

# Caractéristiques des matériaux composites à fibres de carbone recyclées

*-Interactions morphologies / propriétés-*

Olivier MANTAUX – Arnaud Gillet – I2M MPI

# Plan

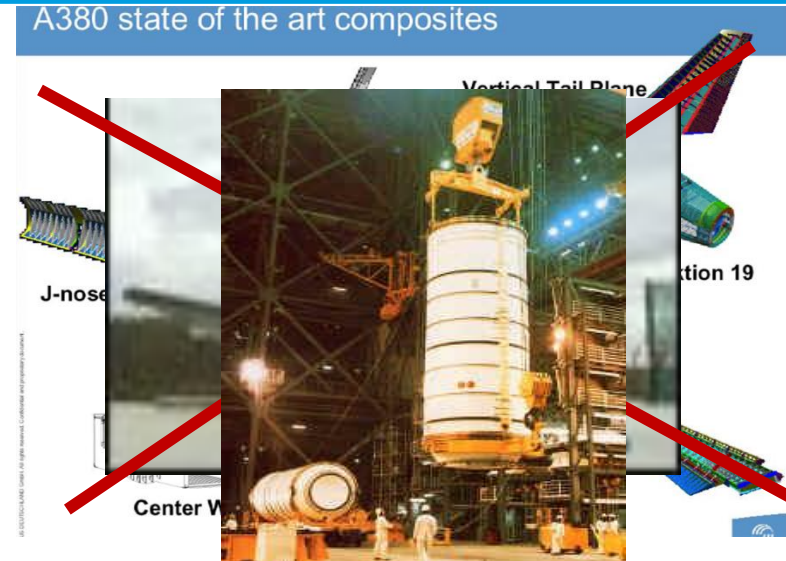
- **1 - Recyclage d'un matériau composite à fibres de carbone**
- **2 – Caractéristiques des fibres de carbone recyclées (FCR)**
- **3 - Propriétés des composites carbone ...recyclés**
- **4 - Influence de la mise en forme de fibres**
- **5 – Comment améliorer la résistance des composites FCR**
- **Perspectives**

# 1 – Recyclage des composites carbone

## 1.1 - Déchets composites à fibres de carbone

### Où trouver des déchets carbone ?

- Peu de déchets de fin de vie
  - Majoritairement des déchets de production
  - Gisement localisé : fabricants aéronautiques
  - Gisement faible : 300 à 1000t/an
  - Produits longs ( tissus, bobines...)
- + démantèlement militaire



# 1.2 – Objectif du recyclage des composites carbone

- Fort taux de fibres (60% à 70%)
- ❖ Grande résistance *longitudinale*
- ⇒ **Recyclage de la fibre de carbone, résine**
- ❖ Fibres non vieilles mais faible volume
- ❖ Forte valeur (>50€/kg pour la fibre neuve)

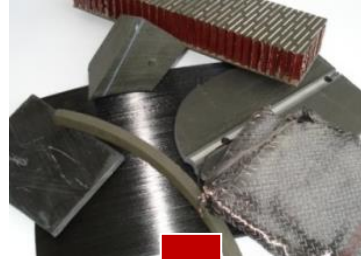


⇒ **Matériaux « hautes performances »  
(application structurales)**

# 1.3 – Procédé de recyclage

→ Plusieurs étapes nécessaires

Déchets  
composites



Fibres de carbone  
recyclées  
FCR



Pièces composite 2°G

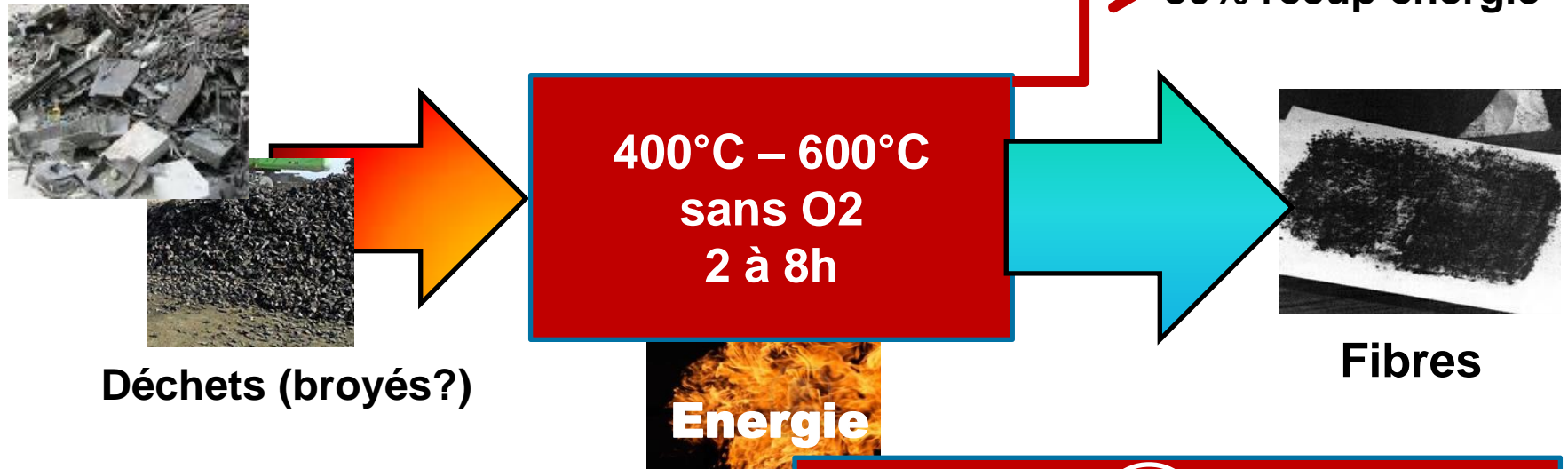


*Elimination de  
la matrice*

?

# 1.4 – Séparation fibre / matrice par pyrolyse

## Pyrolyse



Technologie mature  
Faible perte de propriétés (-5 à -20%)  
Récupération d'énergie

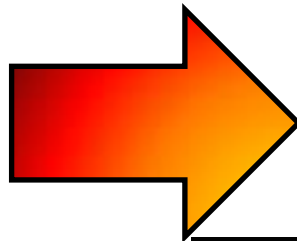
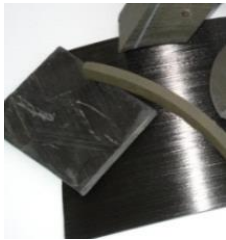


Résines FR, HT ?  
Pénétration à coeur ?  
Pollution ?  
Emmêlement, longueur possible ?

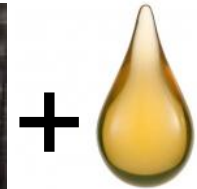
# 1.5 – Séparation fibre / matrice par solvolyse

## Solvolyse

Déchets (découpés)



Fibres (non déplacées)



Energie

400°C  
200 bar  
1h



Toute matrice organique est dissoute  
Pénétration rapide à coeur  
Aucune détérioration du carbone (-5%?)  
Pas de brassage  
Pas ou peu de pollution / impuretés

