



**HAL**  
open science

## Composites à renfort tricoté: Relations entre contexture, nature du renfort et propriétés mécaniques du composite infusé

Laura Balea, Gilles Dusserre, Gérard Bernhart

► **To cite this version:**

Laura Balea, Gilles Dusserre, Gérard Bernhart. Composites à renfort tricoté: Relations entre contexture, nature du renfort et propriétés mécaniques du composite infusé. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.139. hal-00598115

**HAL Id: hal-00598115**

**<https://hal.science/hal-00598115>**

Submitted on 4 Jun 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **Composites à renfort tricoté : Relations entre contexture, nature du renfort et propriétés mécaniques du composite infusé**

## ***Weft-knitted composites: Relationships between fabric architecture, fibre type and mechanical properties of the infused composite***

**Laura Balea<sup>1</sup>, Gilles Dusserre<sup>1</sup> et Gérard Bernhart<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> : Université de Toulouse ; Mines Albi, ICA (Institut Clément Ader)  
Campus Jarlard, F-81013 Albi cedex 09, France

e-mail : laura.balea@mines-albi.fr, gilles.dusserre@mines-albi.fr, gerard.bernhart@mines-albi.fr

### **Résumé**

Les textiles tricotés présentent une bonne drapabilité grâce à leur grande capacité de déformation allée à la possibilité de tricoter des préformes de forme complexe. En contrepartie, les fibres étant courbées dans le renfort, les propriétés mécaniques du composite restent limitées en comparaison aux composites structuraux (tissés et unidirectionnels). L'objectif de cette étude est d'utiliser une autre caractéristique du tricotage, l'insertion de fils flottés, afin d'évaluer les propriétés maximales envisageables pour un composite à renfort tricoté. Pour cela, différentes architectures textiles (Jersey et Jersey chargé avec 1, 2 et 3 flottés) et différentes natures de fibres (verre E, basalte et carbone) sont utilisées. Le comportement et la rupture des composites ainsi obtenus sont étudiés dans différentes directions de sollicitation en fonction du nombre de flottés et de la nature des fibres. Le Jersey présente un comportement anisotrope, la direction rangée ayant les moins bonnes propriétés mécaniques. L'insertion de fils flottés dans cette direction permet d'obtenir un meilleur comportement mais affaiblit la direction colonne. En fonction du nombre de fils flottés on peut obtenir un matériau quasi-isotrope ou bien un matériau anisotrope ayant de meilleures propriétés suivant l'une ou l'autre des directions principales du renfort.

### **Abstract**

Weft knitted fabrics can be easily draped thanks to a high deformation ability and the process capability to knit complex shape preforms. Nevertheless mechanical properties are limited compared to structural composites (woven and unidirectional) because of the curvature of the fibers. The aim of this work is to use an other capability of the knitting process, the insertion of inlay yarns, in order to evaluate the maximal mechanical properties possible for knit reinforced composites. Several knitted architectures (plain knit with 0 to 3 inlay yarns) and several fiber types (E-glass, basalt and carbon) are processed. The behavior and the fracture of the resulting composites are investigated along different load directions depending on the number of inlay yarns and the fiber type. Plain knit reinforcement results in an anisotropic composite with lower properties in the course-wise direction. The insertion of inlay yarns in this direction increases the course-wise properties but weakens the wale-wise direction. Depending on the number of inlay yarns, a quasi-isotropic material could be obtained or an anisotropic material with higher properties in one or the other principal direction of the reinforcement.

**Mots Clés :** composites ; renfort tricoté ; comportement mécanique ; rupture ; procédés voie liquide

**Keywords :** composites; weft knitted reinforcement; mechanical behaviour; fracture; Liquid Composite Moulding

## **1. Introduction**

Il est couramment admis que les composites à renforts tricotés, malgré leur bonne tenue à l'impact [1], présentent des propriétés mécaniques limitées en comparaison à des renforts plus structuraux (unidirectionnels, tissus, tresses) [2]. S'ils ne concurrenceront pas ces renforts sur les applications structurales, ils présentent certaines propriétés (drapabilité [3], perméabilité [4]) particulièrement intéressantes pour la mise en œuvre de composites par les procédés « voie liquide ». En particulier, le tricotage fournit des préformes prêtes à être imprégnées (pas de recours à des semi-produits), ce qui permet d'éviter les étapes de découpe et d'assemblage [5]. On peut donc envisager une production plus réactive, capable de s'adapter aux demandes du client, en particulier en adaptant la contexture [6], le ou les types de fibres tricotées et l'épaisseur du produit.

