

LE GREEMENT DU FINN

ANALYSES TECHNIQUES - article 2

AVANT PROPOS

Dans un premier article, nous vous avons proposé une analyse du comportement du mat d'un FINN et présenté une méthode de caractérisation complète, permettant de définir au mieux ses caractéristiques mécaniques :

ARTICLE 1 : Les mats de FINN

- caractéristiques et comportement (en adéquation avec une voile)
- une méthode de caractérisation statique complète « mat à la bordelaise »
- analyse des résultats et exemples de comparaison

Nous vous proposons maintenant de regarder comment se comporte un mat placé dans sa situation normale de fonctionnement et au-delà, soumis à des sollicitations mécaniques extrêmes (fausses manœuvres, vent et mer violents, chavirage, ...)

Au travers d'un rapide tour d'horizon sur les différents types de gréements on montrera que chaque configuration se traduit par des états de contraintes et déformations différents et donc justifie un dimensionnement spécifique de tous les constituants (mat, gréement dormant, précontrainte initiale, ...).

Nous en arriverons aux différents modes de rupture et regarderons de plus près le comportement de notre mat de FINN.

Nous illustrerons ces propos et présenterons quelques exemples vécus ... (!!!)

ARTICLE 2 : Comportement mécanique d'un mat

- les différents types de gréement
- les sollicitations mécaniques d'un mat (statiques et dynamiques)
- les modes de rupture
- application à un mat de finn

NB1: cet article n'a pas pour vocation de remplacer un cours de calcul de structure, mais de répondre simplement aux questions que chacun d'entre nous peut être amené à se poser. Il est toujours difficile de concilier rigueur scientifique et simplification des exposés. Que les spécialistes acceptent les quelques approximations qu'ils ne manqueront pas de déceler !!!

NB2: les deux premiers points seront évoqués mais pas détaillés. Nous nous attacherons à développer les sujets qui nous concernent de près : les modes de rupture (par flambement) et l'application à un mat de FINN, exemples à l'appui.

LE GREEMENT DU FINN

ANALYSES TECHNIQUES - article 2

Contrairement aux mats haubanés, on peut considérer que les mats de FINN, non haubanés, travaillent uniquement en flexion : les contraintes de compression axiale sont faibles en regard de celles engendrées par la sollicitation en flexion.

En longi, celle-ci est induite en premier lieu par la tension de chute, puis, au fur et à mesure que le cintre du mat absorbe le rond de guindant, par la tension du tissu de la voile (*).

En latéral, ce sont les efforts aérodynamique transmis au mat par la voile (proportionnels au poids du barreur et à l'efficacité de son rappel qui équilibrent la poussée du vent ... auxquels s'ajoutent des surcharges dynamiques : survente, choc dans les vagues, coup de rein, ...).

En partie basse, s'ajoutent au moment de flexion l'effort tranchant du à la poussée de la bôme, et la réaction à l'encastrement au niveau de l'étambrai (*).

(*) pour ces derniers aspects, se référer à l'article 1

Les sollicitations ne posent aucun problème vis-à-vis des modes de flambement global (*) du mat. Par contre, la conception et le dimensionnement de la paroi doit prendre en compte de façon très sérieuse le risque de flambement local (*) des zones en compression dans toutes les sections et, à un degré moindre, la tenue en traction et cisaillement en partie basse.

(*) Ces points sont développés planches 3-4-5

Le mat peut être considéré comme une poutre encastree, travaillant essentiellement en flexion. La raideur en flexion de la poutre est directement proportionnelle au produit EI (variable suivant la section considérée car le profil n'est pas constant):

- E est le module d'Young, qui est une caractéristique propre au matériau (sa rigidité intrinsèque dans la direction considérée)
- I est l'inertie de la section (dans la direction considérée) (sa valeur est d'autant plus grande que la section droite est importante et la paroi épaisse)

De là, on comprend bien : plus le profil est gros, plus la paroi est épaisse, plus le matériau est rigide plus le mat sera raide.

Le problème de conception de nos mats de FINN est alors le suivant :

- on souhaite une certaine « raideur » (ou « souplesse », ... ça traduit la même caractéristique)
- la jauge impose des section avec des côtes extérieures minimales
- on veut être au mini de la jauge en terme de masse
- on veut le profil qui est dans la jauge mais avec la trainée minimale

Le composite carbone/époxy, qui est un matériau très performant (trop même!) en terme de rapport raideur/poids, et trouver le compromis entre ces quatre paramètres pour déterminer la bonne valeur du produit EI n'est pas une tâche facile !

Au vu du résultat, deux constatations se dégagent :

- les profils dans le dernier tiers en partie haute sont très « plats »
- les épaisseurs de parois sont relativement faibles, surtout dans cette zone

(voir planches 1-2-3-4 : coupe d'un mat à environ 800 mm de la tête)

LE GREEMENT DU FINN

ANALYSES TECHNIQUES - article 2

Tout d'abord, avant d'aller plus loin, quelques rappels sur :

[structure en matériau composite « haute performance » : définitions et conception](#)

Matériau « isotrope » matériau « orthotrope »

Sous ces termes barbares, on traduit la façon avec laquelle la matière constitutive du matériau est organisée.

Prenons de l'acier ou de l'aluminium (*) ou une matière plastique comme un bloc de PVC par exemple. En l'observant sur des coupes réalisées dans différents plans, on constate le même faciès. Le matériau est homogène, on ne met pas en évidence des directions privilégiées.

Un matériau de ce type possède des caractéristiques mécaniques identiques dans toutes les directions. Il est dit « isotrope »

Prenons maintenant un morceau de bois, une planche en contre-plaqué, un morceau de mat en lamellé collé (comme nos anciens Bruder), et maintenant un bout de mat HIT ou WILKE ... On constate la présence de plusieurs constituants, des fibres engluées dans de la matière de remplissage (la matrice) et que tantôt on coupe ces fibres, tantôt on les longe, ... On comprend bien que suivant l'agencement de ces fibres et la direction dans laquelle on sollicitera le matériau, les caractéristiques mécaniques vont être différentes.

Un matériau de ce type possède des caractéristiques mécaniques différentes suivant les directions. Il est dit « orthotrope ».

Principes de conception d'une structure composite soumise à des sollicitation mécanique

L'idée est simple: prenons une poutre par exemple. Si on peut identifier des directions selon lesquelles la structure va être préférentiellement sollicitée, il va falloir mettre plus de matière pour tenir sans casser dans cette direction ... ou mettre un matériau plus résistant.

Avec un matériau isotrope, voulant tenir dans une direction, on se pénalise en masse inutile dans les autres directions moins sollicitées. Ça tient, mais c'est lourd et mal optimisé.