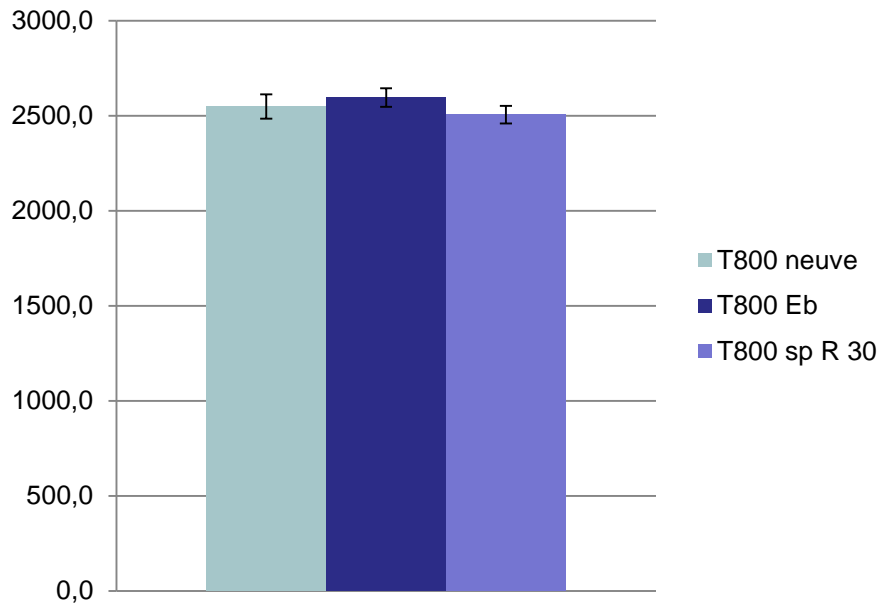


TRL5-6

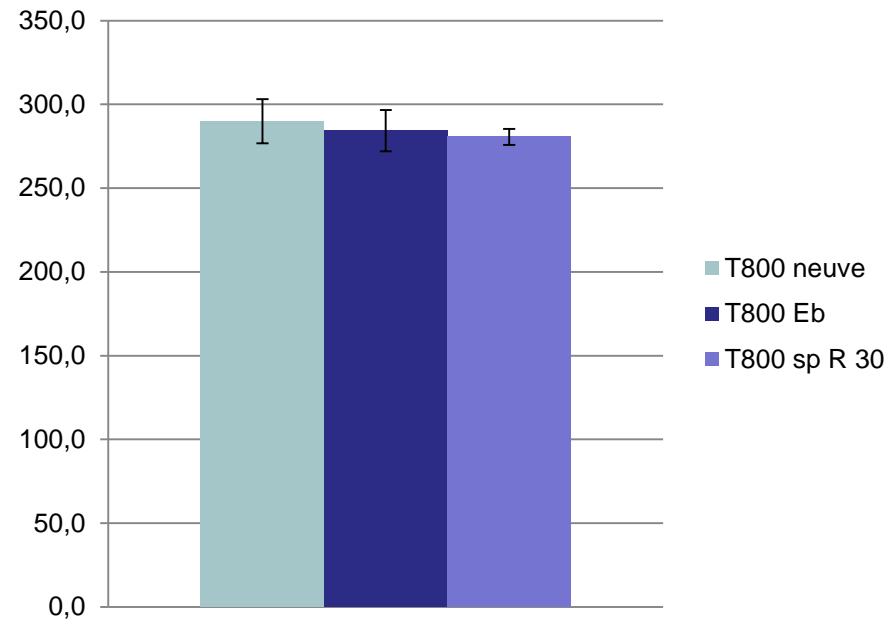
Métier à inventer

Bilan énergétique à travailler

## 2 - Caractérisation de fibres de carbone recyclées ...post-solvolyse



Contrainte à rupture d'une fibre sèche



Module d'élasticité d'une fibre sèche

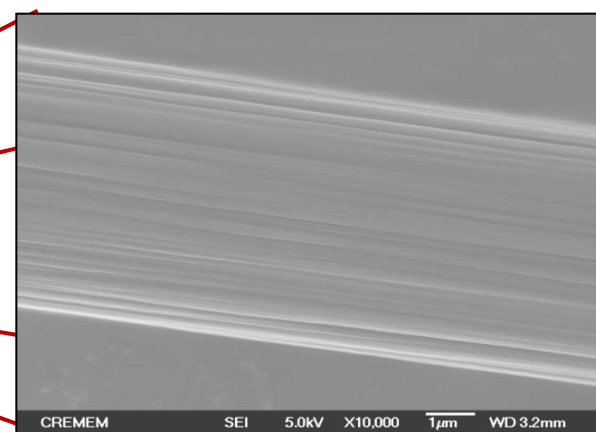
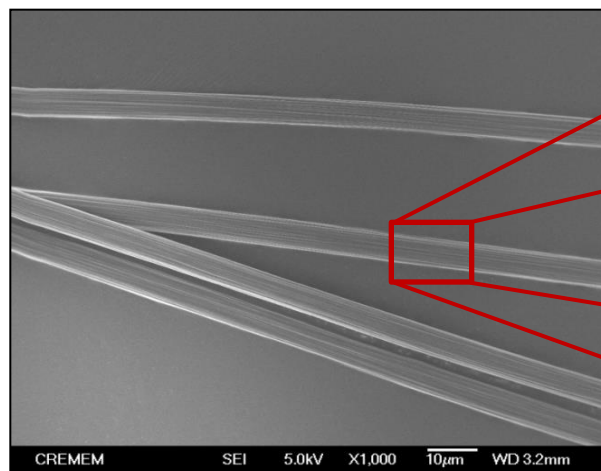
**Aucune dégradation mesurable**



# 2 - Caractéristiques des fibres recyclées post solvolyse

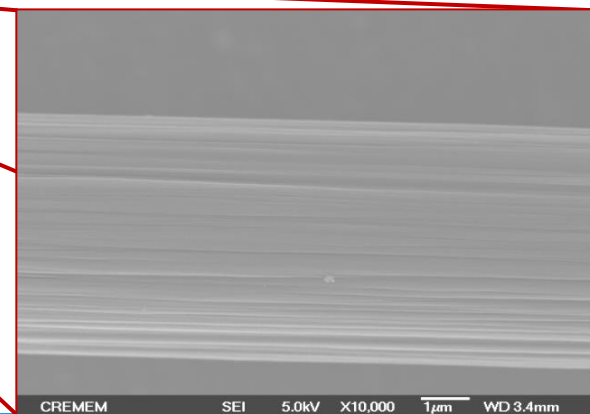
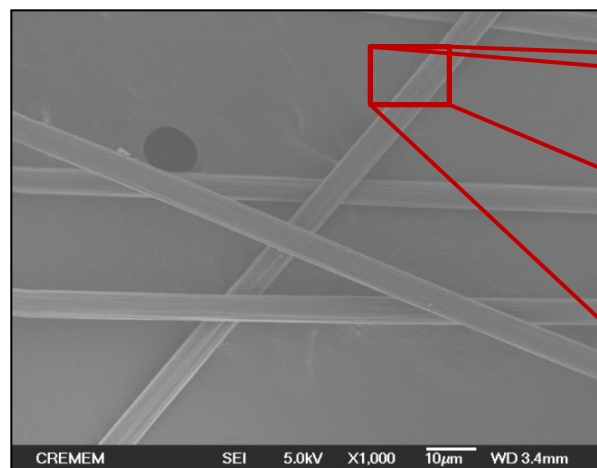
- Impact de la SFC = perte de l'ensimage

Fibre vierge



Carbon fibre:  
T800HB

Après SFC



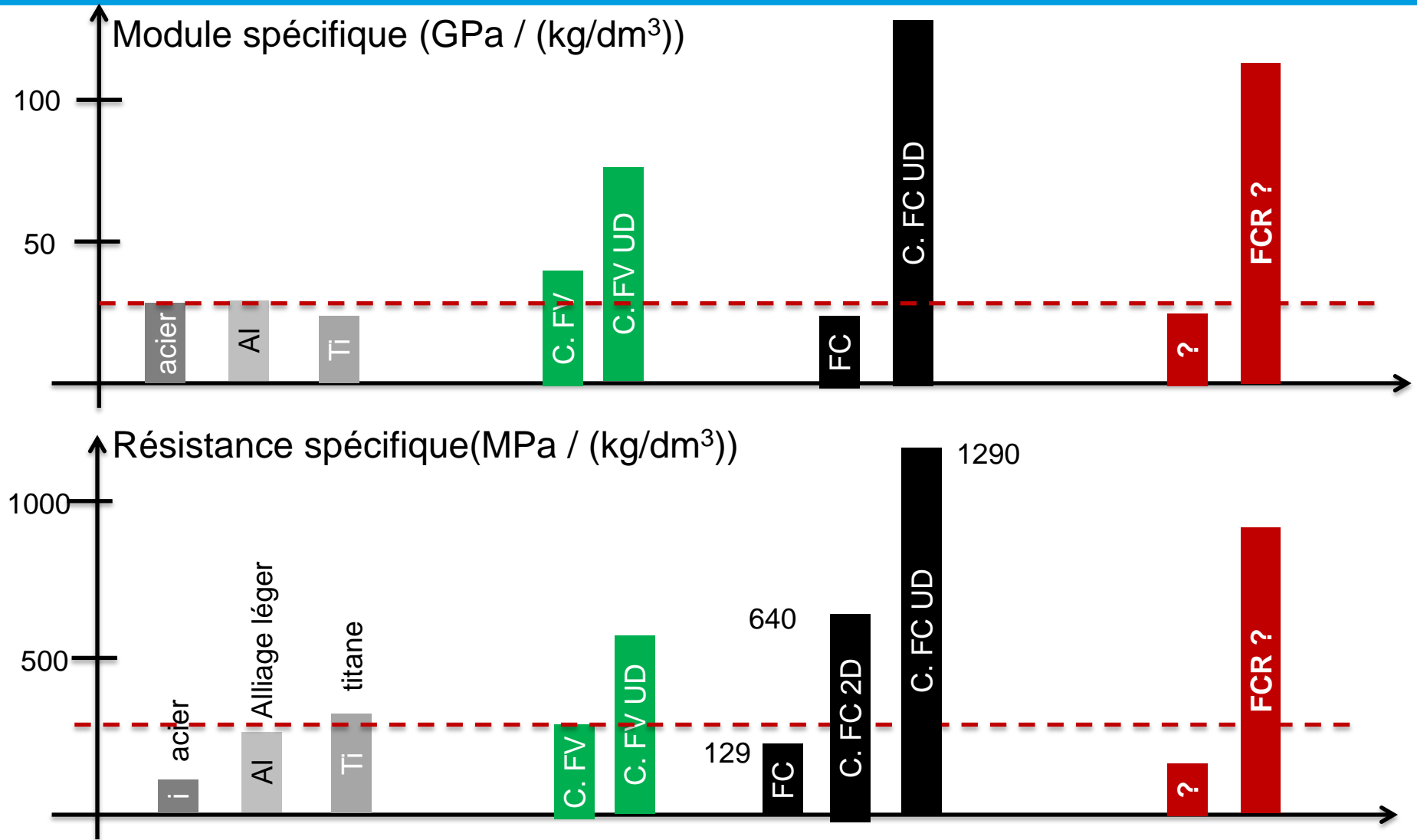
# 3 - Propriétés des composites carbone ...recyclés

