



cetim

Expertise de pièces composites

Journée d'information « PLAISANCE » - CESAM

14 juin 2016

Sophie Toillon, CETIM Nantes

sophie.toillon@cetim.fr

Les matériaux composites en applications marines

Les matériaux composites utilisés dans le domaine nautique :

- ▶ verre polyester → plaisance (coque, pont, ...)
+ sandwich (mousse) , balsa
- ▶ carbone époxy → haut de gamme + compétition (coque mât, bras de liaison, flotteur ...)
+ sandwich Nida

Les matériaux composites en applications marines

03.03.2016

Causes de défaillances les plus courantes :

- ▶ fabrication
- ▶ dimensionnement

Spécificité des matériaux composites

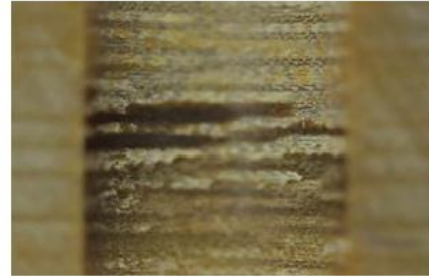


Fabrication simultanée du matériau et de la pièce

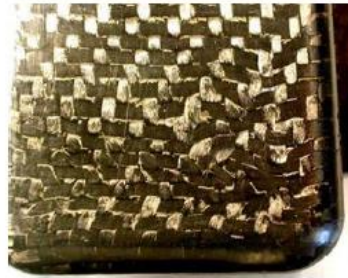
Nature, dimensions et localisation des défauts = fonction de la technique de mise en œuvre, de la géométrie et de la structure de la pièce
Dimensionnement des pièces en tenant compte de ces défauts
Tenue en température = fonction de la mise en œuvre

Principaux défauts rencontrés sur les pièces composites

- ▶ Défauts affectant la matrice (défauts généralement non visibles, brûlures,...)



- ▶ Défauts affectant le renfort (orientation, désalignement des fibres, discontinuité du renfort, plis, ...)



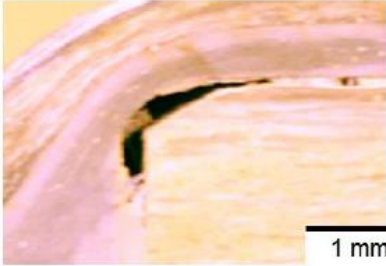
Désalignement des fibres



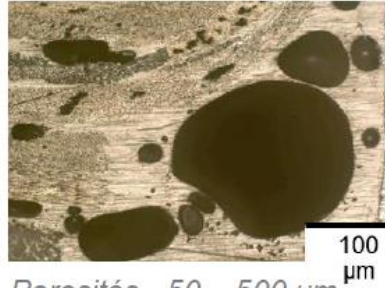
Pli d'une couche de tissu

Principaux défauts rencontrés sur les pièces composites

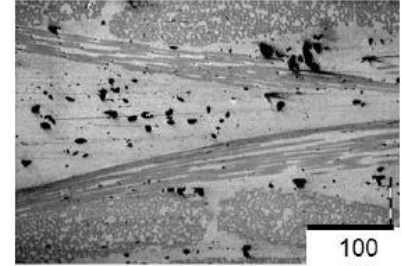
- ▶ Porosité (en surface, à cœur, plus ou moins important,...), délaminage



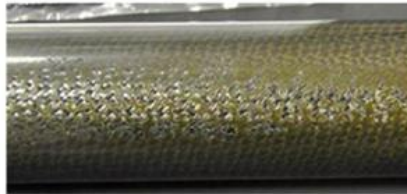
Macroporosités - 500 μm – 5 mm



Porosités - 50 – 500 μm



Microporosités - 0 – 50 μm



Porosité de surface



Délaminage



Délaminage

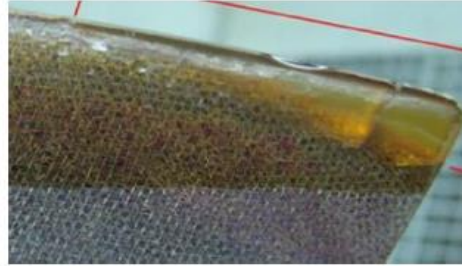
Défaut ou endommagement

Principaux défauts rencontrés sur les pièces composites

- ▶ Mauvaise répartition fibre/matrice (Amas de résine, variation du taux de fibre, manque d'imprégnation, fibres sèches,...)



Zone sèche



Amas de résine



Amas de résine

- ▶ Variation d'épaisseurs

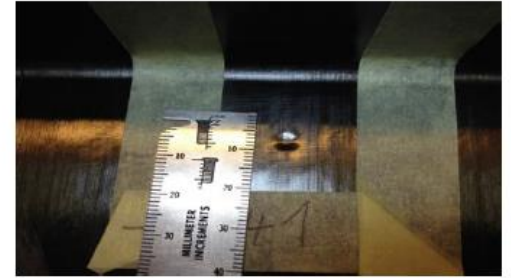


Principaux défauts rencontrés sur les pièces composites

► Inclusions, pollution,...



Inclusion corps étranger

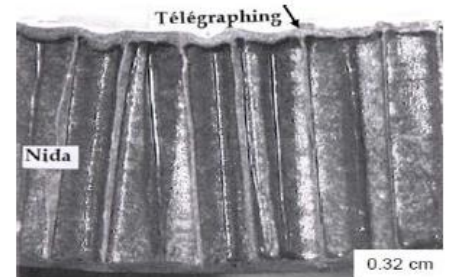


Pollution outillage

► Ecrasement matériau d'âme, télégraphing,...



Télégraphing



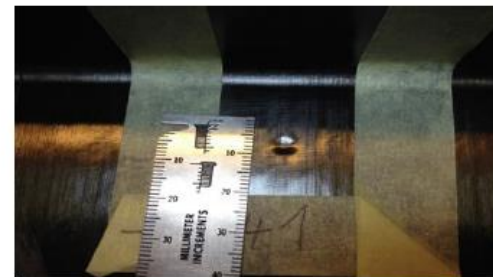
0.32 cm

Principaux défauts rencontrés sur les pièces composites

► Inclusions, pollution,...



