

# Matériaux composites

Pour l'éolienne

# Quelques notions sur les matériaux composites

## LES MATERIAUX COMPOSITES

### I - Qu'est-ce qu'un matériau composite?

Matériau composite : arrangements de fibres - continues ou non - d'un matériau résistant (le renfort) qui sont noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible.

#### 1. Les fibres :

Elles peuvent être :

- courtes : quelques centimètres ou millimètres : ce sont les feutres ou mats utilisés en moulage ;
- longues : utilisées telles quelles ou bien tissées.

Nature des principales fibres :

- Verre,
- « kevlar » (ou aramide) : plus léger,
- carbone (module d'élasticité élevé).

Conditionnement des renforts :

- unidimensionnel : fibres unidirectionnelles,
- bidimensionnel : surface tissée (tissus) ou non (« mats »)
- tridimensionnel

On peut utiliser comme renfort des billes ou des poudres.

#### 2. Les matrices.

Matrices résineuses :

- Thermoplastiques,
- thermodurcissables : polyesters, epoxydes, polyuréthane, silicones...

## II - POURQUOI LES COMPOSITES?

### 1. Des caractéristiques mécaniques intéressantes.

	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Module d'élasticité longitudinal sens long Eq	Contrainte de rupture en traction sens long (MPa)	Contrainte de rupture en compression sens long (MPa)	Contrainte de rupture en traction sens travers (MPa)	Contrainte de rupture en compression sens travers (MPa)	Coefficient de dilatation à 20°C
Acier	7 800	205 000	400 à 1 600	400 à 1 600	Métaux isotropes		$1,3 \cdot 10^{-5}$
AU 4G	2 800	75 000	450	450			$2,2 \cdot 10^{-5}$
TA 6V (Titane)	4 400	105 000	1 200	1 200			$0,8 \cdot 10^{-5}$
Verre (à 60 %)	2080	45000	1 250	600	35	141	$0,4 \cdot 10^{-5}$
Kevlar (à 60 %)	1350	85 000	1 410	280	28	141	$-0,4 \cdot 10^{-5}$
Carbone (à 60 %)	1530	135 000	1 270	1 130	42	141	$-0,12 \cdot 10^{-5}$

Les matériaux sont anidirectionnels fibres + résine epoxyde à 60% de fibres en volume



↑ sens travers  
→ sens li  
unidirectionnel

Fig. 1 : Caractéristiques mécaniques des matériaux.

### 2. Exemples de remplacement de solutions classiques.

Construction	Construction précédente (poids - prix)	Construction composite (poids prix)
Empennage d'hélicoptère	alliage léger + acier 16 kg 1	carbone/epoxyde 9 kg 0,45
Tête de robot de soudage	aluminium 6 kg	carbone/epoxyde 3 kg

Fig. 2 : Comparaison de constructions.

### 3. Avantages :

- Gain de masse : dans l'aéronautique, en moyenne 20 % seulement à cause des liaisons métal-composites (surépaisseurs) et des surdimensionnements à cause du vieillissement.

- Tenue en fatigue : excellente.

- Pas de zone plastique. (Voir fig.3)

- Absence de corrosion.

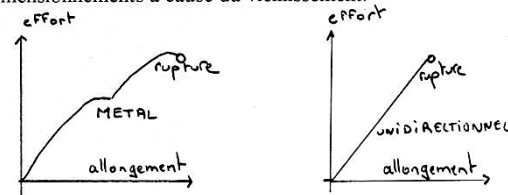


Fig.3 : domaines plastiques et élastiques

- Faible dilatation thermique.
- Bonne tenue au feu.
- Insensibilité à la chimie de la mécanique.  
(Graisses, huiles, peintures et solvants, liquides hydrauliques)
- **Formes complexes aisément réalisables .**  
**Possibilités de moulage** (profil optimisé pour pale)
- Obtention d'une surface parfaitement lisse (meilleur aérodynamisme).

#### 4. Inconvénients :

- Mauvais vieillissement sous l'action : de l'humidité, de la chaleur.
- Mauvaise tenue aux impacts.