Avec une conception en matériau composite, orthotrope donc, composé de fibres tenues entre elles par une matrice de résine, on va chercher à orienter les fibres dans la direction des contraintes les plus fortes : si par exemple les sollicitations en torsion sont prépondérantes, on va faire une structure tubulaire composée surtout de fibres à +ou- 45°, si ce sont plutôt des sollicitations de flexion que nous avons à tenir, alors nous mettrons surtout des fibres dans le sens de la longueur, à 0°.

Mais bien sûr, cette vision est un peu caricaturale et doit être modulée par d'autres considérations afin de prendre en compte la totalité de problèmes qui se posent. Le résultat est l'aboutissement d'un travail d'optimisation de la conception qui nécessite compétence et moyens de calculs adaptés.

D'autre part, pour toute pièce soumise à des contraintes et dont le dimensionnement est très optimisée, la maîtrise des techniques de réalisation est un facteur essentiel de réussite. C'est précisément cette dernière phase, la fabrication, délicate et qui nécessite une très grande rigueur, qui conditionne le comportement du produit mis en situation d'utilisation ...

C'est pour donc pour deux raisons, validation des calculs et validation de la technologie de fabrication, que la démarche est souvent complétée par des essais globaux (en vrai grandeur) ou partiels (sur éprouvettes).

On le conçoit, toute cette aventure coûte fort cher ...alors tenter des impasses en cours de route, sauter des étapes, ne pas respecter strictement la procédure de fabrication ... peuvent, à son insu, conduire l'utilisateur à une cruelle constatation ... celle de devenir l'opérateur du banc d'essai d'un produit mal conçu ou réalisé avec approximation.

MODES DE RUPTURE PAR FLAMBEMENT

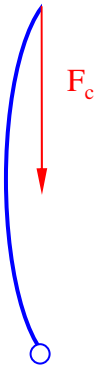
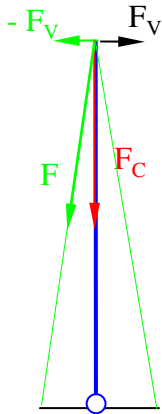
Les différents cas de figure
Les règles de conception

(planches 5-6-7)

Exemples de résultats de calculs
Exemples de cas de ruptures

(planches 8 à 17)

Le flambement (cas général)



mat haubané (cas simplifié) :

F_v est la résultante des forces de poussée dues au vent.

Le mat tient debout grâce à la tension F du hauban qui se décompose en $-F_v$ qui équilibre F_v , et F_c qui met le mat en compression.

F_c peut atteindre des valeurs très élevées (sur Aquitaine Innovation, avec pourtant un plan de haubanage très ouvert, on dépasse 20 tonnes !)

Exemples 1-2

Le flambement :

Si l'effort de compression dépasse une valeur dite « critique », le mat fait comme la canne de Charlot quand il s'appuie dessus ... : sa déformation n'est plus un simple tassement du à la compression selon son axe, mais sa géométrie est fortement déstabilisée latéralement. On dit qu'il « flambe ». A partir de cet instant, un infime accroissement de la force provoque une amplification du phénomène qui aboutit irrémédiablement à la ruine ...

En mécanique des structures, on appelle ce phénomène le « flambement d'Euler ».

Exemples 1-2

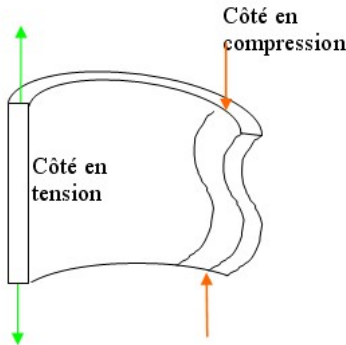
moyens d'y remédier :

- diminuer F en ouvrant plus largement le plan de haubanage (grandes barres de flèches)
- étayer plus efficacement le mat (diminuer la longueur des panneaux en mettant plusieurs étages de hauban, des guignols, ...)
- augmenter la section droite du mat
- augmenter l'épaisseur de la paroi du mat

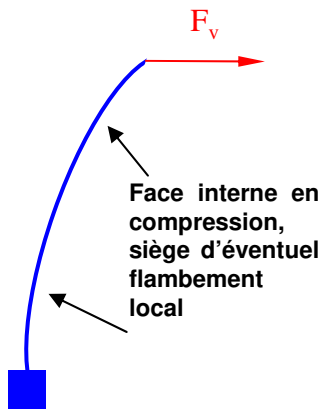
(ces deux derniers points reviennent à augmenter le « moment d'inertie » de la section)

- utiliser un matériau plus raide (module d'Young E plus élevé)

Le flambement local



Exemple : élément de paroi d'une poutre soumise à flexion



C'est ce qui peut se passer sur la face sous le vent d'un mat de FINN (ou lors d'un dessalage « mat planté dans la vase »)

Ce phénomène se produit localement dans les **zones comprimées des structures à parois minces** (plaques ou structures creuses). Il est de même nature que le flambement d'Euler, mais au lieu d'affecter globalement une structure de type « poutre » dans son ensemble, il affecte **localement la paroi**.

Pour bien comprendre, isolons une petite tranche de cette paroi soumise à un effort de compression. Cette petite structure se comporte comme la poutre soumise à un effort de compression de l'exemple précédent.:

Si sa géométrie locale et sa résistance propre ne sont pas suffisantes, il va y avoir flambement local : la paroi s'effondre localement sur elle-même.

Exemples calcul 2-3-4

Exemples :

- Bouteille d'eau minérale ou boîte de conserve que l'on écrase (suivant le grand axe)
- Réservoir soumis à une pression extérieure
- Tube qu'on essaye de cintrer et qui se collapse vers l'intérieur
- Face comprimée d'un mat soumis à des efforts de flexion : mat de FINN par exemple

Exemples calcul 2-3-4
planches 1 à 8

Moyens d'y remédier:

- Éviter les zones planes ou à faible rayon de courbure
- Augmenter l'épaisseur de paroi (ça a également pour effet de diminuer les contraintes de compression)
- « étayer » la paroi par des nervures
- Adopter une technologie « tri-couche »

(ces solutions reviennent à augmenter le « moment d'inertie » local de la paroi)

- Utiliser un matériau plus raide (module d'Young E plus élevé)

Le micro-flambement

On descend un cran de plus dans l'échelle du macroscopique:

- Flambement global: instabilité globale de la structure
- Flambement local: effondrement des zones comprimées d'une paroi peu épaisse
- Micro flambement :