Inclusion corps étranger

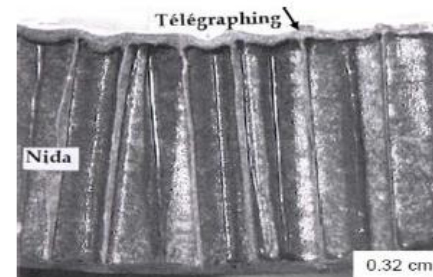


Pollution outillage

► Ecrasement matériau d'âme, télégraphing,...



Télégraphing

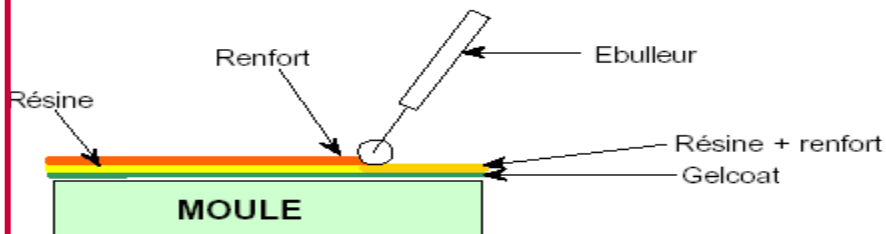


0.32 cm

Procédés de mise en œuvre – Défauts associés

03.03.2016

Moulage au contact,



Principe

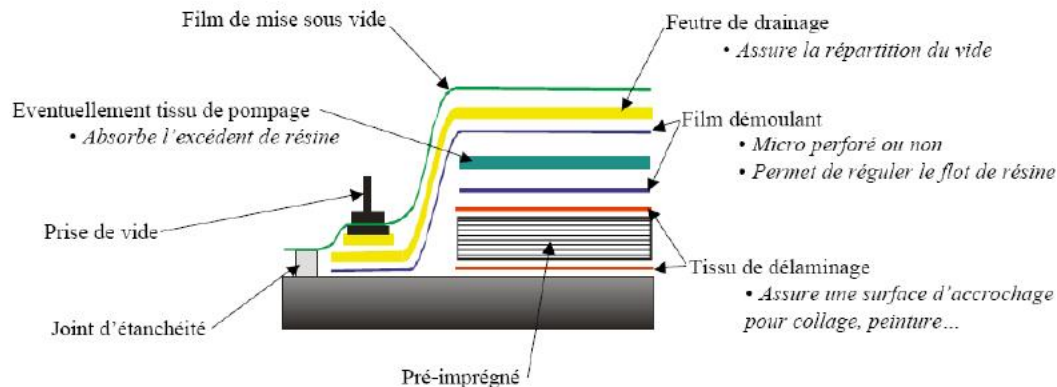
Des couches de renforts sont disposées successivement sur le moule enduit d'un agent démoulant ; chaque couche est imprégnée de résine catalysée jusqu'à obtention de l'épaisseur désirée.

Type de défauts

Défauts affectant la matrice	X
Défauts affectant le renfort	X
Porosité Délaminage	X
Défauts répartition fibre/matrice	X
Variations d'épaisseurs	X
Inclusions pollution	X
Ecrasement matériaux d'âmes	
Rayures, trous manques matière	X

Procédés de mise en œuvre – Défauts associés

Drapage de pré-imprégnés



Principe

Dépose sur un moule de nappes de fibres pré imprégnées recouvertes de nappes de moulage diverses puis polymérisation contrôlée.

Equipements de polymérisation

Etuve, autoclave, presse

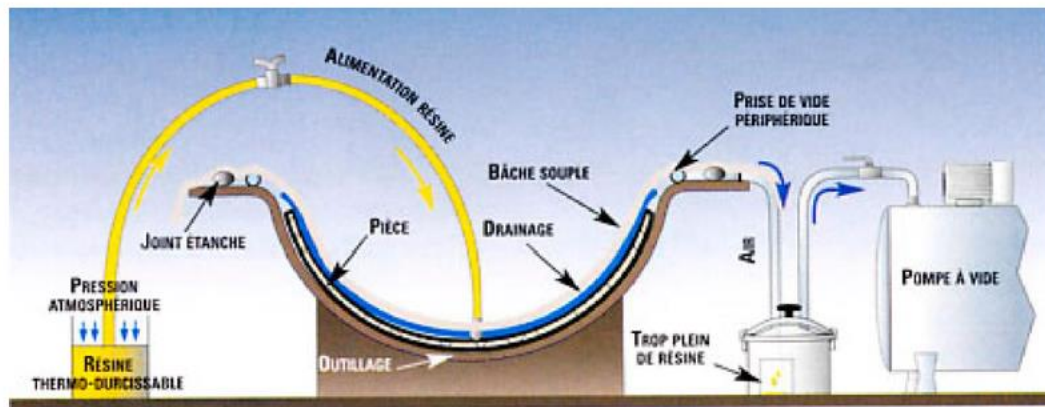


Type de défauts

Défauts affectant la matrice	X
Défauts affectant le renfort	X
Porosité Délaminage	X
Défauts répartition fibre/matrice	
Variations d'épaisseurs	
Inclusions pollution	X
Ecrasement matériaux d'âmes	X
Rayures, trous manques matière	X

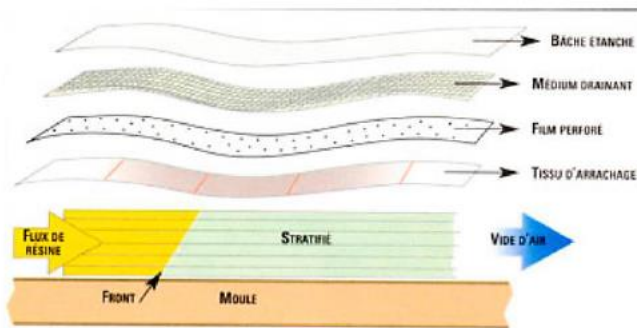
Procédés de mise en œuvre – Défauts associés

Moulage par infusion de résine



Principe

Dépose sur un moule de renforts fibreux. Mise sous vide à l'aide de nappes de moulage diverses puis transfert de la résine au travers du renforts fibreux.