### III - PROCÉDES DE FABRICATION.

#### 1. Moulage :

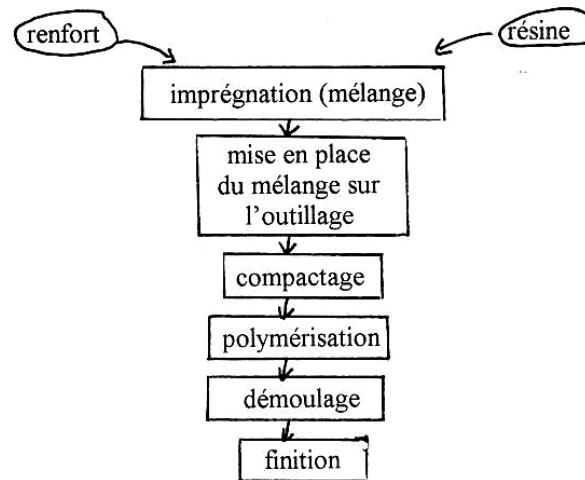
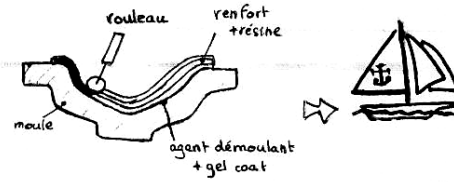


Fig. 4 : Suite des opérations dans tout procédé de formage par moulage.

- Moulage au contact :



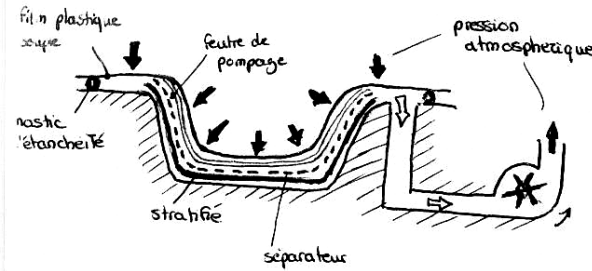
Moule ouvert,

Compactage de l'air restant, obtenu manuellement au rouleau,

Pièces de grandes dimensions avec une cadence de 2 à 4 par jour.

- Moulage poinçon - matrice.

- Moulage sous vide:



Appelé aussi moulage en dépression, au sac

On fait le vide sous le film plastique il y a alors :

- compactage de la pièce,
- élimination de l'air,
- fluage de l'excédent de résine.

Ensuite : polymérisation.

- en étuve,
- en autoclave avec surpression.

Structure aéronautique : 2 à 4 pièces par

jour

- Moulage par injection de résine :



- pression de moulage faible,

- pièces de carrosserie automobile,

- jusqu'à 30 pièces par jour.

- Moulage par injection de pré-impregné : (avec extrudeuses à vis).

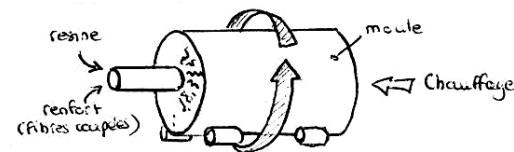
- résines thermodurcissables (carrosserie automobile),

- résines thermoformables (pièces mécaniques à tenue en température).

- Moulage par injection de mousse (idem résine).

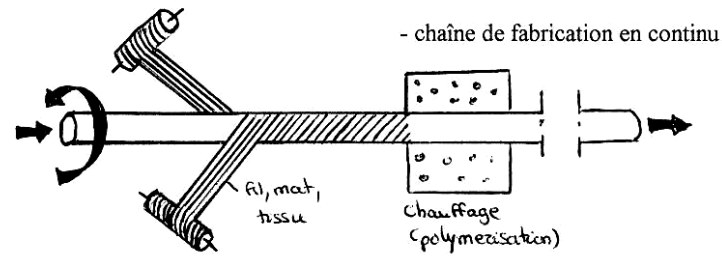
- Centrifugation.

- Fabrication de tubes



- Longueur limitée par celle du moule.

- En roulement filamentaire :



## 2. Renfort unidirectionnel - renfort tissé.

- Renfort unidirectionnel :

Toutes les fibres prennent la même direction de l'espace.

Bonnes caractéristiques dans le sens longitudinal.

Mauvaises dans le sens travers.



- Renfort tissé :

On obtient des caractéristiques mécaniques correctes dans deux directions.

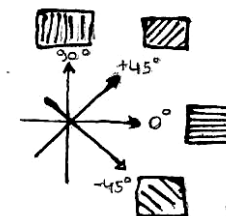
La raideur obtenue est moindre que celle que l'on obtiendrait en superposant 2 unidirectionnels.

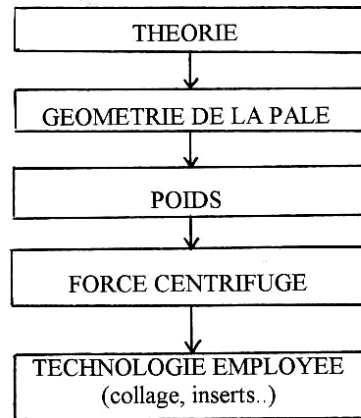


## 3. Stratifiés.

On va superposer des unidirectionnels selon 4 directions normalisées.

