



HAL
open science

**Influence sur la tenue mécanique de l'insertion d'une
fonction de protection électromagnétique au sein de
composites à renforts de fibres de verre = Strength
mechanical influence of electromagnetic shield function
embedded in laminated glass composite**

Jean-Christophe Walrick, Matthieu Grésil, Patrick Parneix

► **To cite this version:**

Jean-Christophe Walrick, Matthieu Grésil, Patrick Parneix. Influence sur la tenue mécanique de l'insertion d'une fonction de protection électromagnétique au sein de composites à renforts de fibres de verre = Strength mechanical influence of electromagnetic shield function embedded in laminated glass composite. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00389620

HAL Id: hal-00389620

<https://hal.science/hal-00389620>

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.

Influence sur la tenue mécanique de l'insertion d'une fonction de protection électromagnétique au sein de composites à renforts de fibres de verre

Strength mechanical influence of electromagnetic shield function embedded in laminated glass composite

Jean Christophe Walrick¹, Matthieu Gresil², Patrick Parneix²

1 : ESTACA
53061 Laval Cedex
e-mail : jcwalrick@estaca.fr

2 : DCNS
56311 LORIENT Cedex
e-mail : mgresil@estaca.fr

Résumé

Cette étude concerne l'évaluation de l'influence sur le comportement mécanique de l'insertion d'un tissu métallisé dans un matériau composite. Elle se limite à un matériau constitué de fibre de verre et de matrice vinylester. L'insertion du tissu dans le matériau a pour but d'apporter une protection électromagnétique à la structure. Cette nouvelle technologie est développée pour l'industrie navale. L'efficacité de la protection électromagnétique dépend de la position du tissu métallisé dans le stratifié. Trois configurations différentes sont étudiées. L'étude s'intéresse au comportement en traction, flexion et cisaillement de manière à caractériser au mieux le comportement mécanique. Ce travail présente les résultats expérimentaux, analytiques et numériques de ces différents cas.

Abstract

This study concerns the insertion of a metallic coated fabric in a composite material and its influence on the mechanical behavior. We have just paid attention for a material made of a glass fiber and a vinylester matrix. The aim of the metallic coated fabric's insertion is to bring an electromagnetic protection to the structure. This new technology is developed for the naval industry. The efficiency of the electromagnetic protection depends on the position of the metallic coated fabric in the laminate. three different configurations are focused. Studies interesting the behavior in traction, bending and shear in order to show in the best way the mechanical behavior. The paper presents the experimental, analytical and numerical results of these different studies.

Mots clés : composite – essai mécanique – expérimental – protection électromagnétique – numérique
Keywords: laminate – mechanical test – experimental – electromagnetic shield - numerical

1. Introduction

Les composites à renforts tissés verres et carbone stratifiés sont de plus en plus utilisés dans le domaine des transports, en particulier dans les secteurs aéronautique et naval. Outre des gains en masse non négligeables et des assemblages réduits, leur intérêt peut être porté sur l'intégration de fonctions au sein du stratifié telles que le contrôle santé, des systèmes antennaires, de mesure de déformation et des écrans de protection électromagnétique. Cette dernière fonction de protection revêt actuellement une importance capitale quant à la survie même de la structure [1]. En effet, les composites à matrice organique n'assurent pas une protection efficace face aux champs électromagnétiques, tant pour les équipements électroniques embarqués, que pour l'intégrité de la structure en cas de foudroiement. Des tests réalisés en impact sur des plaques composites ayant montré une destruction significative de ces dernières. Il apparaît donc primordial d'ajouter une fonction de protection électromagnétique à ces structures composites. Cette fonction intégrée directement au sein du stratifié peut se présenter sous forme de grilles ou métal déployé allant jusqu'à des grammages importants en zone sensible (de l'ordre de 200 à 400 g/m²).

Concernant les zones référencées comme étant moins sensibles, on peut utiliser des tissus métallisés de plus faible grammage qui seront directement intégrés dans les plis composites lors de la fabrication de la structure.

L'intégration de telles fonctions ayant une influence sur l'intégrité de la structure en termes de tenue mécanique sous chargement, c'est cette influence que ce travail vise à quantifier.

Diverses campagnes d'essais sous chargements quasi-statiques ont été entreprises et des approches numériques analytique et éléments finis permettent l'interprétation des phénomènes observés. La position de l'écran de protection électromagnétique au sein du composite stratifié étant le paramètre dominant de cette étude.

Cette présentation ne traite que de l'aspect mécanique, mais s'intègre dans un partenariat avec différents acteurs dont la DCNS sur l'intégration de fonctions protection électromagnétique et contrôle santé [2]. L'optimisation de la protection apportée par les matériaux retenus dans cette étude constitue bien évidemment un critère de choix important.

2. Matériaux et configurations retenus

2.1. Le stratifié composite

Les structures étudiées ont été réalisées à la DCNS de Lorient dans le cadre de la thèse de M GRESIL. Les plaques stratifiées de dimensions 600x600 mm² utilisées pour cette étude sont composées de 10 plis de tissus taffetas de verre (500T 500g/m², ensimage P196 ; Chomarat) dans une résine vinylester (DION 9102 ; Reichold).