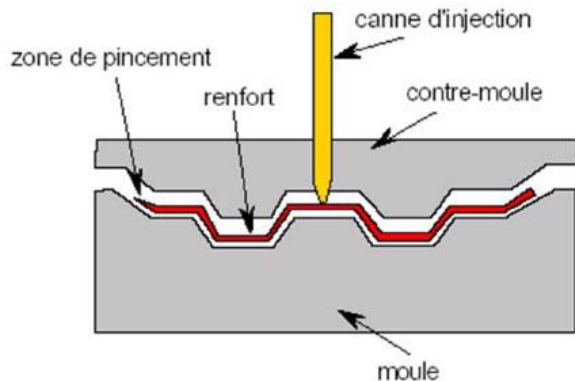


Type de défauts

Défauts affectant la matrice	X
Défauts affectant le renfort	X
Porosité Délamination	X
Défauts répartition fibre/matrice	X
Variations d'épaisseurs	
Inclusions pollution	X
Ecrasement matériaux d'âmes	X
Rayures, trous manques matière	X

Procédés de mise en œuvre – Défauts associés

Moulage RTM (Resin Transfert Molding)



Principe

Une nappe de fibres est déposée dans un moule fermé étanche et la résine est injectée à basse pression. La résine peut-être introduite dans le moule par aspiration à l'aide du vide. La combinaison de la pression et du vide est aussi possible.

Type de défauts

Défauts affectant la matrice	X
------------------------------	---

Défauts affectant le renfort	X
------------------------------	---

Porosité	X
Délaminage	X

Défauts répartition fibre/matrice	X
-----------------------------------	---

Variations d'épaisseurs	
-------------------------	--

Inclusions pollution	X
----------------------	---

Ecrasement matériaux d'âmes	X
-----------------------------	---

Rayures, trous manques matière	X
--------------------------------	---

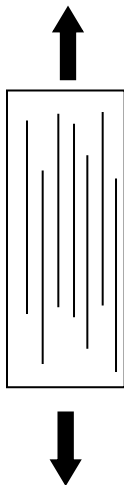
Défauts sur pièces composites : les causes possibles

03.03.2016

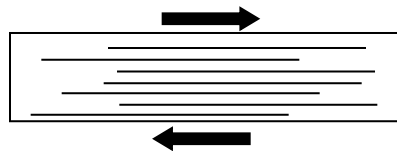
Type de défauts	Causes possibles
Défauts affectant la matrice	Péremption matière, mauvais mélange des produits (homogénéité, dosage), cycle de polymérisation pas adapté, pollution, environnement de travail,...
Défauts affectant le renfort	Mauvais drapage, découpes non adaptées, mauvaise programmation machine (enroulement),...
Porosité Délaminage	Manque de compactage, tension dans les plis, temps de prise de la résine pas adapté, présence d'humidité, cycle de cuisson, stratégie d'injection,...
Répartition fibre/matrice	Mauvais drapage / stratification,...
Variations d'épaisseurs	Mauvaise drapage / stratification,...
Inclusions, pollution	Propreté du poste de travail
Ecrasement âme	Niveau de dépression / pression pas adapté, mauvais drapage,...
Rayures, trous,...	Au démoulage (traitement, propreté OT), manutention,...

Défauts de mise en œuvre - Nocivité

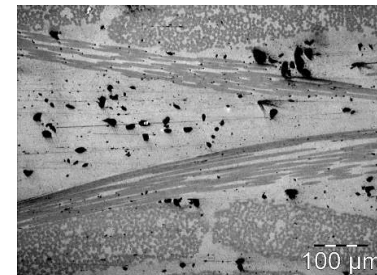
03.03.2016



5 % de porosités
Pas de problème



5 % de porosités
 $\approx 50\%$ de résistance en cisaillement



Défauts de mise en œuvre - Nocivité

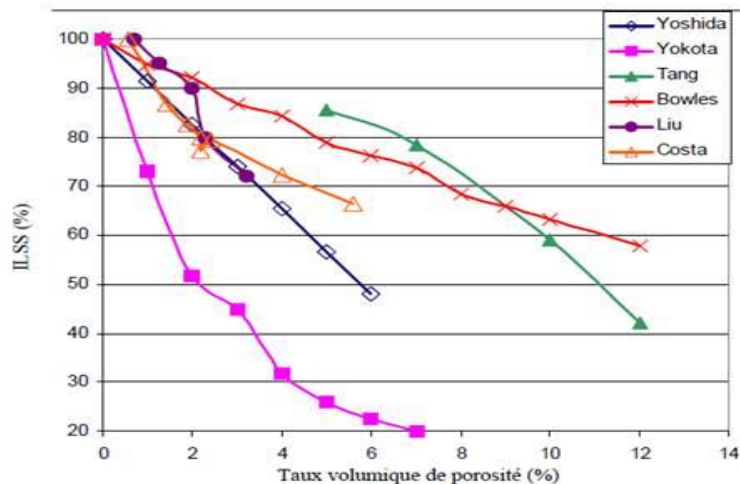
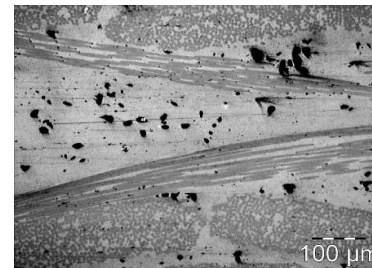


Figure 1.4 : Variation relative de l'ILSS en fonction du taux de porosité pour des matériaux composites carbone/époxy.



Critère de tolérance

Chaudronnerie, citerne, nautisme : <5%

Aéronautique courant : <3%

Aéronautique critique : <1%

Pour un empilement classique, perte de 6 à 7 % sur la résistance CIL par % de taux de porosités

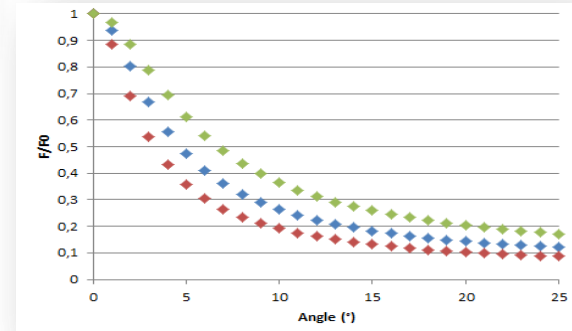
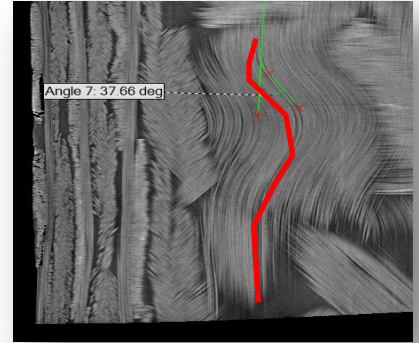
Défauts de mise en œuvre - Nocivité