Considérons maintenant la structure interne d'un matériau composite

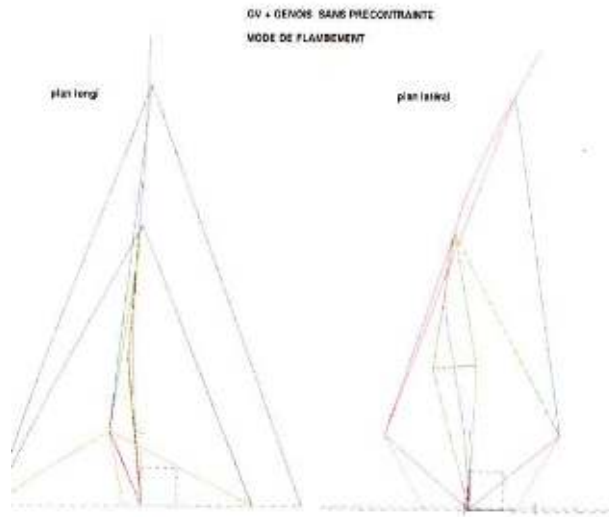
Les fibres (ou les feuilles) sont structurées entre elles par de la résine. Ce sont les fibres, beaucoup plus raides, qui encaissent les efforts. La résine assure la liaison des fibres entre elles, donc la cohésion d'ensemble. Dans le cas d'une structure soumise à de la compression, cette résine peut être le siège d'efforts de cisaillement importants (et de traction dans le sens perpendiculaire aux fibres). Or sa résistance à ces sollicitations est faible ... il peut alors y avoir rupture de la résine ou décollement local entre les couches de fibres. Les fibres n'étant plus tenues, plus structurées entre elles, vont se comporter de façon individuelles: sous l'effort. Elles vont fléchir sur elles-mêmes : c'est le micro-flambement

Voir planches 1 à 8

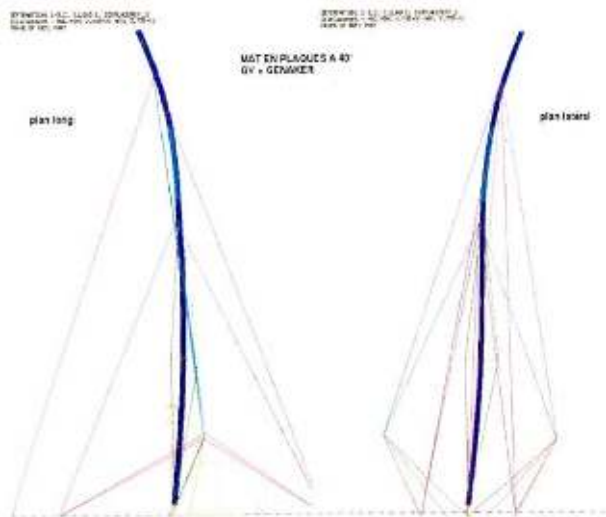
Dans le cas de structures composites à parois minces soumises à des efforts de compression conduisant à la rupture, il est souvent difficile de se prononcer entre « flambement local » et micro-flambement ». Dans la plupart des cas, le mode de ruine précurseur va entraîner l'autre. A l'expertise, on constate toujours un phénomène de délaminage (rupture de la résine entre les tissus ou les nappes de fibres).

moyens d'y remédier :

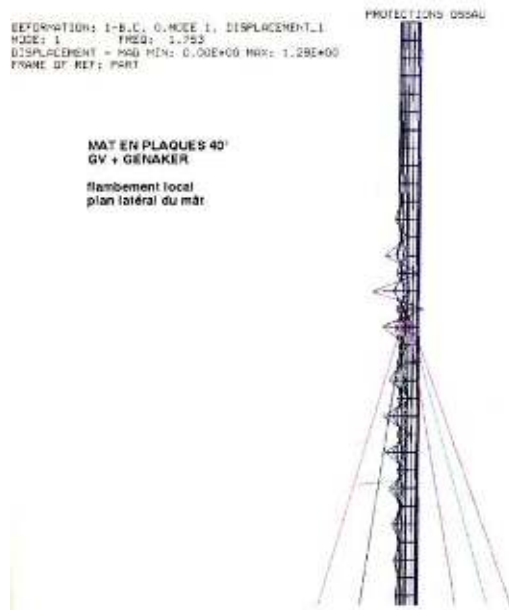
- Utiliser des résines performantes
- Diminuer les contraintes de compression (augmenter l'épaisseur de la paroi)
- «étayer» la paroi par des nervures normales aux efforts de compression
- Réaliser un plan de drapage «équilibré» (symétrie des orientations des nappes de fibres par rapport au milieu de la paroi)
- Stabiliser le comportement des fibres qui travaillent en compression par des couches externes et internes orientées à 90° ou à $\pm 45^\circ$ (notion de "cerclage")



Exemple 1 mode de flambement global sous l'effet des efforts de compression (Aquitaine Innovation)



Exemple 2 déformée sous l'effet des efforts de compression axiale et de la flexion engendrée par le génaker gréé en tête (Aquitaine Innovation)

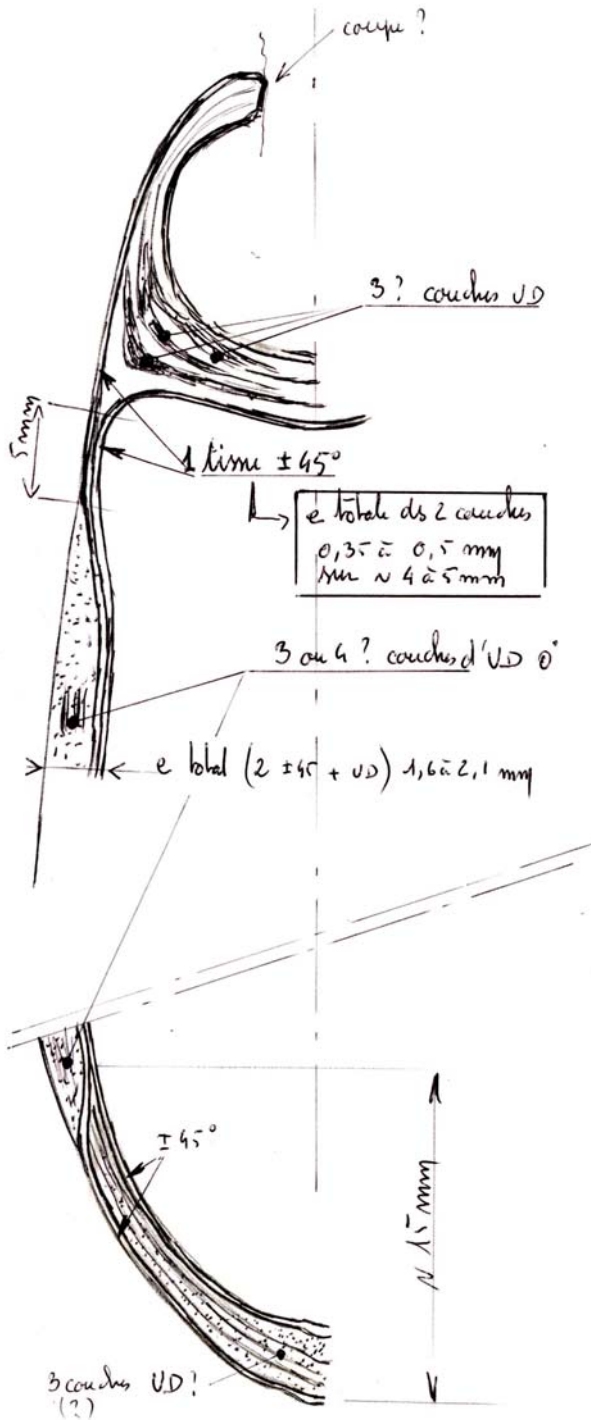


Exemple 3 effet de loupe sur le cas précédent: apparition de flambement local sur le flanc latéral en compression (capelage étau et galhaubans) (Aquitaine Innovation)