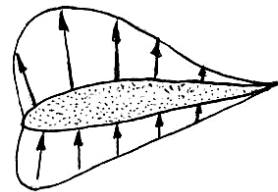
On va mettre plus ou moins de couches (plis) d'unidirectionnel de chaque direction selon les contraintes.



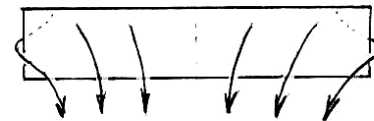


**1. Théorie de Prandtl :**

Répartition de la pression sur un profil

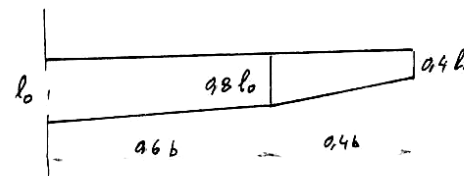
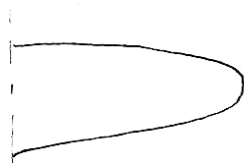


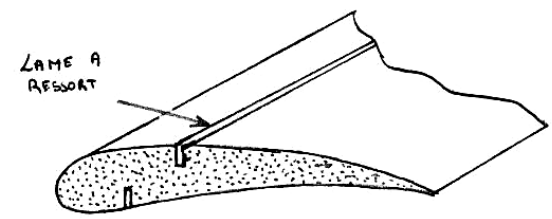
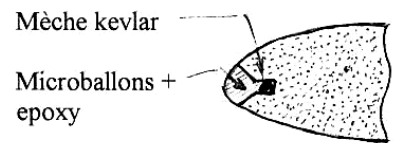
Ecoulements d'air sur une aile



Tourbillons    Traînée

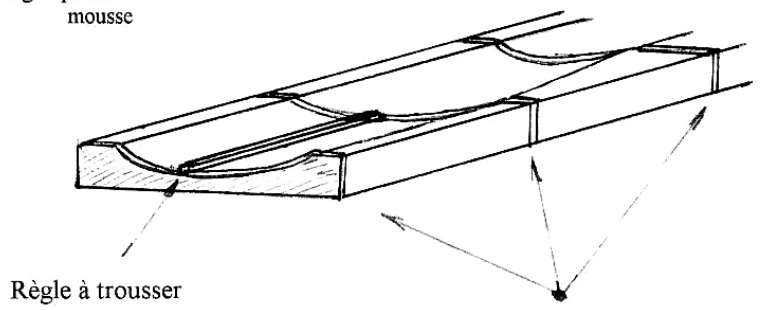
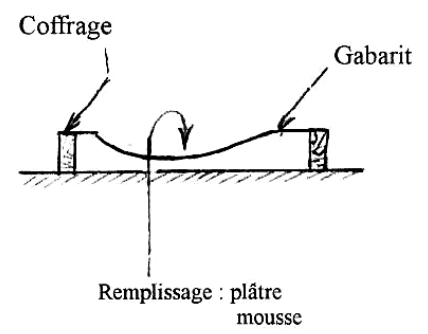
Prandtl démontra que l'aile procurant la traînée induite minimale est celle dite elliptique, que l'on peut simplifier en une aile à double trapèze de rendement voisin.





Méthodes de rigidification de la pale

- Préparation du troussage.



Gabarits évolutifs

Pour une bonne finition ; ponçage très fin poli miroir.



Application :

- Poids de la pale : 4 kg,
- Effort lié à la force centrifuge : 480 daN (pied de pale)

L'aile adoptée n'aura pas besoin de longeron central et la fixation pourra se faire par simple collage.

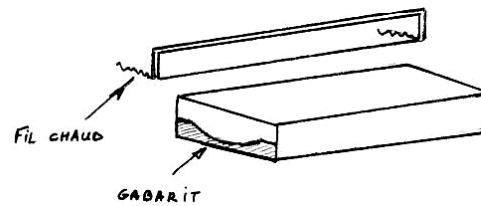
$$- \tau = k_s \cdot F / S < 0.2 \tau_{\text{adhésif}}$$

$$l > 70 \text{ mm}$$

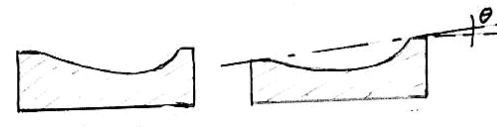
(avec  $k_s = 5$ )

## 2. FABRICATION DE LA PALE.

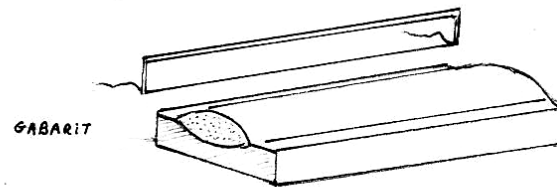
- Noyau de Roofmat :



