

Prise en compte des procédés dépôt de fibres dans la modélisation et la conception des matériaux composites

Anita CATAPANO, Bordeaux INP – I2M

Marco MONTEMURRO, Arts & Métiers ParisTech – I2M

Introduction

La conception et fabrication de structures légères plus performantes et moins coûteuses représente, aujourd'hui, un défi de haute importance dans plusieurs applications industrielles.

« Une étude fiable du marché futur des matériaux composites confirme que les secteurs aéronautique et spatial seront les acteurs principaux à côté des secteurs automobile et des énergies renouvelables »

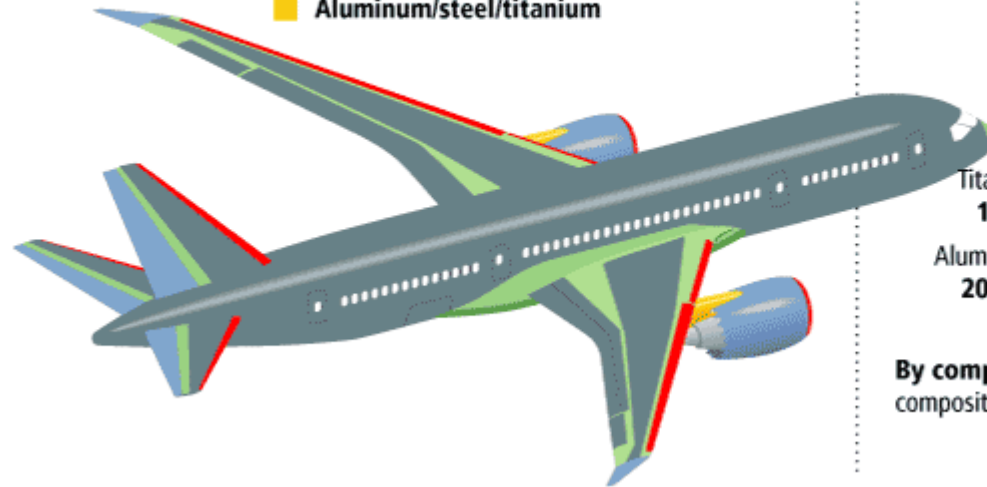
Directeur de *Composites Forecasts and Consulting LLC*
Composites World's annual Carbon Fiber Conference,
Knoxville (TN, US), 2015

Introduction

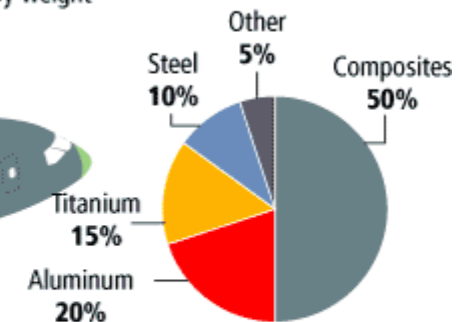
Exemples de programmes de R&D en cours: **Boeing 787**

- 50% de la structure est réalisée en composite
 - Fuselage → 5 pièces en composite (*one piece barrel*)
- 20% restant en aluminium
- 15% en titane
- 10% acier
- 5% matériaux différents

Materials used in 787 body



Total materials used
By weight



By comparison, the 777 uses 12 percent composites and 50 percent aluminum.

Introduction

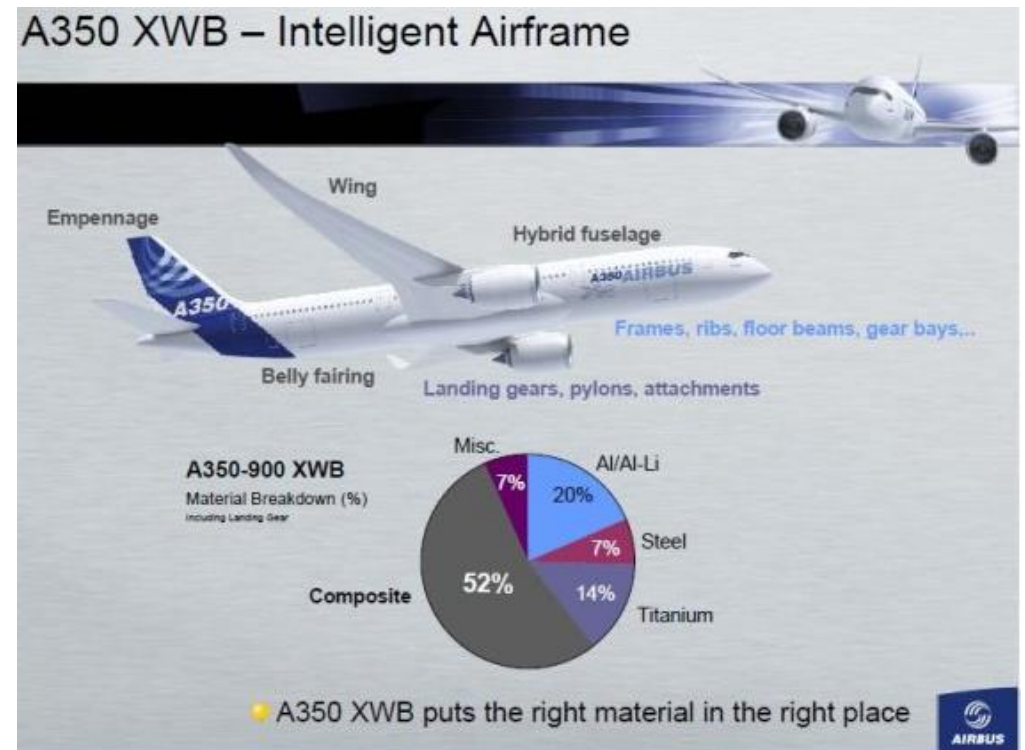
Exemples de programmes de R&D en cours: **Boeing 787**



Introduction

Exemples de programmes R&D en cours: **A350 XWB (eXtra Wide Body)**

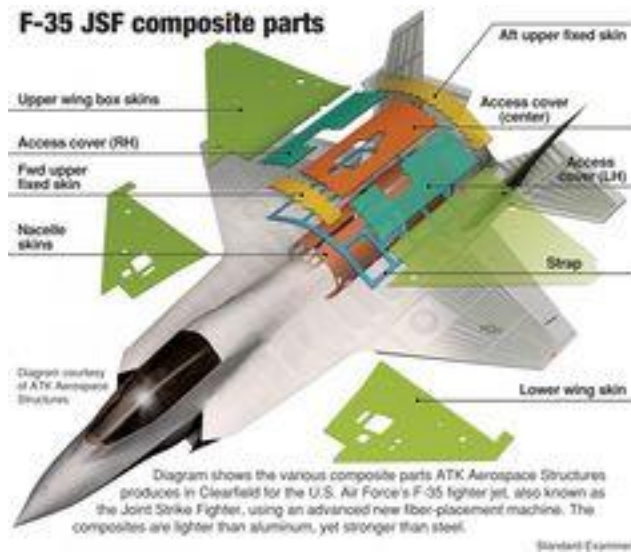
- 52% de la structure est réalisée en composite
- 20% restant en aluminium
- 14% en titane
- 7% acier
- 7% matériaux différents



Introduction

Exemples de programmes R&D en cours:

- F-35 Lightning
- Ariane 6



Ariane 6 configuration

Following a selection starting from 12 PPH configurations three are now retained and further studied - with special focus on competitions to optimise exploitation costs - in preparation of the decisions to be taken at Council in 2014.

- ✓ 1st stage: composite monolithic P180 (Ø 3,7m)
- ✓ 2nd stage: P110 monolithic (Ø 3,7m)
- ✓ 3rd stage: H30 Vinci
- ✓ Boosters: B50 monolithic (Ø 1,8m)
- ✓ Launcher height: 5.0m



MC-2PH+Bz

- ✓ 1st stage: 3 P130-P135 monolithic (Ø 3,5m)
- ✓ Common Core Booster architecture
- ✓ 2nd stage: P130-P135 (identical to 1st stage SRM)
- ✓ 3rd stage: H32 Vinci
- ✓ Launcher height: 5.0m



MC-MP-2PH+CCB

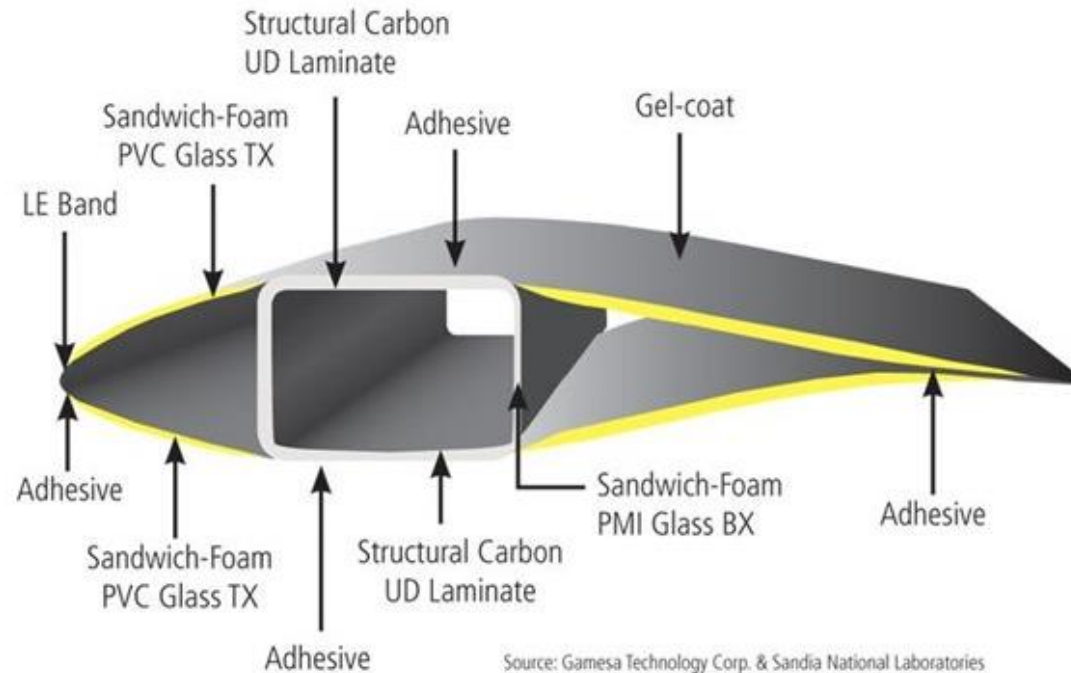
- ✓ 1st stage: 3 composite monolithic P130-P135 (Ø3,5m) Cluster architecture
- ✓ 2nd stage: P130-P135 (identical to 1st stage SRM)
- ✓ 3rd stage: H32 Vinci
- ✓ Launcher height: 5.3m



MC-MP-2PH+CL

Introduction

Exemples de programmes R&D en cours: 6 MW Wind Turbine for offshore (LM Wind Power, Alstom)



Introduction

Deux facteurs cruciaux ont été identifiés pour le développement du marché futur des matériaux composites:

- Le développement de procédés plus rapides et efficaces à coût maîtrisé;
- La recherche de solutions plus performantes et fiables présentant une résistance et une tenue aux dommages accrue.

Aujourd'hui la recherche s'oriente vers solutions composites dont les propriétés mécaniques varient localement en fonction des besoins/requis de la structure

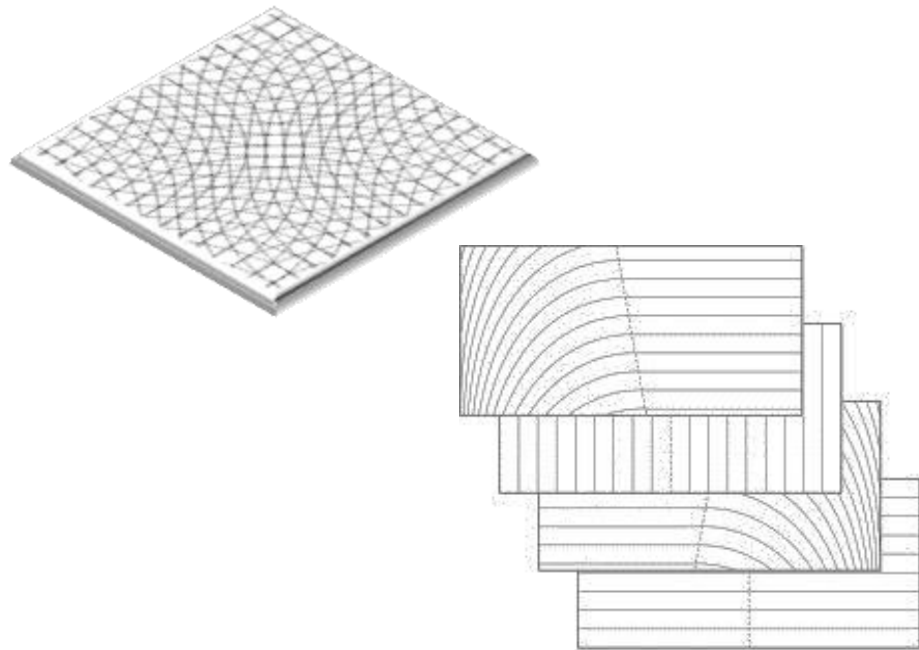
AVANTAGES: élargissement du champ d'application des composites, amélioration des propriétés mécaniques, réduction de la masse et des encombrements, etc.

INCONVENIENTS: procédés de fabrication et processus de conception plus complexes et plus onéreux, etc.