Exemple 4 idem en vue de dessus : effet de loupe sur le cas précédent: apparition de flambement local sur le flanc latéral en compression (capelage étau et galhaubans) (Aquitaine Innovation)

Rupture et flambement local et délaminage sur Mat HIT 631 (planches 1 à 4)



Coupe du mat à 800 mm de la tête
 d'après expertise macro et micro
 photographique
 (voir planches 2-3-4)

Planche 1

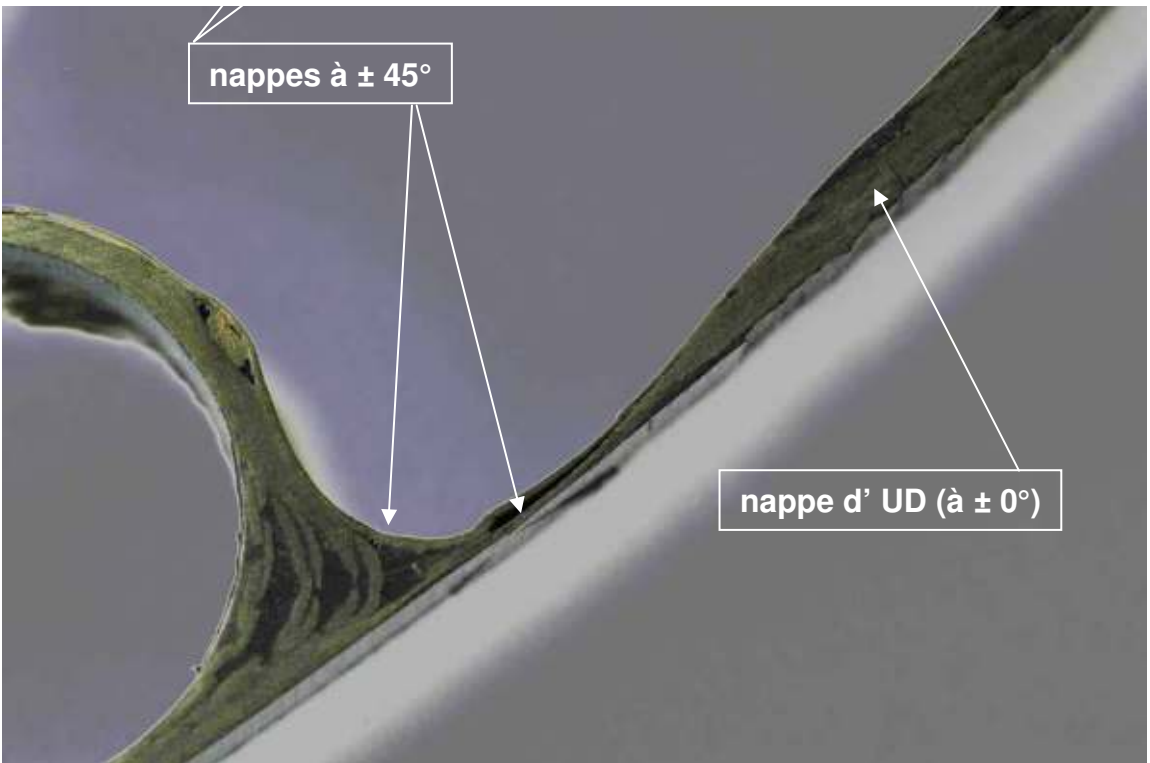
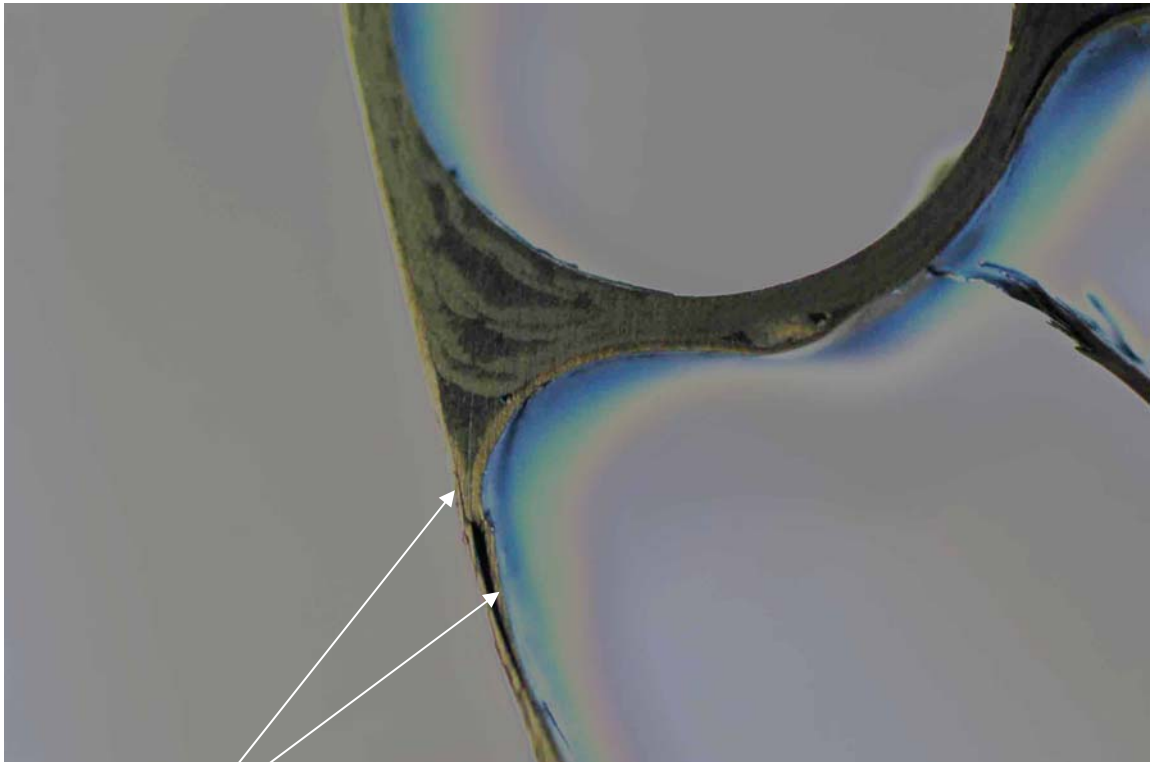