Ondulations d'un renfort UD carbone

➔ diminution des caractéristiques en compression



*Rupture d'un mat de
bateau de course*

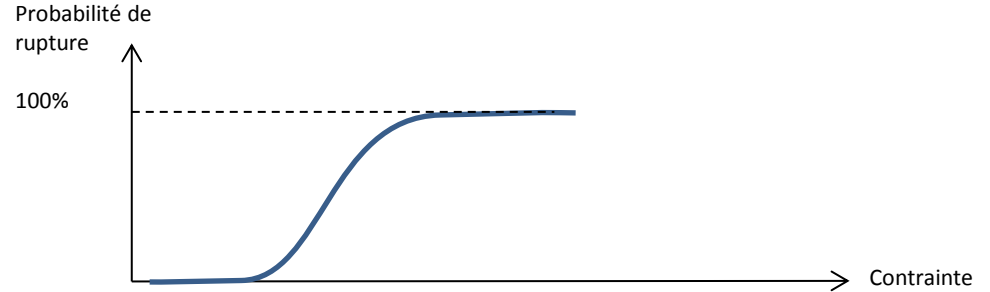
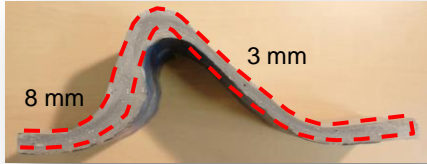


Impact des écart d'angles sur la rupture en compression d'un UD Carbone

Défauts des composites - prise en compte lors de la conception

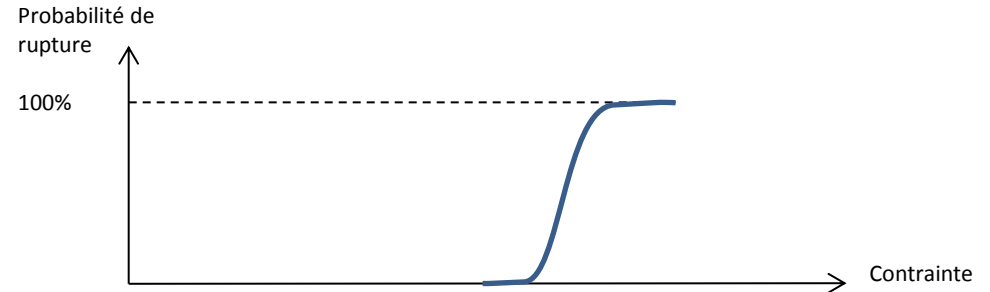
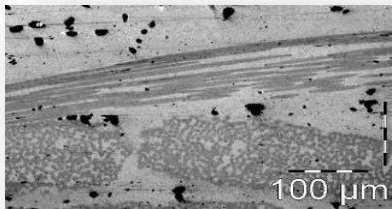
03.03.2016

► Secteur à bas coût



Coefficient de sécurité = 20, l'ignorance nécessite de sur-dimensionner

► Secteur haute technologie



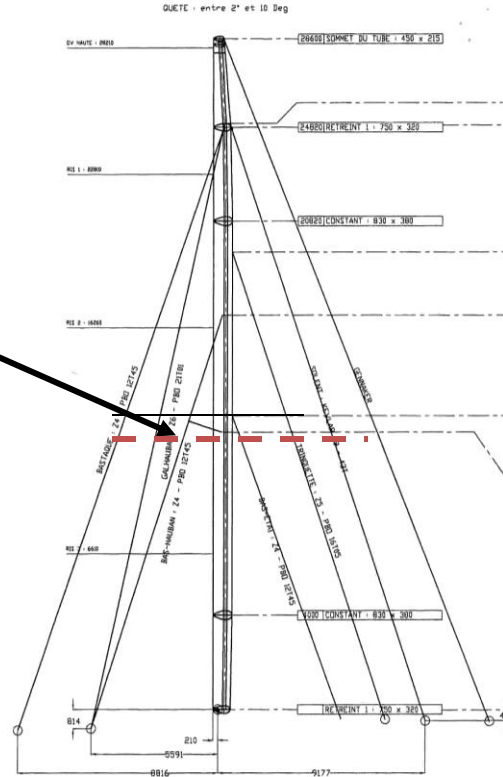
Coefficient de sécurité = 1, prise en compte de la majorité des facteurs fluctuants (raw mat., mise en œuvre, durabilité, probabilité de rupture...)