Introduction

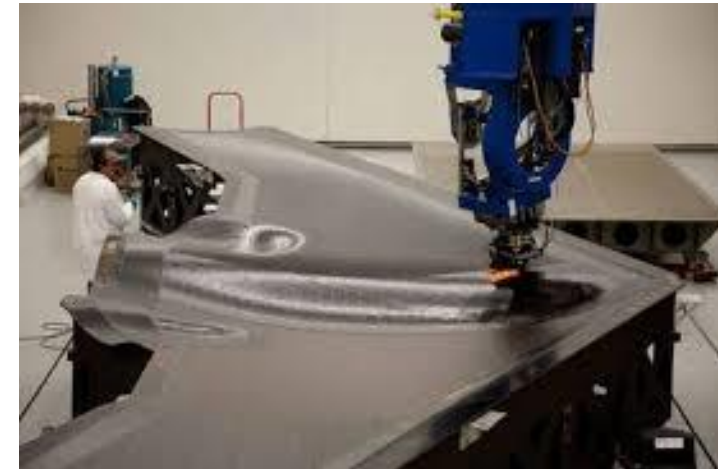
SOLUTION PROPOSÉE:

Variable Angle Tow (VAT) laminates



PROCÉDÉ ASSOCIÉ:

Dépose de fibre (Fabrication additive composite)



- Procédés de type dépose de fibre
 - Evolution historique
 - Automated Tape Laying (ATL)
 - Automated Fibre Placement (AFP)
 - Défauts de fabrication
 - Solutions proposées
 - Propriétés mécaniques des composites obtenus par AFP
- Le processus de conception des composites Variable Angle-Tow (VAT)
 - La stratégie de conception multi-échelle à 2 niveaux (MS2L)
 - Niveau 1: conception à l'échelle macroscopique
 - Niveau 2: conception à l'échelle mésoscopique
 - Exemples numériques
- Conclusions

Procédés de type dépose de fibre

Automated Tape Laying (ATL)

Description:

- dépose d'une unique bande de prepreg (suffisamment large) sur la surface du moule
- vitesse de dépose, température de la bande, tension dans la bande peuvent être contrôlées pendant le procédé

Automated Fibre Placement (AFP)

Description:

- dépose d'une bande constituée de plusieurs bandelettes de prepreg qui sont colmatées ensemble avant la dépose
- vitesse de dépose, température de la bande, tension dans la bande peuvent être contrôlées pendant le procédé

Procédés de type dépose de fibre

Dates historiques:

1966 → commercialisation des fibres de carbone

1960-1970 → conception des premiers systèmes de procédés automatisés pour la dépose de bandes pre-preg

1971 → Chitwood et Howeth, USA: brevet d'un procédé ATL contrôlé numériquement

1974 → Goldsworthy: brevet d'un procédé AFP

1975 → commercialisation de systèmes de type ATL

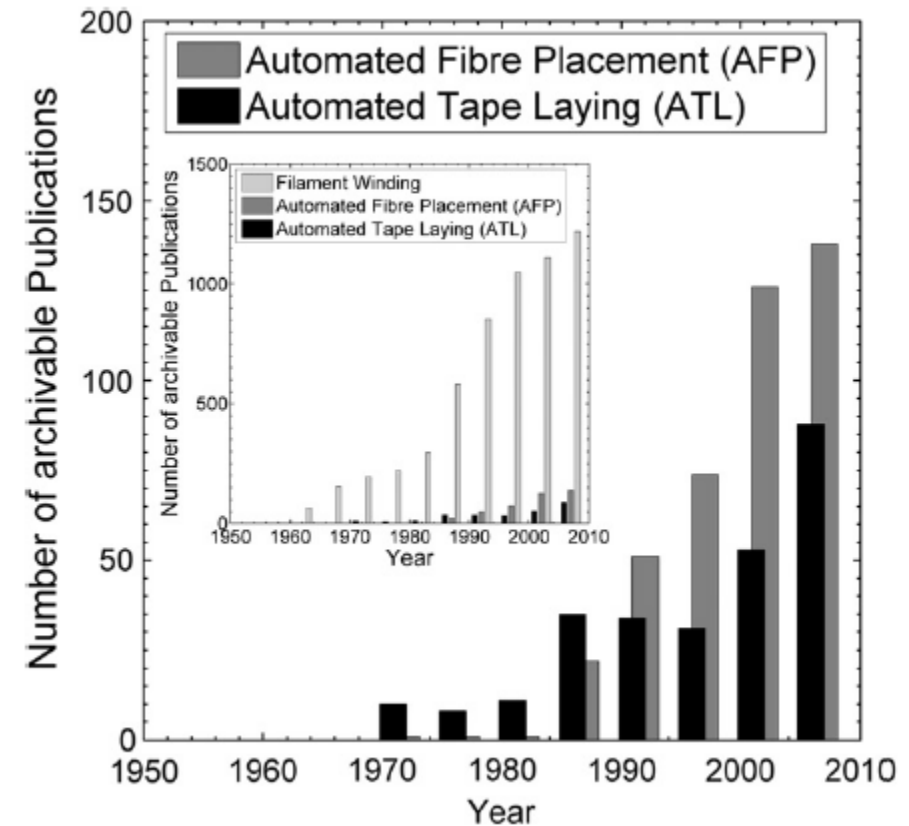
1980 → commercialisation de systèmes de type AFP

Procédés de type dépose de fibre

Evolution historique de l'intérêt de la recherche vers les deux procédés

- Le procédé AFP montre une croissance continue
- Les deux procédés ATL et AFP ont du mal à s'imposer par rapport au *Filament Winding* (a cause du domaine d'application et des coûts associés au procédé)

[1] Dirk H.-J.A. Lukaszewicz, Carwyn Ward, Kevin D. Potter. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future. *Composites: Part B*, 43 (2012) 997–1009.

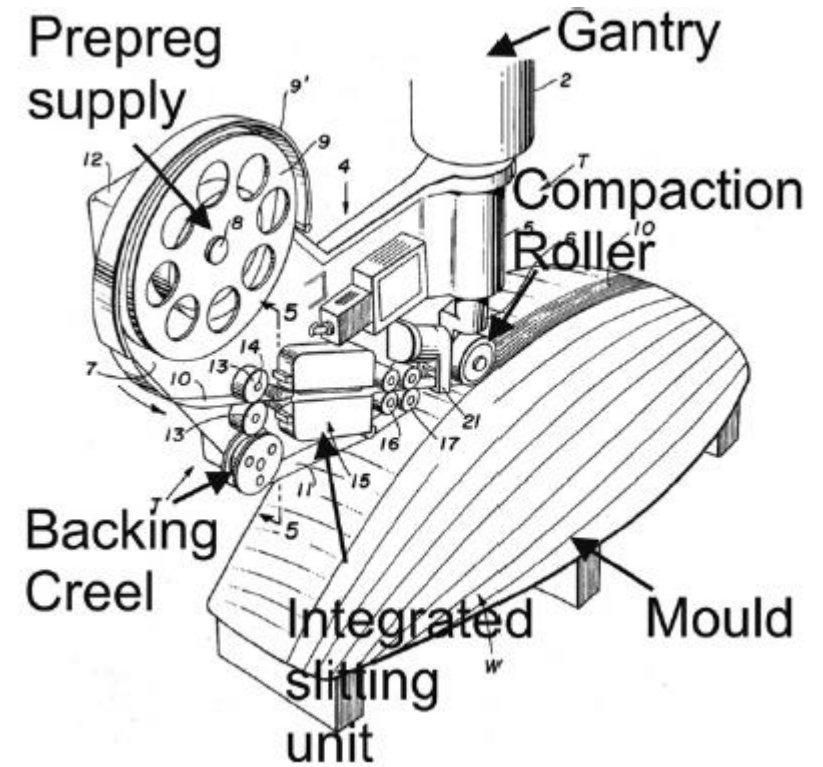


Procédés de type dépose de fibre

Automated Tape Laying (ATL): 1974 Goldsworthy

- Système capable de déposer des bandes de largeur 76 mm sur une surface courbée
- La tête robotisée est capable de tourner
- Le système retire automatiquement le film de protection de la bande prepreg
- Vitesse de dépose: 10-20 m/min
- Adhésion par compression
- Les écarts de matériau pendant le procédé ATL:
 - 30% sur petites pièces
 - 2-4% sur grandes pièces
- Les écarts du procédé classique (drapage manuel): 50-100%
- Ce procédé à été utilisé dans un certain nombre de programmes R&D Aéronautique

[2] Goldsworthy WB. Geodesic path length compensator for composite-tape placement method. Patent US 3810,805, 14th May 1974



Procédés de type dépose de fibre

Automated Tape Laying (ATL)

- 1980 Eaton, Saveriano:
 - Système capable de déposer des bandes à une vitesse de 60 m/min
- 1984 Stone, Mag-Cincinnati:
 - Système capable de déposer des bandes sur surfaces présentant une courbure maximale de 15°
 - Système capable de détecter la surface du moule via ultrasons (Contour Tape Laminating Machine)
- 1986, Meier:
 - Système capable de détecter la surface du moule via le contrôle des forces suivant les axes x, y, z
- ...

Procédés de type dépose de fibre

Automated Tape Laying (ATL)

Limitations du procédé jusqu'à la fin des années '80:

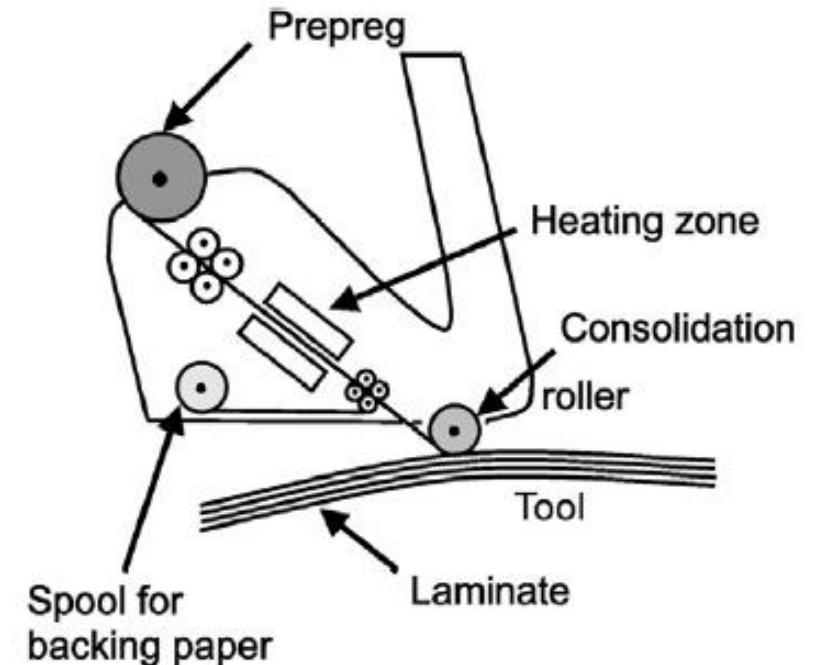
- Fabrication de pièces à géométrie complexe
- Vitesse de dépose
- Alignement des bandes
- Tension dans les bandes → variable en fonction de la géométrie du moule
- Contrôle de la trajectoire d'une bande coupée en fin de course
- Contrôle de la trajectoire d'une bande en début de course
- Contrôle de la pression du rouleau de compactage
- Coûts du système ATL ~ 3,5 M\$

Procédés de type dépose de fibre

Automated Tape Laying (ATL)

Avancées des années `90:

- Introduction d'un système de chauffage des bandes → utile au drapage de pièces à géométrie complexe
- Méthodes de chauffage:
 - 1991 Zaffiro: irradiation
 - 1996 Benda, Stump: aire chaude
- Réduction de la taille des bandes de 150 mm de largeur à 50 mm → utile au drapage de pièces ayant une courbure supérieure à 30°
- Réduction de la vitesse de dépose à 13 m/min
- Introduction d'un système de « cuisson sur place »: chauffage des bandes à 150 °C et dépose à vitesses de 0,06 m/min → solution pas efficace car un post-traitement thermique s'avère toujours nécessaire



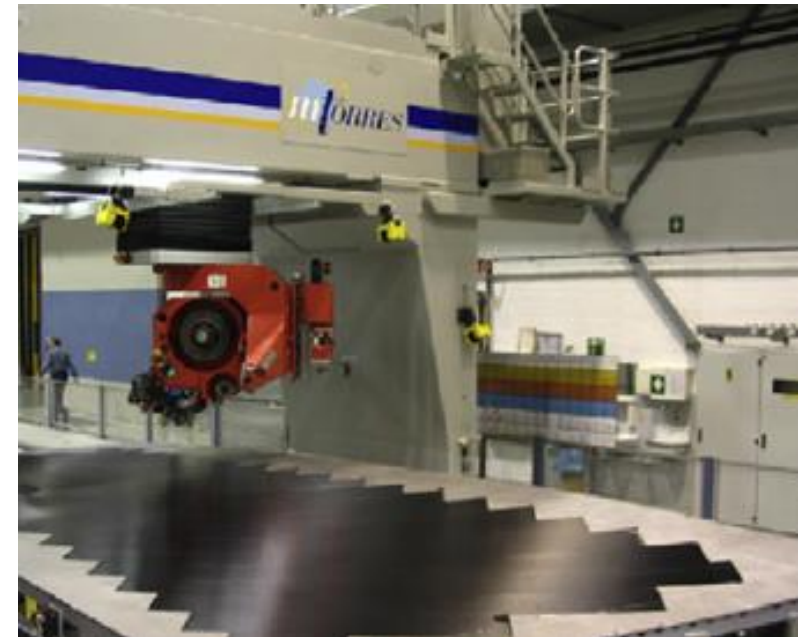
[3] Aström. Manufacturing of polymer composites. London, UK: Chapman & Hall; 1997.

Procédés de type dépose de fibre

Automated Tape Laying (ATL)

Solutions actuelles:

- Largeur des bandes: 75, 150, 300 mm
- Composite prepreg stocké directement dans la tête
- Système de montage sur portique ou sur colonnes verticales
- Ecart de dépose entre deux bandes successives: 0,5-1 mm
- Vitesses de dépose: 5 m/min
- Pression du rouleau: 0,1 MPa (composites thermodurcissable)
- Accélération jusqu'à $0,5 \text{ m/s}^2$



[4] MTorres Disen~os Industriales S. Torres layup – Tape Layer Machine, vol. 2010, 2010.