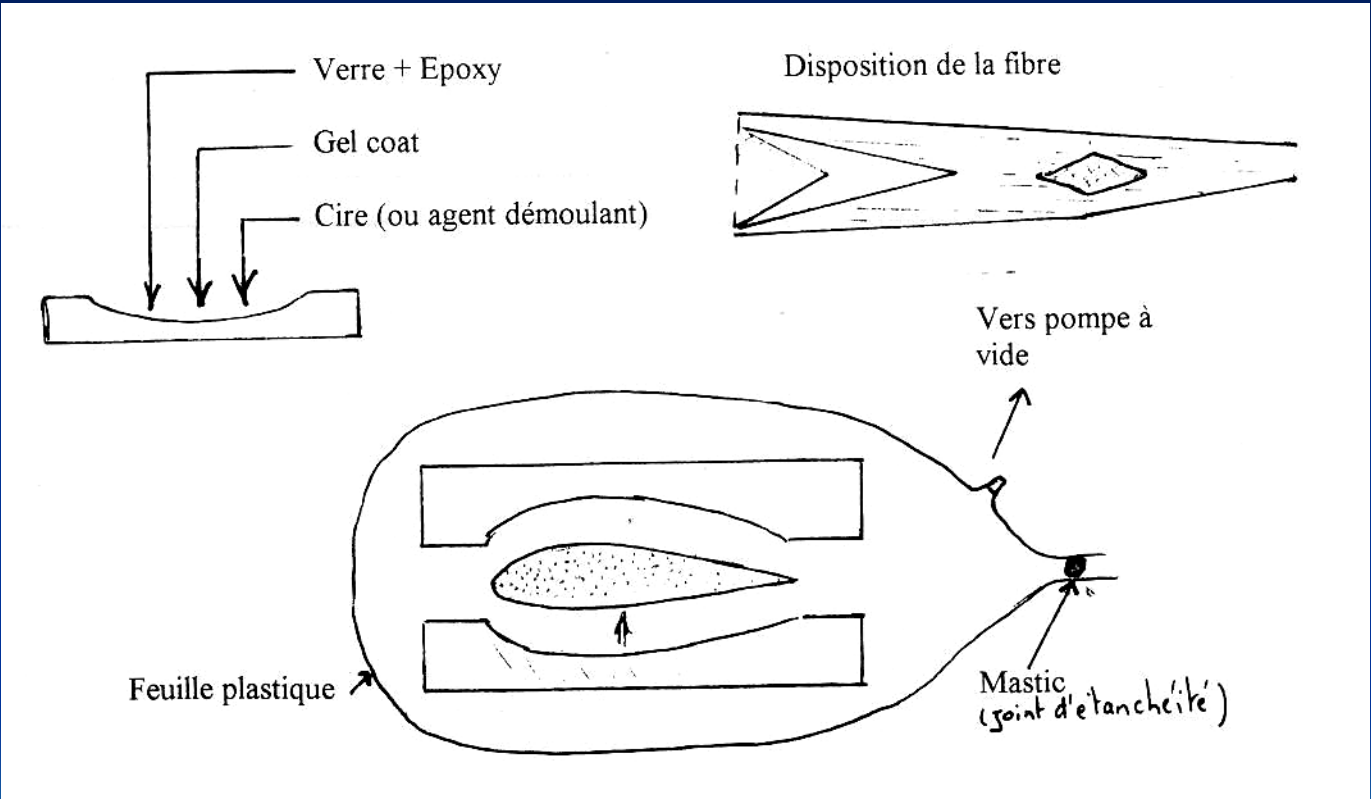
Découpage extrados



Obtention du vrillage



Obtention du noyau

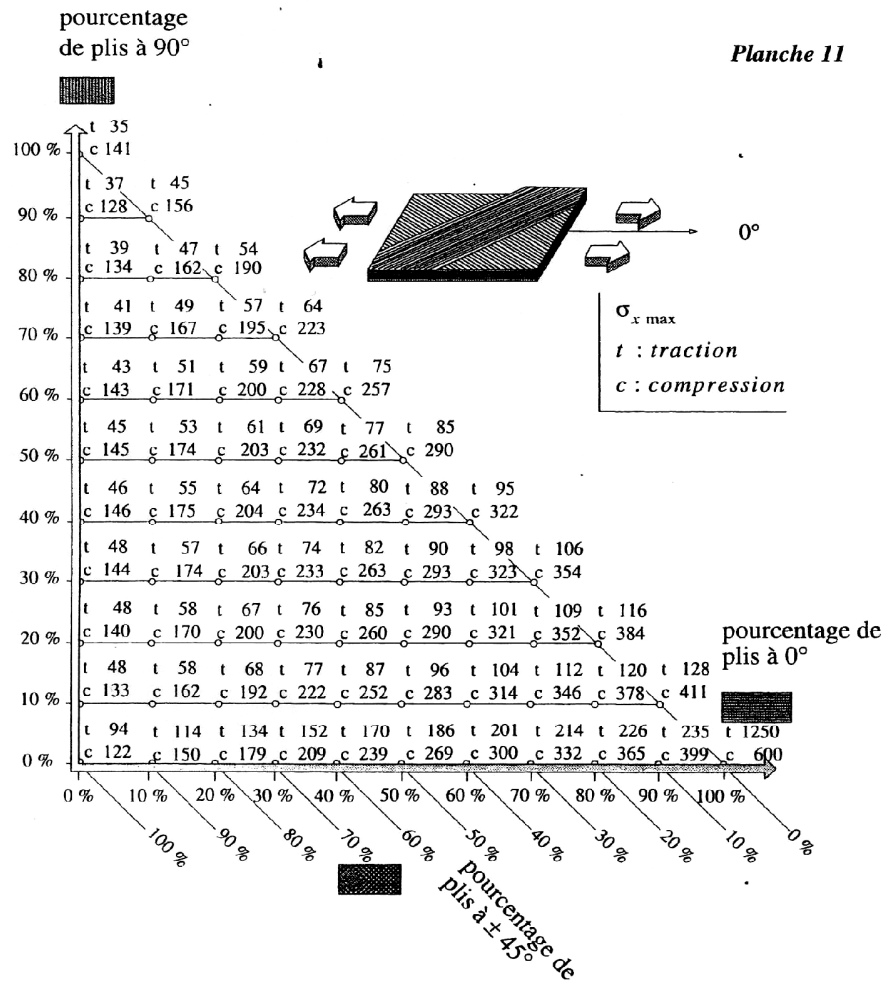


### Stratifié verre/époxyde

$V_f = 60\%$  de fibres en volume

épaisseur du pli : 0.13 mm

caractéristiques du pli : cf. paragraphe 3.3.3.



contrainte maximum  $\sigma_{x \max}$  (Mpa) en fonction des pourcentages de plis dans les directions 0°, 90°, +45°, -45°.