Ces plaques d'épaisseurs moyennes de 3,8 mm sont obtenues par infusion, procédé compatible avec la réalisation de grandes structures. Le tissu métallisé constituant l'écran de protection étant placé au sein des plis de verre constitutifs directement lors du drapage avant infusion. Une pyrolyse réalisée sur échantillon de plaque ayant permis de trouver un taux volumique de fibre d'environ 60%.

2.2. Tissus métallisé et configurations

Le tissu retenu comme écran est un nylon formé de fibres de Cuivre d'épaisseur 100µm (Flectron ref. 3050-113).

L'efficacité de la protection électromagnétique pouvant dépendre de la position de l'écran dans le stratifié, trois configurations différentes de position de l'écran dans le composite ont été retenues :

- Au plan milieu (référence VFm)
- A trois plis de la peau extérieure (référence VFn-3)
- A un pli de la peau extérieure (référence VFn-1)
- Une configuration composite sans écran inséré servant de référence (référence Vref)

Numéro du pli	Eprouvette Vref	Eprouvette VFm	Eprouvette VFn-3	Eprouvette VFn-1
1	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre
2	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre	Flectron
3	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre
4	Fibre de verre	Fibre de verre	Flectron	Fibre de verre
5	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre
6	Fibre de verre	Flectron	Fibre de verre	Fibre de verre
7	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre
8	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre
9	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre
10	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre	Fibre de verre

Fig. 1. Configurations de stratifiés retenues pour cette étude.

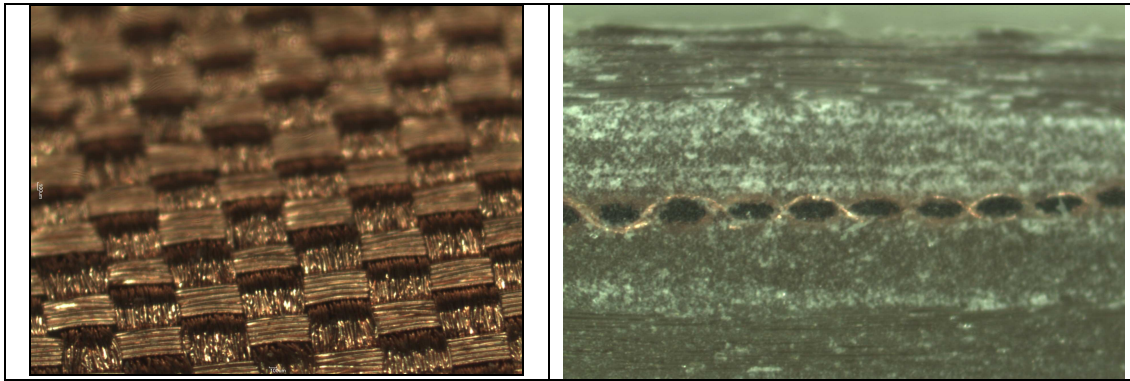


Fig. 2.a. Tissu métallisé servant d'écran. 2.b. Coupe de stratifié avec écran au milieu.

3. Etudes expérimentales

Il s'agit ici de présenter les principaux résultats issus de différentes campagnes d'essais de traction, flexion, réalisées sur les différentes configurations présentées.

3.1. Sollicitation en traction

3.1.1. Essais menés sur tissus métallisés servant d'écran de protection

Les premières campagnes d'essais ont eu pour objet la caractérisation des matériaux et en particulier des tissus métallisés afin d'alimenter de futurs modèles numériques. Des essais de traction sur bandes de tissus ont été réalisés afin de quantifier une résistance en rupture et raideur en traction. Différentes bandes ont été testées en traction par enroulements en empilements multiples autour de chapes de maintien en raison de la faible épaisseur du tissu. En raison des risques importants de glissement de ce tissu souple autour des chapes de nombreux essais ont été effectués avec des empilements différents. Le traitement des données a permis d'extraire un comportement assez linéaire et répétitif (Fig. 3). Les courbes permettent de déterminer une valeur moyenne de module de 879 Mpa (avec un écart type de 10 Mpa) et une contrainte franche en rupture du tissu de 145 Mpa (écart type de 8 Mpa).

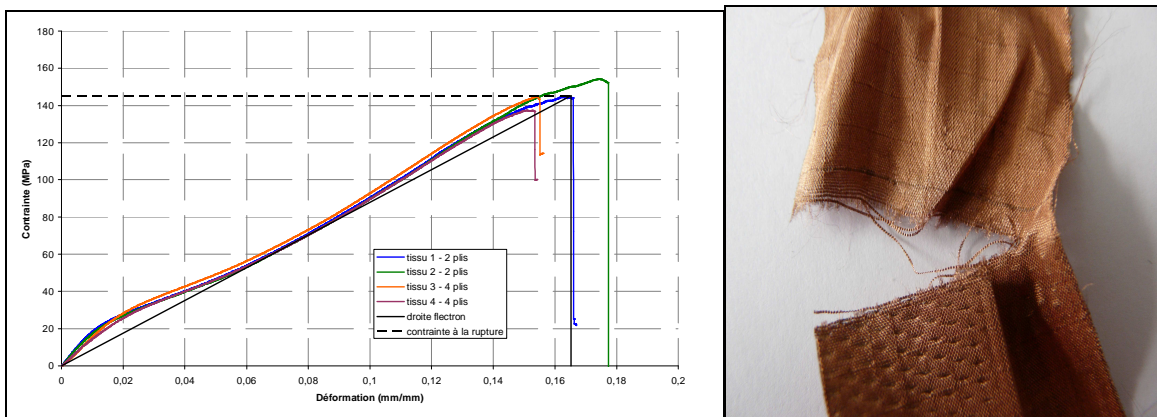


Fig. 3a. Courbes génériques des essais sur tissus Flectron 3.b. rupture de tissus.