Procédés de type dépose de fibre

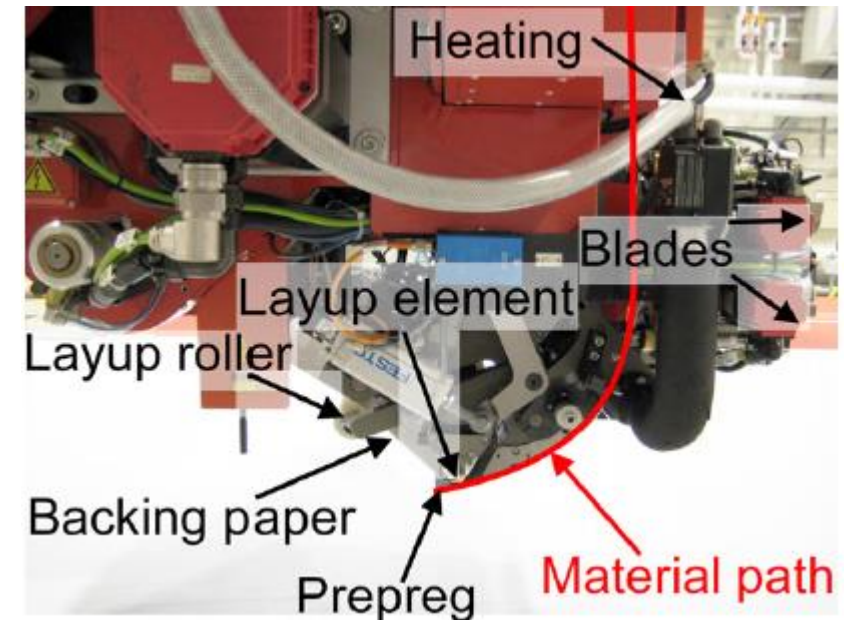
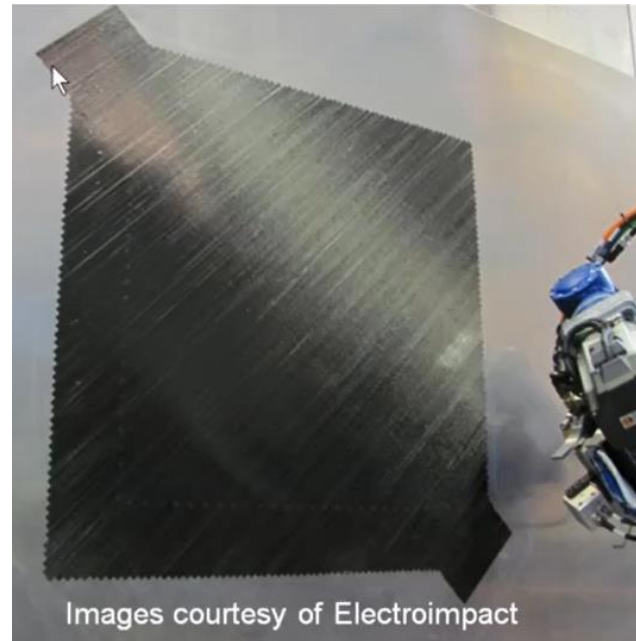
Automated Tape Laying (ATL)

Minimal course length

Définition: distance minimale entre les lames et le point de compactage du rouleau

Utilité: elle représente la limite inférieure de la taille d'un composant à draper

Valeurs: 100-150 mm



Réf. [1]

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Concept fondamental

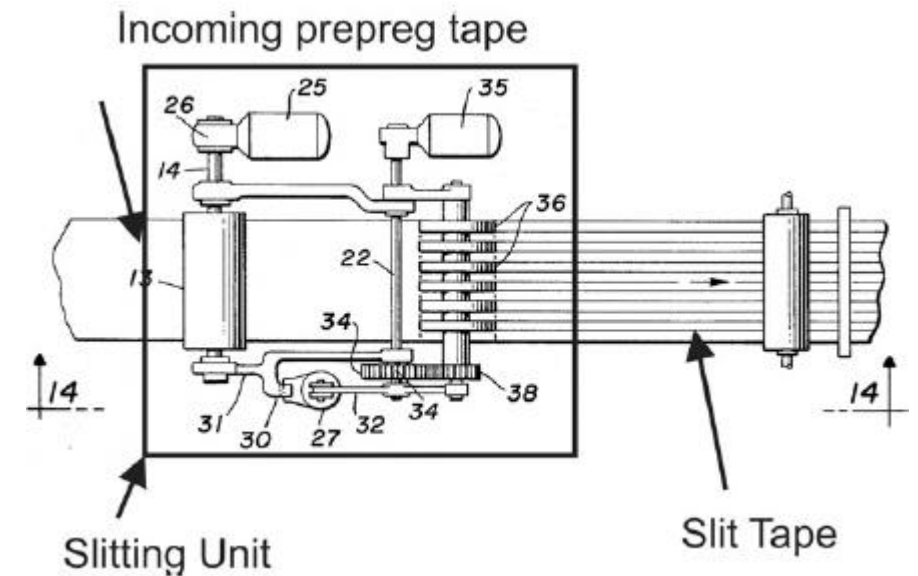
Séparer la bande prepreg en plusieurs bandelettes contrôlés séparément afin de mieux déposer le long d'un chemin courbé

→ L'AFP est capable de draper géométries extrêmement plus complexes par rapport au procédé ATL

Procédé considéré comme une combinaison de:

- Filament Winding
- ATL

Différentes limitations, problématiques et solutions associées au procédé ATL on été immédiatement pris en compte et utilisé dès les premiers prototypes de machines AFP.



Réf. [2]

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Producteurs de machines AFP

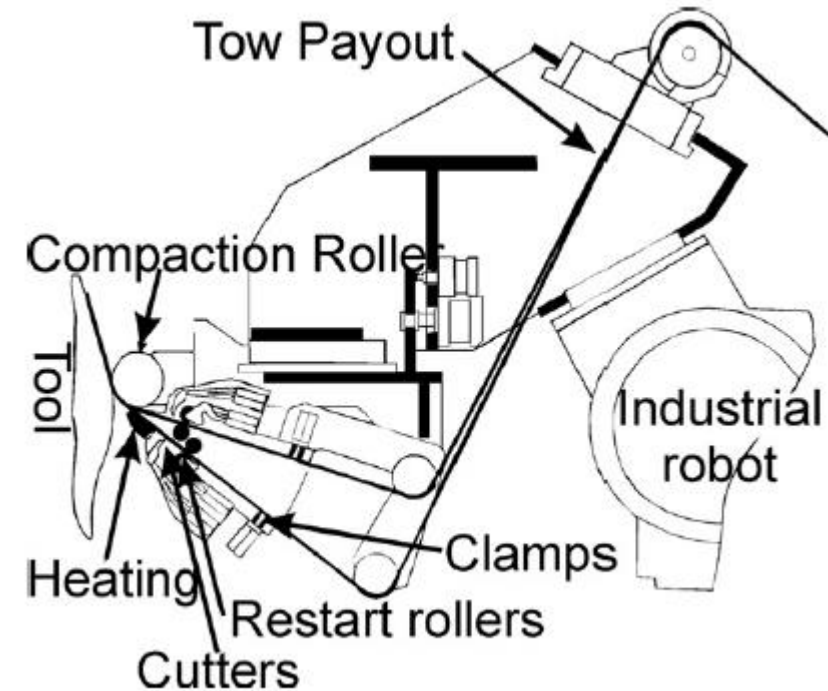
- Automated Dynamics (USA) →
 - Accudyne (USA) →
 - MAGCincinatti (USA) →
 - Coriolis (France) →
 - Electroimpact (USA) →
 - Foster Miller/ATK (USA) →
 - Ingersoll (USA) →
 - Mikrosam (Macedonia) →
 - MTorres (Spain) →
- Ils fournissent leurs systèmes AFP à installer sur des robots et des portiques industriels
- Ils fournissent leurs systèmes AFP avec les robots, portiques ou colonnes d'installation

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Caractéristiques

- Les bandelettes dérivent de bobines séparées et contrôlées séparément
- Contrôle numérique de vitesse de drapage, pression, température et tension des bandelettes
- Vitesse de drapage maximale: 60 m/min
- Accélération: 2 m/s^2
- Largeur des bandelettes: 3,2 mm - 6,4 mm - 12,7 mm
- Nombre maximum de bandelettes à colmater: 32
- Contrôle individuel des bandelettes: arrêt, marche, coupe, vitesse, etc.



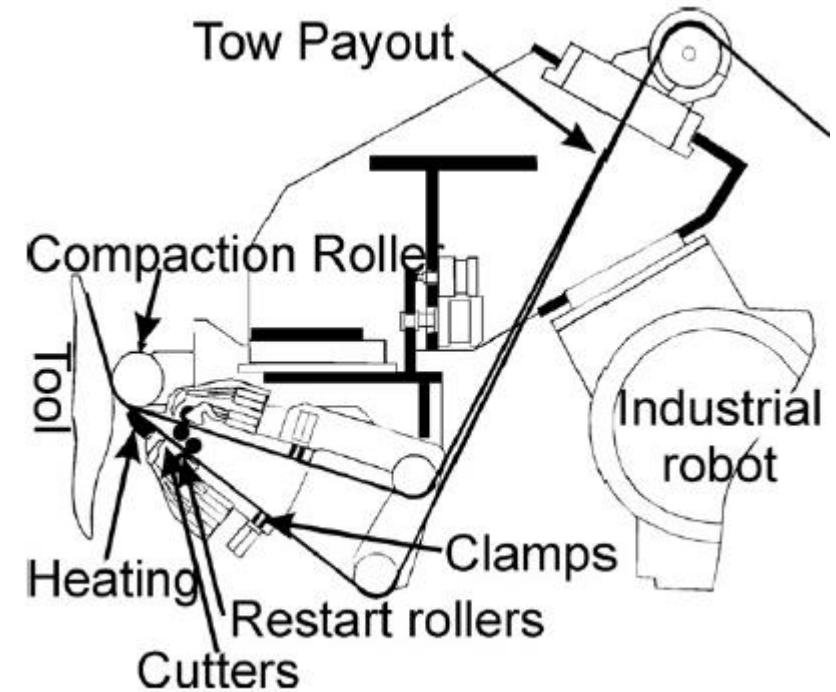
[5] Evans DO. Fiber placement. Cincinnati: Cincinnati Machine; 1997

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Caractéristiques

- Stockage des bandelettes sur la tête du système ou dans réservoirs dédiés
- Rouleau de compactage chauffé pour appliquer une chaleur additionnelle au prepreg
- Systèmes de chauffage des bandes: torches, laser, infrarouges



Réf. [5]

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Problématiques/Limitations

- Présence de défauts liés au procédé
- Longueur minimale de course: 50 mm
- Limitation du rayon du courbure (dans et hors plan)
- Variation du nombre optimale de bandelettes et de leur largeur en fonction de la géométrie
- Contrôle de la trajectoire des bandelettes coupées (début & fin de course) → qualité réduite en fonction de la vitesse de dépose
- Productivité inférieure à celle du procédé ATL: presque la moitié
- Utilisation limitée à prepregs de faible densité surfacique → possible résolution via système de coupure laser

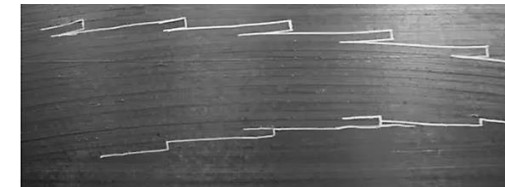
REMARQUE: Différents logiciels de pilotage du procédé sont en cours de développement pour la résolution de certaines de ces problématiques

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Défauts liés au procédé

- *Splicing*: défaut lié au soudage des extrémités des bandes
- *Twist*: Torsion des bandelettes
- *Steering*: défaut lié au rayon de courbure
 - *Wrinkling*, Flambage des bandelettes
 - Détachement des bandelettes
 - Désalignement des bandelettes
- *Gap*: Ecart entre les bandes → augmente avec le steering
- *Tow Wander*: absence de contrôle sur fin/début course de bandes/bandelettes coupés



Tow wander

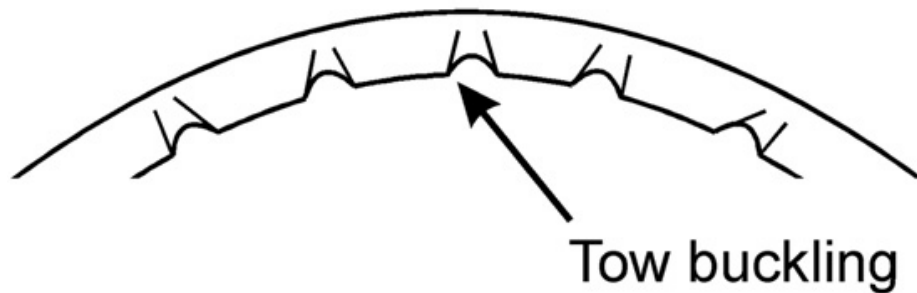


[6] Blom AW, Lopes CS, Kromwijk PJ, Gurdal Z, Camanho PP. A theoretical model to study the influence of tow-drop areas on the stiffness and strength of variable-stiffness laminates. J Compos Mater 2009;43:403–25.

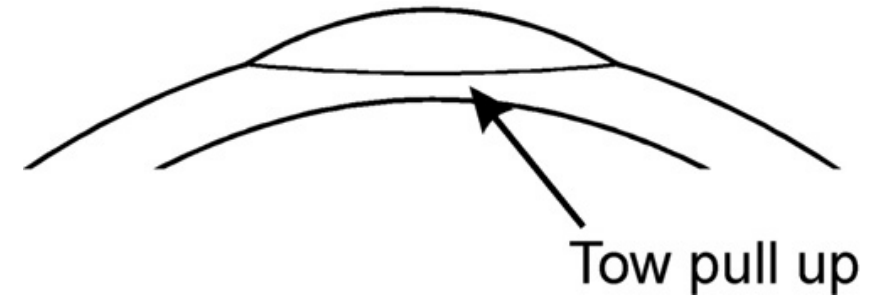
Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

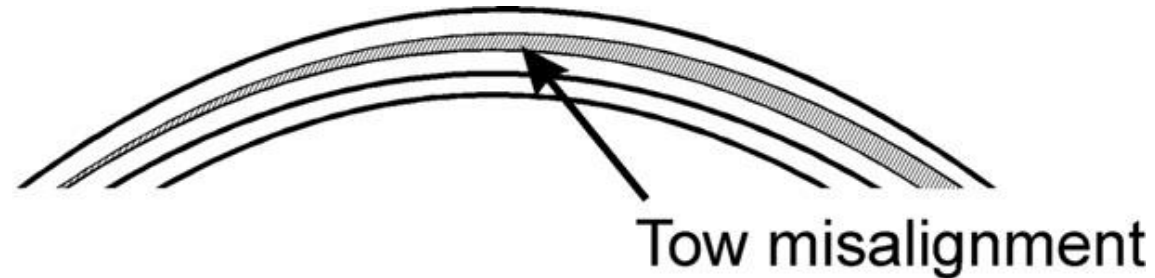
Steering



Flambage à l'intérieur du rayon de courbure à cause des contraintes de compression



Décollement à l'extérieur du rayon de courbure à cause des contraintes de traction

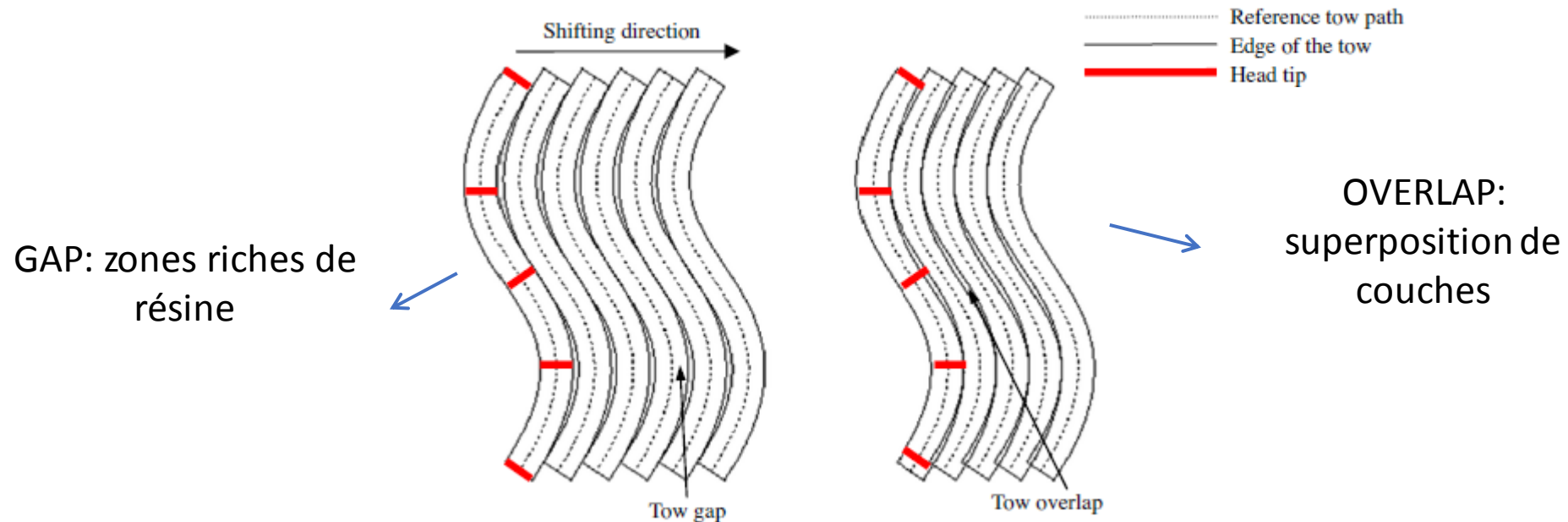


Réf. [6]

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Steering → variation de la largeur locale des bandes en fonction du rayon de courbure



[7] Byung Chul Kim, Kevin Potter, Paul M. Weaver. Continuous tow shearing for manufacturing variable angle tow composites. *Composites: Part A* 43 (2012) 1347–1356.