Exemple – Rupture d'un mât de trimaran

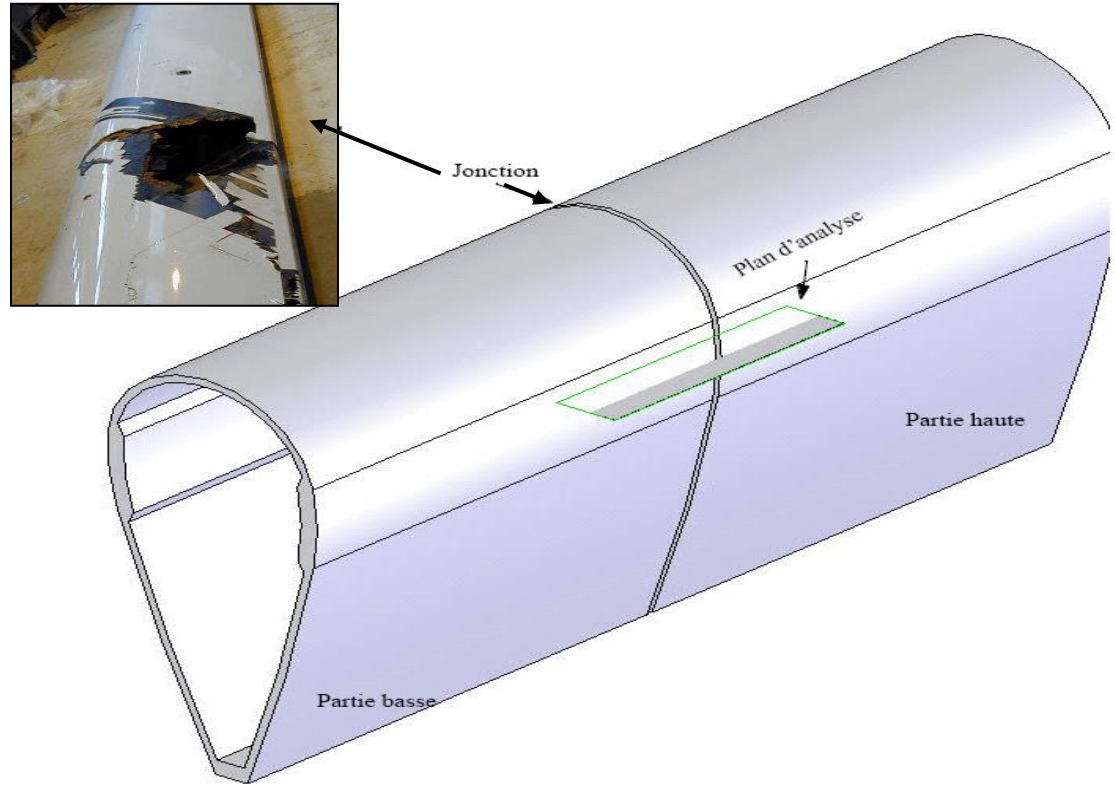
03.03.2016



manchon



Exemple – Rupture d'un mât de trimaran

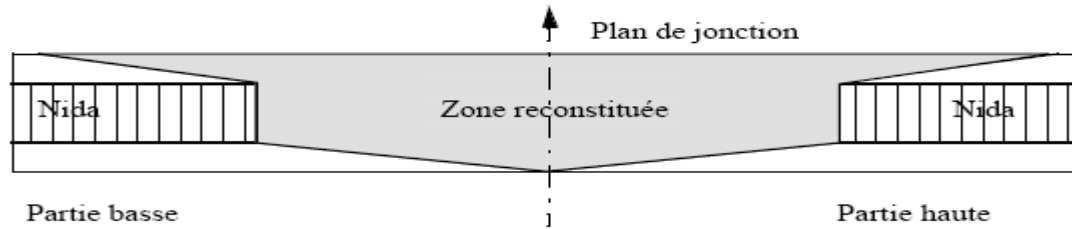


Zone de rupture :
manchon assurant la
liaison entre les
parties basse et haute
du mât

Exemple – Rupture d'un mât de trimaran

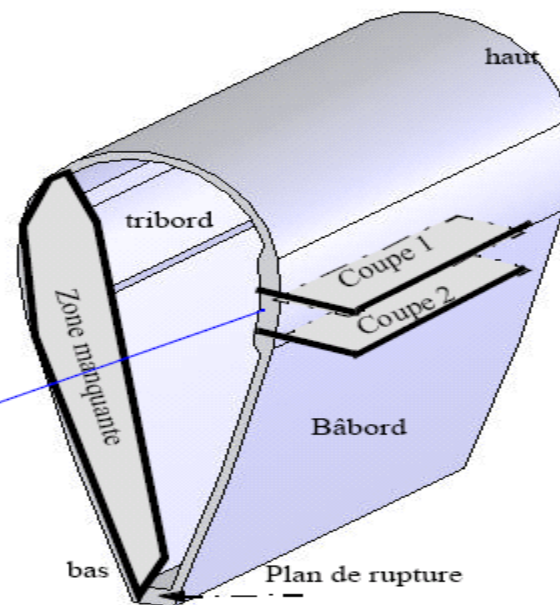
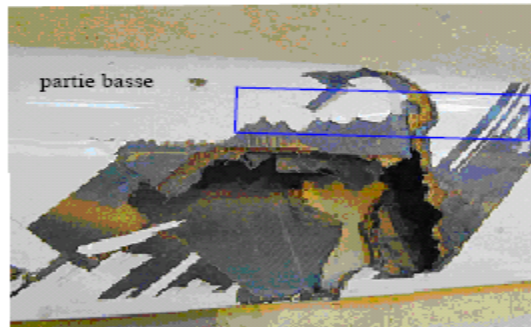
03.03.2016

Principe de réalisation



Exemple – Rupture d'un mât de trimaran

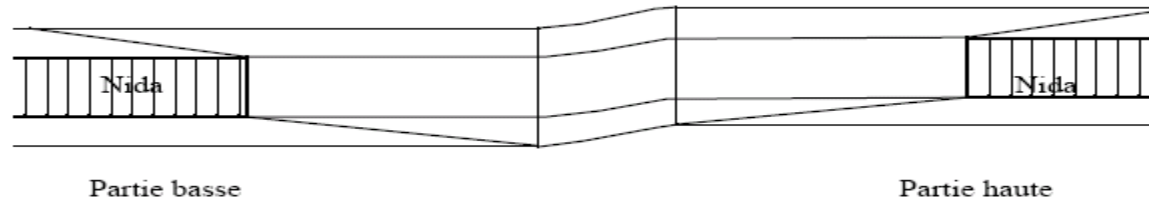
Réalisation de coupes
polies dans la zone
manchonnée



Exemple – Rupture d'un mât de trimaran

Zone de raccordement :
Mésalignement des renforts UD

Géométrie en « S »