**Il existe 2 techniques opérationnelles pour éliminer la matrice sans endommager les fibres de carbone**

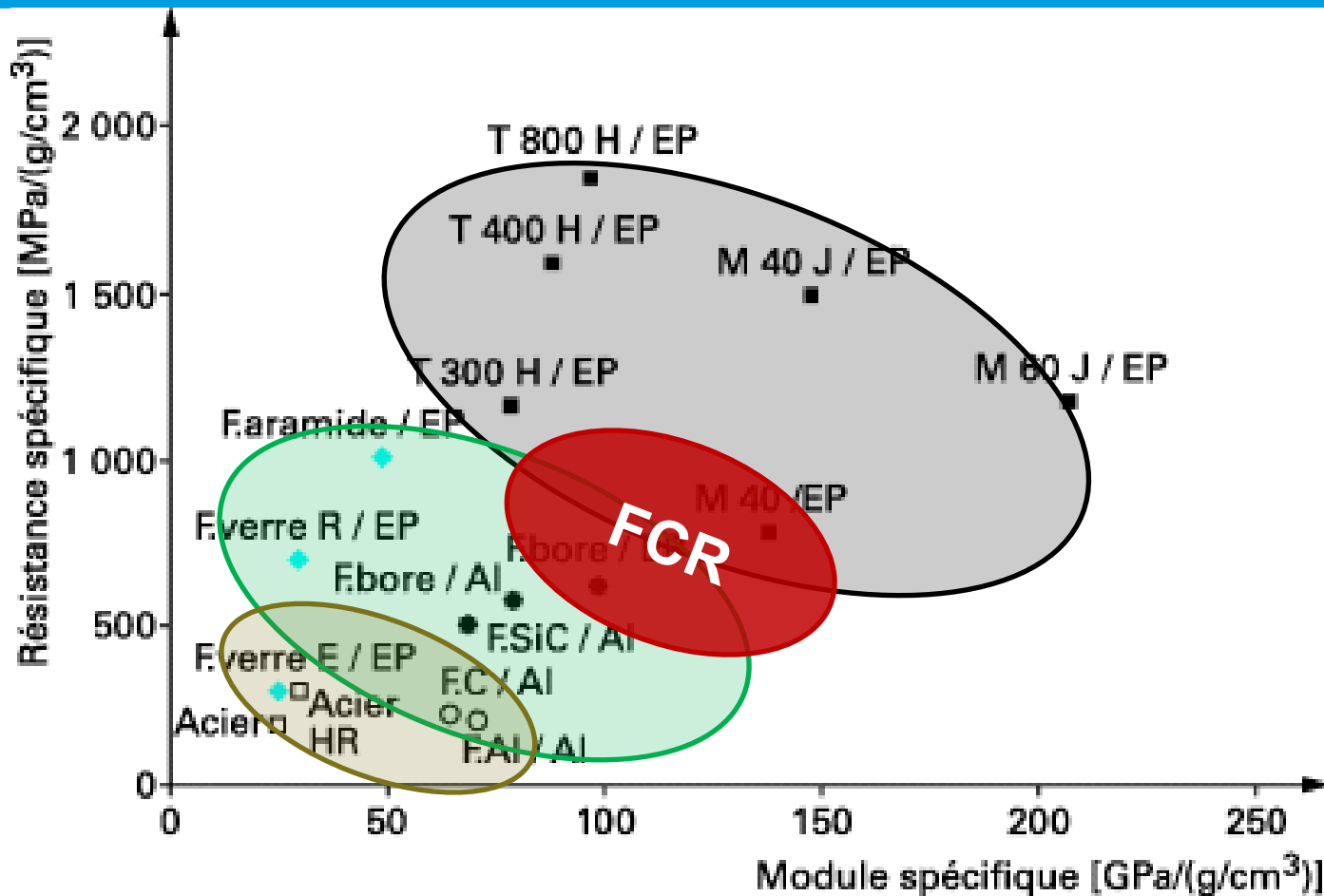
➤ **Comment utiliser les fibres de carbone recyclées ?**

- Valorisation maximale de la qualité de la fibre de carbone recyclée (tirer parti de la qualité de la séparation fibres / matrice)
- ➔ Fibres broyées ou fibres longues ?
- ➔ Sous quelle forme ?
- ➔ Avec quelle résine (TP, TD)?
- ➔ Applications structurales ?

# 3.1 - Composites carbone / autres matériaux « H.P. »

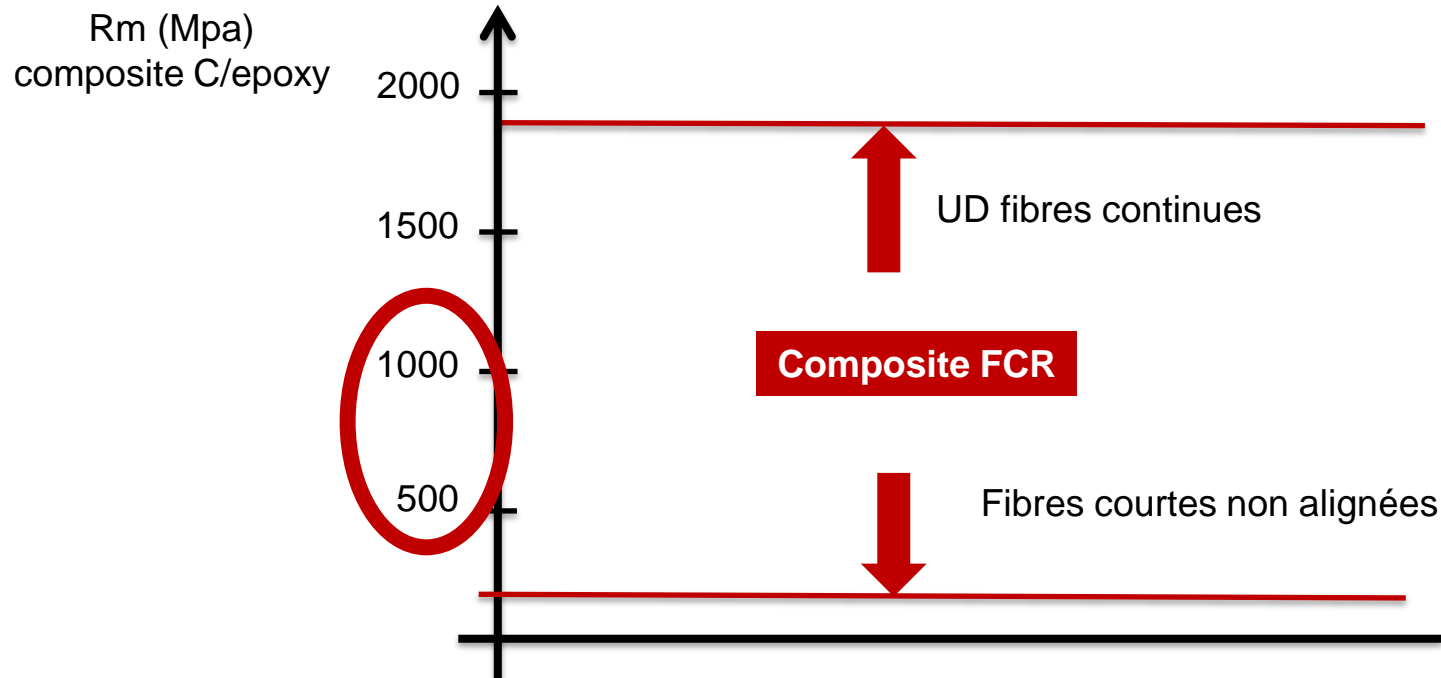


## 3.2 - Que doit-on attendre des composites FCR ?



- Viser E spécifique > 60      <=> E > 95 Gpa
- Viser R spécifique > 500      <=> E > 750 MPa

