

# Développement d'une stratégie d'optimisation pour la conception préliminaire de pièces réalisées par le procédé QSP « Quilted Stratum Process »

Thèse Cifre ONERA-CETIM

Laboratoire : ONERA-DMAS

Ecole doctorale : SMEMAG - Université Paris-Saclay

Directeur de thèse François-Xavier IRISARRI. ONERA-DMAS, Université Paris-Saclay

Encadrants : Cédric JULIEN. ONERA-DMAS, Université Paris-Saclay, Denis ESPINASSOU- IPC CETIM

Juan J. ROJAS CARRILLO

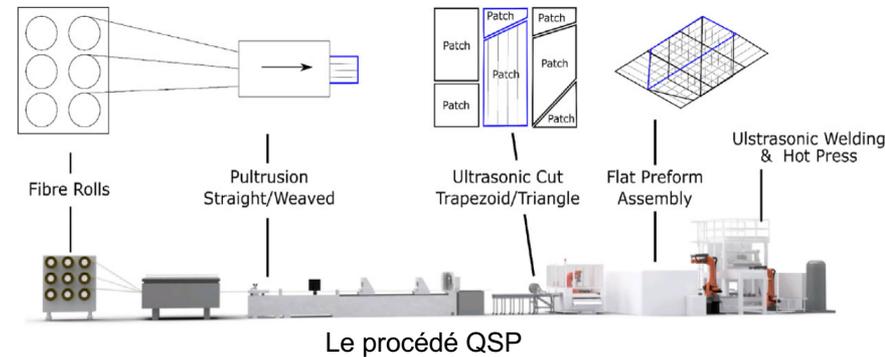
18/01/2023

# Contexte industriel

Développement de nouveaux procédés de fabrication de pièces des composites.

→ Au CETIM, développement du « Quilted Stratum Process » (QSP) :

- Procédé robotisé pour la production à forte cadence (1 pièce/min).
- Pièces composites thermoplastiques
- Maîtrise du coût par la réduction des chutes de matière.



(a)



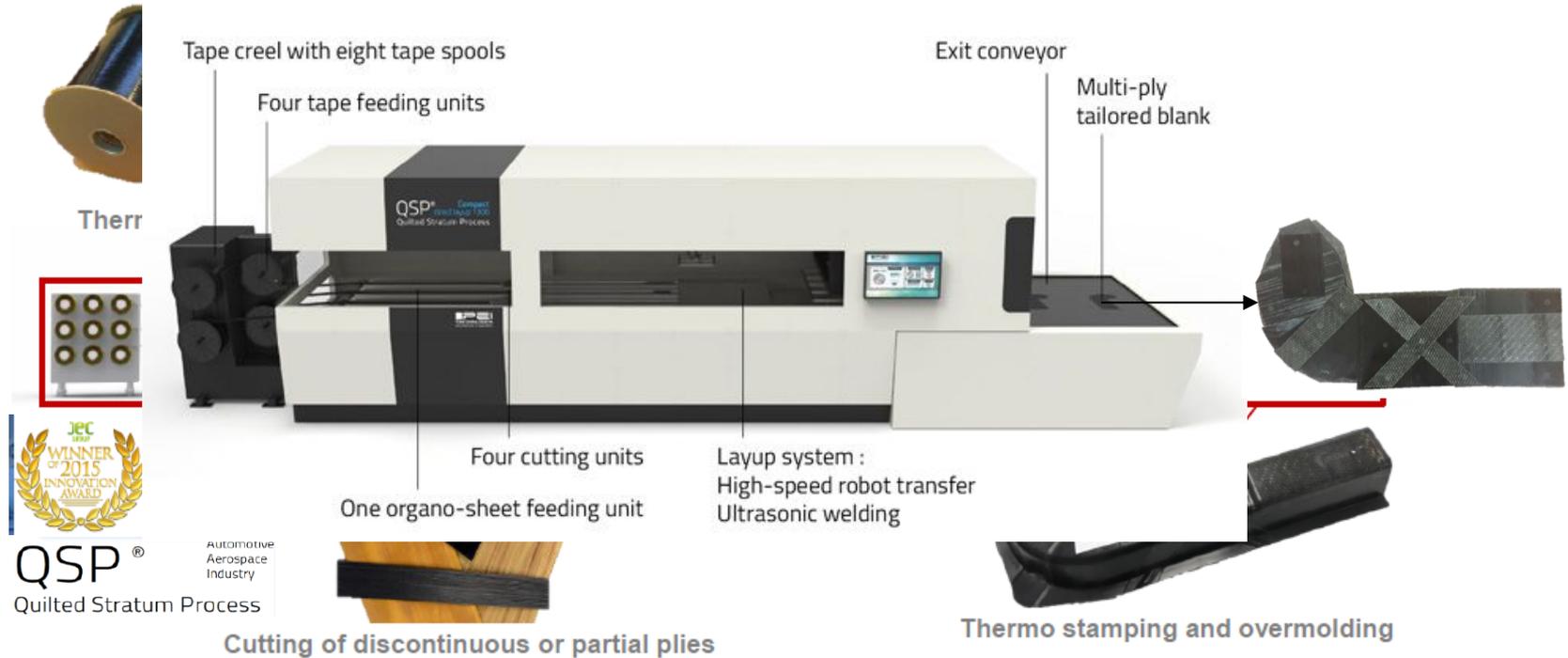
(b)