3.1.2. Essais de traction menés sur stratifiés sans et avec écrans

Cette campagne permet de déterminer les caractéristiques mécaniques courantes des matériaux par des essais sur éprouvettes de traction talonnées découpées dans les plaques. Ces éprouvettes instrumentées de jauges de déformation collées en zone utile sont soumises à traction à 2 mm/min selon norme Iso 527-4.

Le composite étant constitué de plis tissés équilibrés il a été vérifié que le comportement du matériau été le même dans les axes chaîne et trame.

Le module d'Young en petite déformation et défini via le segment linéaire des courbes contrainte-déformation pour les matériaux sans présence d'écran (référence) et ceux équipés d'écrans.

Les modules moyens et leurs écarts types ne montrent pas une différence significative entre les différentes configurations avec une valeur de module voisin de 25000 Mpa (Fig. 4)

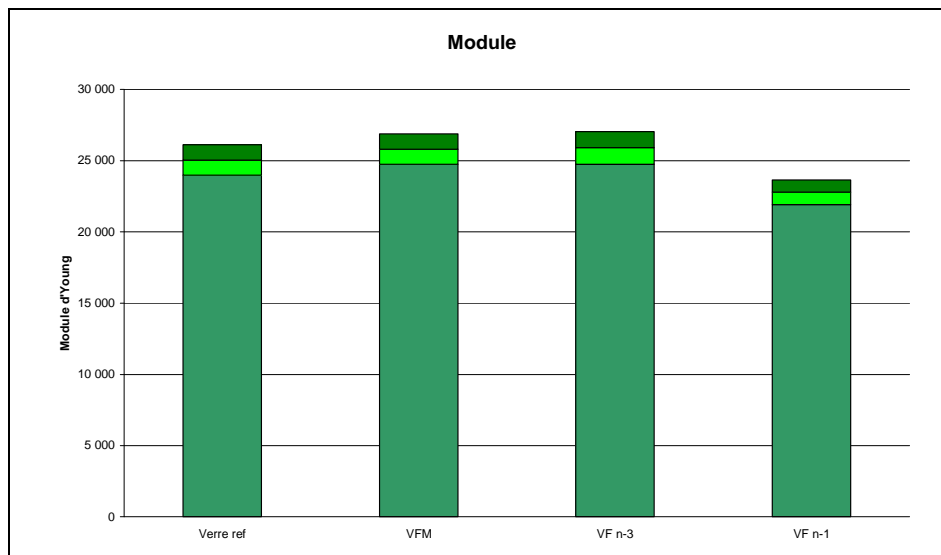


Fig. 4. Modules d'Young en traction via les essais.

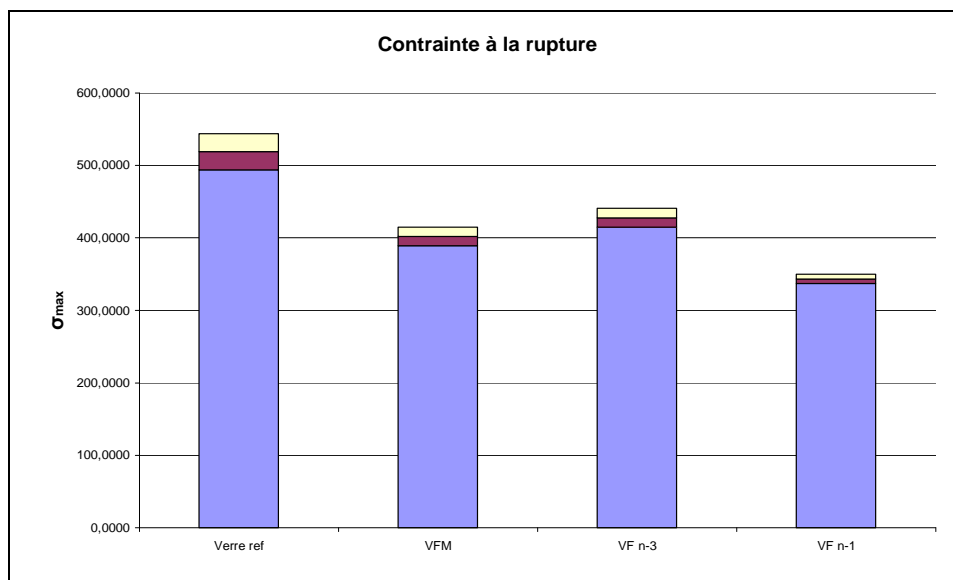


Fig. 5. Contraintes admissibles en traction.