Planche 2

Coupe du mat HIT 631 (800 mm de la tête)

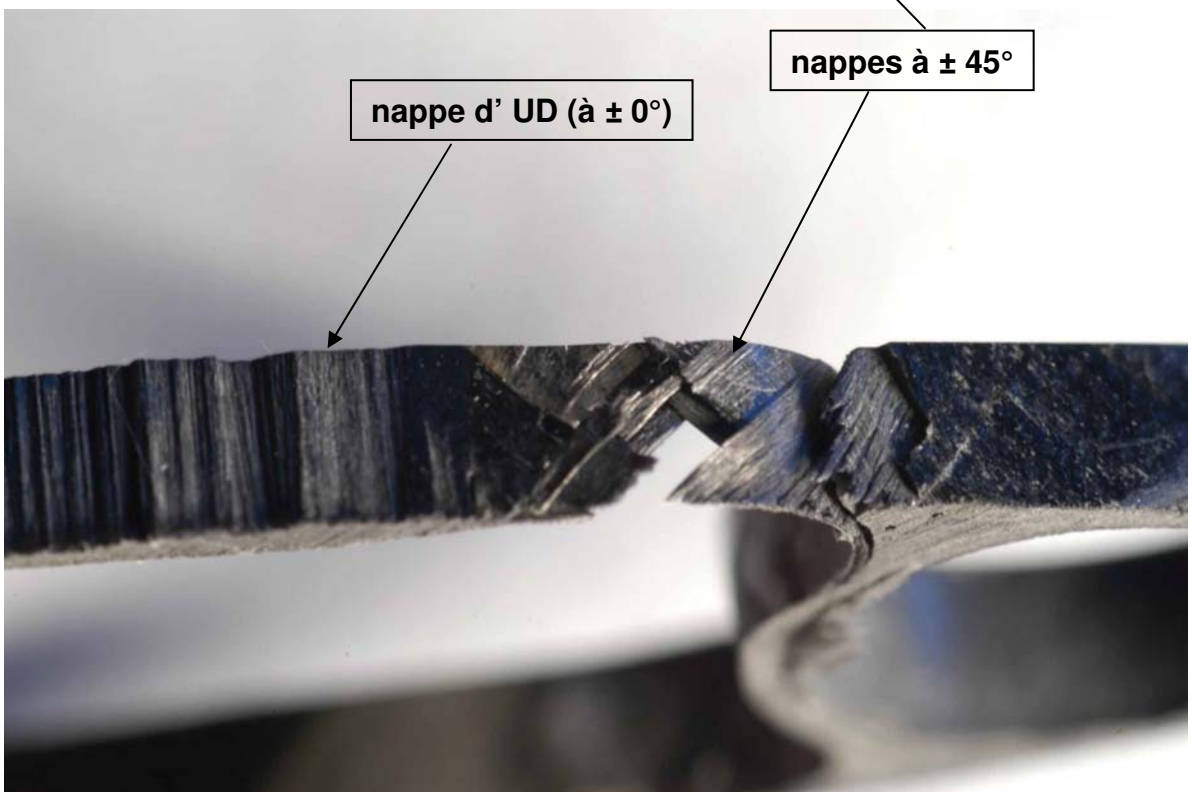
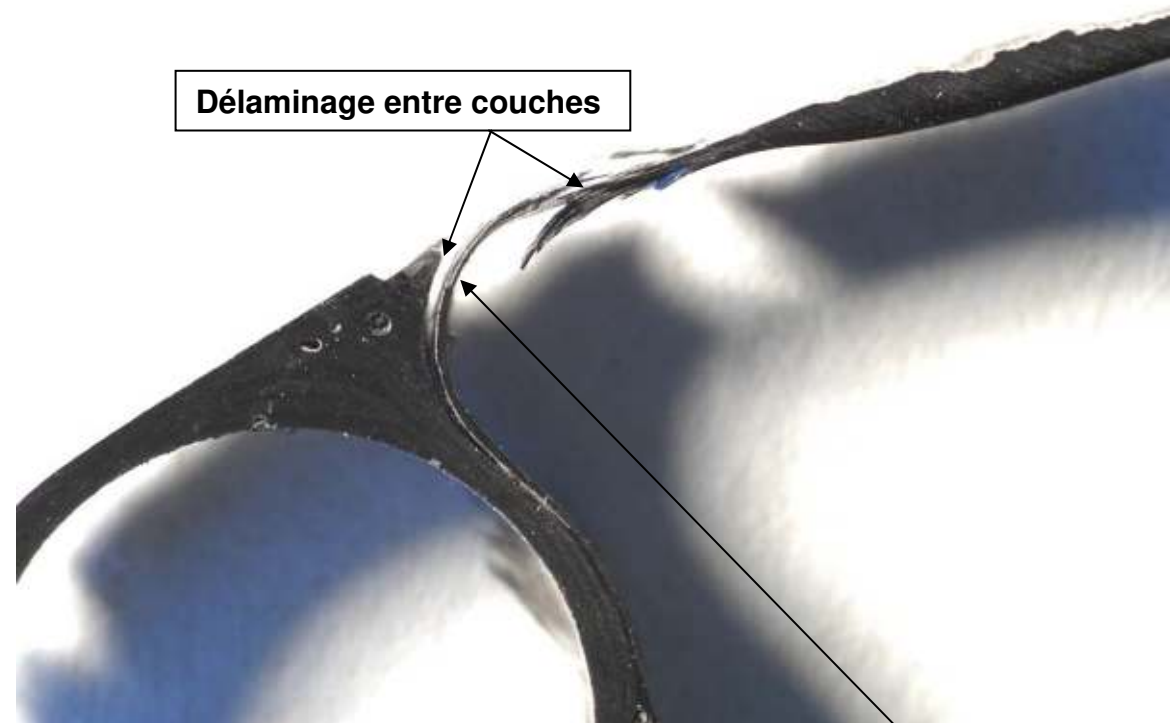


Planche 3

Coupe du mat HIT 631 (800 mm de la tête)

