation d'une onde dans la pale. Lors de l'impact, l'onde se forme au niveau du contact et elle se propage autour de ce point d'impact. La propagation de cette onde s'arrête lorsqu'elle arrive au niveau de la nervure. Elle se propage ensuite suivant la longueur de la pale jusqu'aux extrémités de l'éprouvette. Cette propagation varie en fonction de l'énergie d'impact et correspond au décollement des peaux de la mousse qui est arrêtée par la nervure. Le temps que l'onde va mettre pour arriver aux bords de la pale est de 0.5ms.



Figure 4 : photos successives d'un impact

Le tableau 2 présente les énergies d'impact, ainsi que l'énergie de la pale et de la bille après l'impact. L'énergie absorbée par la pale en résulte. Cette énergie correspond à l'énergie de déformation et d'endommagement de la pale.

Essais	Energie d'impact EI (J)	Energie Pale après impact (J)	Energie bille après impact (J)	Energie absorbée EA (J)	EA/EI
1	20.42	5.47	0	15.24	73.2 %
2	152.77	41.91	0	110.86	72 %
3	235.98	58.45	0.3	177.23	75 %
5	545.95	126.35	8.24	411.36	75.4 %
6	854	194.6	9.6	649.8	76 %
7	996.9	279	7.6	710.3	71.2 %

Tableau 2 : Répartition des énergies

Le rapport entre l'énergie absorbée par la pale durant l'impact par rapport à l'énergie de l'impact varie peu, Il est compris entre 71 et 76% de l'énergie fournie par le projectile.

L'ensemble des essais réalisés a permis d'appréhender les dégradations observables post mortem sur les éprouvettes ainsi que la cinématique des dommages lors d'un impact. On observe un poinçonnement important du bord d'attaque. Les huit tronçons de pale impactés ont été mesurés sur une machine de mesure tridimensionnelle DEA-Hexagon Metrology. Cela a permis d'obtenir une mesure de la déformée du bord d'attaque. Sur la Figure 5, on observe les mesures obtenues en métrologie sur le tronçon de la pale de l'essai 5 impactée à une vitesse de 94.45 m/s. Ces mesures permettent de reconstruire le profil de la ligne du bord d'attaque en noir. L'analyse des distances entre le profil de la pale impactée et le profil de la pale saine donne une profondeur d'impact maximale de 9,2 mm et une empreinte résiduelle qui traduit le phénomène de flexion locale sur 75mm.

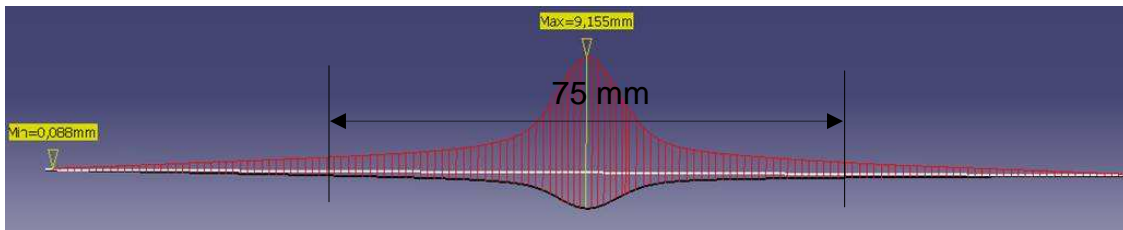
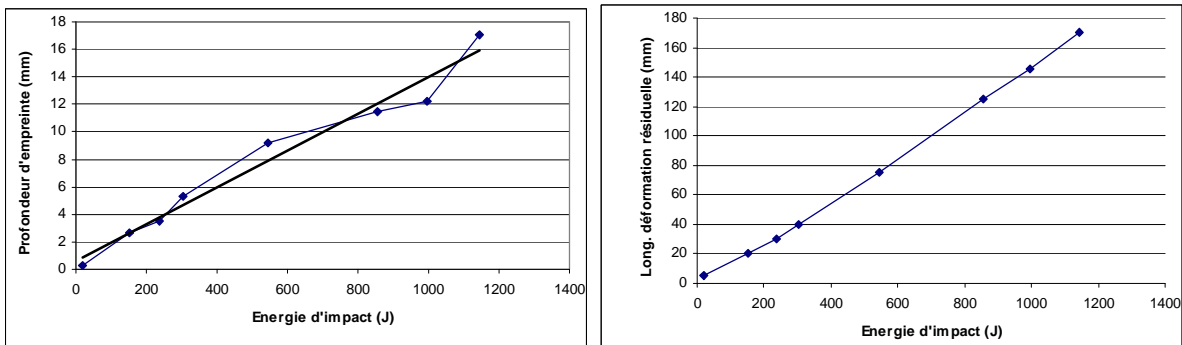