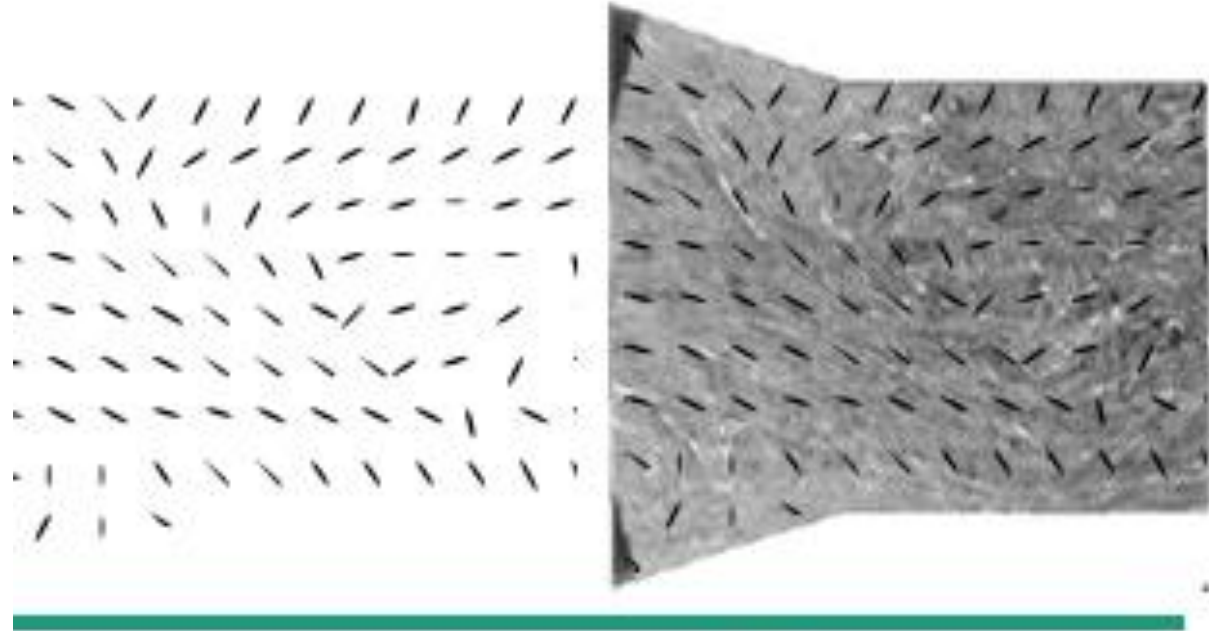
## 3.3 - Caractéristiques futures des composites FCR



- Pour faire des composites FCR des matériaux « hautes performances »
- › Fibres longues,
  - › Fibres alignées,
  - › Fort taux de fibre,
  - › Fibres imbriquées

## 3.4 - Bibliographie caractéristiques des composites FCR

- **Moulage par injection Institut FraunHaufer (D)**  
Fibres courtes non alignées  
+ matrice PP



 **Fraunhofer**  
IGCV

# 3.4 - Bibliographie

## caractéristiques des composites FCR

### → Moulage par injection FCR courtes + matrice Thp (PP)

**Table 2**

Mechanical properties of plain and 30 wt.% recycled carbon fibre (RCF) reinforced PP.

Property	PP	PP + 30 wt.% RCF
Tensile modulus (GPa)	1.69 ± 0.11	14.67 ± 0.76
Tensile strength (MPa)	28.94 ± 0.44	50.62 ± 2.00
Flexural modulus (GPa)	1.46 ± 0.44	14.20 ± 0.31
Flexural strength (MPa)	44.15 ± 0.30	91.34 ± 1.82
Impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )	No-break	12.69 ± 1.14

*K.H. Wong, D. Syed Mohammed, S.J. Pickering, R. Brooks Effect of coupling agents on reinforcing potential of recycled carbon fibre for polypropylene composite Composites Science and Technology 72 (2012) 835–844*

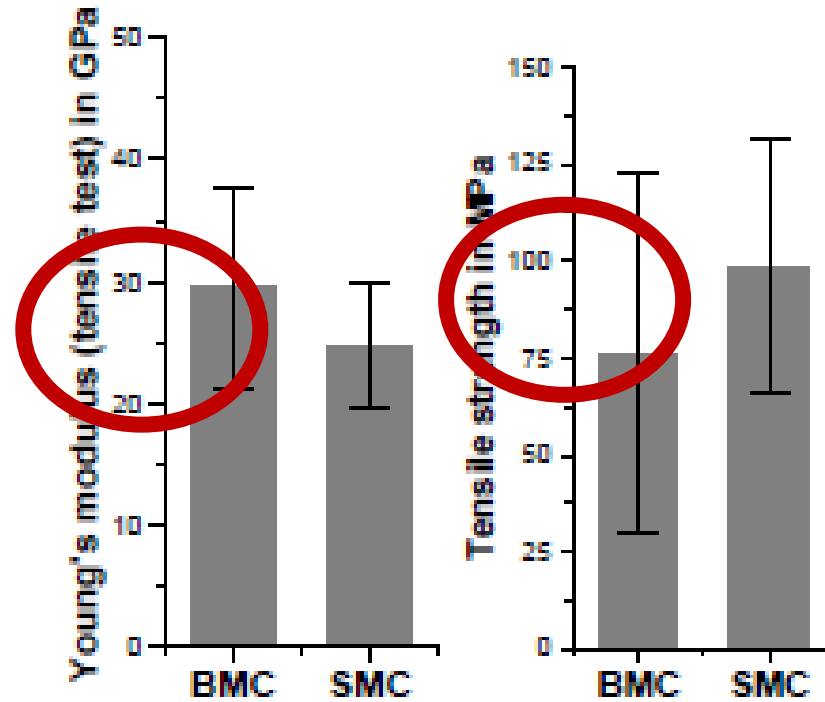
# 3.4 - Bibliographie

## caractéristiques des composites FCR

### → Broyage + réincorporation avec résines

SMC: virgin fibers  
BMC: recycled fiber  
( $v_f$  42%)

unsaturated polyester  
- polyurethane hybrid  
resin (UPPH)



(a) Young's modulus

(b) Tensile strength

*O. Saburow, J. Huether, R. Maertens, A. Trauth, Y. Kechaou, F. Henning, K. A. Weidenmann A direct process to reuse dry fiber production waste for recycled carbon fiber bulk molding compounds*

*1st Cirp Conference on Composite Materials Parts Manufacturing, cirp-ccmpm2017*



# 3.4 - Bibliographie caractéristiques des composites FCR

## → Etudes Hitachi (Jap.)

Fibres sous forme de « perruques »  
(pas de remise en forme)

+ matrice époxy

Résistance 90 MPa



Fig. 2 Dissolve of  $\alpha$



# 3.4 - Bibliographie caractéristiques des composites FCR

- **Projet AfReCar (UK)**  
(FCR « bon marché »  
fibres non alignées  
Lf 40mm  
Résistance **200 MPa**)