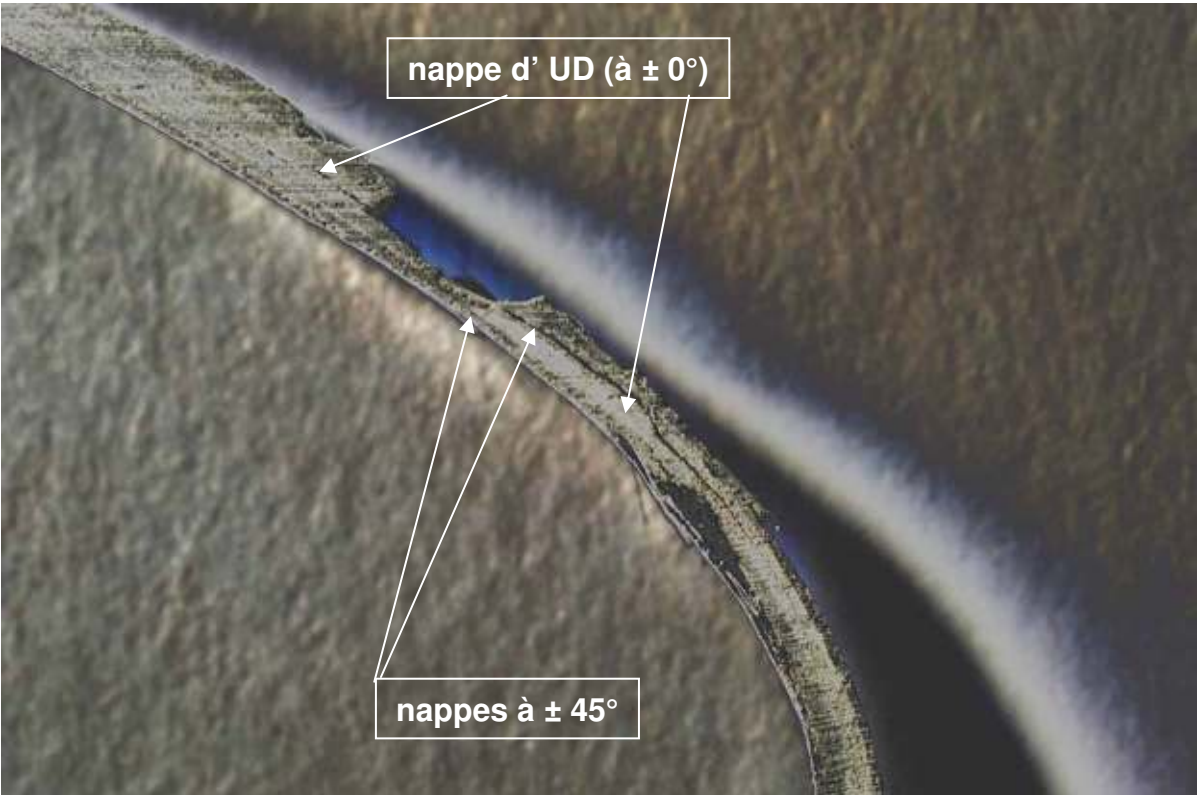
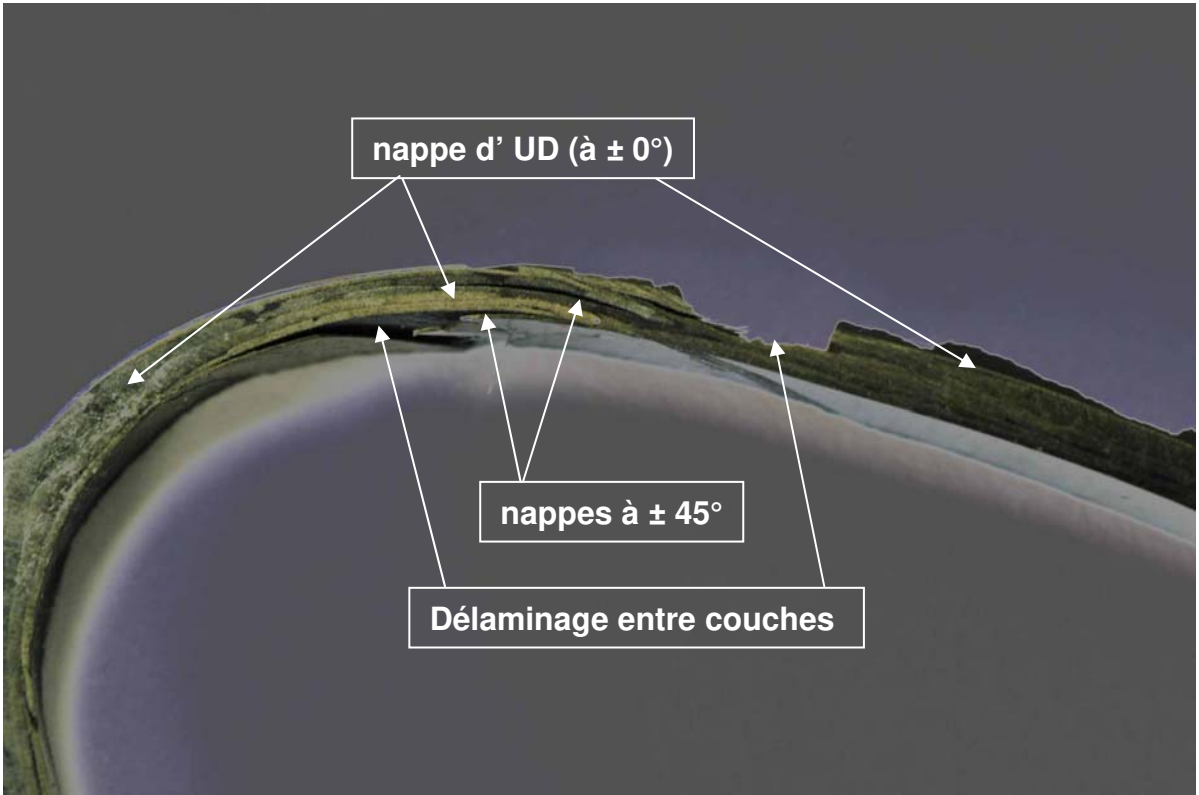


Planche 4

Coupe du mat HIT 631 (800 mm de la tête)

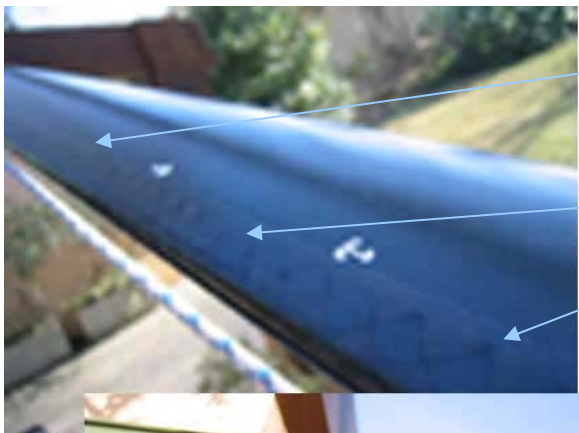
Rupture par délaminage et flambement nappe d'UD sur Mat HIT 610 (planches 5 à 8)

Constat du défaut face tribord, à 1 m environ de la tête de mat lors d'un essai de voile à terre, écoute bordée.