Figure 5 : profil du bord d'attaque après impact, vitesse d'impact 94.45m/s

Comme le montrent les Figures 6a et 6b, la profondeur d'indentation ainsi que l'empreinte résiduelle sont fonction de l'énergie d'impact, et on remarque un comportement quasi linéaire pour l'ensemble des essais.



Figures 6a et 6b : profondeur d'empreinte et empreinte résiduelle vs énergie d'impact

La pénétration du projectile dans le bord d'attaque provoque une flexion de la nervure et une ouverture de la protection inox. Cette ouverture entraîne les peaux composites qui se séparent de la mousse de remplissage. Ce phénomène se traduit par une rupture de la mousse en contact au niveau du collage sur une faible épaisseur.

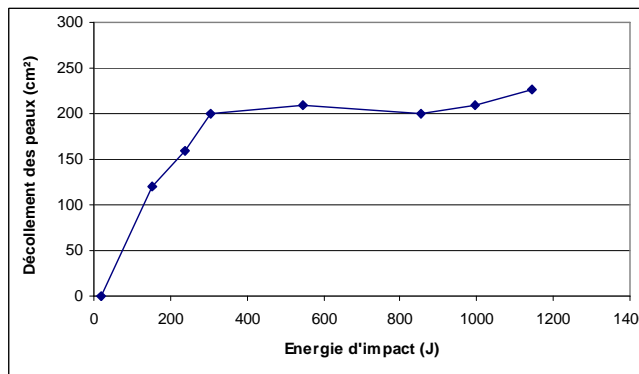


Figure 7 : surface décollée vs énergie d'impact

Pour quantifier la zone de décollement, du Tapping est réalisé sur les deux faces des éprouvettes pour l'ensemble des essais. La surface de décollement en fonction de l'énergie d'impact est présentée sur la Figure 7. On remarque bien l'effet de la nervure qui arrête la propagation de décollement. On constate aussi que pour tous les essais dont l'énergie d'impact est inférieure à 1000 J, le décollement ne dépasse pas la nervure. Lors des essais 2 (150J) et 3 (240J), les décollements des peaux sont symétriques par rapport à

l'axe de l'impact et ils ne se propagent pas jusqu'aux extrémités des éprouvettes. Pour l'essai 8 (1100J), la nervure se décolle de la peau inférieure de la pale. L'ensemble des surfaces décollées correspondent bien à l'évolution de l'onde observée sur la vidéo lors de l'impact.

Pour analyser les dommages internes à la structure, l'ensemble des éprouvettes a été stabilisé par inclusion dans une résine puis découpé parallèlement à la section tous les 10 mm. L'observation des coupes réalisées dans le plan d'impact permet de déterminer les dommages qui apparaissent lors du mécanisme de dégradation (Figure 8).