# 3.4 - Bibliographie caractéristiques des composites FCR

## → Fibres recyclées sous forme de voiles 2D enduits

Fibres pyrolysées

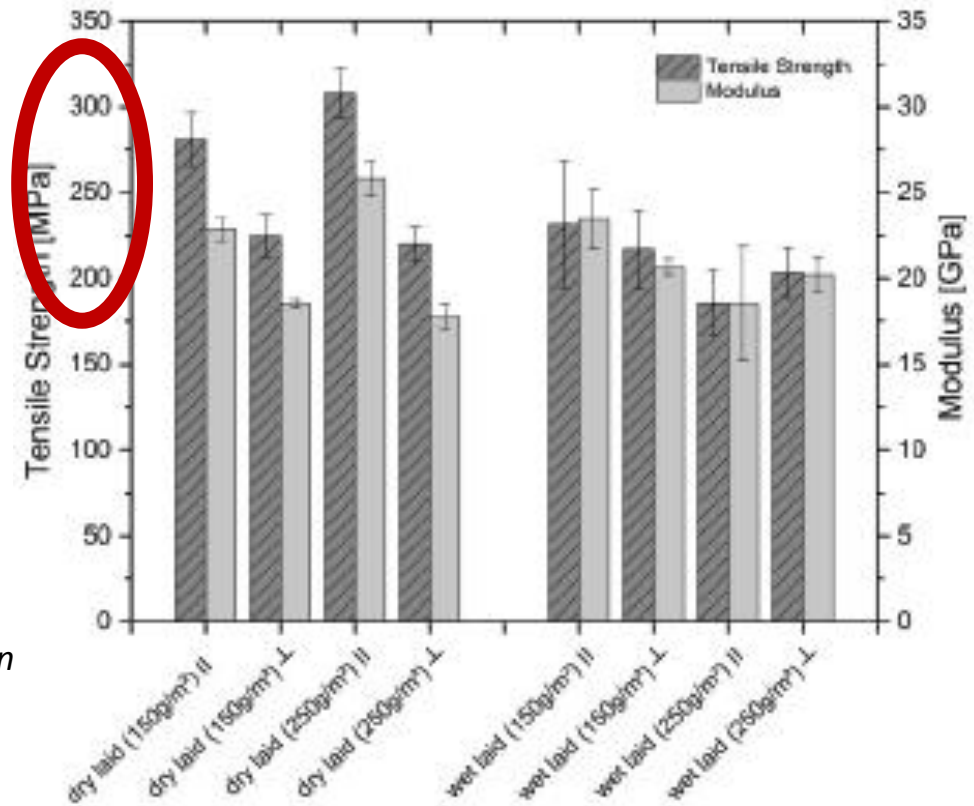
$L_f$  10 à 30 mm

Matrices TP/TD

Procédé compression, RTM

=>  $V_f$  20 à 25%

*Jakob Wöllinga, Maren Schmiega, Frank Manisa an  
comparison of processing technologies  
Procedia CIRP 66 ( 2017 ) 271 – 276*



# 3.4 - Bibliographie

## caractéristiques des composites FCR

### → Travaux Univ. Birmingham / Boeing (UK)

fibres partiellement alignées (40%) sous forme de voile

$L_f \approx 40\text{mm}$

$R \approx 400\text{ Mpa}$

**A racing kayak made out  
of recycled carbon fibre**

A team of academics developed a high-performance racing kayak made out of recycled carbon fibre, which entered the International Canoe Race in Wiltshire, UK.

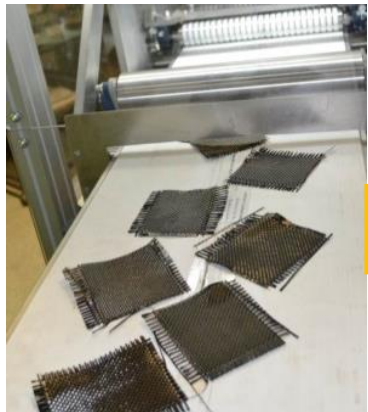


More of recycled carbon fibres, this race kayak gives a second life to composite materials.



# 3.5 – Technologie I2M caractéristiques des composites FCR

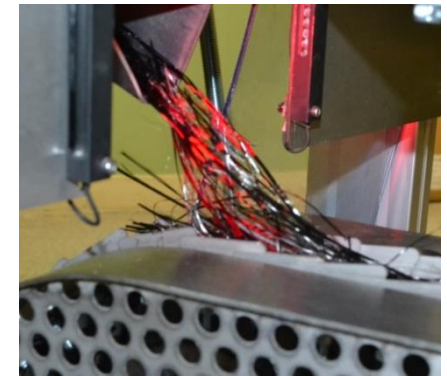
→ Technologie de réalignement I2M - Bordeaux



Morceaux de tissus



Binding (2% PA)



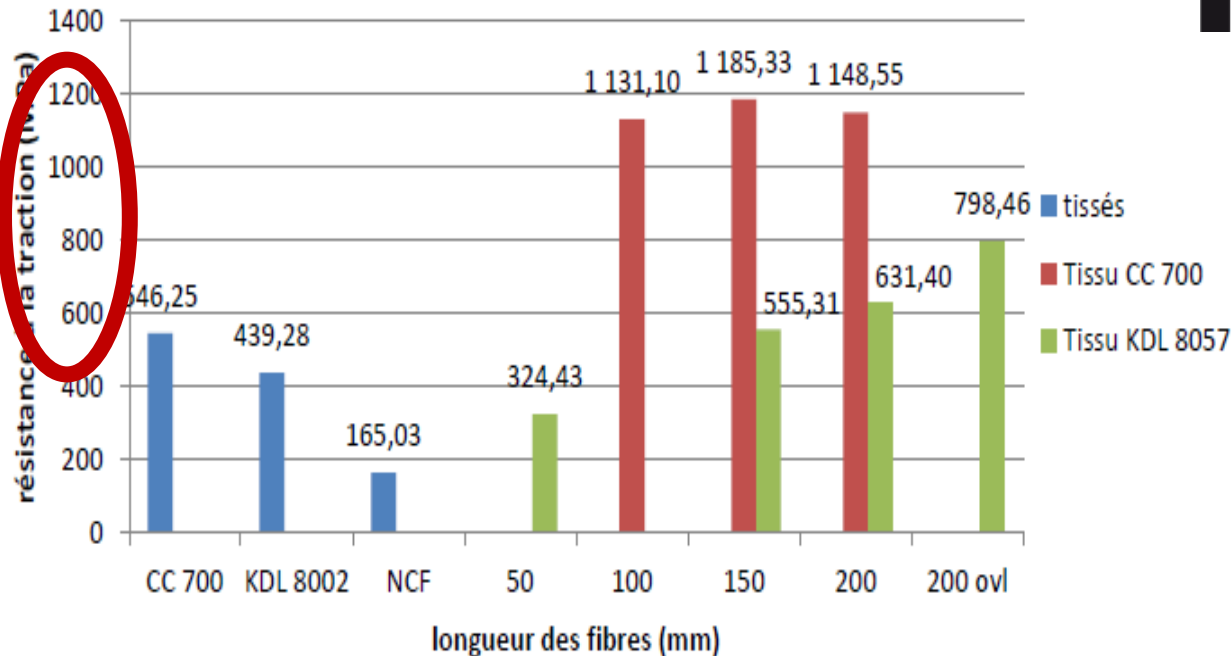
**Production de bandes continues de fibres réalignées**  
**Lf 50 à 200mm**  
**Dispersion d'alignement 8°**

# 3.5 – Technologie I2M

## caractéristiques des composites FCR



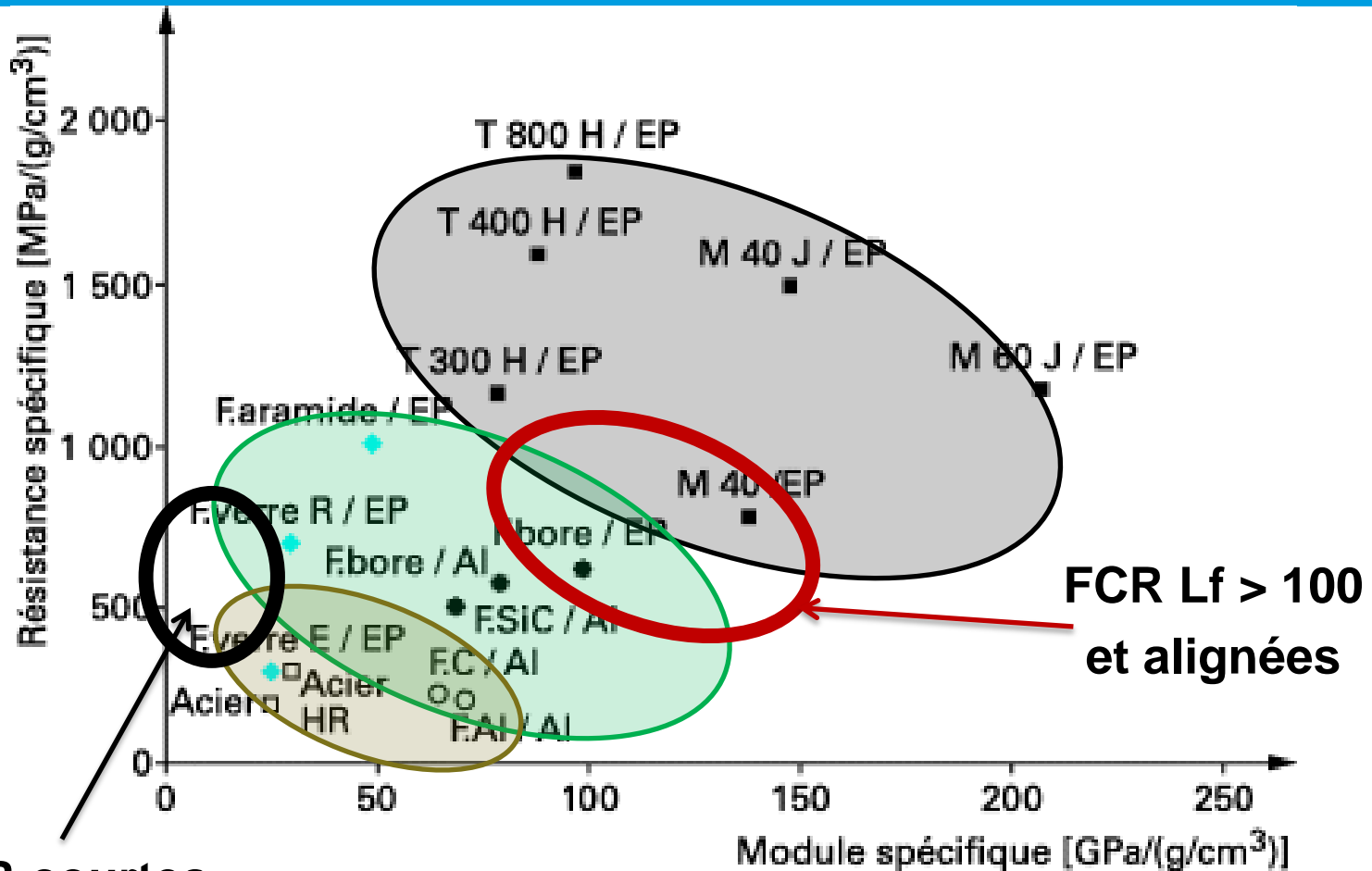
### → Résultats des composites « I2M »