Pièce QSP : (a) Préforme fabriquée à partir de patches.  
(b) Pièce thermo-estampée.

# Le procédé QSP

## HIGH VOLUME LINE OF THERMOPLASTIC COMPOSITES



# Enjeux industriels

- Renforcer le lien entre la conception, l'optimisation numérique et la fabrication des pièces composites par le procédé QSP.
- Contribuer au développement d'un outil de conception et de calculs dédié au procédé QSP afin d'accompagner son adoption dans l'industrie.
- Diffuser le procédé QSP.



# Objectif général de thèse

Développer une méthode numérique appliquée au procédé QSP permettant d'optimiser des structures industrielles fabricables et performantes.

- ▶ Optimiser la préforme patchée.
- ▶ Implémenter des contraintes spécifiques au procédé QSP.
- ▶ Exprimer la performance de la solution comme un compromis contrôlé entre performances mécaniques et coûts.

# Contenu

1. Introduction
2. **Bibliographie**
3. Premiers travaux
4. Conclusion

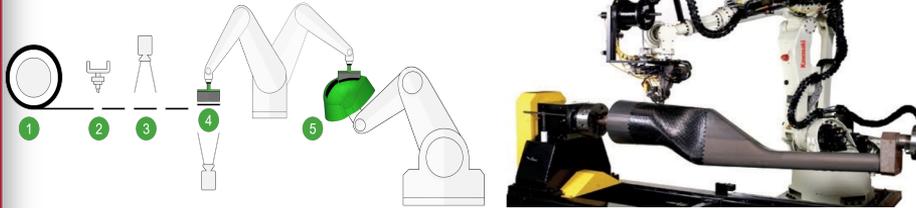


# Optimisation de composites

## Spécifiques aux procédés

Conventionnels : composites à rigidité constante (Xu et al., 2018), (Ghiasi et al., 2009).

Non-conventionnels : variations spatiales de rigidité. Automatic Fiber Placement (AFP). Fiber Patch Placement (FPP). Quilted Stratum Process (QSP). (Xu et al., 2018), (Ghiasi et al., 2010).



**FPP Process.** Source :  
[www.cevotec.com/en/fpp-technology](http://www.cevotec.com/en/fpp-technology)

**AFP Process.** Source :  
[www.trelleborg.com/en/seals/products-and-solutions/advanced-composites](http://www.trelleborg.com/en/seals/products-and-solutions/advanced-composites)

## Méthodes

- Directes : utilisent directement les caractéristiques de plis comme la séquence d'orientation, le nombre de plis : ...
  - Méthodes basées sur l'évaluation du gradient. (Stegmann et al., 2005), (Sørensen et al., 2014).
  - Méthodes métaheuristiques (algo. Évolutionnaire). (Adams et al. 2004), (Seresta et al. 2007).
- Multiniveaux : décomposition du problème
  - Orientations et épaisseur comme variables d'optimisation. (Soremekun et al., 2002), (Soeiro et al., 1994).
  - Utilisation de *Lamination Parameters* (LPs). (Liu et al. 2010), (Meddaikar et al., 2017), (Ijsselmuiden, 2011).

# La méthode QSD « Quilted Stratum Design »

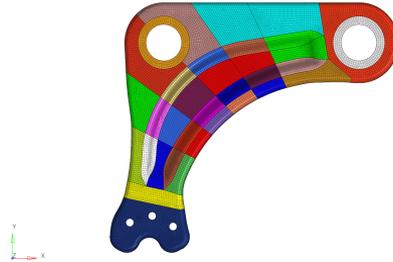


ONERA  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

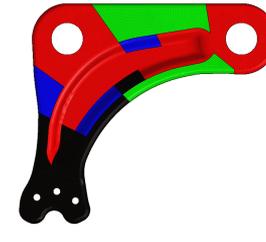
**Module I :** Zonage fin de la pièce sur lequel la rigidité du matériau est optimisée avec une méthode à gradient.