Conditions :

- quête 6800 mm
- écoute bordée (bôme au pont, effort mesuré en bout de bôme 42 daN)

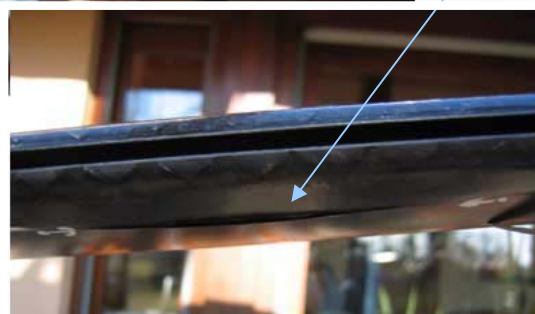
Mat au repos



Zone souple au touché sur 200 mm (entre la couche d'UD et le rail de ralingue)



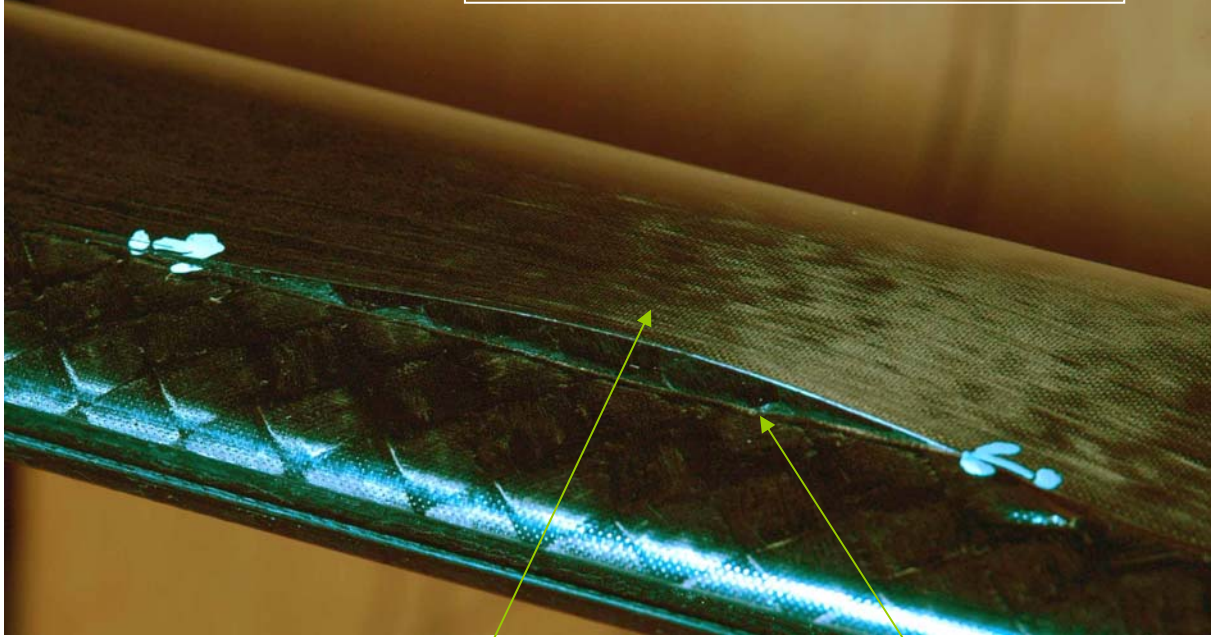
Décollement de la nappe d'UD sur 100 mm (visible quand le mat est mis en flexion)