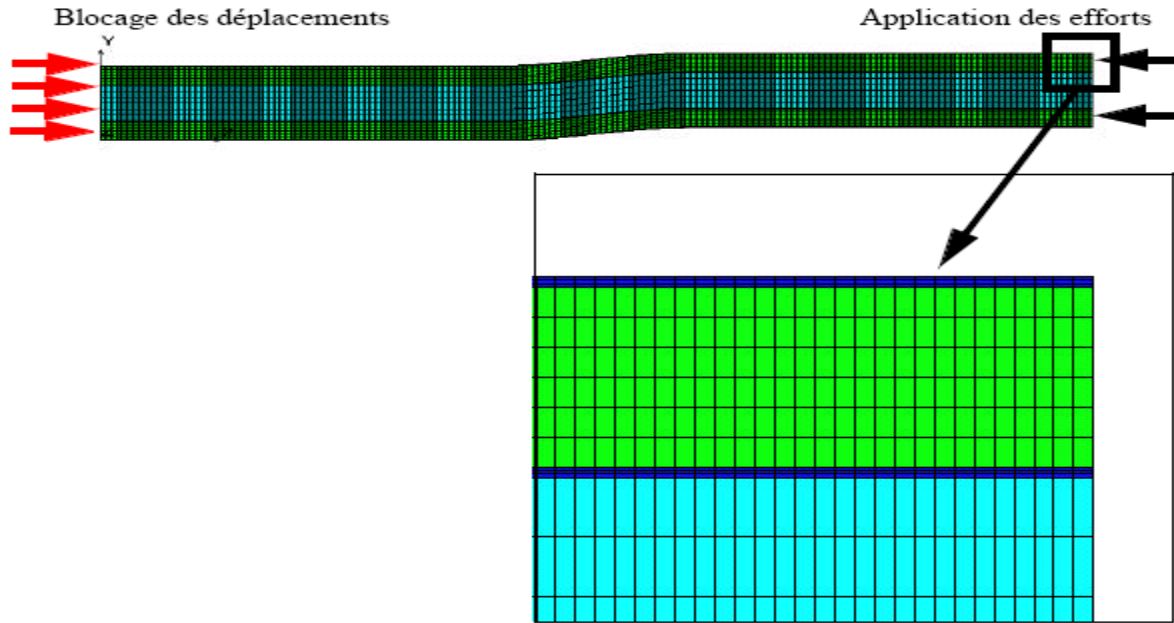
Exemple – Rupture d'un mât de trimaran

03.03.2016

Evaluation de la nocivité de ce défaut d'alignement des renforts UD :

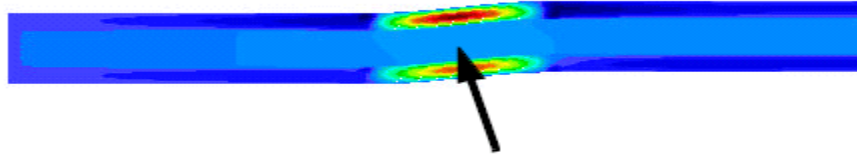
- ▶ calcul des caractéristiques mécaniques des couches
- ▶ modélisation de la zone de raccordement à partir des plans de drapage et en tenant compte du défaut d'alignement mesuré
- ▶ application des efforts de compression calculés dans cette partie du mât

Exemple – Rupture d'un mât de trimaran



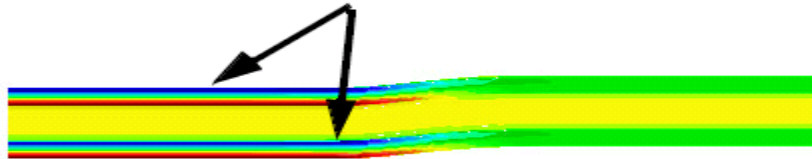
Exemple – Rupture d'un mât de trimaran

Résultats : ce défaut engendre une amplification des contraintes dans les matériaux



Rupture du Nida en cisaillement dans la zone du « S »

Rupture des barreaux UD en compression et écroulement de la structure



Exemple de rupture de structures composites liée au dimensionnement

03.03.2016

Rupture du bras de liaison AV Bd lors de son convoyage vers Calais pour le départ de la Course des Phares



Photo © Y. ZEDDA



Rupture bras de liaison

03.03.2016

Objectifs de l'expertise :

- ▶ Rechercher l'origine de la défaillance
- ▶ Apporter des solutions avant le départ de la Route du Rhum

Rupture bras de liaison

Déroulement de l'expertise :

Pistes compte tenu de l'historique et des circonstances de l'avarie :

- Problème de fabrication
 - Problème de conception
-
- ▶ Contrôle de la qualité de mise en œuvre du bras
 - ▶ Etude du comportement du bras pour plusieurs cas de chargement
 - ▶ Identification des modes de ruine fondamentaux du bras par fractographie –
Corrélation avec les résultats des calculs

Rupture bras de liaison

1- Contrôle de la qualité de fabrication du bras :



- ▶ vérification de l'état de polymérisation de la résine en différents points du bras (BB face AR, barreau UD ..) – Mesure de T_g
- ▶ vérification des séquences d'empilement des renforts
- ▶ vérification de la masse volumique apparente du Nida
- ▶ évaluation du taux de fibres de carbone dans les barreaux UD
- ▶ détermination du taux de porosités (barreaux UD)
- ▶ détermination de la résistance au C.I.L. apparent dans les barreaux d'UD
- ▶ évaluation de la résistance au cisaillement au niveau du film de colle présent à l'interface UD/BB sur la face AR

Rupture bras de liaison



1- Contrôle de la qualité de fabrication du bras

- ▶ Pas de problème de fabrication susceptible d'être à l'origine de la défaillance du bras de liaison Avant Bâbord.

Rupture bras de liaison



2- Etude du comportement du bras pour plusieurs cas de chargement :

- ▶ Étape 1 : détermination des différents matériaux dans la structure à partir des plans : « Echantillonnage »

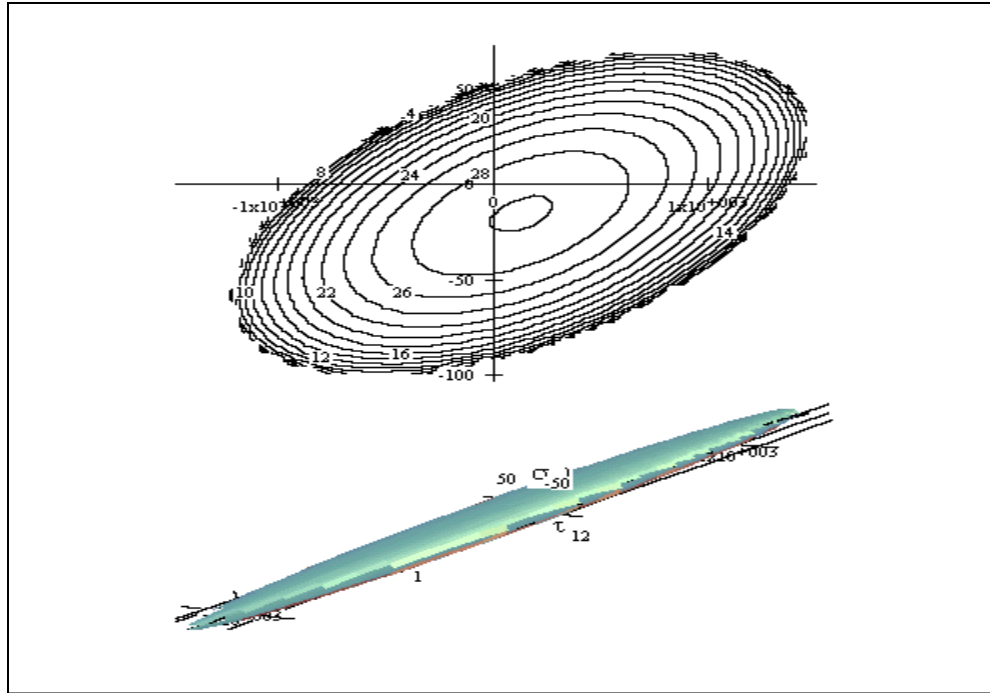
Rupture bras de liaison



2- Etude du comportement du bras pour plusieurs cas de chargement :