ALTAIR



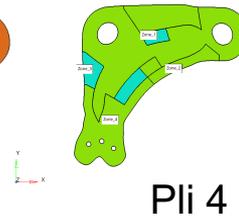
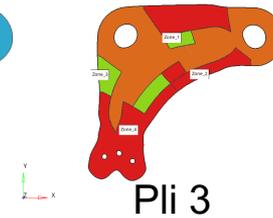
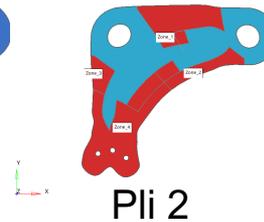
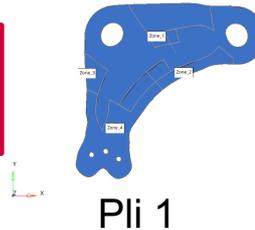
**Module II :** Ces zones sont regroupées pour créer de clusters afin de dessiner de zones et d'avoir moins de ceux-ci, qui soient fabricables avec de patches.



■ Zone 1  
■ Zone 2  
■ Zone 3  
■ Zone 4

**Module III:** Les empilements sont restitués.

	Zone_1	Zone_2	Zone_3	Zone_4
Ply 1	-60	-60	-60	-60
Ply 2	-30	0	0	0
Ply 3	30	0	60	0
Ply 4	60	60	90	60



(Irisarri et al., 2019)

# Verrous scientifiques

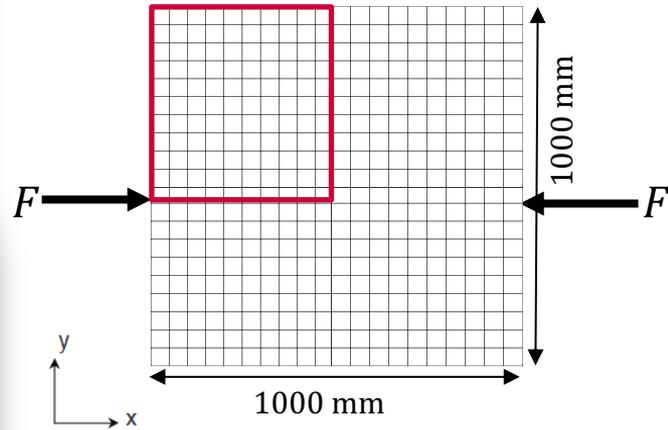
1. Comment décrire une préforme patchée et comment optimiser son plan de patchage pour aboutir à une préforme fabricable et performante?
2. De quelle façon inclure l'analyse de résistance de la pièce et par quel moyen prendre en compte les modes de ruine spécifiques aux pièces patchées?
3. Comment tenir compte des limitations et caractéristiques du procédé QSP afin de minimiser les chutes de matière ?

# Contenu

1. Introduction
2. Bibliographie
3. **Premiers travaux**
4. Conclusion



# Problème d'illustration



Plaque en appuis simples avec bords droits

$E_{11} = 181000 \text{ MPa}$
$E_{22} = 10300 \text{ MPa}$
$G_{12} = 7170 \text{ MPa}$
$G_{13} = 3000 \text{ MPa}$
$G_{23} = 3000 \text{ MPa}$
$\nu_{12} = 0,28$

## Problème d'optimisation global

$$\max \lambda_c$$

$$\{\mathbf{t}, \mathbf{x}\}$$

$$\text{tel que : } \begin{cases} m \leq m_0 \\ \mathbf{D}^* = \mathbf{A}^* \\ q_r \leq 0 \text{ avec } r = 1, \dots, R \\ \mathbf{t} \in [t_{\min}, t_{\max}]^{nz} \\ \mathbf{x} \in \mathbf{X} \end{cases}$$

Où :

$m_0$  : masse initiale de la plaque.

$q_r$  : règles de design.

$nz$  : nombre de zones.

$\mathbf{x}$  : variables d'optimisation du plan de patchage.