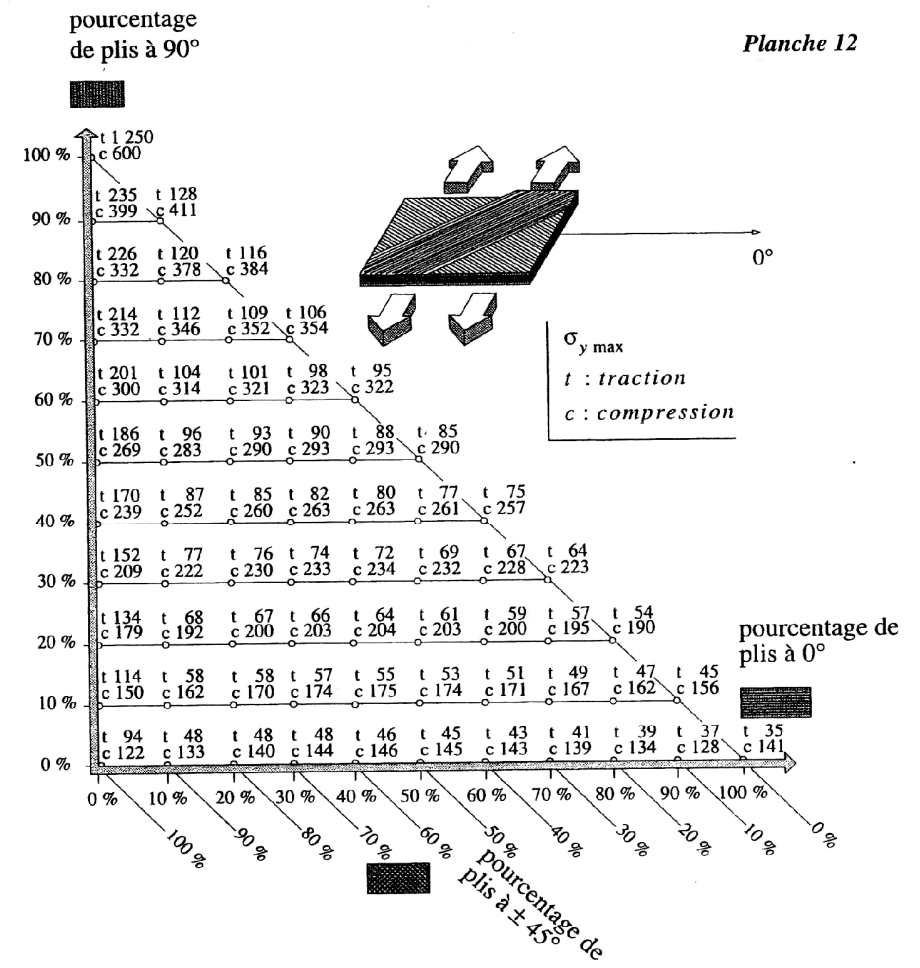
### Stratifié verre/époxyde

$V_f = 60\%$  de fibres en volume

épaisseur du pli : 0.13 mm

caractéristiques du pli : cf. paragraphe 3.

Verre /  
époxyde



contrainte maximum  $\sigma_{y \max}$  (Mpa) en fonction des pourcentages de plis dans les directions 0°, 90°, +45°, -45°.

**Stratifié verre/époxyde**

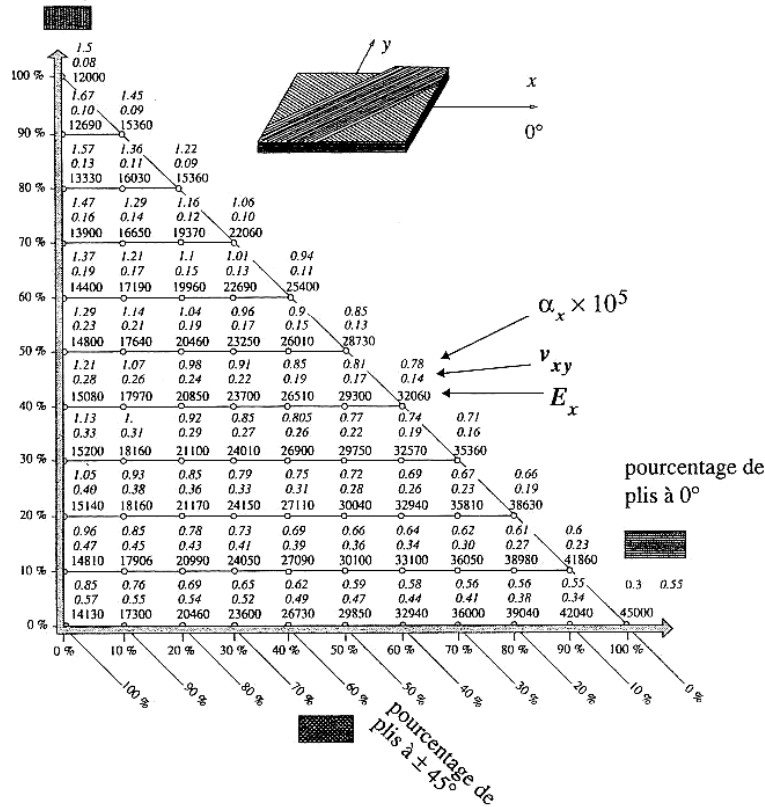
$V_f = 60 \%$  de fibres en volume

épaisseur du pli : 0.13 mm

caractéristiques du pli : cf. paragraphe 3.3.3.

pourcentage de  
plis à 90°

**Planche 14**



module longitudinal  $E_x$  du stratifié (Mpa) en fonction des pourcentages de plis dans les directions 0°, 90°, +45°, -45°. Coefficient de Poisson  $\nu_{xy}$ . Coefficient de dilatation  $\alpha_x$ .