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Steering → variation de la largeur locale des bandes en fonction du rayon de courbure



[8] K. Chauncey Wu, Brian F. Tatting, Brett H. Smith, Design And Manufacturing Of Tow-Steered Composite Shells Using Fiber Placement. 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 4 - 7 May 2009, Palm Springs, California

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Steering → variation de la largeur locale des bandes en fonction du rayon de courbure



Réf. 8

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Steering → solutions adoptées: TOW DROP/TOW OVERLAP

TOW DROP:

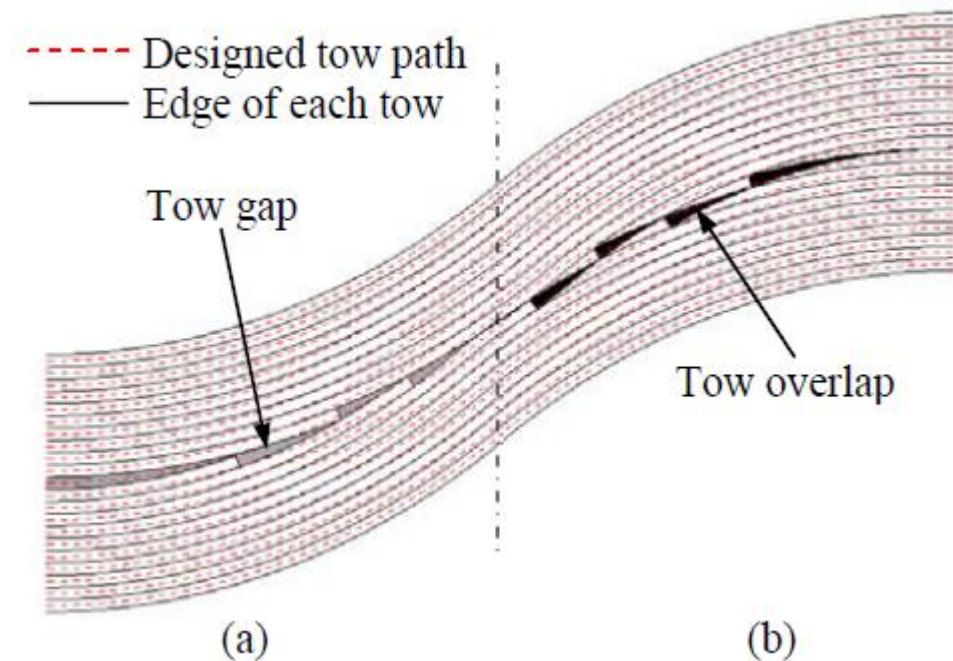
Coupe de la bandelette (externe à la bande) dès que son extrémité latérale externe entre en contact avec la courbe/course d'une bandelette adjacente (appartenant à la bande adjacente)

→ Présence de zones riches de résine/gaps mais de plus petite taille

TOW OVERLAP:

Coupe de la bandelette (externe à la bande) dès que son extrémité latérale interne touche la courbe/course d'une bandelette adjacente (appartenant à la bande adjacente)

→ Présence de zones caractérisées par superposition de couches/overlap mais de plus petite taille



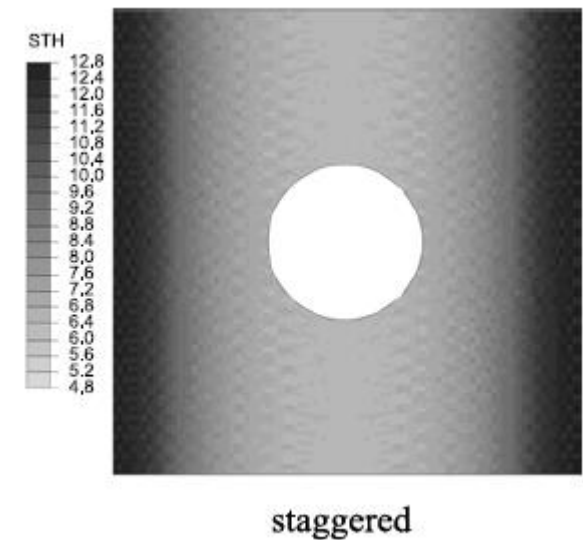
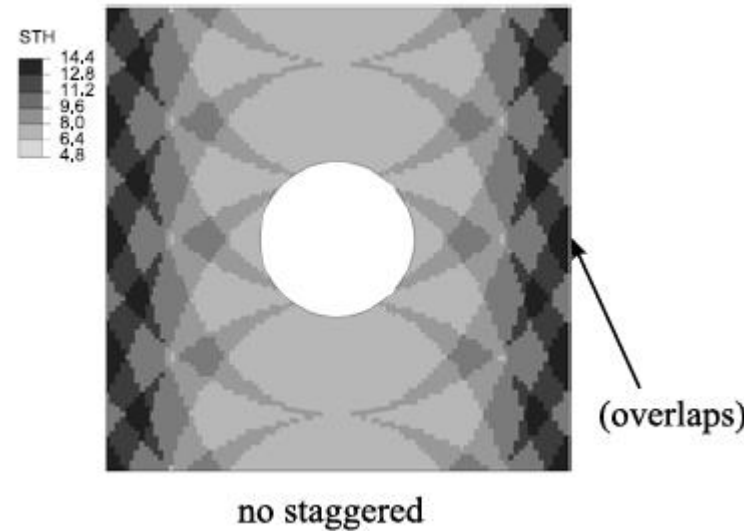
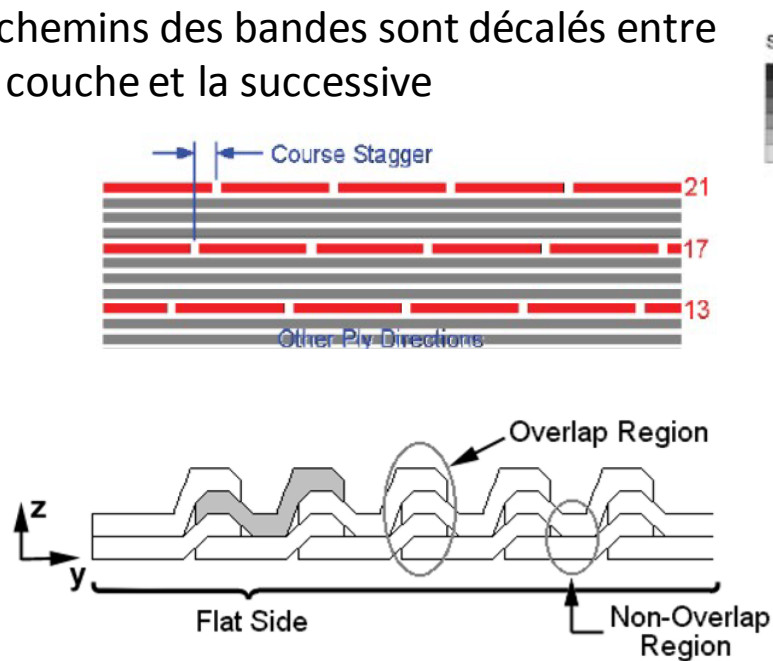
[9] B.C. Kim, K. Hazra, P. Weaver, K. Potter. Limitations of fibre placement techniques for variable angle tow composites and their process-induced defects. 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS.

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Steering → solutions adoptées: SHIFTING/STAGGER

Les chemins des bandes sont décalés entre une couche et la successive



[10] Olben Falcó Salcines. Analysis of process-induced defects on steered-fiber panels for aeronautical applications. PhD Thesis, University of Girona, 2014.

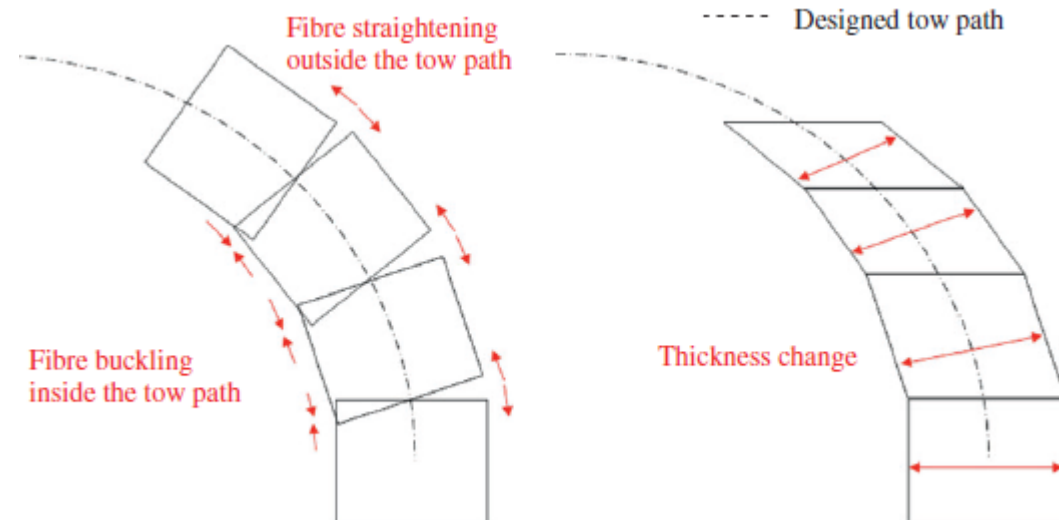
Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Steering → solutions adoptées: CONTINUOUS TOW SHEARING (CTS)

AFP Classique: la tête du système AFP tourne autour de l'axe vertical pour suivre le chemin courbé des bandes (dans le plan)

AFP avec CTS: les bandes sont soumises à glissement que varie de manière continue → avec un pilotage correct de la tête on peut éviter aussi bien le *gap* que les *overlaps*

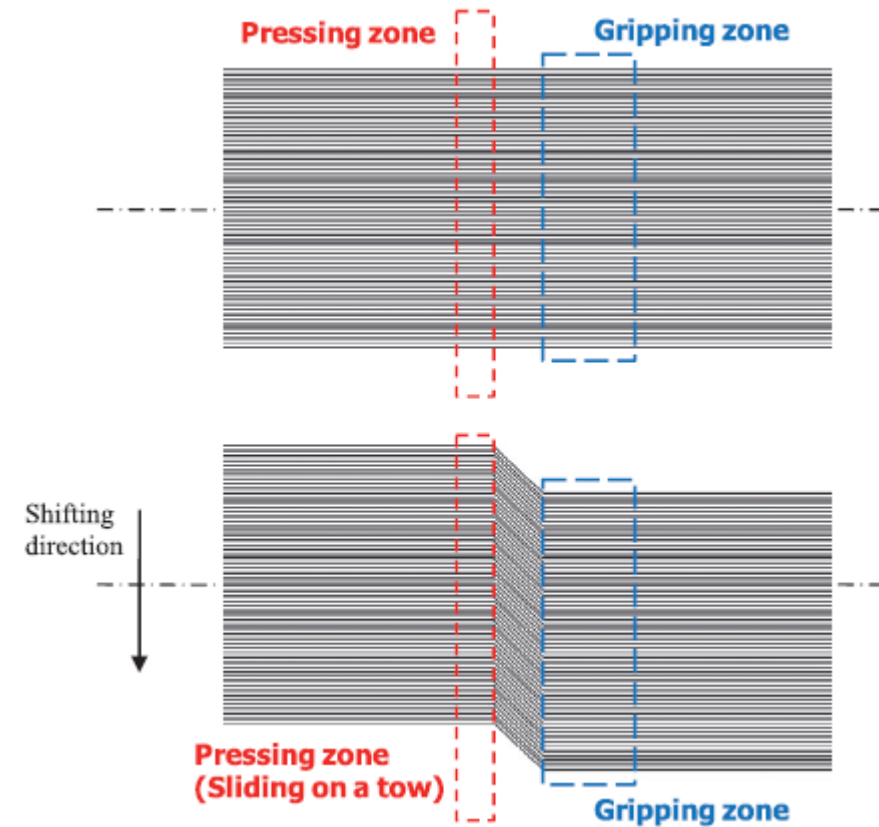
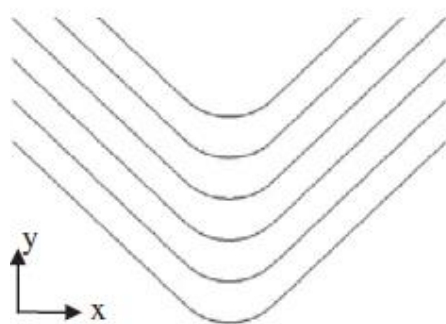
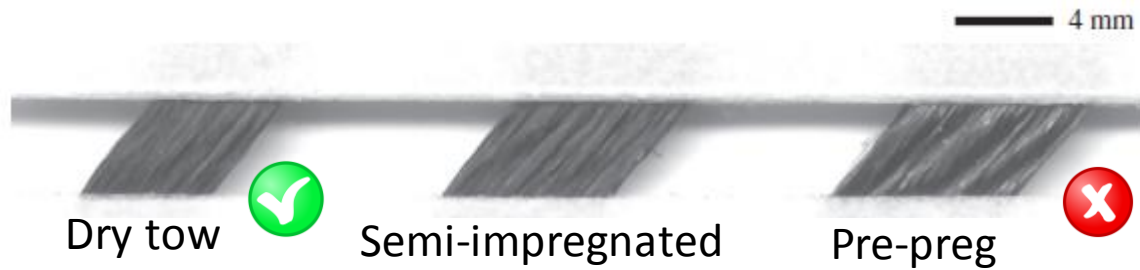


[11] B.C. Kim, K. Potter, P. Weaver. Continuous tow shearing for manufacturing variable angle tow composites. *Composites: Part A* 43 (2012) 1347–1356.