# Module I : résultat

Régularisation  
continue du  
problème  
global

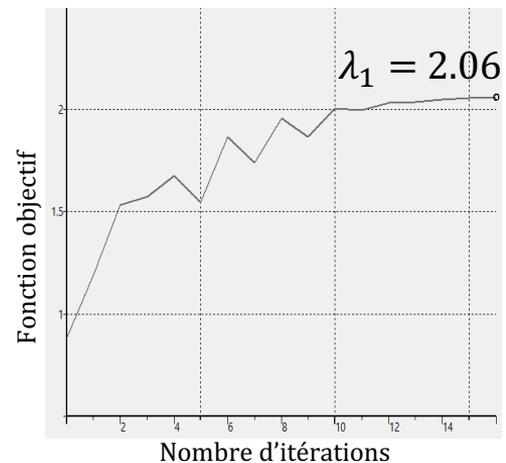
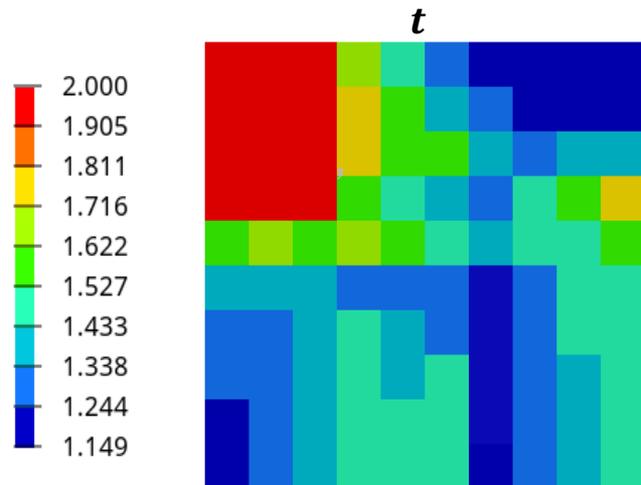
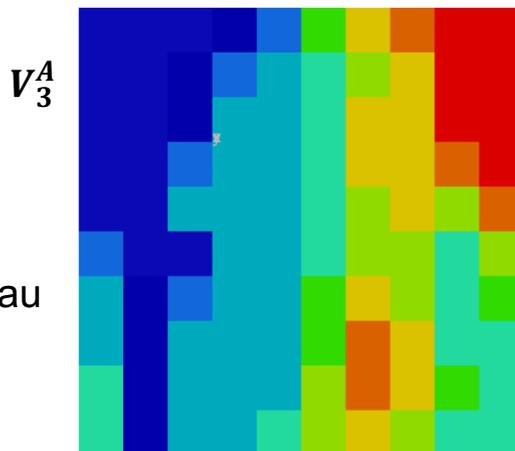
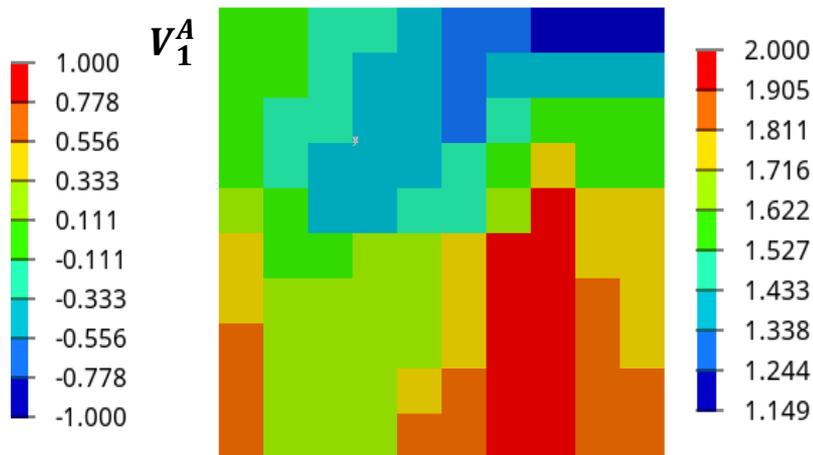
$\max \lambda_c$

$\{t, V\}$

tel que :

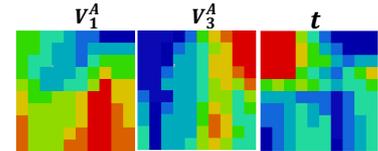
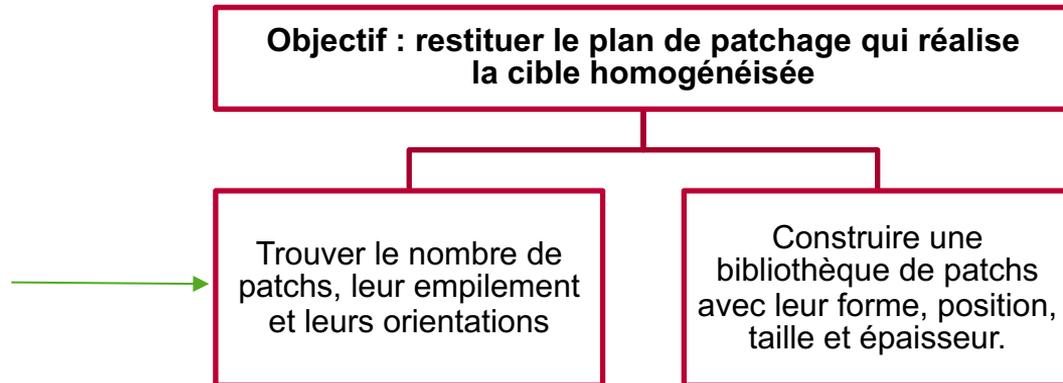
$$\left\{ \begin{array}{l} m \leq m_0 \\ V^A = V^D \\ V \in \Omega_V \\ t \in [t_{min}, t_{max}]^{nz} \end{array} \right.$$