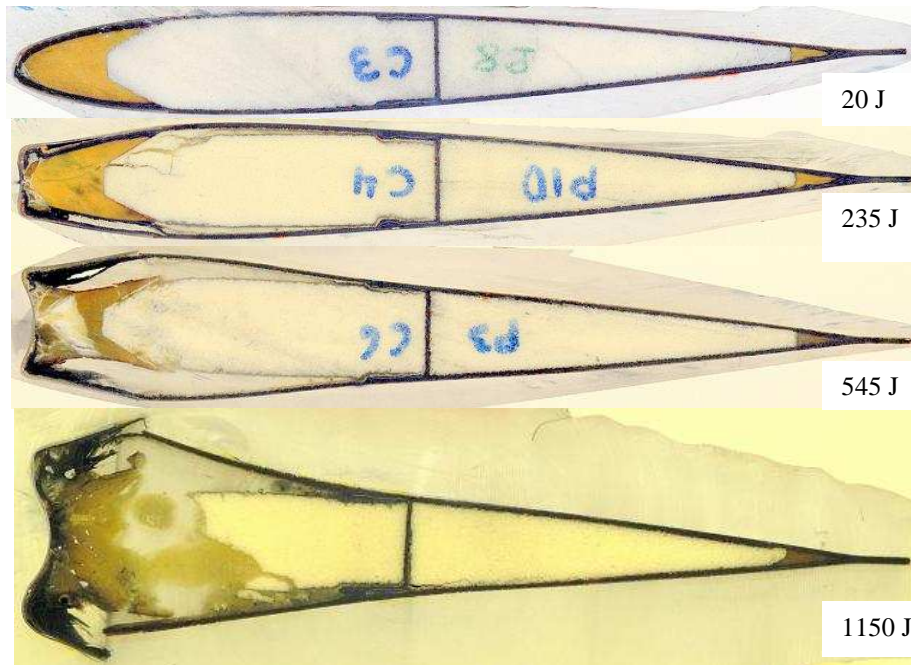


Figure 8 : sections du plan d'impact

Pour une énergie d'impact de 20 Joules, les dommages engendrés dans la structure se limitent à un léger matage de la protection Inox situé sous le point d'impact. Lorsque la vitesse du projectile augmente, on retrouve sur la section les observations faite sur l'indentation permanente ainsi que sur le décollement des peaux. Le phénomène d'ouverture est bien identifié. Il s'amorce par la plastification de l'Inox et un décollement peau / roving et entraîne ensuite le décollement peau / mousse. La liaison entre l'Inox et la peau résiste mieux que celle entre la peau et le roving. Il faut atteindre une énergie de 500J pour observer un décollement entre la protection Inox et la peau. Ce décollement reste très local (uniquement sous l'emprunte du projectile) et ne se propage pas longitudinalement. Par contre, les peaux sont partiellement ou totalement déchirées dans la zone située au niveau de l'extrémité de la partie Inox. Par construction, pour passer sous l'Inox, la peau subit à ce niveau une forte courbure locale ce qui peut avoir une influence sur le comportement observé.

La partie roving est rapidement fissurée au droit de l'impact et ce pour un niveau d'énergie relativement bas. Sur l'essai à 20 J, on peut observer les premières fissurations qui se font à 45° par rapport à l'axe de l'impact. En augmentant la vitesse d'impact, on remarque que la fissuration de la résine augmente dans la partie frontale du longeron toujours suivant le même angle. Des paquets de fibres vont ainsi se déplacer suivant ce plan de glissement. Cette cinématique de déplacement se retrouve pour toutes les pales impactées. Passé 800 J, après microfissuration locale de la résine et déplacement des paquets des fibres situé sur le devant du longeron, on observe des fissurations sur toute la partie arrière qui entraîne la rupture complète du longeron. La partie en mousse situé à l'arrière du longeron est elle aussi fortement endommagée.

L'observation des dommages pour des sections situées dans des plans plus extérieurs au plan d'impact confirme ces observations. Dès 300 Joules, l'énergie est suffisante pour décoller les peaux du roving jusqu'à l'extrémité de l'éprouvette. La dégradation du roving sous la forme rupture de la résine et des plis garde un caractère local limité à la zone situé au droit du point d'impact. Par contre, des fissurations se propagent longitudinalement et peuvent atteindre les extrémités des éprouvettes.