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

CONTINUOUS TOW SHEARING (CTS)






Réf. 11

Procédés de type dépose de fibre

Automated Fibre Placement (AFP)

Effet des défauts sur les propriétés du matériau résultant

		Gap	Overlap	Half Gap/Overlap	Twisted Tow
Tension		—	—	↓	↑
Compression		—	↑	—	—
In-Plane Shear	Length	—	—	↓	↓
	Width	↑	↓	↓	↓
OHT		—	—	—	
OHC	Length	↑	↑	↑	
	Width	↓	↓	↓	

 ≥ 3% increase (up to 13%)
 ±3% variation
 ≥ 3% decrease (up to 12%)

OHT: open-hole tension
OHC: open-hole compression

[12] Croft K, Lessard L, Pasini D, Hojjati M, Chen J, Yousefpour A. Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates. *Compos Part A – Appl Sci Manuf* 2011;42:484–91.

Le processus de conception des VAT

Etat de l'art: avancées et limitations

- Utilisation de paramètres de Tsai et Pagano et des paramètres de lamination pour décrire le comportement du matériau → ces paramètres ne sont pas des invariants tensoriels
- Utilisation de fonctions (linéaires, quadratiques, paramétriques, etc.) pour représenter le chemin des bandes → les fonctions linéaires et quadratiques limitent considérablement le domaine de conception
- Utilisation d'empilements standard (symétriques, équilibrés, etc.) → limitation du domaine de conception
- Absence d'approches multi-échelle pour la conception/optimisation de stratifiés VAT
- Manque de travaux de recherche sur le développement de formulations mathématiques adaptées pour la prise en compte des contraintes technologiques du procédé (AFP, CTS, ATL)
- Le comportement à rupture et la tenue au dommage des VAT reste un problème ouvert

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

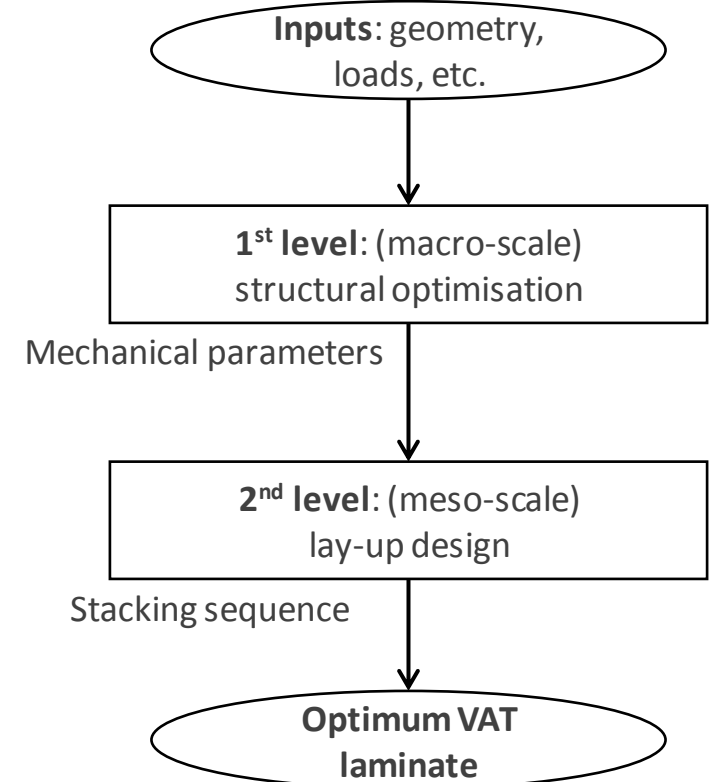
Difficultés

- Concevoir en même temps le matériau et la structure (anisotropes)
- Variation locale des propriétés mécaniques
- Problème multi-échelle (mésos-macro)
- Nature différent des variables de conception
- Nombre important de variables de conception



[13] M. Montemurro, A. Catapano. Ch: A new paradigm for the optimum design of variable angle tow laminates. In: Variational analysis and aerospace engineering: mathematical challenges for the aerospace of the future. Springer optimization and its applications, 1st Ed. vol. 116. Springer International Publishing; 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-45680-5>.

[14] M. Montemurro, A. Catapano. On the effective integration of manufacturability constraints within the multi-scale methodology for designing variable angle-tow laminates. *Composite Structures* , 161: 145-159, 2017

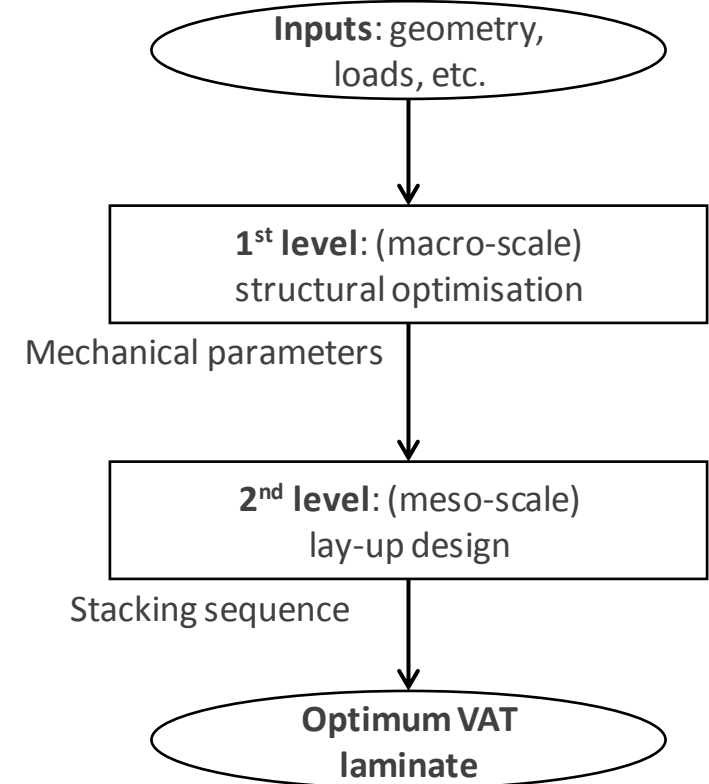


Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

1^{ère} étape (échelle macroscopique): détermination de la distribution spatiale des paramètres mécaniques de la structure (le stratifié est modélisé comme une *plaque anisotrope homogène équivalente*)

2^{ème} étape (échelle mésoscopique): détermination de l'empilement optimale (i.e. la trajectoire optimale des bandes dans chaque pli) satisfaisant la distribution des paramètres mécaniques issus de l'étape 1 de la stratégie



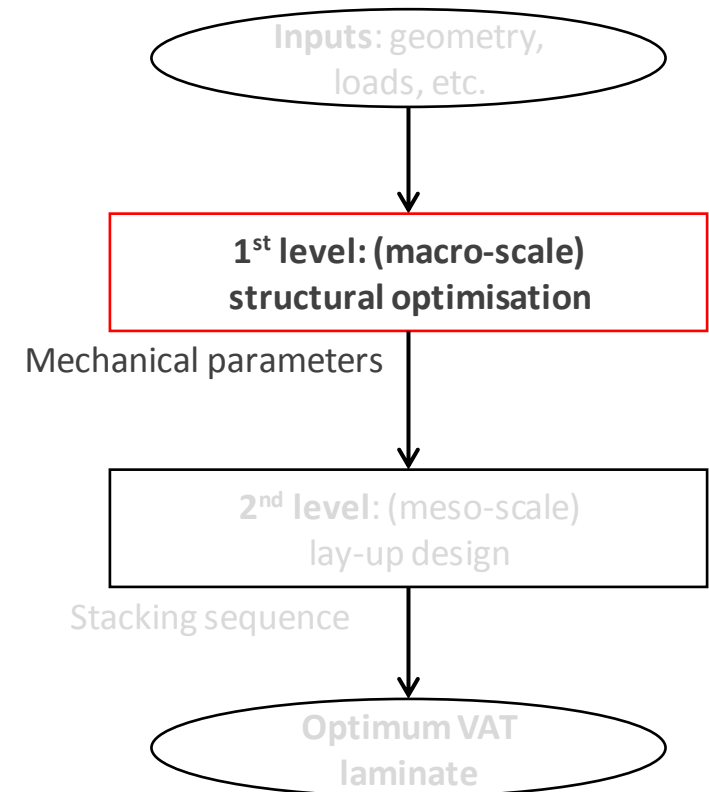
Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

1^{ère} étape (échelle macroscopique): caractéristiques principales

- Les stratifiés sont considérés orthotropes et quasi-homogènes (en tout point de la structure)
- Le cisaillement hors-plan est pris en compte (théorie FSTD)
- La variation ponctuelle des paramètres mécaniques (i.e. les *paramètres polaires*) est exprimée à l'aide de hyper-surface de type B-spline et/ou NURBS

→ *Strong convex hull property*: les contraintes d'optimisation imposées sur les paramètres polaires sont vérifiées que sur les points du *réseau de contrôle*



Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

1^{ère} étape (échelle macroscopique): les paramètres polaires, Verchery 1979

Représentation d'un tenseur d'ordre 4 du type de l'élasticité

$$L_{1111} = T_0 + 2T_1 + R_0 \cos 4\Phi_0 + 4R_1 \cos 2\Phi_1;$$

$$L_{1112} = R_0 \sin 4\Phi_0 + 2R_1 \sin 2\Phi_1;$$

$$L_{1122} = -T_0 + 2T_1 - R_0 \cos 4\Phi_0;$$

$$L_{1212} = T_0 - R_0 \cos 4\Phi_0;$$

$$L_{2212} = -R_0 \sin 4\Phi_0 + 2R_1 \sin 2\Phi_1;$$

$$L_{2222} = T_0 + 2T_1 + R_0 \cos 4\Phi_0 - 4R_1 \cos 2\Phi_1.$$

INVARIANTS (5)

T_0, T_1 : modules isotropes

R_0, R_1 : modules anisotropes

$\phi_0 - \phi_1$: différence des angles polaires

1) $\Phi_0 - \Phi_1 = K \pi/4 \rightarrow$ ordinary orthotropy



2) $R_0 = 0 \rightarrow$ special orthotropy



3) $R_1 = 0 \rightarrow$ square symmetry



4) $R_0 = R_1 = 0 \rightarrow$ isotropy



Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

1^{ère} étape (échelle macroscopique): les paramètres polaires, Verchery 1979

Matrice de rigidité réduite du matériau de base (bandelette)

$$Q_{xx} = T_0 + 2T_1 + R_0 \cos 4(\Phi_0 + \delta_k) + 4R_1 \cos 2(\Phi_1 + \delta_k),$$

$$Q_{xy} = -T_0 + 2T_1 - R_0 \cos 4(\Phi_0 + \delta_k),$$

$$Q_{xs} = R_0 \sin 4(\Phi_0 + \delta_k) + 2R_1 \sin 2(\Phi_1 + \delta_k),$$

$$Q_{yy} = T_0 + 2T_1 + R_0 \cos 4(\Phi_0 + \delta_k) - 4R_1 \cos 2(\Phi_1 + \delta_k),$$

$$Q_{ys} = -R_0 \sin 4(\Phi_0 + \delta_k) + 2R_1 \sin 2(\Phi_1 + \delta_k),$$

$$Q_{ss} = T_0 - R_0 \cos 4(\Phi_0 + \delta_k),$$

Tenseur d'ordre
4 du type de
l'élasticité

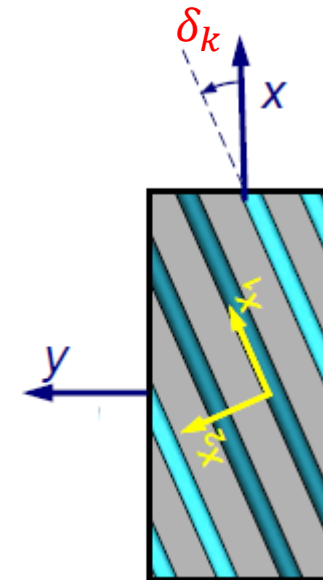
Matrice de rigidité (cisaillement) hors-plan du matériau de base

$$\hat{Q}_{qq} = T + R \cos 2(\Phi - \delta_k),$$

$$\hat{Q}_{qr} = R \sin 2(\Phi - \delta_k),$$

$$\hat{Q}_{rr} = T - R \cos 2(\Phi - \delta_k).$$

Tenseur d'ordre 2
symétrique



Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

1^{ère} étape (échelle macroscopique): Loi de comportement du stratifié dans le cadre de la FSDT

$$\begin{Bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\epsilon_0\} \\ \{\chi_0\} \end{Bmatrix},$$

$$\{F\} = [H]\{\gamma_0\},$$

Hypothèses de la FSDT:

- Segments normaux au plan moyen de la plaque restent droits après déformation
- L'épaisseur de la plaque ne change pas après déformation

REMARQUE:

- Forme classique de [H]: les contraintes de cisaillement sont constantes dans l'épaisseur du pli
- Formes modifiées de [H]:
 - Variation quadratique des contraintes de cisaillement
 - Le cisaillement est nul sur les faces externes du stratifié

[15] M. Montemurro. An extension of the polar method to the First-order Shear Deformation Theory of laminates. *Composite Structures* 127: 328-339, 2015.

[16] M. Montemurro. Corrigendum to "An extension of the polar method to the First-order Shear Deformation Theory of laminates"[Compos. Struct. 127 (2015) 328-339]. *Composite Structures* 131: 1143-1144, 2015.