Concernant la rupture, celle-ci intervient de façon brutale. Dans le cas de la présence d'un écran dans le stratifié, cette rupture est répartie le long de l'éprouvette au niveau de l'interface du pli métallisé au regard des autres plis. Ceci peut être justifié par la variation des champs de contraintes dans l'épaisseur au voisinage de l'interface en raison des variations de propriétés mécaniques. Ce gradient en contrainte à l'interface engendrant une rupture étendue et prématurée (Fig.6) au regard des éprouvettes sans écran. Ceci se traduit par une réduction de 10 à 15 % de la contrainte admissible.



Fig. 6. Faciès de rupture d'une éprouvette de traction avec écran au milieu.

3.2. Tenue mécanique aux chargements en flexion

Les résultats des essais de traction ont mis en évidence l'influence de l'insertion de la protection par une rupture anticipée au niveau de l'interface. Il faut donc compléter la caractérisation par un chargement favorisant de forts gradients des champs de déformations et contraintes dans l'épaisseur du stratifié. Pour

cela des essais en flexion sur éprouvettes de type poutres ont été réalisés. Deux types de configurations ont été testées : la flexion de type trois points sur poutres courtes favorisant le cisaillement inter laminaire et sur poutres longues favorisant les champs de contraintes en traction-compression dans l'épaisseur.

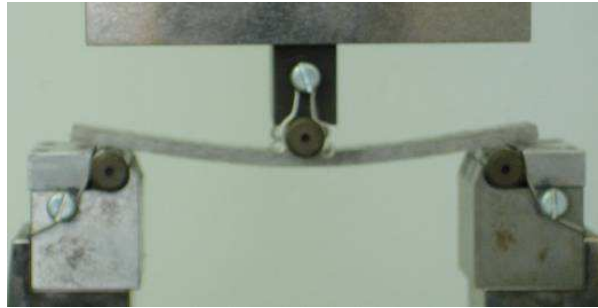


Fig. 7. Configuration retenue pour des essais de flexion trois points.

3.2.1. Essai en flexion poutres courtes

L'objectif de cet essai est de caractériser la résistance au cisaillement inter-laminaire des différentes configurations précédentes. La contrainte de cisaillement est engendrée par un outil exerçant un effort tranchant linéaire transverse en milieu de la poutre avec des appuis rapprochés.

La contrainte de cisaillement inter laminaire maximale peut être estimée via la relation suivante :

$$\tau_{13} = 3F / (4bh) \quad (\text{eq. 1})$$

b et h étant respectivement la largeur et l'épaisseur de la poutre.

Des essais ont été réalisés sur les différentes configurations, avec pour les stratifiés non-symétriques VF n-1 et VF n-3 la nécessité d'effectuer une distinction entre la configuration avec l'écran orienté en partie supérieure proche de la zone de chargement (au dessus) ou à l'inverse en retournant l'éprouvette l'écran orienté en partie inférieure (au dessous). Ainsi pour ces configurations de stratifié avec protection non symétrique, le chargement engendrant un gradient dans l'épaisseur, des effets dus à la localisation de l'endommagement pouvait amener des comportements différents selon cette orientation.

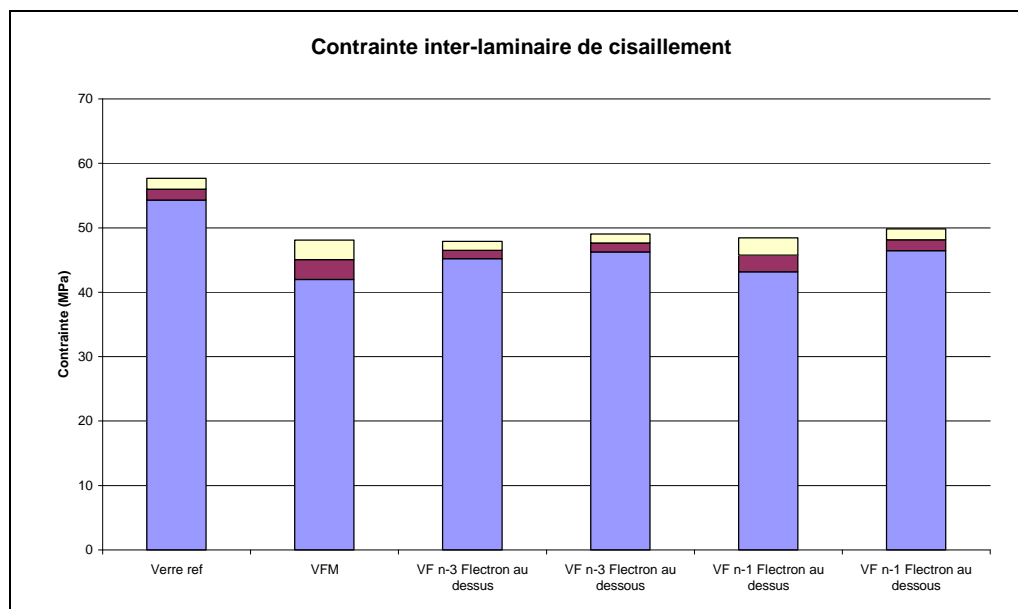


Fig. 7. Comparaison des niveaux de contraintes de cisaillement déterminés.