**Stratifié verre/époxyde**

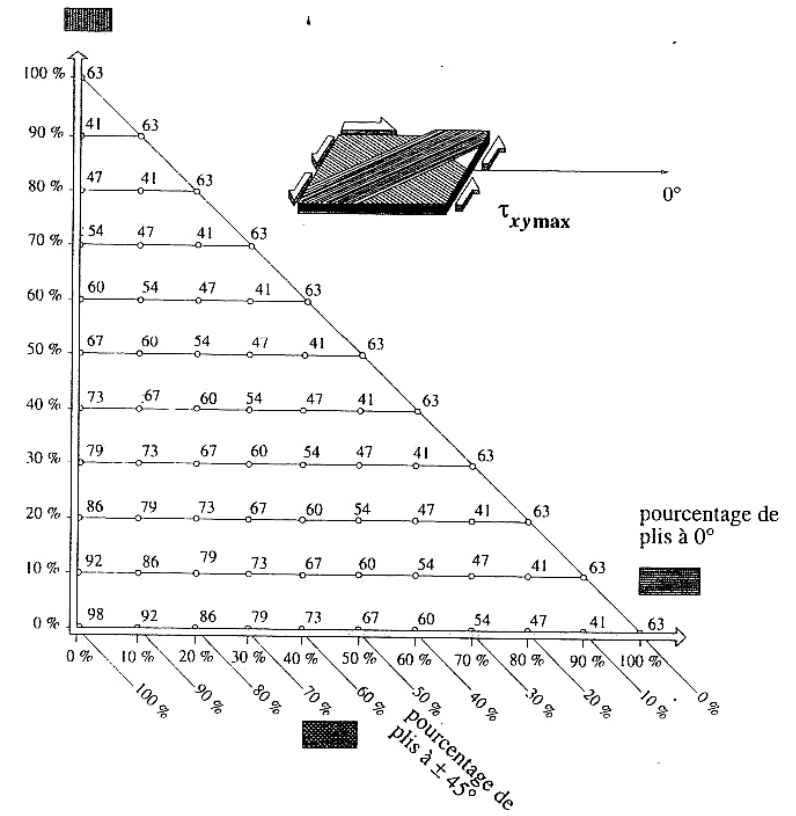
$V_f = 60 \%$  de fibres en volume

épaisseur du pli : 0.13 mm

caractéristiques du pli : cf. paragraphe 3.3.3.

pourcentage  
de plis à 90°

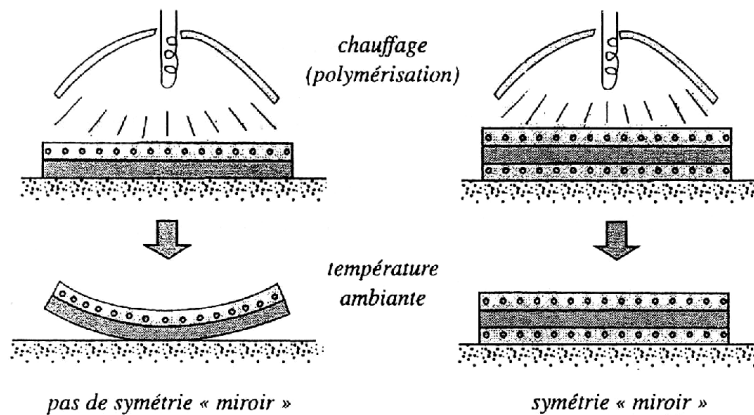
**Planche 13**



contrainte maximum  $\tau_{xy\max}$  (Mpa) en fonction des pourcentages de plis dans les directions 0°, 90°, +45°, -45°

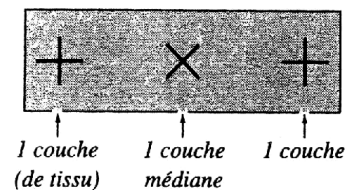
**Pourquoi la symétrie miroir :** lors de la constitution de la pièce stratifiée, les plis successifs imprégnés de résine sont drapés à température ambiante, puis placés dans une étuve pour la polymérisation. Dans le composite ainsi créé à chaud, la dilatation d'ensemble de la pièce, d'origine thermique, s'effectue sans qu'il y ait variation globale de sa forme par voilement ou gauchissement. Par contre, lors du refroidissement, les plis ont tendance à se contracter différemment suivant le sens des fibres ou suivant le sens travers. De là, l'apparition de contraintes d'origine thermique.

Lorsque la symétrie miroir est réalisée, elle entraîne la symétrie de ces contraintes, et empêche ainsi l'apparition des déformations d'ensemble de la pièce : voilement, gauchissement, comme l'illustre le schéma ci-dessous.



○ **Cas particulier des tissus équilibrés :** certains stratifiés sont constitués partiellement ou totalement de couches de tissu équilibré. On fait alors figurer sur le dessin un schéma décrivant la composition du stratifié.

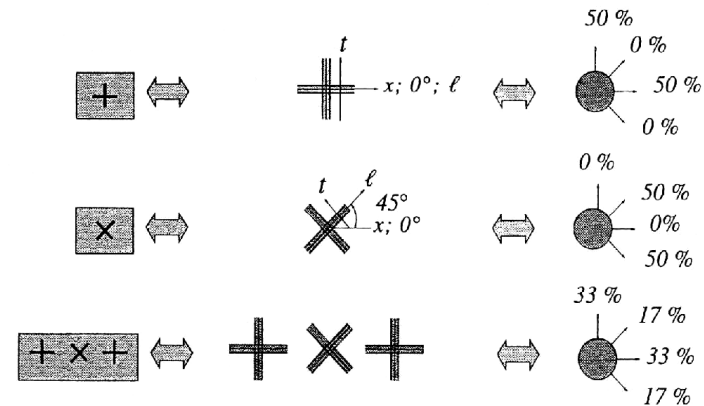
**Exemple :**



Le stratifié précédent, constitué de 3 couches de tissu équilibré, est pourvu de la symétrie miroir : on considère en effet qu'une couche tissée est équivalente à deux séries de plis unidirectionnels croisés à  $90^\circ$ , et donc est elle-même pourvue de la symétrie miroir (\*).