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

1^{ère} étape (échelle macroscopique): Matrices de rigidité du stratifié

$$[A^*] = \frac{1}{h} [A],$$

$$[B^*] = \frac{2}{h^2} [B],$$

$$[D^*] = \frac{12}{h^3} [D],$$

$$[H^*] = \begin{cases} \frac{1}{h} [H] & \text{(basic),} \\ \frac{12}{5h} [H] & \text{(modified).} \end{cases}$$

$$[C_1^*] = [A^*] - [D^*],$$

h épaisseur du stratifié
 n nombre de pli

$$T_{0B^*} = 0,$$

$$T_{1B^*} = 0,$$

$$R_{0B^*} e^{i4\Phi_{0B^*}} = \frac{1}{n^2} R_0 e^{i4\Phi_0} \sum_{k=1}^n b_k e^{i4\delta_k},$$

$$R_{1B^*} e^{i2\Phi_{1B^*}} = \frac{1}{n^2} R_1 e^{i2\Phi_1} \sum_{k=1}^n b_k e^{i2\delta_k},$$

$$T_{0A^*} = T_0,$$

$$T_{1A^*} = T_1,$$

$$R_{0A^*} e^{i4\Phi_{0A^*}} = \frac{1}{n} R_0 e^{i4\Phi_0} \sum_{k=1}^n e^{i4\delta_k},$$

$$R_{1A^*} e^{i2\Phi_{1A^*}} = \frac{1}{n} R_1 e^{i2\Phi_1} \sum_{k=1}^n e^{i2\delta_k},$$

$$T_{0D^*} = T_0,$$

$$T_{1D^*} = T_1,$$

$$R_{0D^*} e^{i4\Phi_{0D^*}} = \frac{1}{n^3} R_0 e^{i4\Phi_0} \sum_{k=1}^n d_k e^{i4\delta_k},$$

$$R_{1D^*} e^{i2\Phi_{1D^*}} = \frac{1}{n^3} R_1 e^{i2\Phi_1} \sum_{k=1}^n d_k e^{i2\delta_k},$$

$$T_{H^*} = \begin{cases} T & \text{(basic),} \\ 2T & \text{(modified),} \end{cases}$$

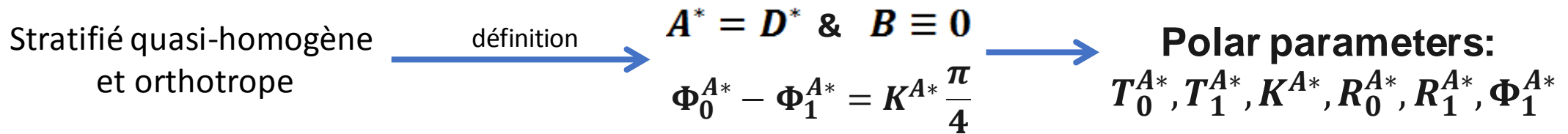
$$R_{H^*} e^{i2\Phi_{H^*}} = \begin{cases} \frac{1}{n} R e^{i2\Phi} \sum_{k=1}^n e^{-i2\delta_k} & \text{(basic),} \\ \frac{1}{n^3} R e^{i2\Phi} \sum_{k=1}^n (3n^2 - d_k) e^{-i2\delta_k} & \text{(modified),} \end{cases}$$

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

1^{ère} étape (échelle macroscopique): Résultats principaux de la FSDT

$$R_{H^*} e^{i2\Phi_{H^*}} = \begin{cases} \frac{1}{n} R e^{i2\Phi} n \frac{R_{1A^*}}{R_1} e^{i2(\Phi_1 - \Phi_{1A^*})} = R_{1A^*} \frac{R}{R_1} e^{i2(\Phi + \Phi_1 - \Phi_{1A^*})} & \text{(basic),} \\ \frac{1}{n^3} R e^{i2\Phi} \frac{n^3}{R_1} e^{i2\Phi_1} (3R_{1A^*} e^{-i2\Phi_{1A^*}} - R_{1D^*} e^{-i2\Phi_{1D^*}}) \\ = \frac{R}{R_1} e^{i2(\Phi + \Phi_1)} (3R_{1A^*} e^{-i2\Phi_{1A^*}} - R_{1D^*} e^{-i2\Phi_{1D^*}}) & \text{(modified).} \end{cases}$$



Définition:

$$R_{0K}^{A^*} = (-1)^{K^{A^*}} R_0^{A^*}$$

Variables indépendantes pour la conception du matériau d'un stratifié quasi-homogène et orthotrope:

$$R_{0K}^{A^*}, R_1^{A^*}, \Phi_1^{A^*}$$

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

1^{ère} étape (échelle macroscopique): Les hyper-surfaces de type B-spline

$$R_{0K}^{A*}(\xi, \gamma) = \sum_{i=0}^{n_c} \sum_{j=0}^{m_c} N_{i,p}(\xi) N_{j,q}(\gamma) R_{0K}^{A*(i,j)} \quad (n_c + 1) \times (m_c + 1) : \text{overall number of control points}$$

$$R_1^{A*}(\xi, \gamma) = \sum_{i=0}^{n_c} \sum_{j=0}^{m_c} N_{i,p}(\xi) N_{j,q}(\gamma) R_1^{A*(i,j)} \quad \xi, \gamma \in [0,1]: \text{dimensionless parameters of the B-spline hyper-surface}$$

$$\Phi_1^{A*}(\xi, \gamma) = \sum_{i=0}^{n_c} \sum_{j=0}^{m_c} N_{i,p}(\xi) N_{j,q}(\gamma) \Phi_1^{A*(i,j)} \quad p, q: \text{degrees of the B-spline basis functions along } \xi \text{ and } \gamma \text{ directions, respectively}$$

$$\{R_{0K}^{A*(i,j)}, R_1^{A*(i,j)}, \Phi_1^{A*(i,j)}\}: \text{polar parameters at each control point}$$

$$\Xi = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, \Xi_{p+1}, \dots, \Xi_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right\}, \quad r = n_c + p + 1$$

$$\Gamma = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, \Gamma_{q+1}, \dots, \Gamma_{s-q-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1} \right\}, \quad s = m_c + q + 1$$

Knot vectors

Modifications pour prendre en compte les contraintes de fabrication à l'échelle macroscopique



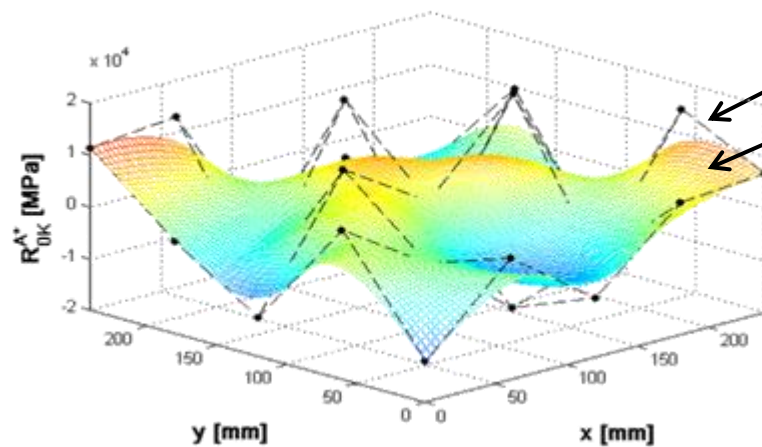
$$R_{0K}^{A*}(\xi, \gamma) = \text{const.}$$

$$R_1^{A*}(\xi, \gamma) = \text{const.}$$

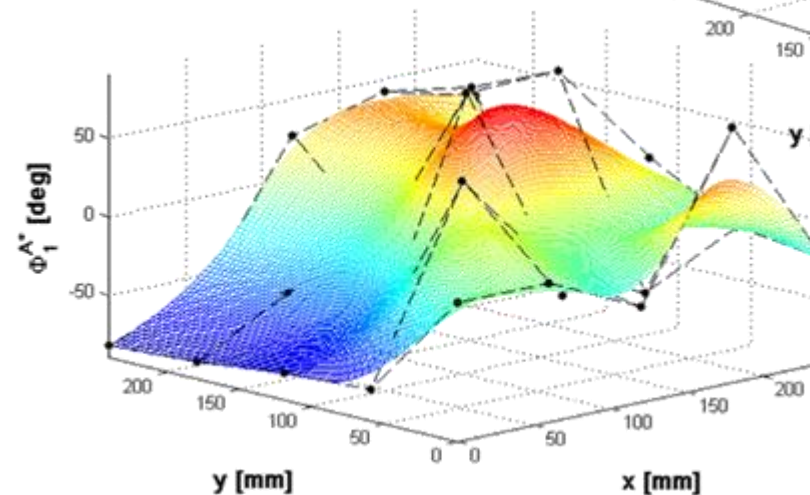
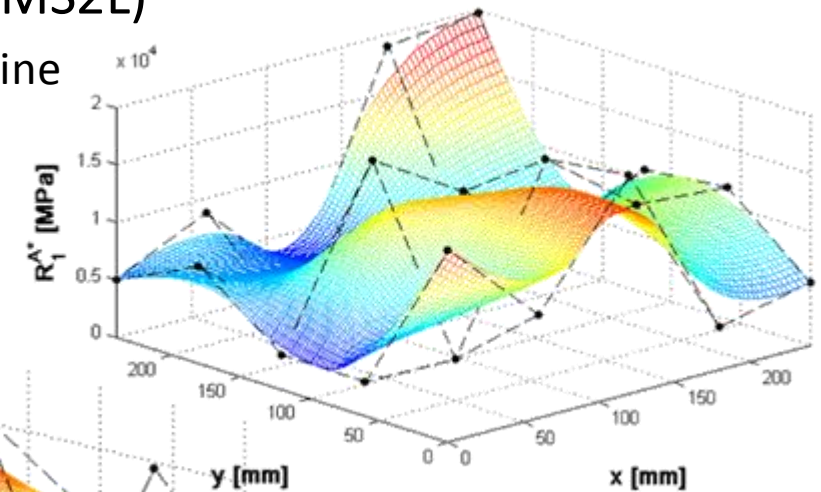
Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

1^{ère} étape (échelle macroscopique): Les hyper-surfaces de type B-spline



Control net
B-spline surface



Avantages:

- Réduction du nombre de variables de conception
- Stratégie efficace
- Convergence dans temps réduits

Rappel: les contraintes d'optimisation doivent être vérifiées que dans les points du réseau de contrôle

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

1^{ère} étape (échelle macroscopique): Formulation mathématique des contraintes de fabrication, Réf. [14]

$$g_1(\mathbf{x}) = r_{adm} - r_{min} \leq 0 ,$$

$$r_{min} = \min_{(x,y)} r(x,y) ,$$

$$r(x,y) = (\mathbf{t} \cdot \nabla \Phi_1^{A*})^{-1} , \quad \begin{matrix} x \in [0, a] , \\ y \in [0, b] . \end{matrix}$$

$$\mathbf{t} = \{ \cos \Phi_1^{A*} , \sin \Phi_1^{A*} \} ,$$

$$\nabla \Phi_1^{A*} = \left\{ \frac{1}{a} \frac{\partial \Phi_1^{A*}}{\partial \xi} , \frac{1}{b} \frac{\partial \Phi_1^{A*}}{\partial \gamma} \right\} .$$

a, b largeur de la plaque suivant les axes x et y , respectivement

r_{adm} rayon de courbure minimum admissible pour la bande et imposé par le procédé AFP/CTS

Contraintes de faisabilité à imposer sur les paramètres polaires (*Vannucci, 2013*)

$$g_2(\mathbf{x}) = 2 \left(\frac{R_1^{A*}}{R_1} \right)^2 - 1 - \frac{R_{OK}^{A*}}{R_0} \leq 0$$

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

1^{ère} étape (échelle macroscopique): Formulation du problème d'optimisation

Vecteur des variables de conception

$$\mathbf{x} = \left\{ \Phi_1^{A^*(0,0)}, \dots, \Phi_1^{A^*(n_p, m_p)}, R_{0K}^{A^*}, R_1^{A^*} \right\} .$$

Problème d'optimisation à l'échelle macroscopique (exemple de problème de maximisation de la charge critique de flambage):

$$\begin{array}{l} \min_{\mathbf{x}} \quad -\lambda(\mathbf{x}) \\ \text{subject to:} \\ g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad (i = 1, 2) \end{array}$$

Nombre total de variables de conception:

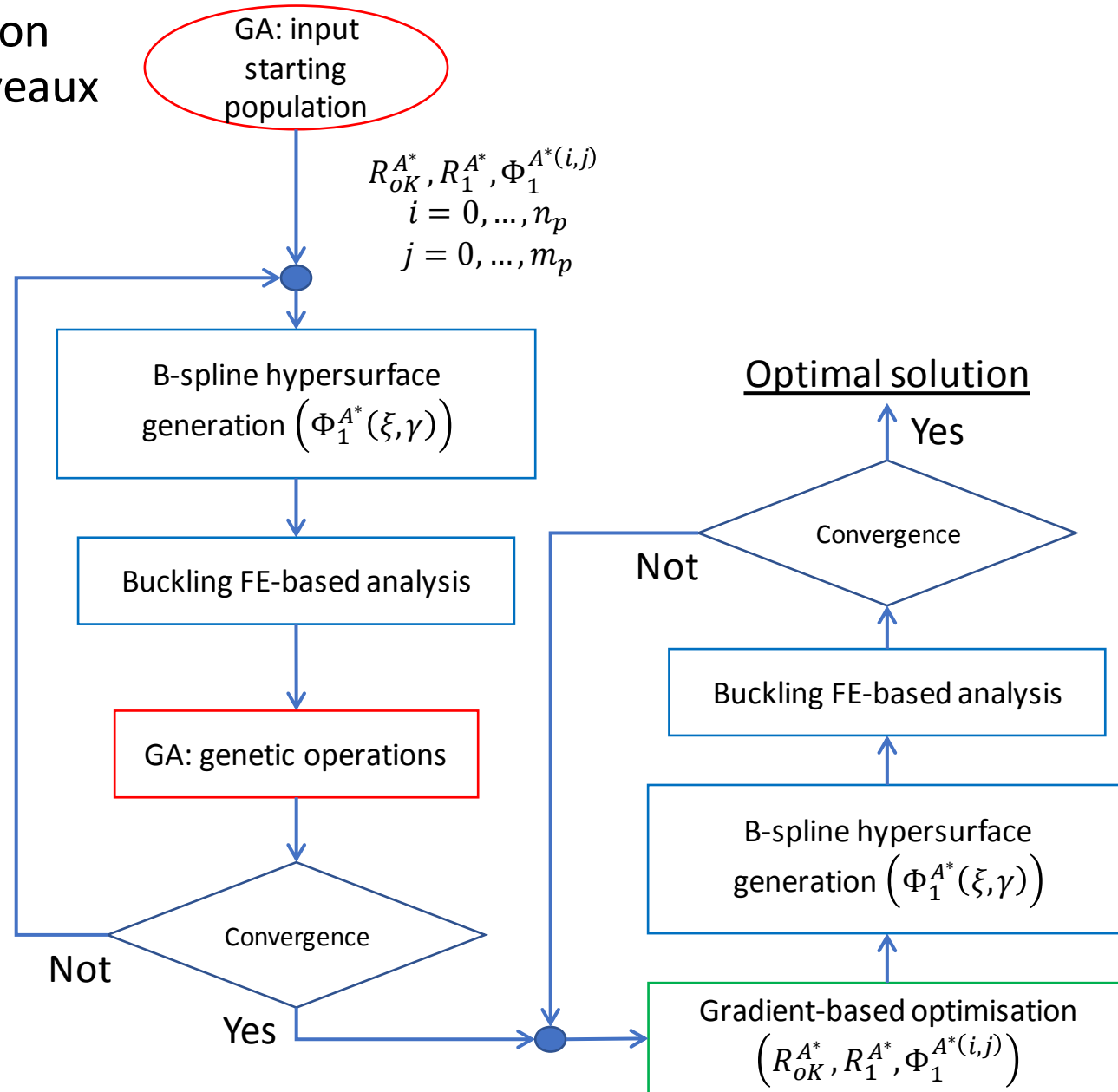
$$(n_c + 1) \times (m_c + 1) + 2$$

Nombre total de contraintes d'optimisation:

$$2$$

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

1^{ère} étape (échelle macroscopique): La maquette numérique



Fortran

Ansys APDL

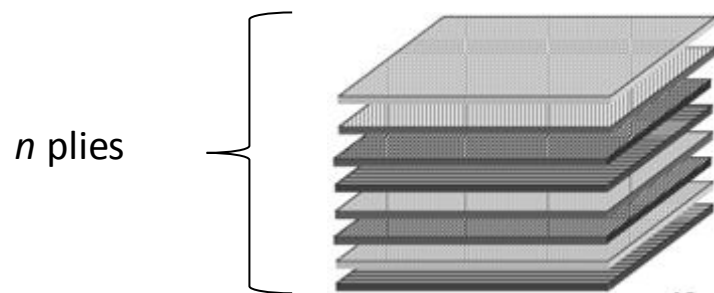
Matlab

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

2^{ème} étape (échelle mésoscopique): caractéristiques principales

- Représentation mathématique de la variation locale de l'orientation des bandes via surfaces B-spline (une pour chaque couche)
- Reconstruction de la trajectoire des bandes: analogie avec les problème des lignes de courant (mécanique des fluides)



$$\delta_k(\xi, \gamma) \quad k = 1, \dots, n$$

$$\delta_k(\xi, \gamma) = \sum_{i=0}^{n_c} \sum_{j=0}^{m_c} N_{i,p}(\xi) N_{j,q}(\gamma) \delta_k^{(i,j)}$$

$\delta_k^{(i,j)}$: angle d'orientation d'une bande à chaque point de contrôle du k-ème pli

$$\delta_k^{(i,j)} = \Phi_1^{A^*(i,j)} + \delta_k(\xi_0, \gamma_0) - \Phi_1^{A^*(\xi_0, \gamma_0)}$$

La seule inconnue qui représente aussi la seule **variable de conception** (pour chaque pli)!!!