Mat en flexion

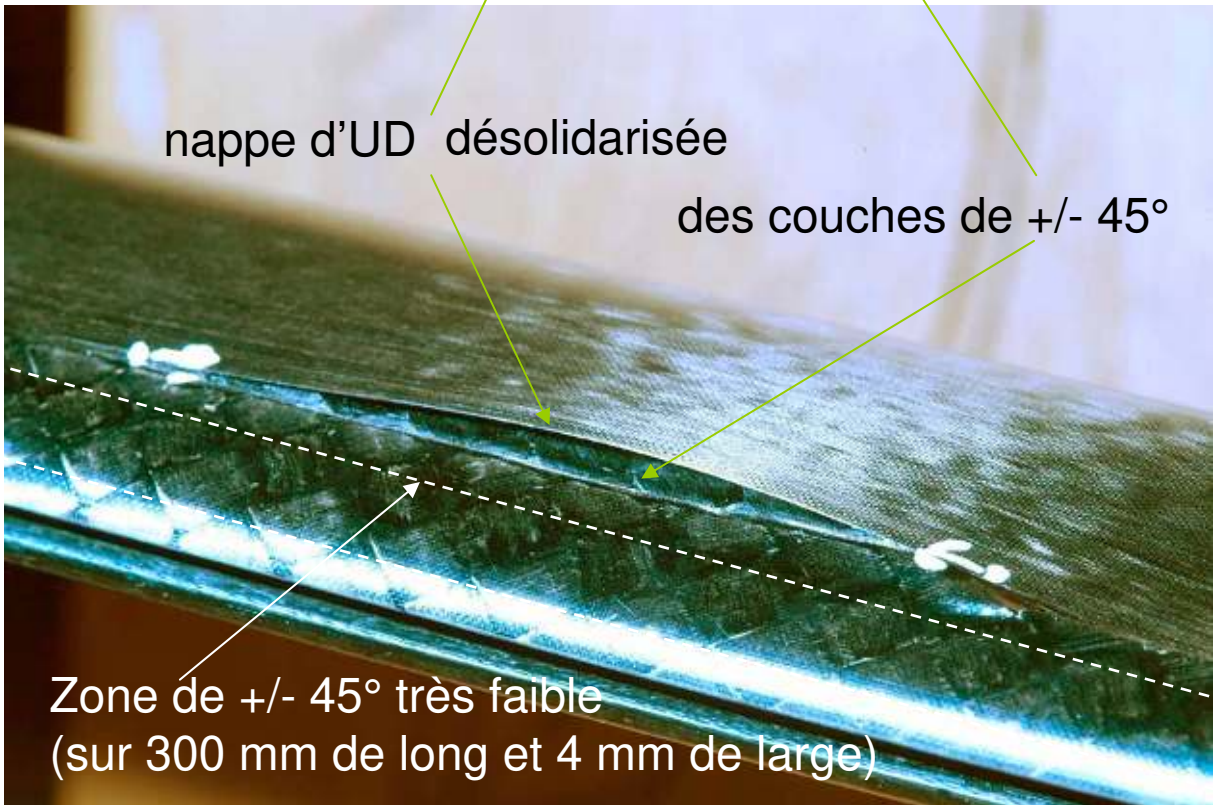
Planche 5

Mat en flexion latérale tribord



nappe d'UD désolidarisée

des couches de +/- 45°



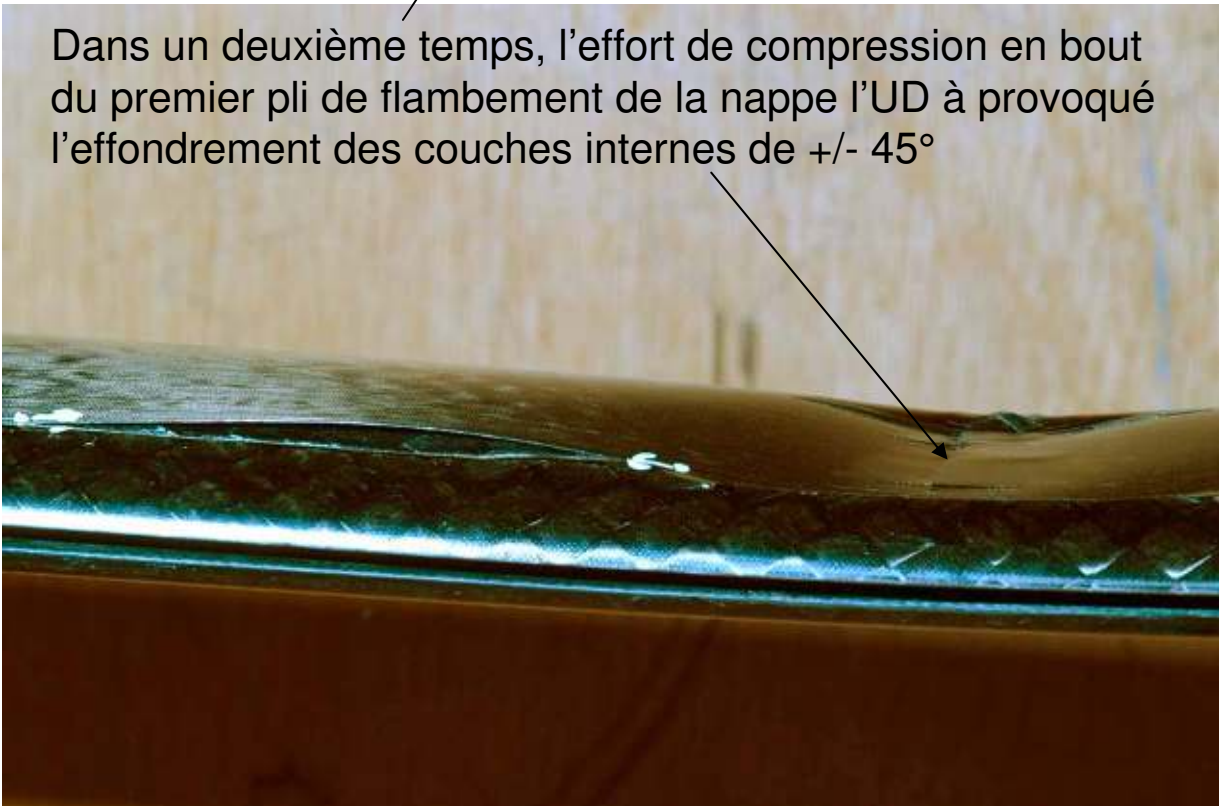
Zone de +/- 45° très faible
(sur 300 mm de long et 4 mm de large)

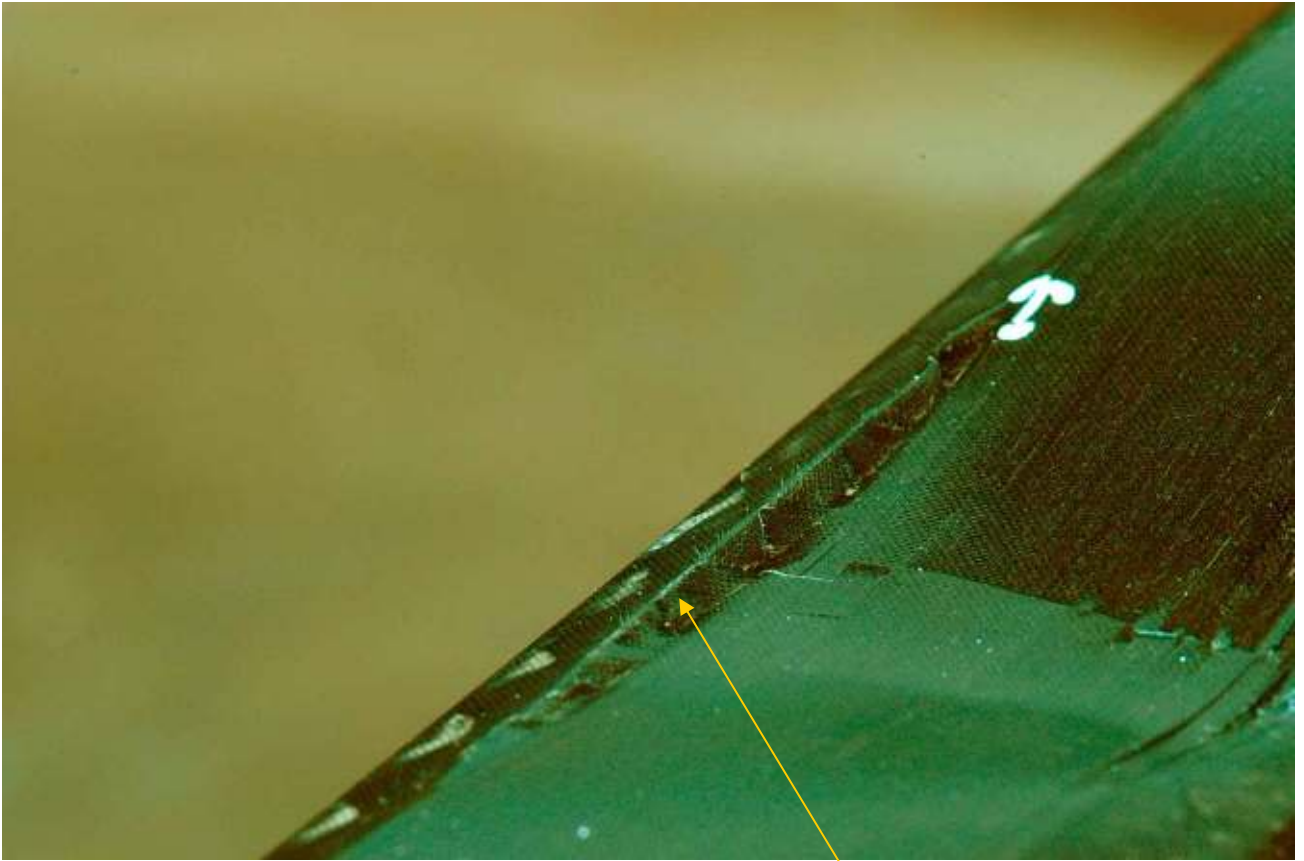
Planche 6

Flambement local de paroi



Dans un deuxième temps, l'effort de compression en bout du premier pli de flambement de la nappe l'UD à provoqué l'effondrement des couches internes de +/- 45°





Les 2 couches de $\pm 45^\circ$ situées le long du renfort de ralingue se sont délaminées (certainement la couche interne qui s'est décollée de la partie centrale du renfort de ralingue)