**50mm < Lf < 300mm**  
**Réalignement ± 8°**  
**R ≈ 550 à 1000 Mpa**

# 4 – Influence de la mise en œuvre

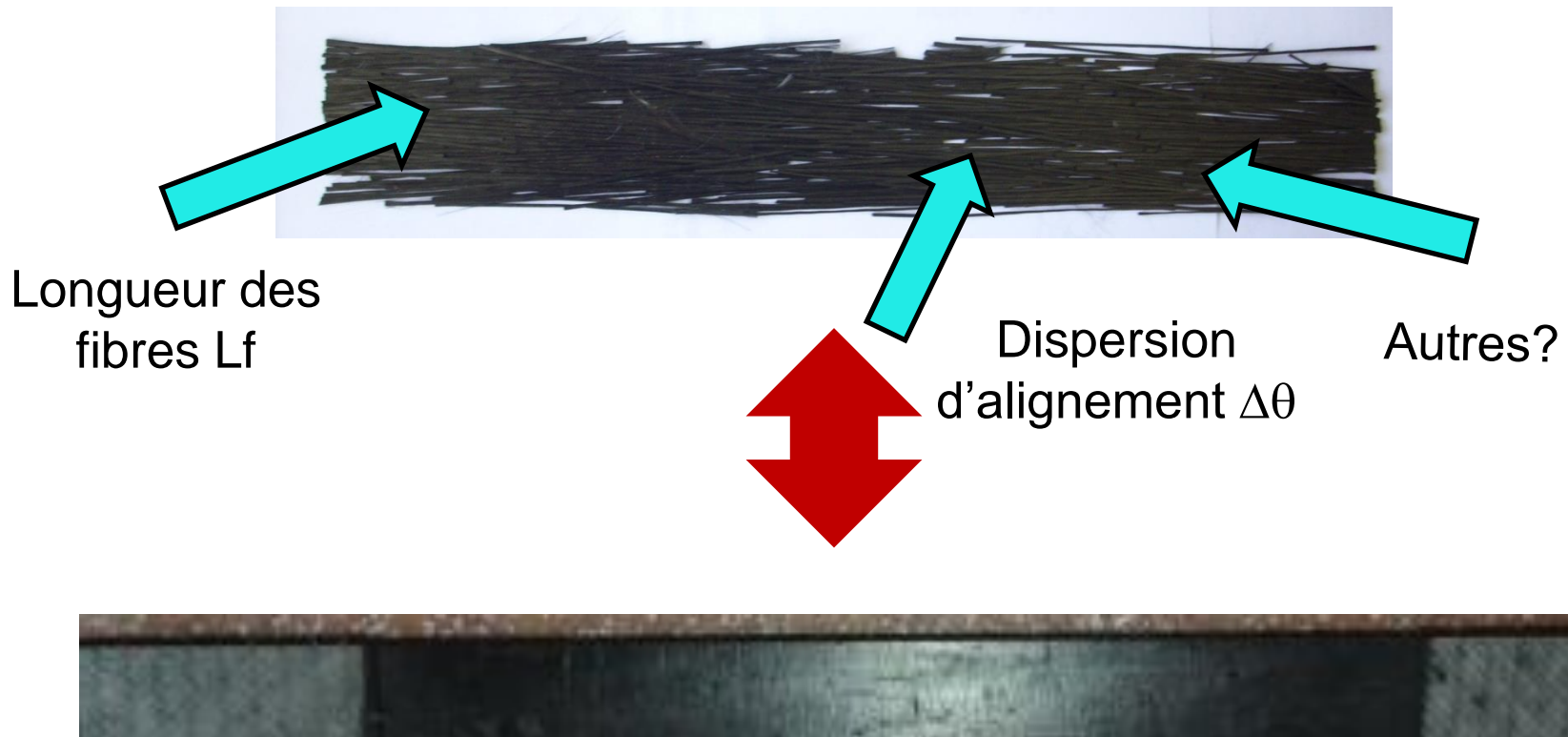
## 4.1 Positionnement des composites FCR ?



**FCR courtes  
ou non alignées**

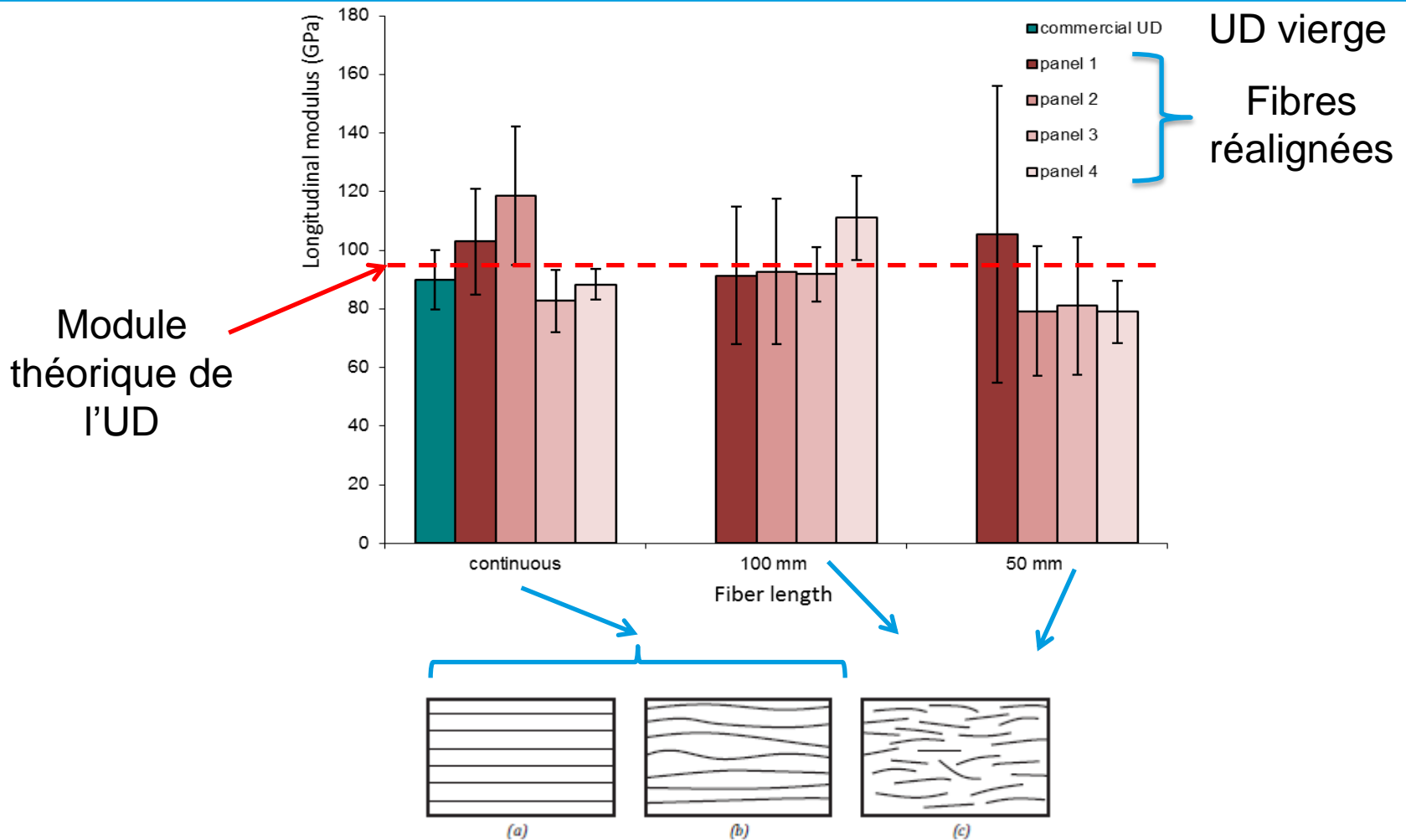
## 4.2 paramètres morphologiques des FCR