Vision homogénéisée du matériau



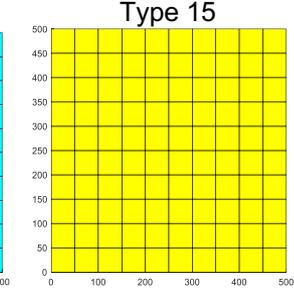
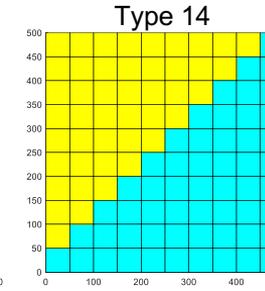
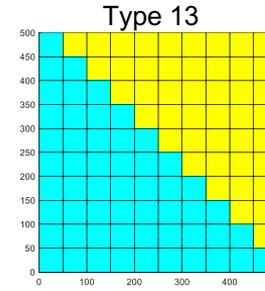
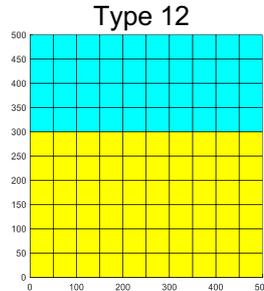
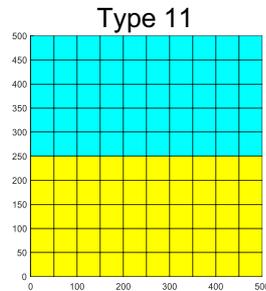
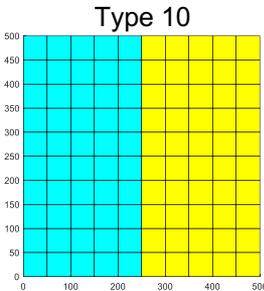
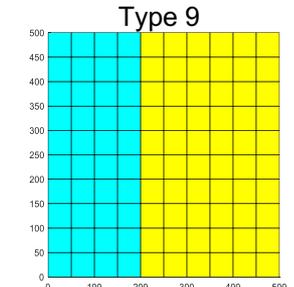
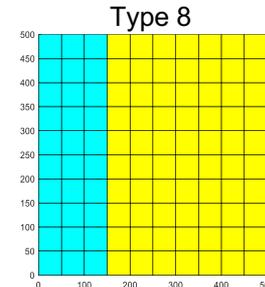
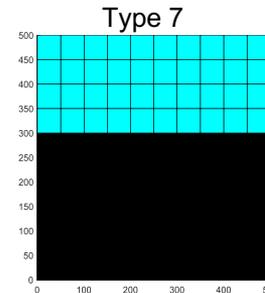
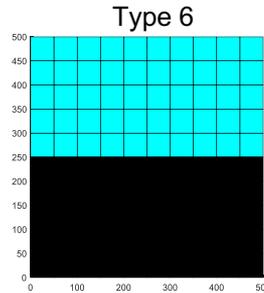
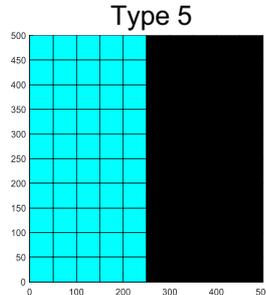
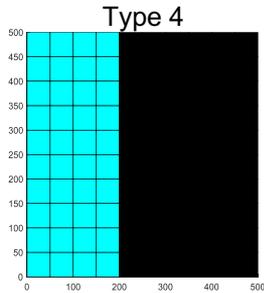
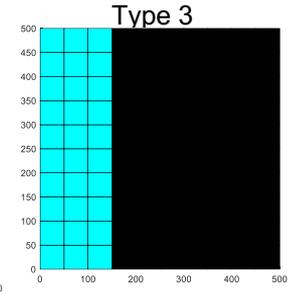
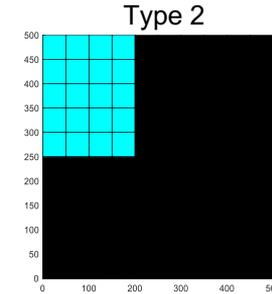
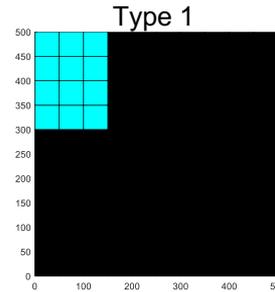
# Repenser la restitution du plan de patchage