Les propriétés mécaniques de ces matériaux doivent cependant être suffisantes pour trouver de nouvelles applications. Des études précédentes [7] ont montré que les tricots double fonture ont un comportement quasi-isotrope avec des propriétés faibles (contrainte à rupture d'environ 50 MPa). En plus de la possibilité qu'ils offrent de réaliser des préformes cylindriques, les tricots simple fonture présentent des propriétés intéressantes dans la direction colonne (contrainte à rupture d'environ 140 MPa), mais plus limitées dans la direction rangée. L'objectif de cette étude est de contribuer à l'amélioration des propriétés mécaniques en utilisant des fils flottés dont la fonction première est le renforcement de la direction rangée.

Des plaques composites de matrice époxyde renforcée de tricots Jersey et Jersey chargé (de un à trois fils flottés) ont été fabriquées par le procédé VARTM. Chaque contexture a été réalisée avec des fibres de verre E, de basalte et de carbone. Chacun des douze matériaux a été caractérisé par des essais de traction dans les directions 0° (direction colonne), 45° et 90° (direction rangée).

## 2. Matériaux et méthodes

### 2.1 Fibres et renforts tricotés

Les tricots étudiés sont fabriqués avec des fibres de verre E, de basalte et de carbone. Les caractéristiques de ces différentes fibres sont détaillées dans le (Tab. 1). Le nombre de filaments dans chaque mèche tricotée a été choisi pour assurer un diamètre de mèche équivalent pour chaque nature de fibres, ce qui entraîne des masses surfaciques plus faibles pour le carbone et équivalentes pour le verre et le basalte.

Tous les tricots ont été réalisés sur le même métier avec la même jauge de manière à assurer une taille de maille équivalente pour toutes les contextures (environ 5 mm dans la direction colonne et 4 mm dans la direction rangée). La longueur moyenne de fil par maille est d'environ 12 mm pour le Jersey et de 17, 20 et 22 mm respectivement pour les contextures disposant d'un (JC1), de deux (JC2) et de trois fils flottés (JC3). L'épaisseur du textile augmente également avec le nombre de fils flottés. La (Fig. 1) détaille l'architecture fibreuse en fonction du nombre de fils flottés. Le pas choisi pour la fixation du fil flotté au Jersey par une charge est de quatre mailles, d'une rangée à l'autre, les charges se font sur la même colonne de mailles. Les tricots avec fils flottés présentent donc certaines colonnes sans charge et d'autres qui sont chargées à chaque rangée comme montré sur la (Fig. 1).

La capacité d'une fibre à être tricotée est liée à sa tenue au cisaillement lors de la formation de la maille dans le bec de l'aiguille. Les filaments de petit diamètre sont ainsi d'avantage sujet à la rupture lors du tricotage. De même, la présence de flottés fait augmenter les efforts lors du tricotage. Les tricots de carbone et les tricots JC2 et JC3 présentent ainsi un endommagement initial non négligeable que l'on peut observer sur la (Fig. 1).

fibre	caractéristiques des filaments		caractéristiques de la mèche		caractéristiques des tricots				
					Jersey	JC1	JC2	JC3	
verre E <sup>1</sup>	diamètre	16 µm	nombre de filaments	1200	masse surfacique	844	1237	1575	1774
	module	80 GPa	masse linéaire	600 tex		g/m_	g/m_	g/m_	g/m_
	densité	2.62	diamètre équivalent	0.58 mm		épaisseur	1.6 mm	1.95 mm	2.35 mm
basalte <sup>2</sup>	diamètre	13 µm	nombre de filaments	1672	masse surfacique	914	1305	1518	1771
	module	84 GPa	masse linéaire	600 tex		g/m_	g/m_	g/m_	g/m_
	densité	2.70	diamètre équivalent	0.56 mm		épaisseur	1.6 mm	1.9 mm	2.25 mm
carbone <sup>3</sup>	diamètre	7 µm	nombre de filaments	6000	masse surfacique	596	820	1047	1193
	module	238 GPa	masse linéaire	400 tex		g/m_	g/m_	g/m_	g/m_
	densité	1.76	diamètre équivalent	0.57 mm		épaisseur	1.55 mm	1.85 mm	2.1 mm

Tab. 1. Caractéristiques massiques et dimensionnelles des fibres et des tricots étudiés (<sup>1</sup> Owens Corning Vetrotex T30 111AX23, <sup>2</sup> Basaltex BCF, <sup>3</sup> Toho Tenax HTA 5131 6K Z10).