Comme signalé au paragraphe 3.4.2, on peut considérer la composition du stratifié résultant de deux façons différentes (\*\*):

a) Chaque couche de tissu est remplacée par 2 séries de plis unidirectionnels identiques, croisés à  $90^\circ$ , d'épaisseur moitié de l'épaisseur  $e$  de la couche de tissu, et dont on connaît les propriétés élastiques. Cette représentation est commode pour la détermination des propriétés élastiques du stratifié. On aura ainsi les équivalences ci-après :

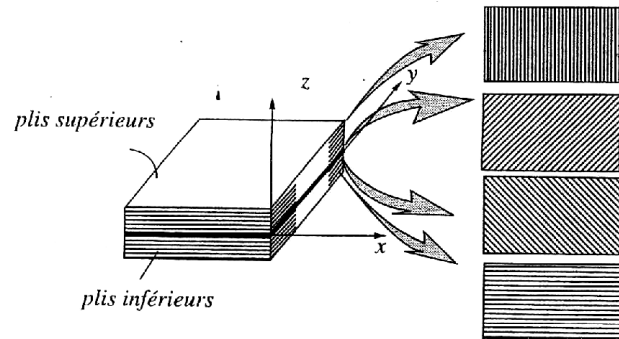


b) Une couche de tissu est remplacée par un seul pli anisotrope d'épaisseur  $e$  dont on connaît les propriétés élastiques et limites de rupture. Cette représentation est utile pour la détermination des contraintes de rupture du stratifié. On aura ainsi les équivalences ci-après :

\* Si cette hypothèse est bien vérifiée pour une toile ou un taffetas (cf. paragraphe 3.4.1) voire un sergé, elle l'est de moins en moins au fur et à mesure que le pas de l'armure augmente (pas d'une toile : 2, d'un sergé : 3, d'un satin de 4 : 4, d'un satin de 5 : 5, etc.). Si l'on suppose que ce pas tend vers l'infini, alors le pli tissé tend vers la superposition de deux couches d'unidirectionnel croisées à  $90^\circ$ . Il ne possède donc plus la symétrie miroir. C'est ainsi qu'un unique pli de satin de 5 de carbone/époxyde par exemple, polymérisé en autoclave, apparaîtra déformé (surface courbe) lors du démoulage (cf. application 18.2.17).

\*\* cf. exercices 18.2.9. et 18.2.10.

○ **Plan moyen** : c'est par définition le plan qui sépare en deux moitiés l'épaisseur du stratifié. Sur la figure ci-après, c'est le plan  $x, y$ . Il a pour cote, par convention :  $z = 0$ .



○ **Description des plis** : elle se fait depuis le pli extrême de cote  $z < 0$  jusqu'au pli extrême de cote  $z > 0$ .

- chaque pli est repéré par son orientation,
- les plis successifs sont séparés par un « / »,
- il faut éviter de grouper un trop grand nombre de plis contigus dans une même direction (\*): néanmoins lorsque cela se produit, un chiffre en indice indique le nombre des plis identiques.

○ **La symétrie miroir** : on dit qu'une pièce stratifiée est dotée de la « symétrie miroir » lorsque les empilements de plis de part et d'autre du plan moyen sont identiques.

\* Ceci afin de limiter les contraintes inter-ply, dites « interlaminaires » (cf. paragraphe 5.4.4 et chapitre 17). Cette précaution vaut également pour les couches de tissu (par exemple, pas plus de 4 couches de tissu carbone/époxyde consécutives suivant une même direction).

### Exemple

NUMÉRO DE PLY	ORIENTATION	NOTATION CONVENTIONNELLE	SYMBOLE
10	90°	[90/0 <sub>2</sub> /-45/45] <sub>s</sub>	
9	0°		
8	0°		
7	-45°		
6	+45°		
5	+45°		
4	-45°		
3	0°		
2	0°		
1	90°		

### Exemple

NUMÉRO DE PLY	ORIENTATION	NOTATION CONVENTIONNELLE	SYMBOLE
7	0°	[0/45/-45/90] <sub>s</sub>	
6	+45°		
5	-45°		
4	90°		
3	-45°		
2	+45°		
1	0°		