- **Variables descriptives de la préforme :**
  - Patch : forme, positionnement, orientation, épaisseur, taille et matériau.
  - Préforme : Nombre et ordre des patches.
- **Décomposition du problème**



# Base de données de plis

- Former des plis à partir de patches, sans chevauchement



# Problème combinatoire pour la restitution du plan de patchage

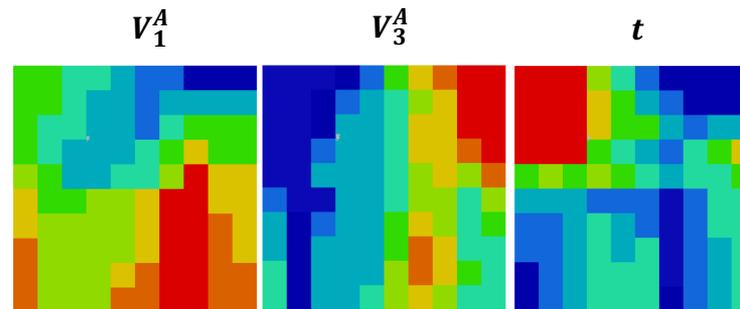
$$\min_{\{x\}} f(x)$$

Où :

$$f(x) = \sum_{e=1}^{N_e} w_e d_{ABD}(ABD_e, ABD_e^c)$$

$$d_{ABD} = (Tr(ABD_e^{-1} \times ABD_c) + Tr(ABD_e \times ABD_c^{-1}) - 12)$$

La cible : résultat du module I de QSD



$$\mathbf{A} = \mathbf{t} (\Gamma_0 + \Gamma_1 V_1^A + \Gamma_2 V_2^A + \Gamma_3 V_3^A + \Gamma_4 V_4^A)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{t}^2}{4} (\Gamma_1 V_1^B + \Gamma_2 V_2^B + \Gamma_3 V_3^B + \Gamma_4 V_4^B)$$

$$\mathbf{D} = \frac{\mathbf{t}^3}{12} (\Gamma_0 + \Gamma_1 V_1^D + \Gamma_2 V_2^D + \Gamma_3 V_3^D + \Gamma_4 V_4^D)$$

Développement d'un Algorithme Evolutionnaire dédié

# Variables d'optimisation

$$X_1 \in \{1, \dots, n\}^N \quad (\text{types de plis})$$

$$X_2 \in \{-75, -60, \dots, 75, 90\}^{M \times N} \quad (\text{orientations de patchs})$$