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

2^{ème} étape (échelle mésoscopique): formulation du problème d'optimisation

Objective: déterminer (au moins) un empilement satisfaisant les paramètres matériaux et géométriques issus de l'étape 1 → **dans l'espace des paramètres polaires le problème est formulé sous forme d'un problème de minimisation sans contraintes**

$$\min_{\delta_k(\xi_0, \gamma_0)} I(\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) \quad k = 1, \dots, n . \quad I(\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) = \sum_{i=1}^6 f_i(\delta_k(\xi_0, \gamma_0))$$

$$K^{A^*(opt)} = \begin{cases} 1 & \text{if } R_{OK}^{A^*(opt)} < 0, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$f_1(\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) = \left[\frac{\Phi_0^{A^*}(\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) - \Phi_1^{A^*}(\delta_k(\xi_0, \gamma_0))}{\pi/4} - K^{A^*(opt)} \right]^2, \quad f_4(\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) = \left[\frac{\Phi_1^{A^*}(\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) - \Phi_1^{A^*(opt)}(\xi_0, \gamma_0)}{\pi/4} \right]^2,$$

$$f_2(\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) = \left[\frac{R_0^{A^*}(\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) - R_0^{A^*(opt)}}{R_0} \right]^2, \quad f_5(\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) = \left[\frac{\| [C] (\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) \|}{\| [Q] \|} \right]^2,$$

$$f_3(\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) = \left[\frac{R_1^{A^*}(\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) - R_1^{A^*(opt)}}{R_1} \right]^2, \quad f_6(\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) = \left[\frac{\| [B^*] (\delta_k(\xi_0, \gamma_0)) \|}{\| [Q] \|} \right]^2,$$

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

2^{ème} étape (échelle mésoscopique): les solutions quasi-triviales (QT)

Les solutions QT sont solutions exactes par rapport au requis de quasi-homogénéité indépendamment de l'angle d'orientation de chaque pli

La démarche

- On fixe le nombre de couches n
- On fixe le nombre de groupes saturés n_g (i.e. le nombre de orientations possibles dans la séquence)
- Check sur toutes les permutations de la position de chaque groupe saturé qui satisfont la condition de quasi-homogénéité

$$\sum_{k=1}^n b_k = 0 \Leftrightarrow \sum_{j=1}^{n_g} \sum_{k \in j} b_k = 0$$
$$\sum_{k=1}^n c_k = 0 \Leftrightarrow \sum_{j=1}^{n_g} \sum_{k \in j} c_k = 0$$

avec:

$$b_k = 2k - n - 1$$
$$c_k = 12k(n + 1) - 12k^2 - 2n^2 - 6n - 4$$

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

2^{ème} étape (échelle mésoscopique): les solutions quasi-triviales (QT)

Exemple: $n = 18, n_g = 3$

Solutions

3 groupes avec orientations arbitraires "0", "1", "2"

1	0 1 2 0 1 2 2 2 1 1 0 0 1 0 0 2 2 1
2	0 1 2 2 0 1 1 2 0 1 2 0 2 0 1 0 1 2
3	0 1 2 2 0 1 1 2 0 2 1 0 1 0 2 0 2 1
4	0 1 2 2 1 0 2 0 1 1 0 2 1 2 0 0 2 1
5	0 1 1 2 2 2 0 0 2 1 0 0 1 1 1 2 2 0

Ils existent que 5 solutions QT pour ce cas. Aucune de ces solutions est symétrique mais le tenseur de découplage membrane/flexion est identiquement nul.

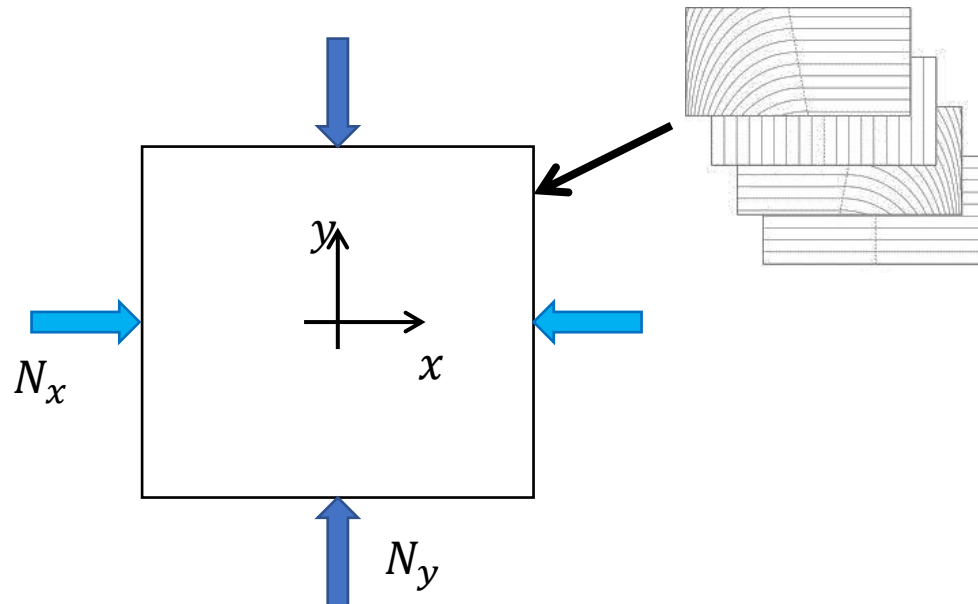
Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

Cas d'étude: maximisation de la charge critique de flambage d'un stratifié VAT

Contraintes d'optimisation:

- Contraintes de faisabilité sur les variables de conception du matériau
- Contraintes de fabrication sur le rayon de courbure minimum admissible (imposé par le procédé AFP)



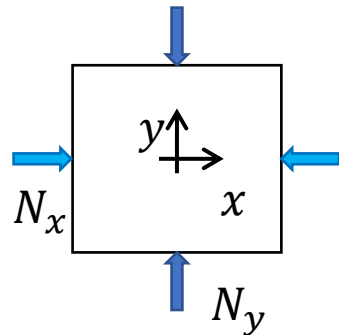
Hypothèses:

- La géométrie et les conditions limites sont connus et fixés
- Les bandes prepreg sont les mêmes pour chaque couche
- Le comportement du matériau est linéaire élastique
- Le stratifié est quasi-homogène et orthotrope en tout points de la structure
- À l'échelle macroscopique le comportement du stratifié est décrit par l'intermédiaire de la FSDT

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

Cas d'étude: 1^{ère} étape, échelle macroscopique



Domaine de conception: variables matériaux

Design variable	Type	Lower bound	Upper bound
R_{0K}^{A*} [MPa]	continuous	-17693.3868	17693.3868
R_1^{A*} [MPa]	continuous	0.0	19072.0711
$\Phi_1^{A*(i,j)}$ [deg]	continuous	-90.0	90.0

Propriétés mécaniques de la bande prepreg

Technical constants		Polar parameters of $[Q]^a$		Polar parameters of $[Q]^b$	
E_1 [MPa]	161000.0	T_0 [MPa]	23793.3868	T [MPa]	5095.4545
E_2 [MPa]	9000.0	T_1 [MPa]	21917.8249	R [MPa]	1004.5454
G_{12} [MPa]	6100.0	R_0 [MPa]	17693.3868	Φ [deg]	90.0
ν_{12}	0.26	R_1 [MPa]	19072.0711		
ν_{23}	0.10	Φ_0 [deg]	0.0		
		Φ_1 [deg]	0.0		
Density and thickness					
ρ [kg/mm ³]	1.58×10^{-6}				
h_{ply} [mm]	0.125				

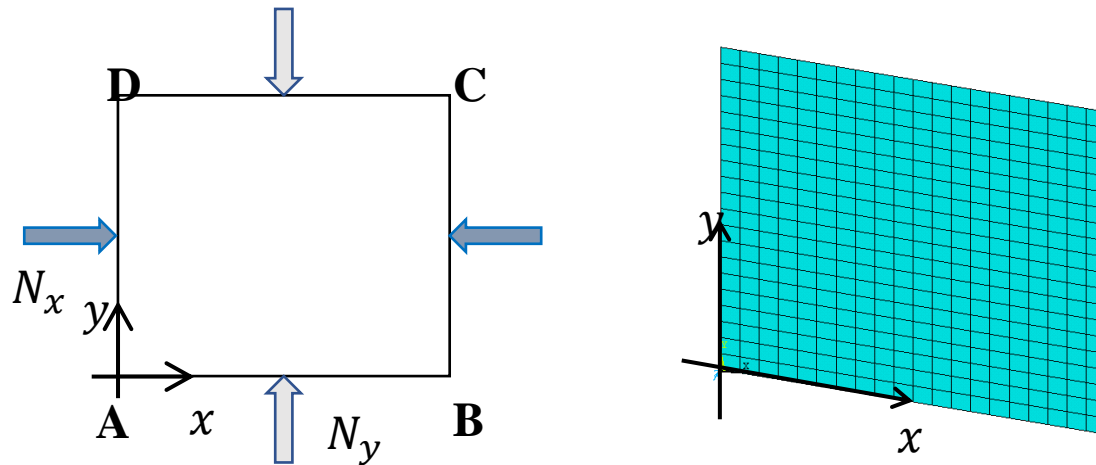
^a In-plane reduced stiffness matrix of the pre-preg strip.

^b Out-of-plane shear stiffness matrix of the pre-preg strip.

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

Cas d'étude: 1^{ère} étape, échelle macroscopique



Code EF: ANSYS

Éléments: 8-nodes SHELL281

Analyse: linéaire / flambage

Ddl: 2482

Geometrical parameters

$$a = b = 254\text{mm}$$

BCs of the FE model

Sides	BCs
AB, CD	$U_x = 0$ $U_z = 0$
BC, DA	$U_y = 0$ $U_z = 0$

Solution de référence	
Séquence d'empilement (24 plis)	$[0/-45/0/45/90/45/0/-45/90/45/90/-45]_s$
Charge critique de flambage	81,28 N/mm ($N_y = 0,5N_x$)

Le processus de conception des VAT

La stratégie de conception multi-échelle à deux niveaux (MS2L)

Cas d'étude: 1^{ère} étape, échelle macroscopique

Cas 1: aucune contrainte de fabrication

Cas 2: contrainte de fabrication sur le rayon de courbure minimum ($r_{adm} = 80\text{mm}$)

Paramètres de l'algorithme génétique (AG):

Number of individuals	Number of generations	Crossover probability	Mutation probability	Selection operator
270	250	0.85	$1/N_{ind}$	Roulette wheel

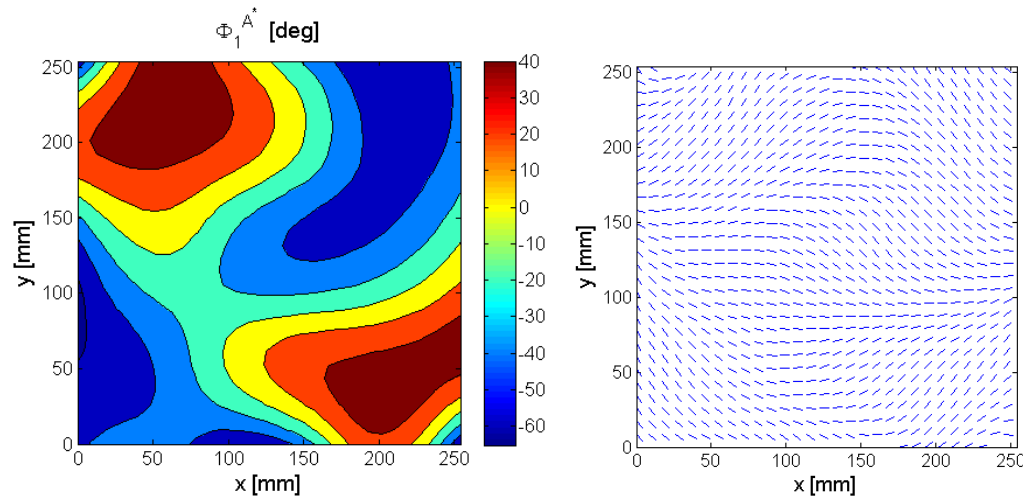
$m_p \backslash n_p$	0	1	2	3	4
0	-45.5311	-10.1854	-85.8024	90.0000	-60.6225
1	-59.4246	-90.0000	90.0000	71.8029	81.9769
2	-70.5450	39.6424	-90.0000	-48.3263	0.2430
3	87.7414	55.5200	71.4718	-77.6823	-42.7740
4	-58.0815	90.0000	-1.2187	-78.7346	-31.8303

$m_p \backslash n_p$	0	1	2	3	4
0	49.1349	40.1612	54.0772	30.9143	44.3536
1	33.0933	86.2196	40.7661	15.8884	60.8939
2	29.1137	21.5929	51.7663	47.8135	59.6959
3	66.0686	29.2392	54.6419	55.1906	28.4075
4	40.2953	25.9924	41.6383	71.7229	45.2671

Polar parameters		
	case 1	case 2
R_{0K}^{A*}	13756.4634	-17693.3868
R_1^{A*}	17164.86	0.0000