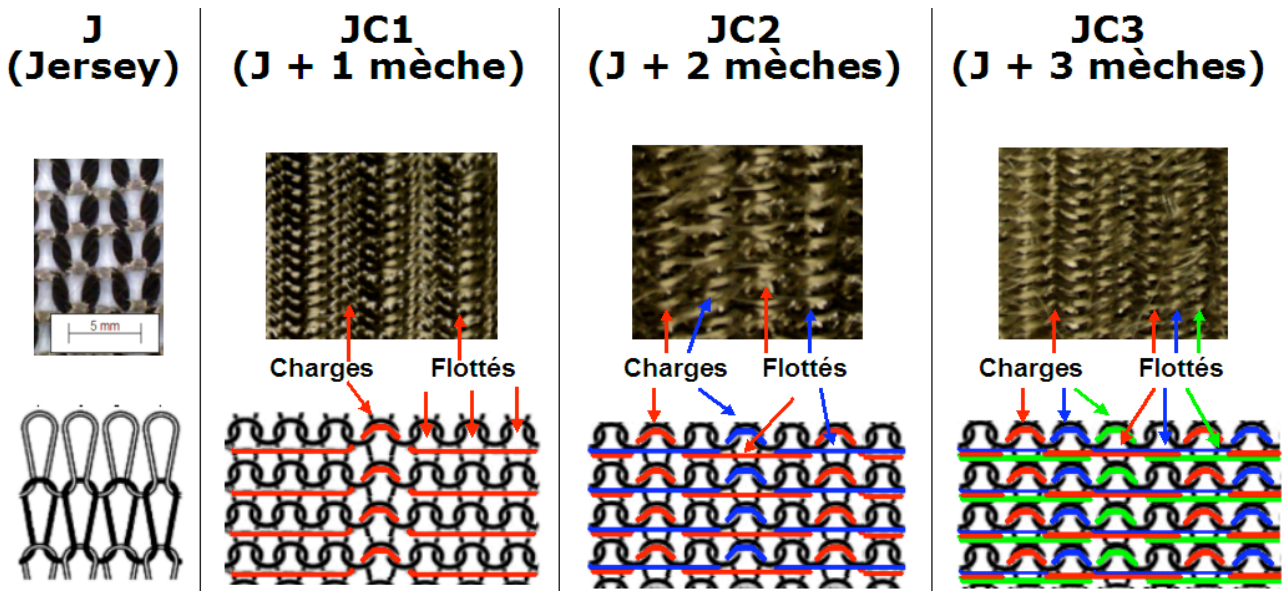


Fig. 1. Renforts tricotés étudiés (les images correspondent à des tricots de fibres de basalte).

## 2.2 Mise en oeuvre des composites

Des préformes carrées de 400 mm de côté, dont les contextures ont été présentées dans le paragraphe précédent, ont été imprégnées en moule fermé à température ambiante et pression atmosphérique par le procédé VARTM avec une résine époxyde bi-composants (résine SICOMIN SR 1710i et durcisseur SD8822). Un cycle de polymérisation de 16 heures à 60°C a ensuite été appliqué avant démoulage (voir la référence [7] pour de plus amples détails).

Afin d'obtenir des caractéristiques comparables (épaisseur de 3mm et taux volumique de fibres d'environ 30 %) entre les plaques renforcées de Jersey et de JC1, trois plis de Jersey ont été drapés pour deux plis de JC1. Ce même nombre de plis a été conservé pour la fabrication des composites renforcés de JC2 et JC3 pour mettre en évidence l'augmentation du taux de fibres par la présence des flottés. Le (Tab. 2) présente les caractéristiques des plaques obtenues. Les taux volumiques indiqués ont été obtenus par double pesée sur chaque plaque.

fibre	caractéristiques des composites				
	renfort	Jersey	JC1	JC2	JC3
	nombre de plis	3	2	2	2
verre E	$V_f$	31%	29%	38%	43%
	porosité	2.8%	5.4%	7.1%	5.4%
basalte	$V_f$	32%	31%	35%	41%
	porosité	3.4%	8.4%	7.5%	6.6%
carbone	$V_f$	32%	30%	37%	42%
	porosité	2.6%	10.1%	4.1%	3.2%

Tab. 1. Taux volumique de fibre  $V_f$  et taux de porosité moyen dans les composites.

## 2.3 Préparation des éprouvettes et essais de traction

Des éprouvettes de traction de 25 mm par 200 mm ont été découpées dans ces plaques à l'aide d'une lame circulaire à diamants sous lubrification à l'eau. Chaque plaque a fourni trois éprouvettes orientées à 0° (direction colonne), trois à 45° et trois à 90° (direction rangée). Des talons en alliage d'aluminium de 25 mm par 50 mm ont été collés sur chaque face aux extrémités de l'éprouvette.

Les essais de traction sont réalisés sur une machine électromécanique Instron 5800R d'une capacité de 30 kN. La contrainte conventionnelle est obtenue à l'aide de la mesure de la charge en cours d'essais et la déformation de la zone utile est mesurée à l'aide d'un extensomètre de base 25 mm.

Chaque configuration d'essai a fait l'objet de mesures de champ de déformation par la technique de stéréo-corrélation 3D d'images numériques. Pour cela, la zone utile a été mouchetée et observée par un banc stéréoscopique.