$n$  : types de pli

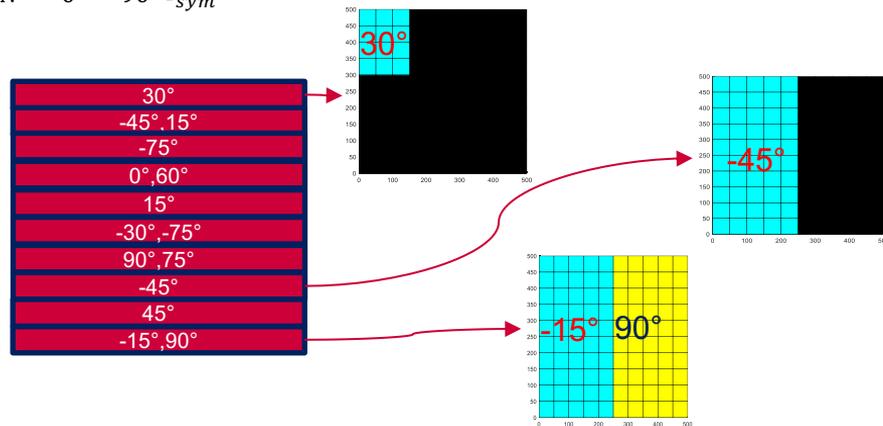
$M$  : nombre maximal de patchs par pli

$N$  : nombre de plis dans le stratifié

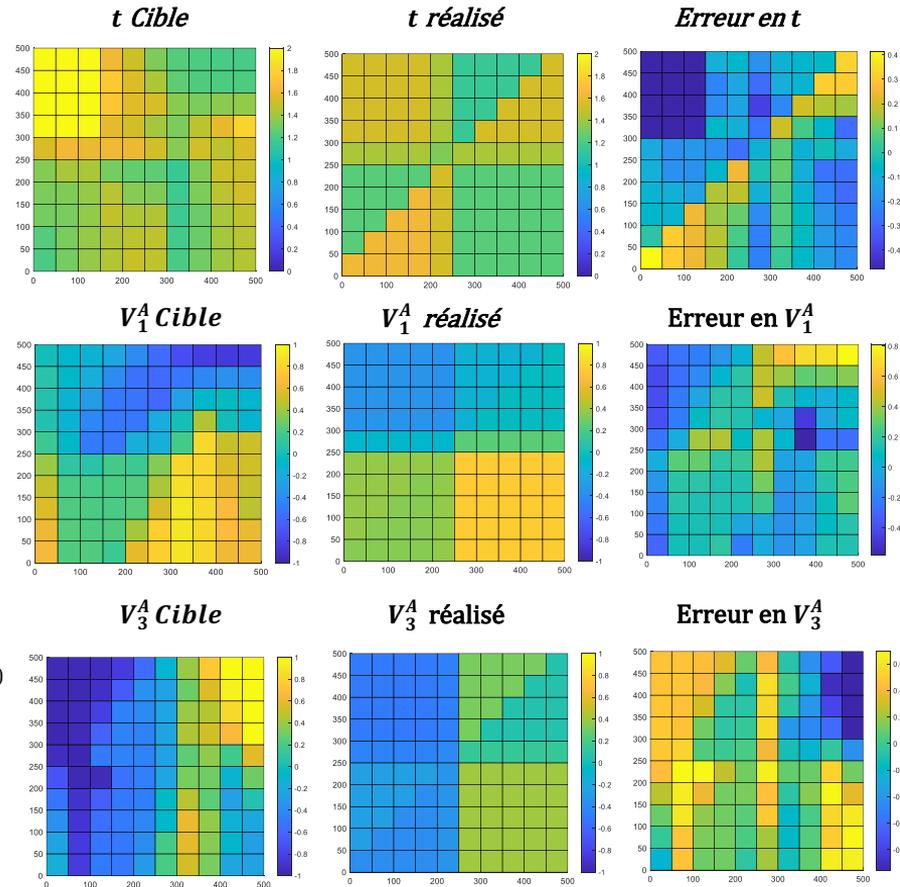
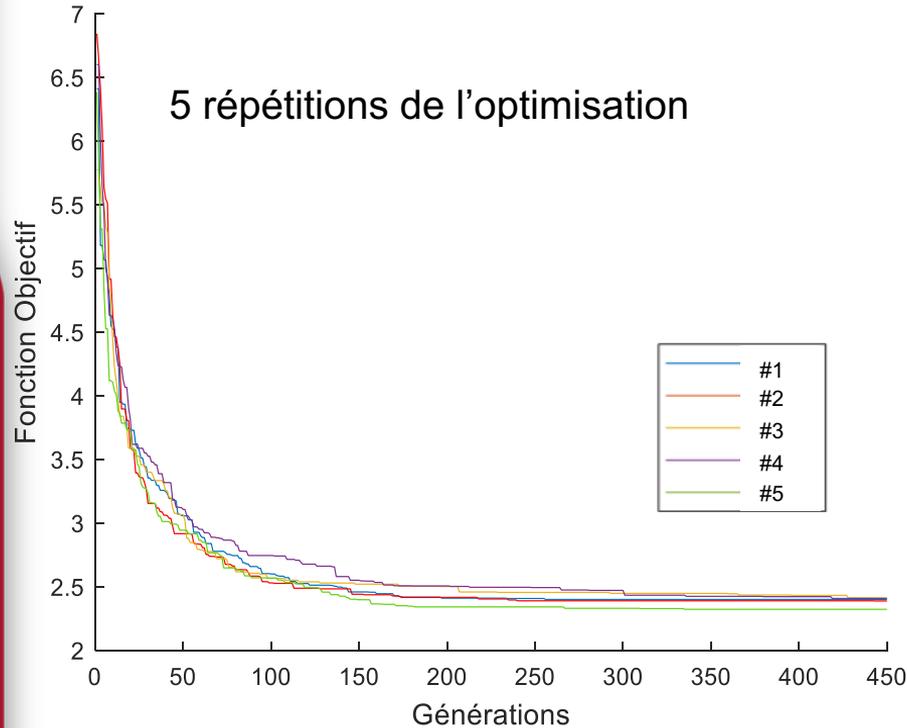
## Interprétation des variables :

$$X_1 = \begin{bmatrix} 1 & 12 & 4 & 13 & 6 & 14 & 8 & 5 & 9 & 10 \end{bmatrix}_{sym}$$