- ▶ Étape 2 : Calcul des caractéristiques de rigidité et de rupture de chaque matériau : « Pré-processing »

Rupture bras de liaison



A partir des contraintes max admissibles -> Enveloppe de rupture (S_1 , S_2 , t_{12}) représentant les contraintes dans le sens 1, 2 et de cisaillement dans le plan

UD M40J

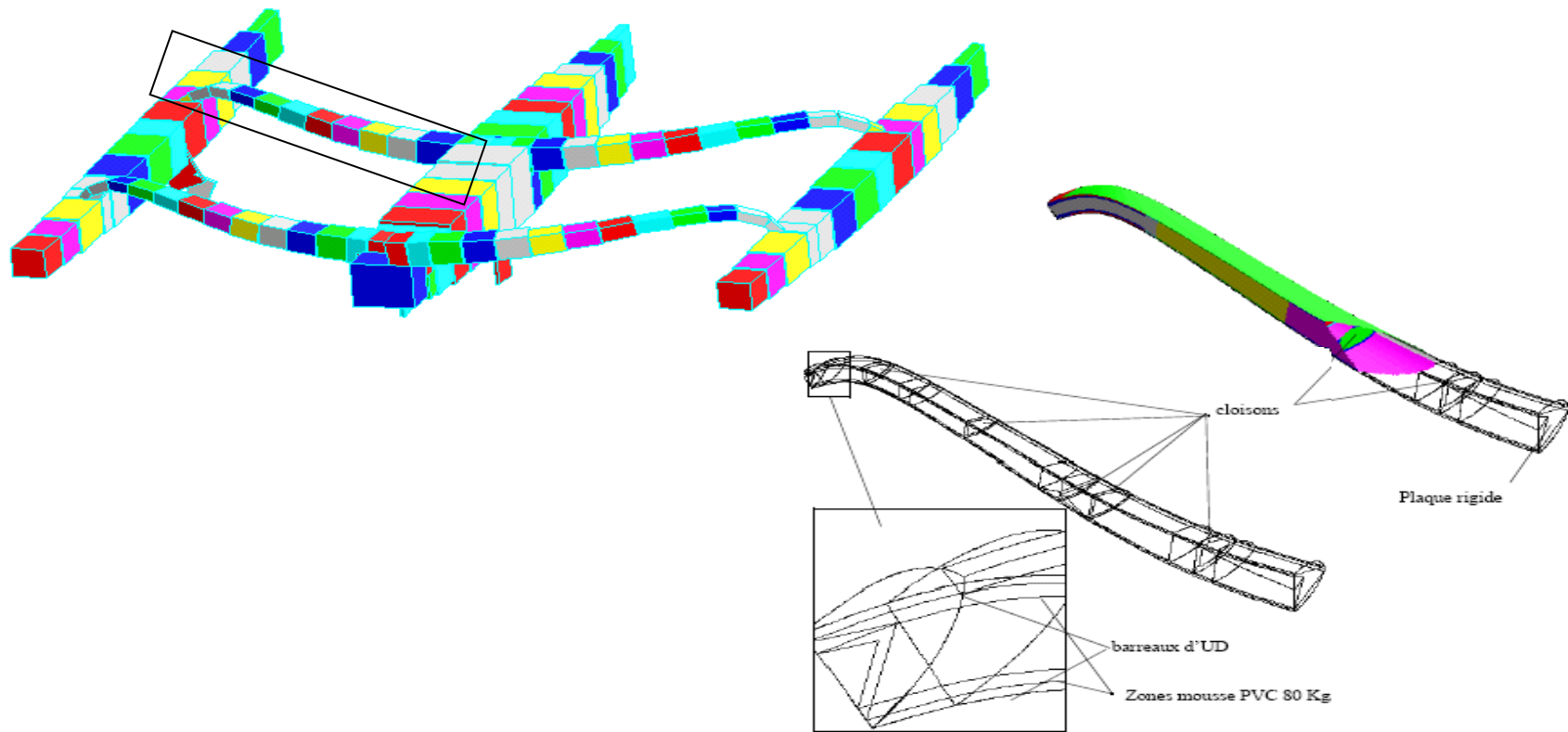
Rupture bras de liaison

2- Etude du comportement du bras pour plusieurs cas de chargement :

- ▶ Étape 3 : Modélisation

Rupture bras de liaison

03.03.2016



Rupture bras de liaison

Plusieurs cas de chargement :

- ▶ config. d'enfournement bras sous le vent + gréement + poids
- ▶ config. foil avec portance $6,5T$ (poids du bateau) + coef. dyn de 2 + gréement + poids
- ▶ config. foil avec efforts donnés + gréement + poids
- ▶ config. foil avec efforts donnés + gréement + poids, point d'application des efforts hydrodynamiques abaissé

Rupture bras de liaison

03.03.2016

2- Etude du comportement du bras pour plusieurs cas de chargement :