La comparaison des niveaux de contraintes montre que la présence de l'écran dégrade la tenue au cisaillement inter laminaire (environ de 15%). Il est cependant difficile de différencier les configurations équipées d'écran. Un examen post-mortem des éprouvettes à été effectué en microscopie optique pour identifier les modes de rupture. Dans la plupart des cas la zone endommagée ne reste pas confinée à proximité des interfaces de l'écran. Ainsi les modes de rupture les plus souvent observés sont la rupture dans la partie en traction avec cisaillement inter laminaire ou rupture en compression (Fig 8).



Fig. 8. Zone d'endommagement pour VF n-3 au dessus.

3.2.2. Essais de flexion poutre longue

Ces essais produisent un gradient de contrainte en traction et compression dans l'épaisseur du matériau. Les dimensions des éprouvettes ont été déterminées en accord avec la norme ISO14125. Ainsi il faut respecter un ratio longueur entre appuis sur épaisseur qui soit suffisamment important (supérieur à 16) pour favoriser les effets en traction – compression face au cisaillement.

Le module de flexion a été calculé sur la partie linéaire grâce à la relation standard liant ce module au moment de flexion, déplacement et caractéristiques de la poutre :

$$E = \frac{M}{6 \times V \times I} \times \left(\frac{l}{2}\right)^2 \quad \text{Avec} \quad \begin{array}{l} M : \text{le moment} \\ L : \text{la portée inter-appuis} \\ V : \text{le déplacement} \\ I : \text{l'inertie de la poutre} \end{array} \quad (\text{eq. 2})$$

Avec les expressions :

$$M = F \times \left(\frac{l}{2}\right) \quad I = \left(\frac{1}{12}\right) b h^3 \quad (\text{eq. 3})$$

Ce qui donne au finale :

$$E = 2 \times \frac{F}{V \times b \times h^3} \times \left(\frac{l}{2}\right)^3 \quad \text{Avec} \quad \begin{array}{l} b = 15 \text{ mm} \\ h = 3,9 \text{ mm} \\ l = 80 \text{ mm} \end{array} \quad (\text{eq. 4})$$

Le comportement en terme d'évolution en charge – déplacement est de type linéaire avec une rupture brutale. Le module ayant été déterminé pour la partie linéaire.

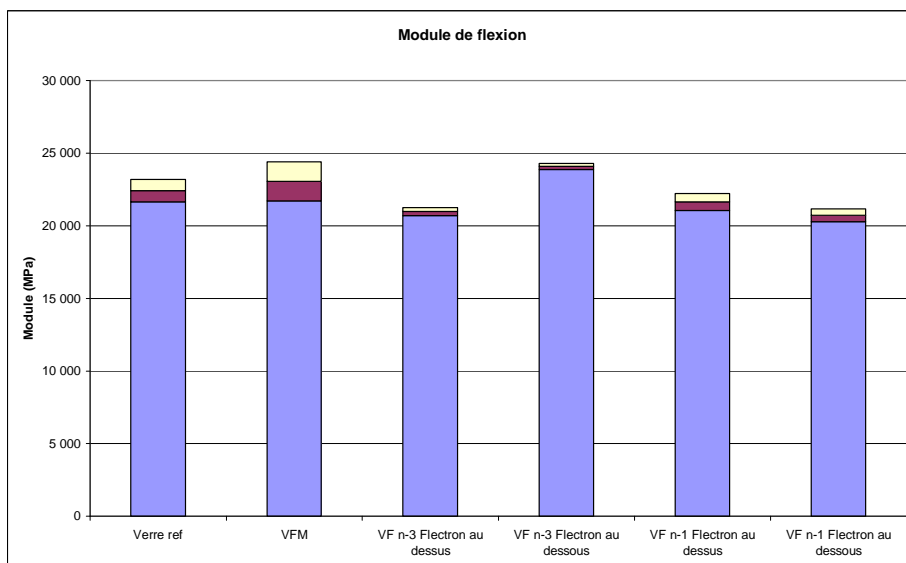


Fig. 9. Comparaison des modules de flexion pour les différentes configurations.