Différents essais ont été réalisés de façon à analyser l'influence du design de la structure (drapage, nervure, protection) sur sa tenue à l'impact. L'orientation des plis n'a que très peu d'influence, par contre le nombre de plis a plus d'effet sur la tenue à l'impact.

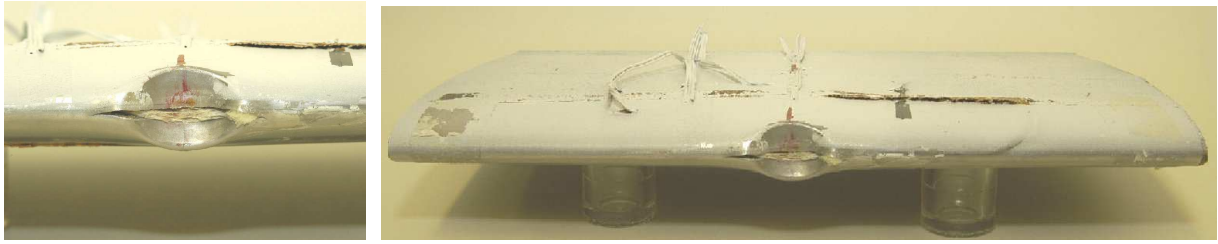


Figure 9 : impact 500 J éprouvette 2 plis

Tout d'abord, lorsque l'éprouvette est réalisée avec seulement 2 plis, 1 tissu verre orienté à $(0^\circ/ 90^\circ)$ et 1 tissu carbone orienté à $(+45^\circ/ -45^\circ)$, on observe l'apparition d'une fissure horizontale de la protection inox au niveau du point d'impact ainsi qu'une rupture des plis dans la zone décrite précédemment pour un niveau d'énergie de 500 J (Figure 9).

Ensuite, si l'éprouvette impactée est fabriquée sans nervure, les dommages observés sont équivalents sur la partie avant mais la zone décollée augmente de 45 %.

Enfin, pour identifier le rôle joué par la protection inox, une pale sans protection a été impactée à 235 J. La dégradation du bord d'attaque est forcément plus importante en comparaison avec un essai de même énergie sur une éprouvette avec protection. Par contre la zone décollée est 30 % moins importante ce qui confirme le rôle prépondérant joué par la protection inox dans le scénario d'endommagement.

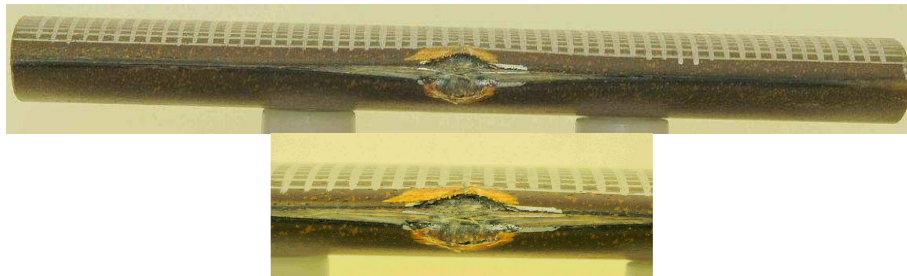


Figure 10 : impact 235 J éprouvette sans protection inox

3. Modélisation Eléments Finis

3.1 Présentation du modèle

Il s'agit de proposer une modélisation E.F. de l'impact sur des structures de type pale, et de la valider à partir des essais d'impacts présentés. Ces essais réalisés sur des tronçons de pale ont montré deux modes de ruptures prépondérants : le décollement des peaux, et l'endommagement local du roving. Donc, la modélisation E.F. proposée doit être réaliste, aussi bien au niveau de la cohérence avec les phénomènes physiques observés expérimentalement, que sur la mise en œuvre à l'échelle d'une pale ou tronçon de pale. La difficulté résulte essentiellement dans le compromis taille de maille et convergence / temps de calcul qui peut être très pénalisant pour la modélisation de la pale complète [2].