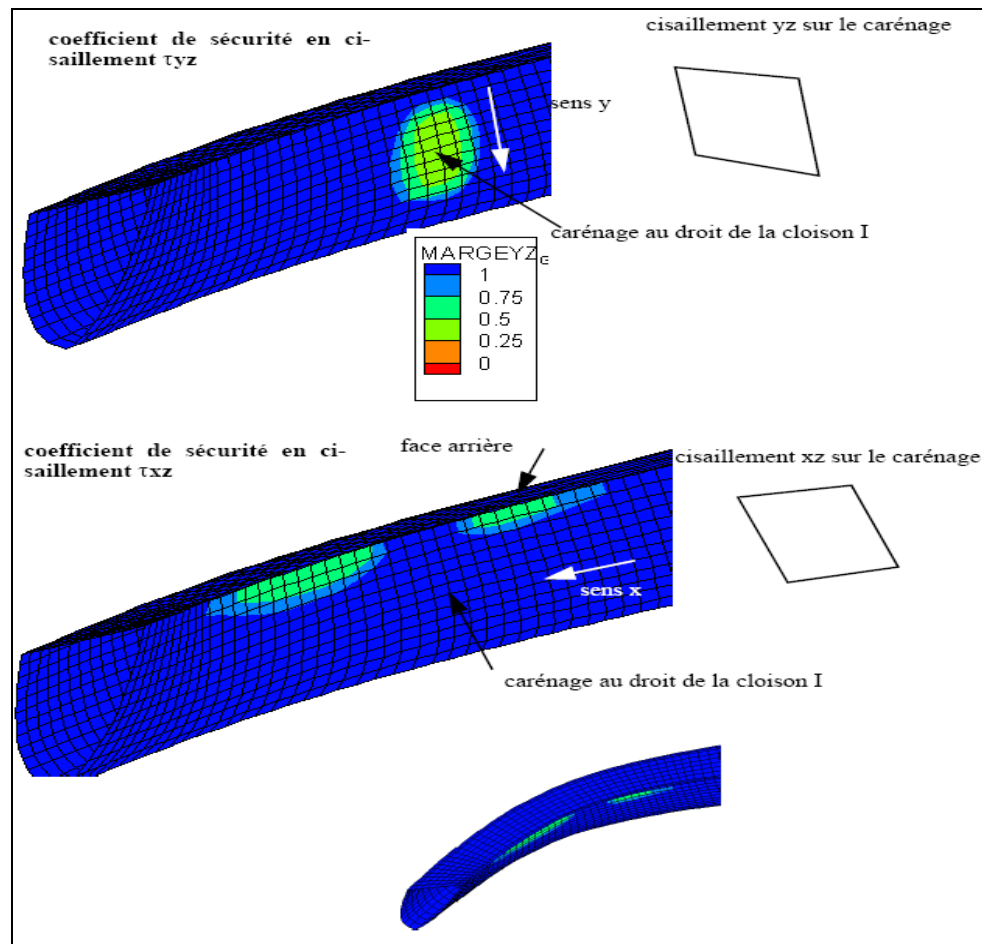
- ▶ Étape 4 : « Post-traitement »

Rupture bras de liaison

Cas de chargement :

config. d'enfournement bras
sous le vent + grément +
poids

Nida



Rupture bras de liaison

2- Etude du comportement du bras pour plusieurs cas de chargement :

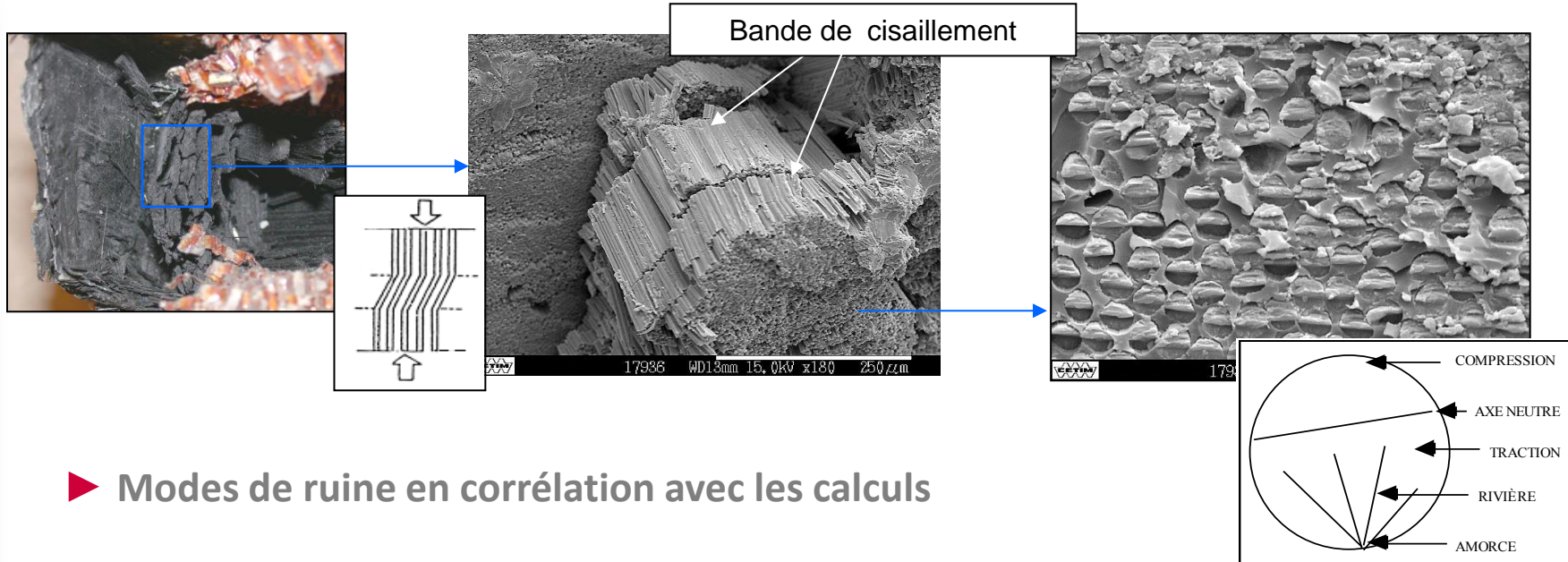
- ▶ Crosse = zone la plus faible du bras
- ▶ Identification des zones sensibles
- ▶ Scénario possible de rupture
 - rupture du Nida bien avant l'avarie
 - dégradation progressive des Bibiais de la face AR du bras
 - augmentation du chargement dans les barreaux d'UD qui vont fatiguer (barreau inférieur + bord d'attaque)

Rupture bras de liaison



3- Analyse fractographique du bras :

- ▶ Cisaillement dans le Nida
- ▶ Rupture en compression dans le barreau UD inférieur



- ▶ Modes de ruine en corrélation avec les calculs

Rupture bras de liaison



4- Contrôle non destructif du bras AV Tribord intact

- ▶ Mise en évidence de dommages dans les zones sensibles identifiées par les calculs

Rupture bras de liaison



RECHERCHE ET VALIDATION DE SOLUTIONS AVEC L'ARCHITECTE ET LE BE ...

50.



Vers le futur