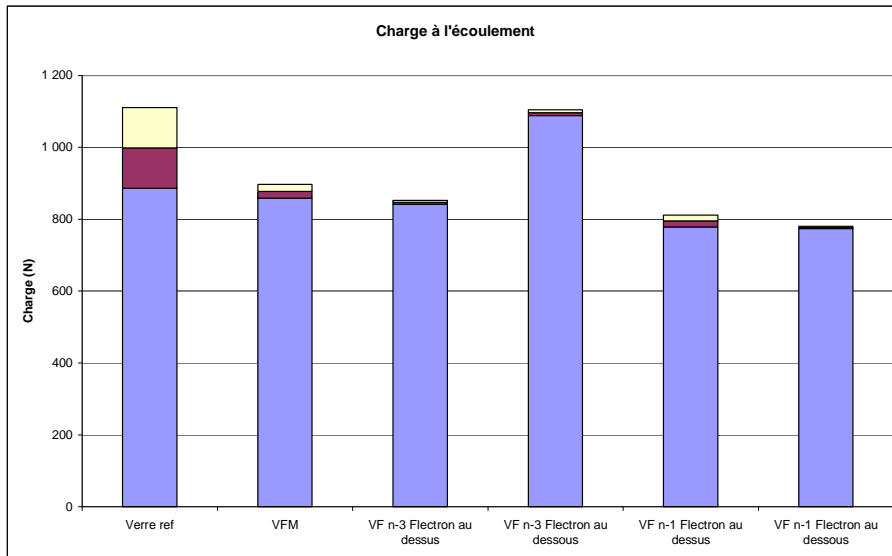


Fig. 10. Comparaison des charges admissibles associées

La figure 9 présente une influence relativement faible de l'insertion de l'écran sur le module linéaire de la structure tout comme pour les résultats du chargement en traction (Fig. 4). En effet le pli de tissu étant de faible épaisseur au regard des plis composites il n'a que peu d'influence sur la raideur élastique du matériau. Une dispersion un peu plus importante est cependant observée autour de la valeur moyenne du module du matériau de référence.

Tous comme pour les essais précédents, la différence intervient essentiellement pour la charge en rupture qui se trouve notablement affaiblie pour certaines configurations avec une baisse pouvant atteindre plus de 20% par rapport au verre ref. Ce sont les configurations avec l'écran proche des plis externe VF n-1 qui affichent la plus grande perte de performance. Ceci s'expliquant par le fait que les plis les plus éloignés de la fibre neutre sont les plus sollicités en termes de contraintes de compression (écran au dessus) ou traction (écran au dessous).

Un examen optique post-mortem des éprouvettes permettant d'identifier les mécanismes d'endommagement et leur propagation.

VFm : En règle générale, un plus grand endommagement dans la partie des éprouvettes travaillant en traction (inférieure) est observé, sans décohésion systématique à l'interface écran-verre.

VF n-3 : La rupture s'initie dans la partie en traction. Si l'écran est en partie supérieur, l'endommagement se propage alors en partie inférieure dans les plis de verre. Si l'écran est au dessous, on observe une rupture complète de la partie inférieure sans endommagement de la partie supérieure (Fig. 11), ce qui peut expliquer une rigidité maintenue de l'éprouvette.

VF n-1 : La rupture à lieu en traction des fibres de verre, même si l'écran est en dessous, après rupture du pli inférieur unique l'endommagement se propage en partie supérieure du matériau (Fig. 12) contrairement à la configuration VF n-3 se qui engendre la chute plus significative de la résistance.

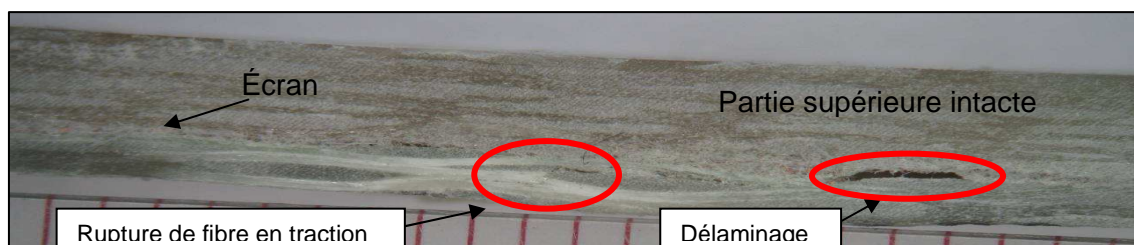


Fig. 11. Répartition de l'endommagement sur configuration VF n-3 au dessous.

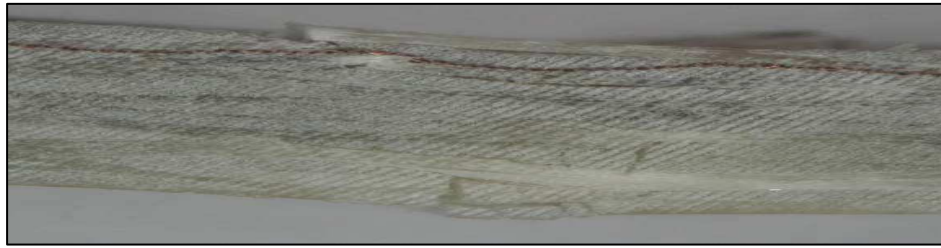


Fig. 12. Rupture en traction propagée dans la partie inférieure pour VF n-1

4. Corrélation avec des modèles numériques

Dans le but de valider l'influence des champs de contraintes-déformations sur l'affaiblissement relatif des configurations instrumentées une étude numérique à été réalisée afin de pouvoir estimer la répartition des champs dans les différents plis. Le but étant de pouvoir quantifier ces niveaux et de retrouver des discontinuités de contraintes dans l'épaisseur à l'interface de l'écran. Cette étude s'est décomposée en une partie analytique, basée sur la théorie classique des stratifiés [3] et une modélisation par éléments finis des essais de flexion afin de valider les niveaux d'endommagement déterminés.