En effet, la modélisation des dommages générés par un impact sur une structure composite de type industrielle reste difficile, en raison de la complexité des phénomènes à modéliser, et des échelles distinctes auxquelles apparaissent les phénomènes d'endommagement. Pour obtenir une modélisation acceptable avec des modèles usuels, il faudrait utiliser des tailles de maille très faibles, ce qui entraînerait, au niveau de la modélisation globale d'une pale, des temps de calcul prohibitifs. D'où l'importance de mettre en place des stratégies de modélisation efficaces, à l'échelle macroscopique, permettant de modéliser ces phénomènes avec des tailles de maille qui ne sont pas pénalisantes lors d'un calcul.

Tout ce développement a été réalisé sur le code explicite RADIOSS [3]. Au niveau du bord d'attaque, le modèle doit donc gérer l'endommagement de la matrice, la décohésion des fibres et paquets de fibres tout en maintenant les fibres saines. L'idée est de modéliser le bord d'attaque par des éléments 3D, représentant la matrice, et des éléments 1D représentant les paquets de fibres (Figure 11).

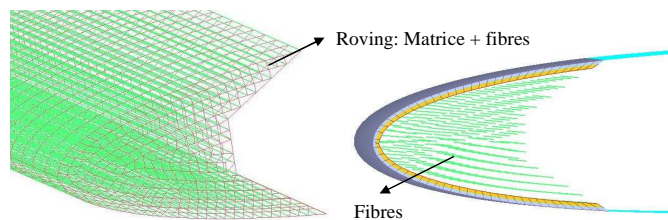


Figure 11 : Modélisation bord d'attaque

Lors de l'impact, la matrice est endommagée de manière indépendante, et le déplacement des fibres est géré par le glissement et le contact des paquets de fibres les uns sur les autres. Pour modéliser le décollement, d'une part entre la peau et le roving, et d'autre part entre la peau et la mousse, on a créé une couche d'éléments spécifiques de façon à évaluer précisément le champ de contrainte dans cette zone. L'utilisation d'éléments de faibles dimensions sera pénalisante sur le temps de calcul, mais elle est obligatoire pour contrôler correctement les phénomènes de décollement. La rupture de ces éléments reflète le phénomène de décollement entre les différentes parties.

La partie résine du bord d'attaque ainsi que la protection inox sont modélisées par une loi élasto-plastique avec endommagement. La peau en composite est définie par une loi classique de coques orthotropiques. La rupture est gérée en déformation. Le comportement des fibres étant quasi linéaire jusqu'à la rupture, une loi classique est utilisée avec une rupture en déformation.

3.2 Résultats et discussion

L'analyse des résultats obtenus à partir du modèle réalisé permet de comprendre la cinématique de l'impact. La Figure 12 montre le comportement de la section située au droit de l'impact et la courbe de l'enfoncement du bord d'attaque au niveau du point d'impact à différents instants de l'impact.