→ Paramètres morphologiques



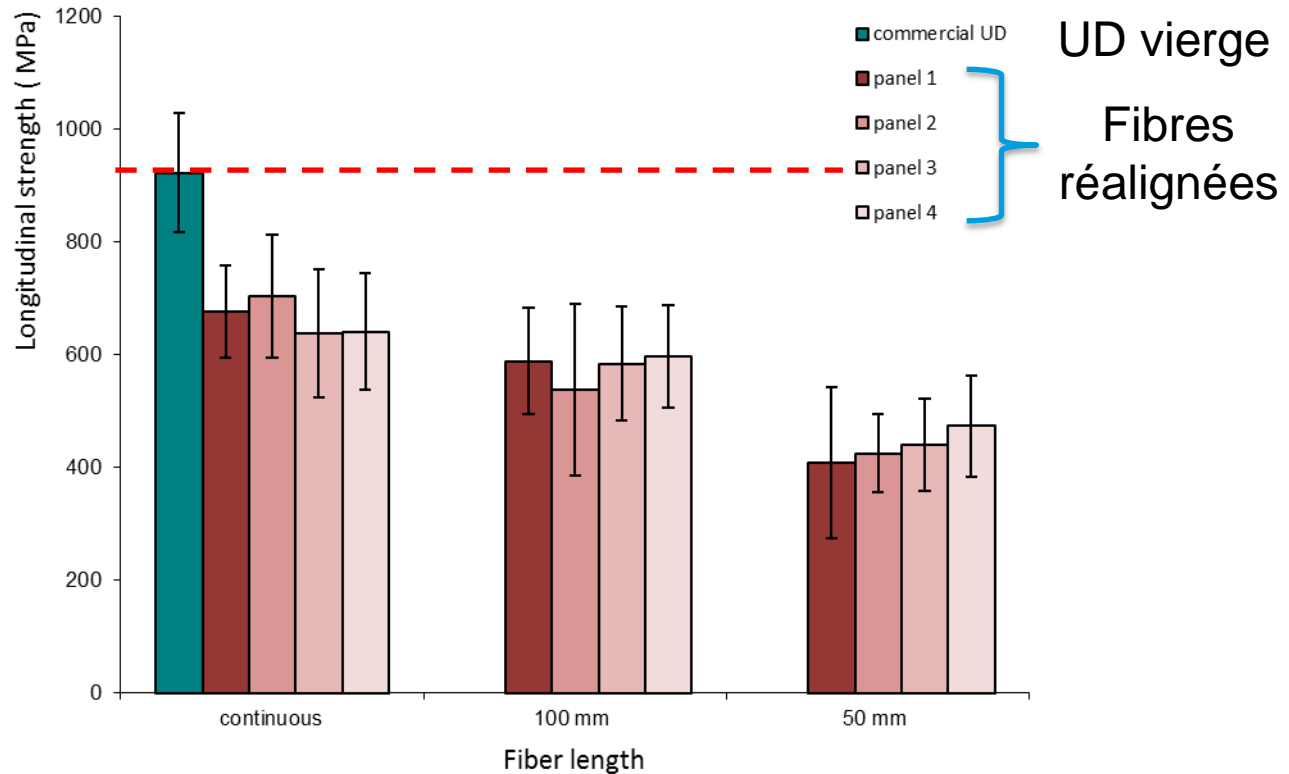


# 4.3 Etude de l'effet de la longueur des FCR



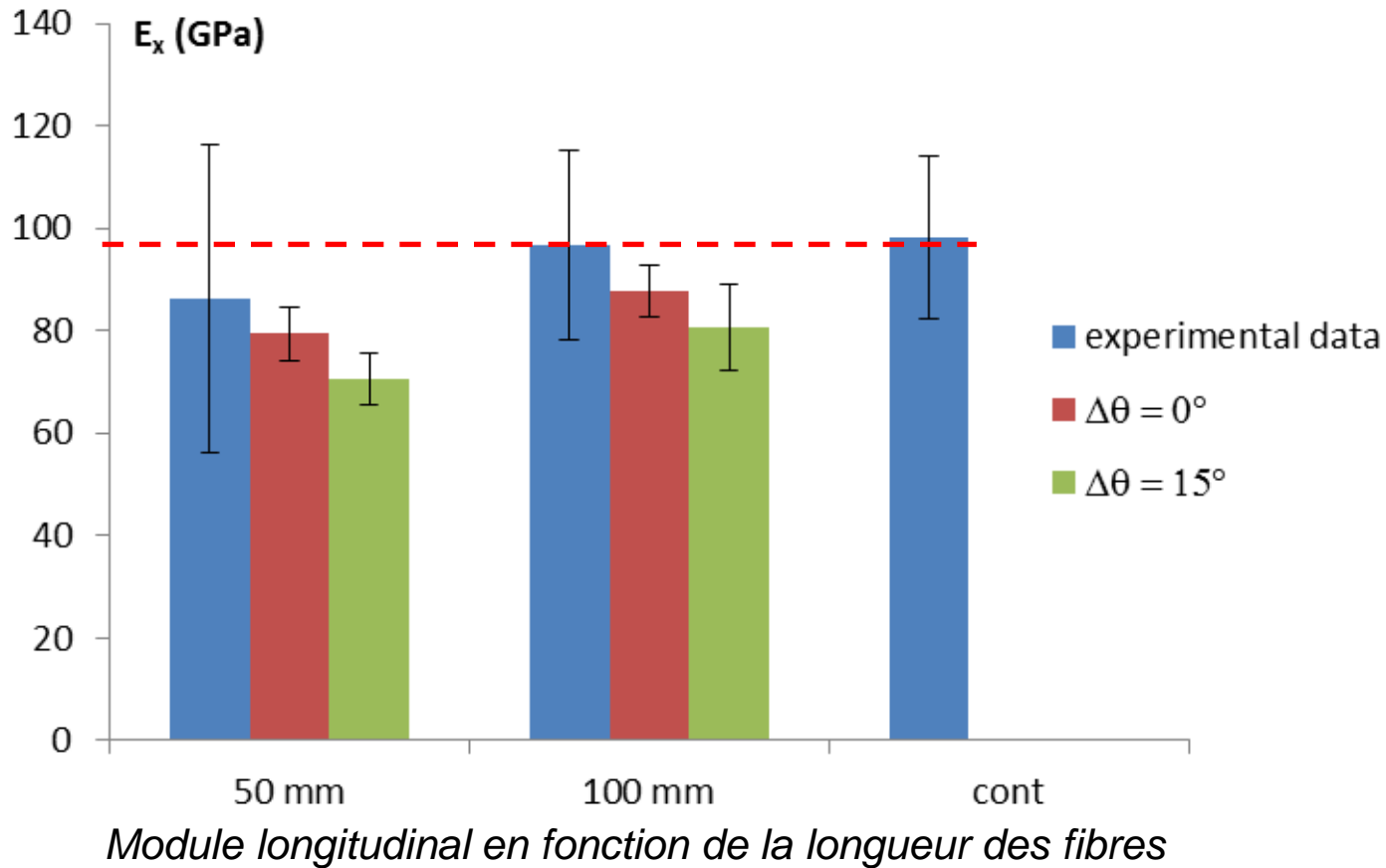
→ **Module composite RCF = module vierge si  $L_f > 100\text{mm}$**