Afin d'alimenter ce modèle numérique les données matériaux relatives aux constituants fibres et matrice ont été utilisées via les données fournisseur. Il a alors été possible par la loi des mélanges de déterminer les propriétés d'un pli de verre (Tab. 1), ainsi que du pli Flectron - écran via les données issues des essais de traction. A partir des caractéristiques d'un pli verre tissés considéré comme un pli orthotrope équilibré et connaissant les empilements et épaisseurs respectives des plis, il a été possible de remonter à la matrice de raideur du stratifié.

Utilisant le chargement appliqué sur la structure comme donnée d'entrée il est possible d'avoir une estimation dans le domaine linéaire des champs de contraintes et déformations et de revenir ainsi à une estimation du comportement global des différentes configurations.

Module d'Young longitudinal équivalent du pli	E_{l_pli}	26040 Mpa
Module d'Young transversal équivalent du pli	E_{t_pli}	26040 Mpa
Module d'Young transversal équivalent du pli	G_{lt_pli}	4895,10 Mpa
Coefficient de poisson équivalent du pli	ν_{lt_pli}	0,16

Tab. 1. Caractéristiques d'un pli de verre obtenue par la loi des mélanges.

Un critère de rupture en contraintes de type Tsai-Wu à également été utilisé afin d'établir un niveau global de rupture.

$$\left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}\right) \cdot \sigma_L + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right) \cdot \sigma_T + \frac{\sigma_L^2}{X_t \cdot X_c} + \frac{\sigma_T^2}{Y_t \cdot Y_c} + \frac{\sigma_{LT}^2}{S_{LT}^2} - \frac{\sigma_L \cdot \sigma_T}{X_t \cdot X_c} \leq 1 \quad (\text{eq. 4})$$

Les contraintes critiques X_t , X_c , Y_t , Y_c et S_{lt} respectivement contraintes admissibles longitudinales en traction, compression, transversales et en cisaillement sont ici déterminées via les essais de traction et flexion et compression (ces derniers n'étant pas présentés ici).

X_t	430 Mpa
X_c	168 Mpa
Y_t	449 Mpa
Y_c	177 Mpa
S_{lt}	50 Mpa

Tab. 2. contraintes admissibles.

Une première validation a été effectuée en calculant via ce modèle analytique le module d'Young pour les différentes configurations (Tab. 3). Il a ainsi été possible de retrouver une valeur conforme à celle obtenue via les essais de traction et surtout de s'assurer que ce modèle pouvait rendre compte de la différence due à l'insertion de l'écran.

Verre	Verre + Electron milieu	Verre + Electron n-3	Verre + Electron n-1
26040 MPa	25386 MPa	25378 MPa	25354 MPa

Tab. 3. Modules déterminés par calcul analytique.

Des résultats d'estimation du comportement global en déformation ramenés à l'expression de la flèche en flexion poutre longue sont ici présentés (Fig. 13) et comparés aux résultats expérimentaux ainsi qu'à une simulation d'un modèle éléments finis. Ce dernier a été réalisé à l'aide d'éléments coques de type multicouche intégrant les propriétés du stratifié dans un calcul statique linéaire à l'aide du code Nastran.

La figure 13 reporte les niveaux de flèches atteints pour les modèles numériques comparés aux valeurs expérimentales pour chaque configuration.

Les valeurs de flèches sont très proches confirmant la bonne cohérence entre les différentes approches. Les valeurs de flèches numériques et expérimentales en VF n-1 et VF n-3 sont ici les moyennes des valeurs obtenues suivant la position de l'écran.

Les modèles numériques étant linéaires avec un critère de rupture en contrainte, les écarts de niveaux atteints peuvent en partie s'expliquer par la non prise en compte des non-linéarités, en particulier l'endommagement intervenant au sein des plis. Cependant ce premier modèle analytique en phase avec la simulation éléments finis permet de quantifier les différents gradients de contraintes au sein du matériau et en particulier les discontinuités de champs au voisinage de la zone des tissus métallisés (Fig. 14).

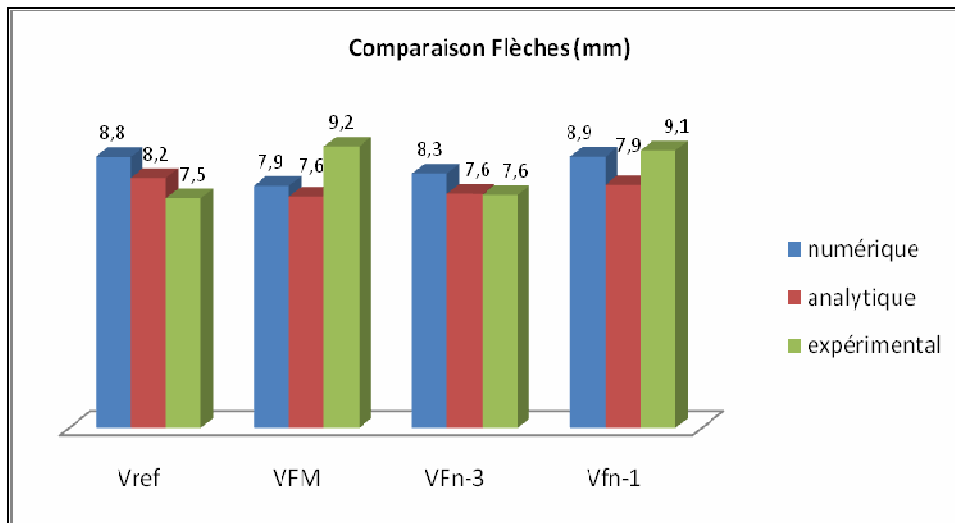


Fig. 13. Comparaison calcul-expérimental de la valeur de flèche en flexion poutre longue.