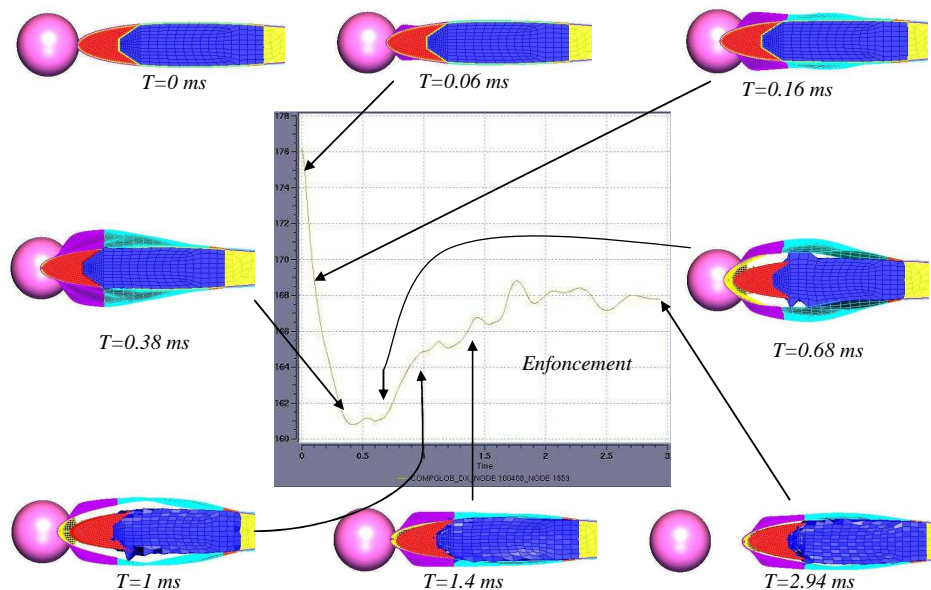


Figure 12 : Modélisation de l'impact

L'image à l'instant $t=0.06\text{ms}$ montre la formation de l'onde au niveau du bord d'attaque suite au contact avec la bille. L'amplitude de cette onde va augmenter et cette dernière va se propager en même temps dans la direction de l'impact et vers l'extrémité de la pale, ce qui va entraîner un gonflement de la structure et amener au décollement peau-roving et peau-mousse.

Grâce à la courbe qui donne l'enfoncement du bord d'attaque en fonction du temps, on observe quatre zones :

- Une première zone de montée de charge pendant 0.35ms. La pénétration de la bille entraîne un gonflement de la section. Celui-ci atteint un maximum à environ 0.38 ms.
- Une deuxième zone où l'enfoncement du bord d'attaque se stabilise pour une courte durée d'environ 0.25ms, mais où le décollement se propage pour toute la partie entre le bord d'attaque et la nervure
- Une troisième zone pendant 1ms qui représente le retour élastique de la structure
- Une quatrième zone où la pale prend sa forme finale

Les différents résultats obtenus par le modèle numérique sont comparés avec ceux obtenus expérimentalement. La vitesse de la pale après impact, la profondeur d'empreinte, la longueur de la déformation résiduelle dans le bord d'attaque, ainsi que la surface de décollement seront présentés en fonction de l'énergie d'impact.

La Figure 13 présente la vitesse de la pale après impact calculée numériquement et mesurée expérimentalement, pour des énergies d'impact inférieures à 854J. On remarque que les deux courbes sont assez proches, avec une erreur relative maximale de 8.48% pour une énergie d'impact à 854J ($V=119\text{m/s}$).

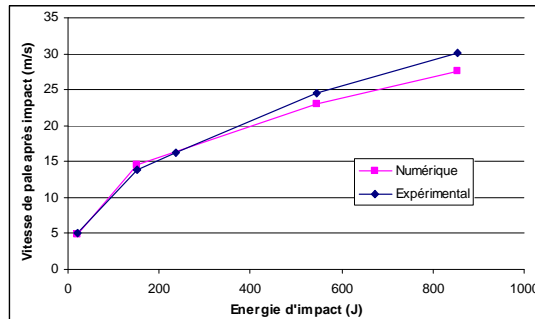


Figure 13 : Vitesse de pales après impact fonction de l'énergie d'impact

De même, les deux courbes, numérique et expérimentale, de la profondeur d'impact en fonction de l'énergie d'impact, sont assez proches (Figure 14). L'erreur relative est inférieure à 5.68%.

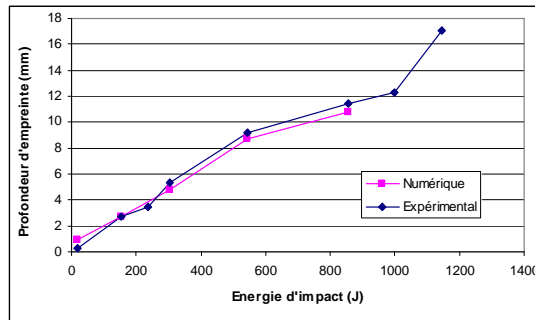


Figure 14 : Profondeur d'empreinte / énergie d'impact

La longueur de la déformation résiduelle en fonction de l'énergie d'impact, est présentée sur la figure **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** 15. La zone de déformation résiduelle obtenue par le modèle numérique, suit la même courbe obtenue expérimentalement. L'erreur relative entre les différents résultats est inférieure à 4%.