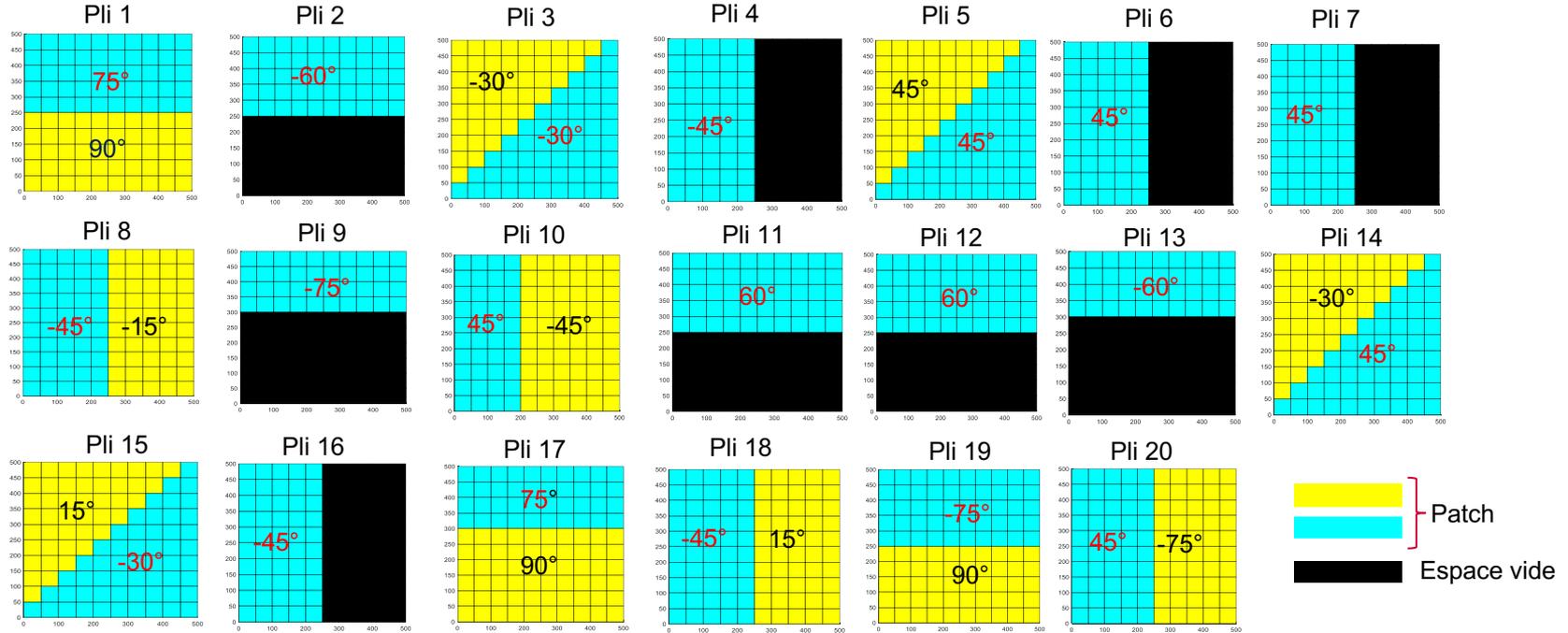
$$X_2 = \begin{bmatrix} 30 & -45 & -75 & 0 & 15 & -30 & 90 & -45 & 45 & -15 \end{bmatrix}_{sym}$$



# Courbes de convergence et cartographie de l'erreur



# Illustration de la solution



# Conclusion

## Bilan :

- Réalisation d'une synthèse bibliographique sur l'optimisation des composites.
- Définition d'une démarche globale de décomposition du problème.
- Prise en main de l'outil QSD.
- Première mise en œuvre partielle de la démarche et premiers développements (AE).

## Travaux en cours :

- Création de la bibliothèque de patchs : optimisation topologique à base de composants (Method of Morphable Components). (Zhang et al., 2016).
- Poursuite des développements sur la restitution d'empilements de patchs.
- Traiter des cas d'applications plus complexes

## Travaux à suivre :

- Minimisation des chutes de matière.
- Analyse des modes de ruine spécifiques aux pièces patchées.
- Prise en compte de la rupture de pièces QSP.

Merci beaucoup pour votre attention !



---

*Osez le futur*