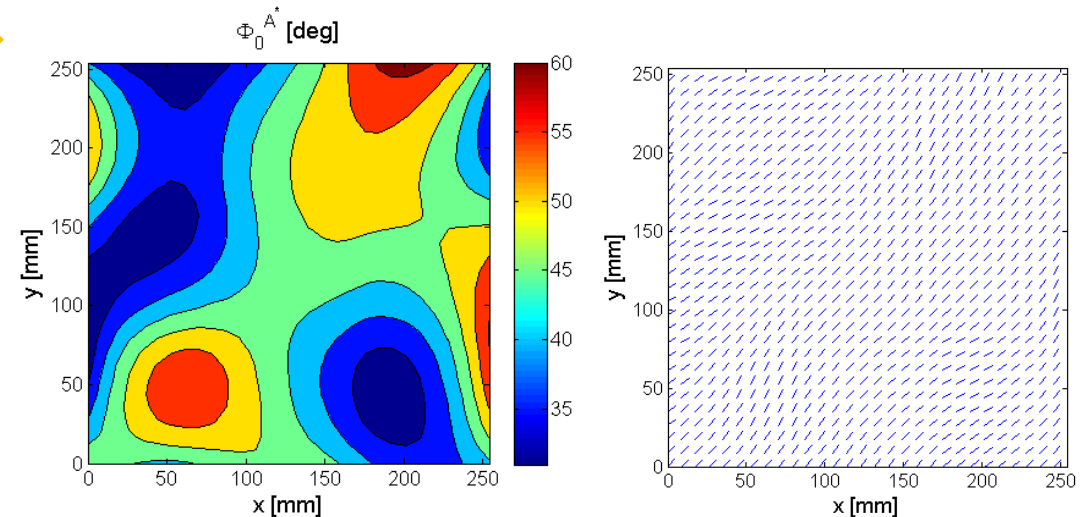
Le processus de conception des VAT

Cas d'étude: 1^{ère} étape, échelle macroscopique



Cas 1: aucune
contrainte de
fabrication

Optim. solution	
Buckling load	145,74 N/mm
Increment	78%



Cas 2: contrainte de
fabrication sur le rayon
de courbure minimum

Optim. solution	
Buckling load	136,09 N/mm
Increment	67%

Le processus de conception des VAT

Cas d'étude: 2^{ème} étape, échelle mésoscopique

Paramètres de l'algorithme génétique (AG):

Number of individuals	Number of generations	Crossover probability	Mutation probability	Selection operator
500	500	0.85	$1/N_{ind}$	Roulette wheel

Cas 1: empilement optimal → séquence

QT suivante:

[0 1 0 1 2 0 2 0 2 2 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1 2 0 2 0]



3 orientations à optimiser

Cas 1: empilement optimal → séquence

QT suivante:

[0 0 2 2 2 2 0 2 0 2 0 0 0 0 2 0 2 0 2 2 2 2 0 0]



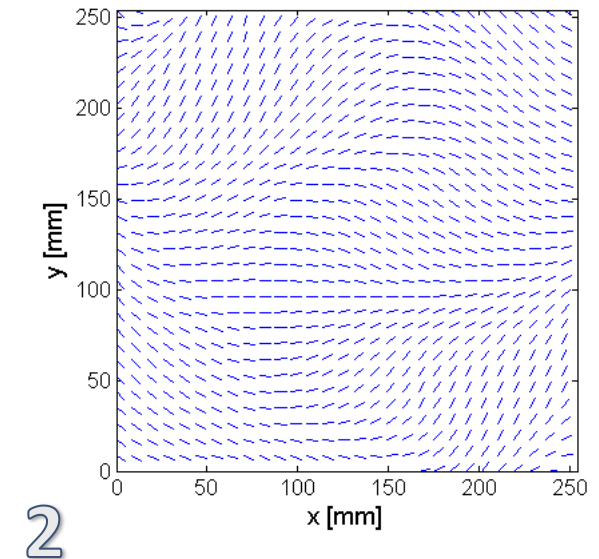
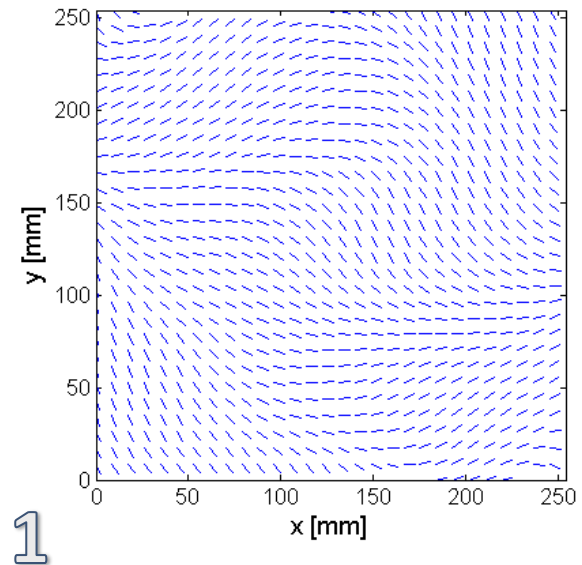
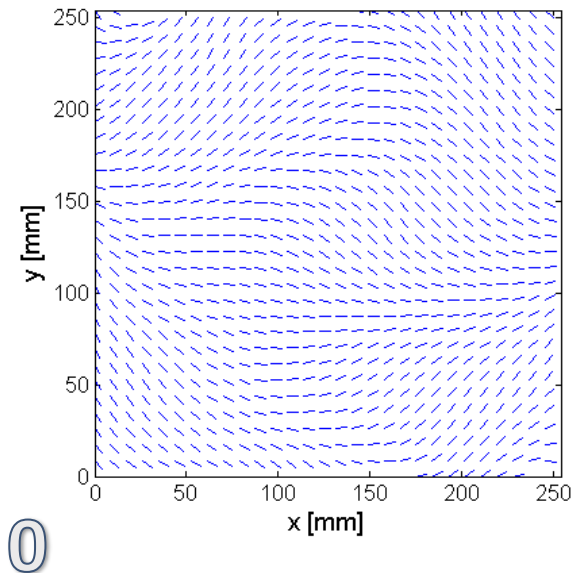
3 orientations à optimiser



Le processus de conception des VAT

Cas d'étude: 2^{ème} étape, échelle mésoscopique

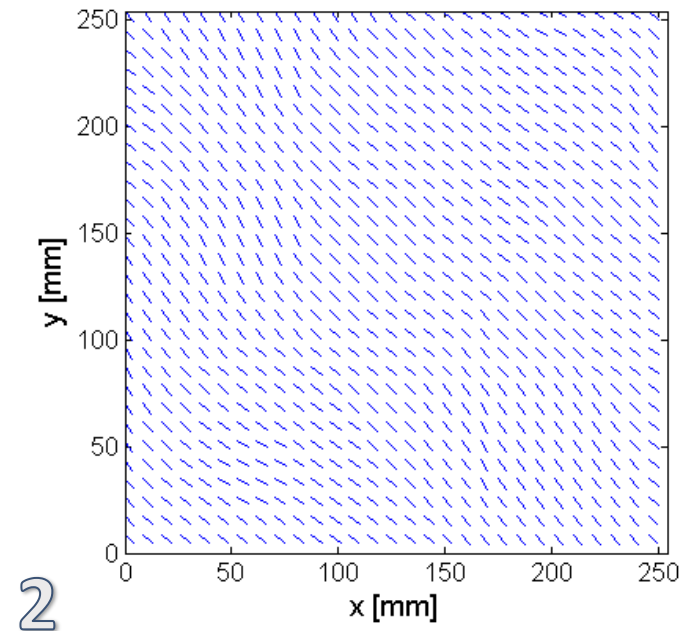
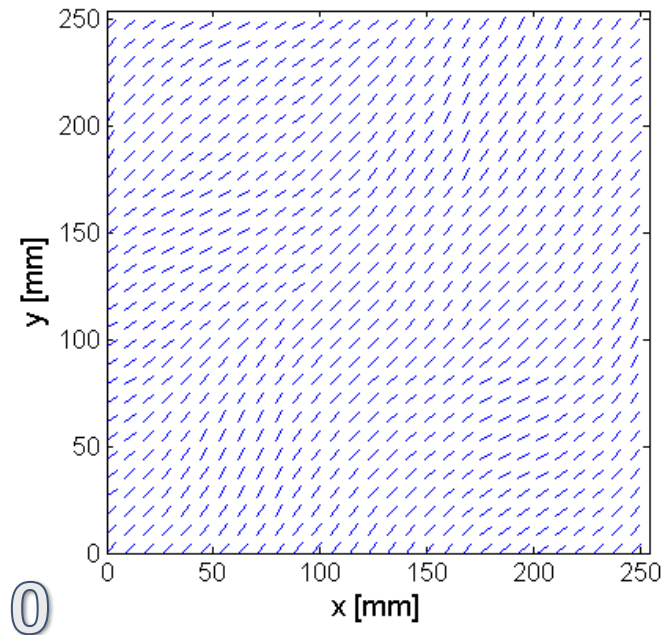
Cas 1



Le processus de conception des VAT

Cas d'étude: 2^{ème} étape, échelle mésoscopique

Cas 2



Le processus de conception des VAT

Conclusions

- Les procédés ATL et AFP permettent de fabriquer une nouvelle classe de stratifiés plus performantes et adaptables aux requis structuraux
- Un gros effort est demandé pour améliorer le procédé et éliminer les nombreux défauts de fabrication
- Il est possible de formuler mathématiquement le problème de conception de stratifiés VAT grâce à
 - Formulation par invariants tensoriels
 - Représentations de type B-spline et/ou NURBS
- L'utilisation d'algorithmes de recherche de solutions de type évolutionnaire semble être la piste la plus prometteuse
- L'introduction de solutions de type VAT pour les stratifiés impose au marché industriel une réflexion et une reformulation/refus des règles de conception classiques
- Pour que les stratifiés VAT soient réellement compétitifs vis-à-vis des solutions classiques il est nécessaire
 - de reformuler le processus de conception en intégrant les spécificités du procédé
 - d'abandonner les configurations et les règles métier classiques (p.ex. stratifiés symétriques, équilibrés, etc.)
 - de développer des modèles numériques prédictifs pertinents capable de saisir les mécanismes principaux à toute échelle caractéristique

Le processus de conception des VAT

Projets en cours

- Projet SMARTCOMPOSITES: Région Nouvelle Aquitaine AAP 2016

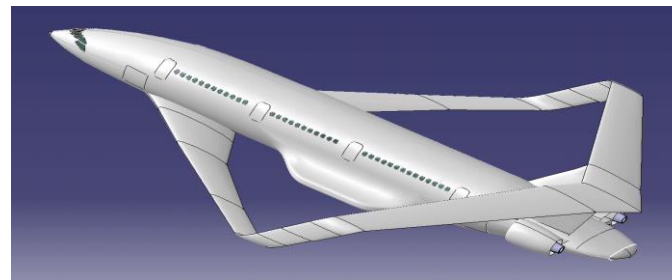
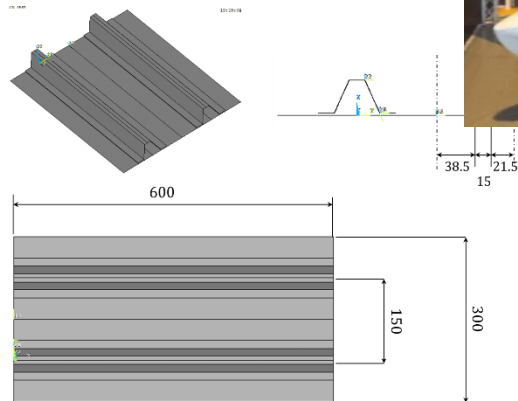


- ✓ Deux thèses PhD
 - ✓ **G.A. FIORDILINO** (POLITO & ENSAM). Superviseurs: M. Montemurro, A. Pagani, J. Pailhes, E. Carrera
 - ✓ **T. GARULLI** (UNIFI & INP). Superviseurs: A. Catapano, J. Jumel, D. Fanteria

Le processus de conception des VAT

Projets en cours

- Projet PARSIFAL: H2020, Mobility for Growth Programme, RIA - <http://parsifalproject.eu/>



- ✓ ENSAM/I2M WP (conception et analyse de la structure du PrP)
 - 1 thèse PhD
 - 1 post-doc
 - 1 tenure track

Le processus de conception des VAT



Références

1. Dirk H.-J.A. Lukaszewicz, Carwyn Ward, Kevin D. Potter. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future. *Composites: Part B*, 43 (2012) 997–1009.
2. Goldsworthy WB. Geodesic path length compensator for composite-tape placement method. Patent US 3810,805, 14th May 1974
3. Aström. *Manufacturing of polymer composites*. London, UK: Chapman & Hall; 1997.
4. MTorres Disen~os Industriales S. Torres layup – Tape Layer Machine, vol. 2010, 2010.
5. Evans DO. *Fiber placement*. Cincinnati: Cininnati Machine; 1997
6. Blom AW, Lopes CS, Kromwijk PJ, Gurdal Z, Camanho PP. A theoretical model to study the influence of tow-drop areas on the stiffness and strength of variable-stiffness laminates. *J Compos Mater* 2009;43:403–25.
7. Byung Chul Kim, Kevin Potter, Paul M. Weaver. Continuous tow shearing for manufacturing variable angle tow composites. *Composites: Part A* 43 (2012) 1347–1356.
8. K. Chauncey Wu, Brian F. Tatting, Brett H. Smith, Design And Manufacturing Of Tow-Steered Composite Shells Using Fiber Placement. 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 4 - 7 May 2009, Palm Springs, California.
9. B.C. Kim, K. Hazra, P. Weaver, K. Potter. Limitations of fibre placement techniques for variable angle tow composites and their process-induced defects. 18th International conference on composite materials.
10. Olben Falcó Salcines. Analysis of process-induced defects on steered-fiber panels for aeronautical applications. PhD Thesis, University of Girona, 2014.
11. B.C. Kim, K. Potter, P. Weaver. Continuous tow shearing for manufacturing variable angle tow composites. *Composites: Part A* 43 (2012) 1347–1356.

Le processus de conception des VAT

Références

12. Croft K, Lessard L, Pasini D, Hojjati M, Chen J, Yousefpour A. Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates. *Compos Part A – Appl Sci Manuf* 2011;42:484–91.
13. M. Montemurro, A. Catapano. Ch: A new paradigm for the optimum design of variable angle tow laminates. In: *Variational analysis and aerospace engineering: mathematical challenges for the aerospace of the future*. Springer optimization and its applications, 1st Ed. vol. 116. Springer International Publishing; 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-45680-5>.
14. M. Montemurro, A. Catapano. On the effective integration of manufacturability constraints within the multi-scale methodology for designing variable angle-tow laminates. *Composite Structures* , 161: 145-159, 2017.
15. M. Montemurro. An extension of the polar method to the First-order Shear Deformation Theory of laminates. *Composite Structures* 127: 328-339, 2015.
16. M. Montemurro. Corrigendum to “An extension of the polar method to the First-order Shear Deformation Theory of laminates” [*Compos. Struct.* 127 (2015) 328–339]. *Composite Structures* 131: 1143-1144, 2015.
17. A. Catapano, B. Desmorat, P. Vannucci. Stiffness and Strength Optimization of the Anisotropy Distribution for Laminated Structures. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 167(1): 118-146, 2015.