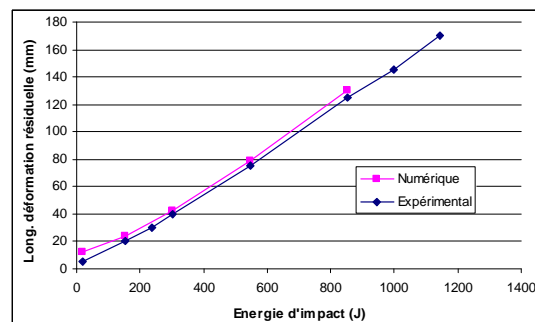


Figure 15 : Zone de déformée de la pale en fonction de l'énergie d'impact

Enfin, on présente sur la figure 16 les courbes représentant la surface de décollement en fonction de l'énergie d'impact. Les résultats numériques sont assez corrects. L'erreur relative pour les différents résultats est inférieure à 7.5%.

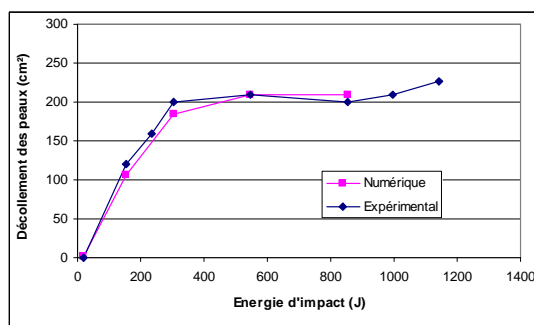


Figure 16 : Surface de décollement de la pale en fonction de l'énergie d'impact

D'une manière générale, la modélisation numérique donne des résultats assez satisfaisants par rapport à l'expérience. Les essais de validation montrent que la stratégie de modélisation utilisée est correcte.

4. Conclusion

De nombreux essais expérimentaux ont été réalisés pour comprendre les phénomènes mis en jeu lors d'un impact frontal d'une pale. A partir des observations effectuées, le mécanisme de ruine a pu être défini. Dans un premier temps, le bord d'attaque est le premier élément qui subit l'endommagement, puis dans un deuxième temps l'augmentation du niveau d'énergie d'impact va entraîner une plastification de la protection inox qui pilote ensuite le décollement peau mousse de la structure. De plus, la pénétration du projectile endommage le roving par fissuration de la résine qui entraîne le glissement des paquets de fibres de part et d'autre de la zone impactée.

Une nouvelle stratégie pour la modélisation de l'impact sur pales est ensuite proposée. Cette stratégie consiste à modéliser le roving par la superposition d'éléments volumiques et d'éléments barres. Les éléments volumiques représentent la résine époxyde, tandis que les éléments barres représentent les paquets de fibres. Le décollement des peaux est modélisé par une couche d'éléments endommageables. Cette nouvelle approche a été validée par les résultats obtenus sur la modélisation de l'impact de la pale à différentes vitesses. Ces résultats sont assez satisfaisants. Le modèle développé permet de bien représenter l'ensemble des ruptures expérimentales, et cela pour des niveaux d'énergie inférieurs à 1000J. Il peut être utilisé industriellement dans la phase de dimensionnement pour modéliser le comportement de la pale à l'impact. Ce modèle ne prend pas en compte le décollement des deux interfaces peau-nervure et peau-roving. Pour gérer ces phénomènes, le développement d'un élément volumique spécifique dédié à la modélisation du délaminage est mis en œuvre dans l'équipe.

5. References

- [1] S. Abrate, «Impact on composite structures ». *Cambridge University Press*, 1998
- [2] Radioss theory manual, Version 4.2, 2001.
- [3] I. Tawk, « Modélisation à l'impact de pales d'hélicoptères », *Thèse de doctorat, Université de Toulouse*, 2009.