## 4.3 Etude de l'effet de la longueur des FCR



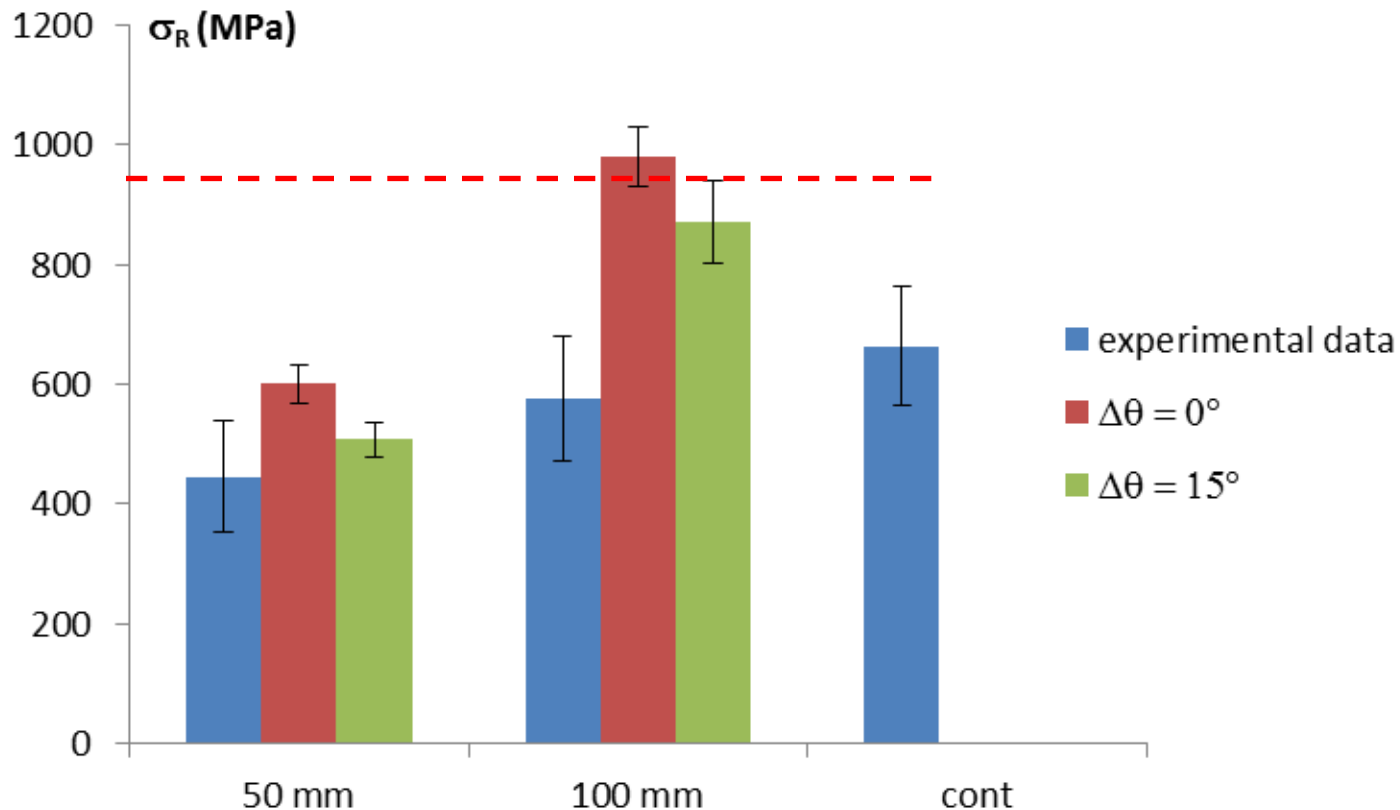
→ Résistance composite RCF > 50% résistance vierge si  $L_f > 100\text{mm}$

## 4.4 Etude de l'effet du désalignement des FCR



→ Un désalignement  $< 15^\circ$  a peu d'effet sur le module d'élasticité

## 4.4 Etude de l'effet du désalignement des FCR



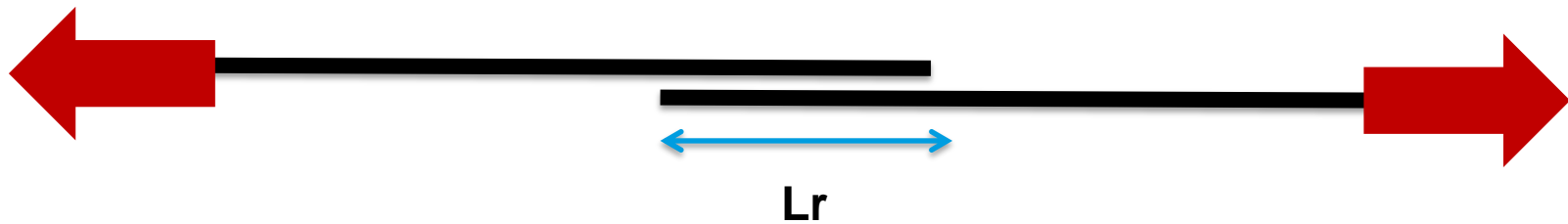
*Contrainte à rupture fonction de la longueur des fibres*

- Un désalignement de  $15^\circ$  engendre une baisse de 10% de la résistance
- Baisse de résistance obtenue expérimentalement : 38%...

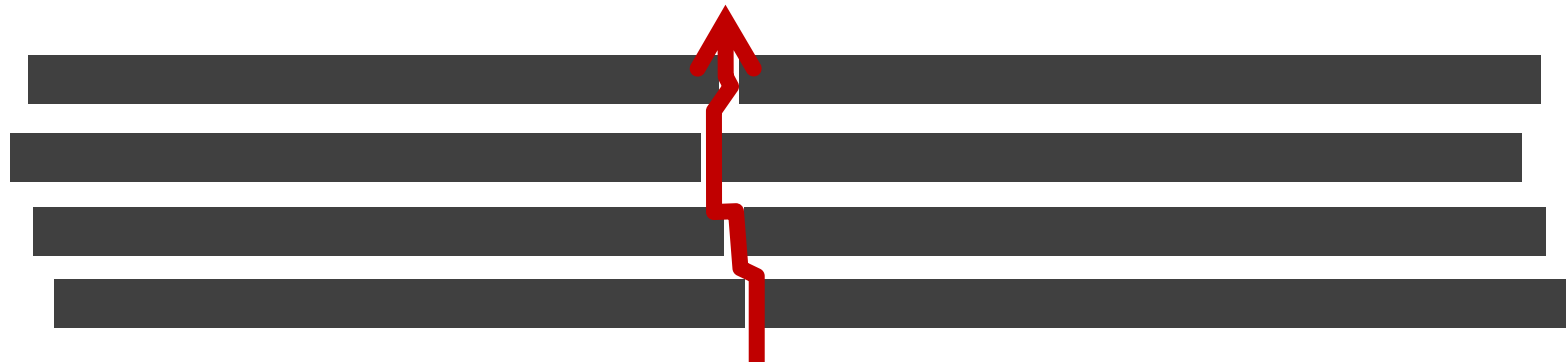
## 4.4 Paramètres supplémentaires à étudier

Composite FCR = composite à fibres discontinues...

→ Longueur de recouvrement ?



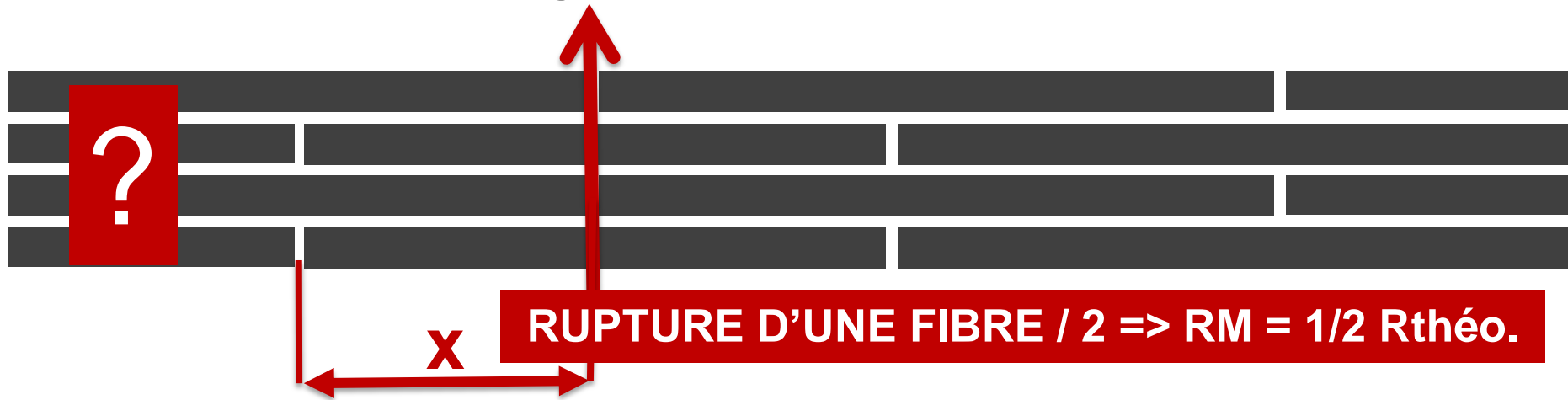
*Hélas, ce n'est pas si facile...*



**RUPTURE DE LA MATRICE**

# 5 - Perspectives

→ Etude de la morphologie idéale des préformes de FCR



# CONCLUSION

- Si  $L_f > 100\text{mm}$ , les composites RCF seront très rigides,
- C'est la morphologie des fibres qui conditionne la résistance
- Il est possible d'obtenir une résistance des RCF =  $\frac{1}{2}$  résistance vierge
- Seule l'étude et la maîtrise de l'imbrication des RCF permettra d'obtenir des résistances  $> 1000\text{ MPa}$