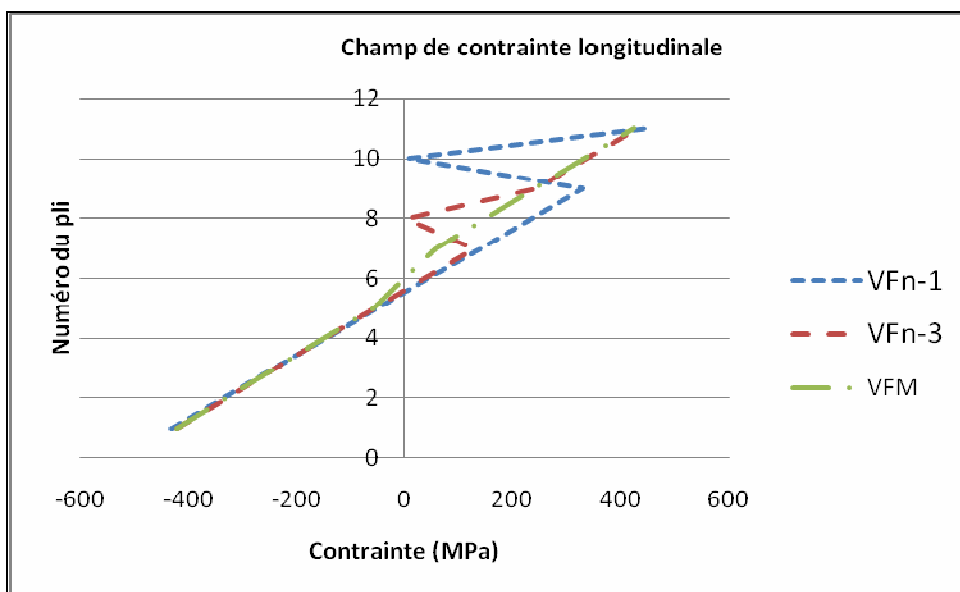


Fig. 14. Répartition des contraintes normales calculées dans l'épaisseur.

5. Conclusion

Ce travail constitue une amorce d'étude qu'en aux effets sur la tenue mécanique de l'intégration de fonctions dans les composites. En effet les structures composites tendent de plus en plus à intégrer différentes fonctions parmi lesquelles la protection aux champs électromagnétique a une importance capitale. De nombreuses études visent à optimiser ces protections en efficacité de blindage, en masse pour ne pas perdre les avantages du composite. Cette optimisation implique également un choix qu'en au positionnement du blindage au sein du stratifié. Il apparaît vital de s'intéresser aux effets mécaniques qui découlent de ces choix.

Les résultats présentés dans le cadre d'essais de chargements mécaniques quasi-statique montrent une influence non négligeable pouvant atteindre 20% de réduction qu'en à la tenue en flexion. Des modèles analytiques linéaires ont permis de confirmer l'influence des gradients de contraintes provoqués par l'insertion d'écran et de retrouver une différenciation de comportement pour les configurations étudiées.

Des études complémentaires sont en cours concernant les chargements en compression et tenue post-impact. En effet cette influence mécanique peut s'avérer plus critique concernant les sollicitations dynamiques et en particulier face aux effets de tenue à l'endommagement lors d'impacts basse énergie. Ainsi la question est de savoir si l'écran intégré ne risque pas de servir d'amorçage à l'endommagement après l'impact de corps de faibles masses (grêles, chute d'outil lors de maintenance, ..) et de quantifier la résistance post-impact par des essais de compression.

Concernant l'approche numérique des modèles éléments finis sont en cours de réalisation intégrant sous forme de coques épaisses la stratification avec prise en compte de la cinématique de chaque pli dans l'épaisseur notamment pour étude des décohésions et de flambage localisés. Ces simulations intègrent également des lois d'endommagement non linéaires dont les paramètres seront identifiés par les essais réalisés.

Références

- [1] A. Abu Obaid, S. Yarlagadda, "Structural performance of the glass fiber-vinyl ester composites with interlaminar copper inserts" *Composites PartA: applied science and manufacturing*, Vol 39, pp 195 – 203, 2008
- [2] M. Gresil, P. Parniex, J.L. Boulay, C. Cheype, J.C. Walrick, B. Lascoup, D. Placko, M. Lemistre " Mechanical effect and shielding effectiveness of the insertion of metallice scren in glass and carbon composite" ECCM13 (juin 2008) 13^{ème} conférence européenne sur les matériaux composites à Stockholm (Suède)
- [3] J.M. Berthelot "Comportement mécanique et analyse des structures » Lavoisier, 4^{ème} édition, 2005