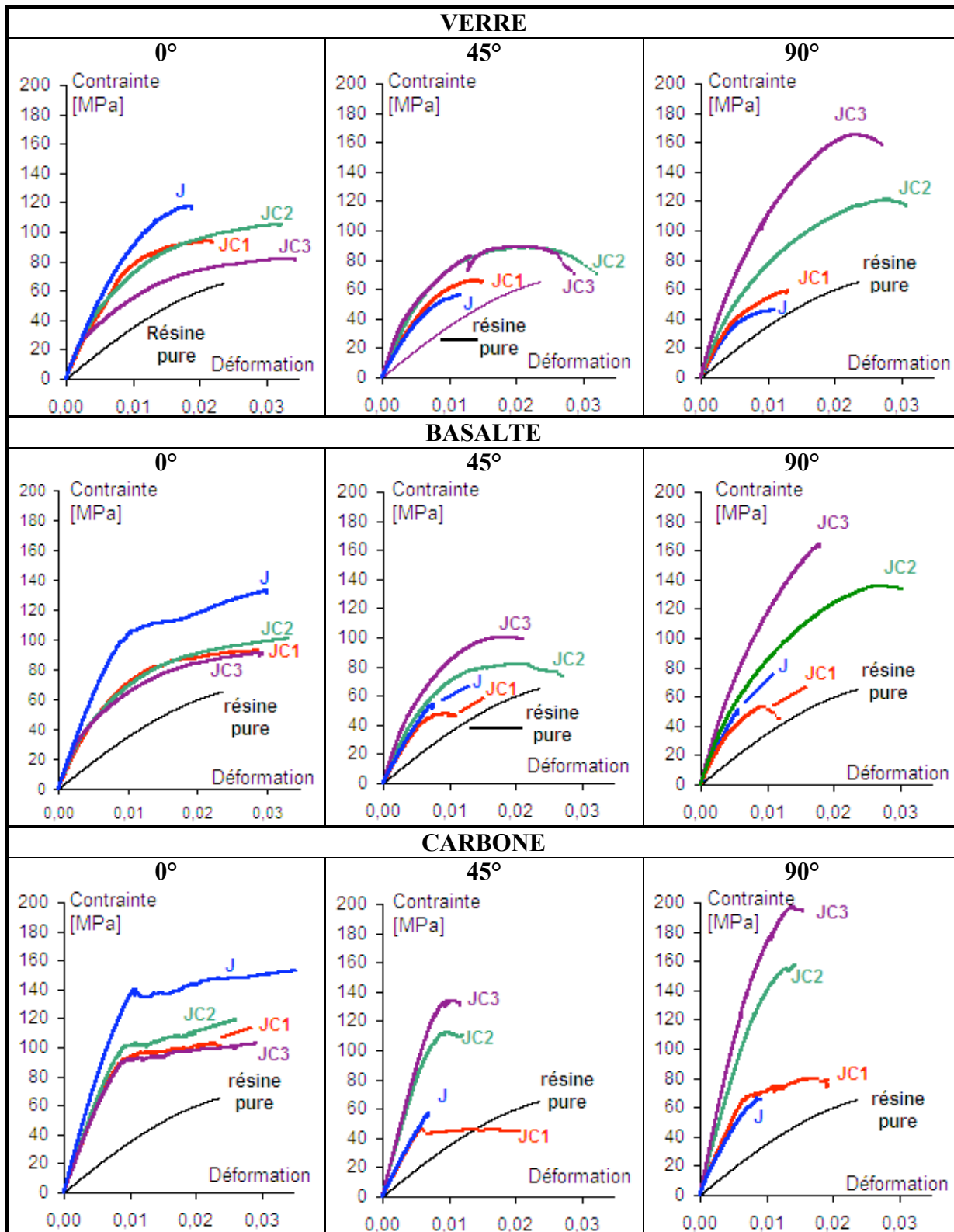


Fig. 2. Comportement mécanique des composites à renforts tricotés (JC, JC1, JC2, JC3) à base de fibres de verre, basalte, carbone dans les directions 0°(colonne), 45° et 90°(rangée).

### 3. Résultats

#### 3.1 Comportement mécanique

La résine utilisée a un module élastique de 3620 MPa et une contrainte à rupture de 65 MPa. Son comportement est élastique linéaire jusqu'à 45 MPa, puis présente une légère plasticité (Fig. 2). Le comportement des composites à renforts tricotés est de type élastique endommageable. Le renforcement d'une matrice époxyde par un tricot Jersey de fibres techniques [7] permet d'augmenter son module d'un facteur deux dans les directions 45° et 90° et d'un facteur trois dans la direction 0°. Sa contrainte à rupture, en revanche, n'est améliorée que dans la direction colonne.

La (Fig. 2) montre que l'ajout de fils flottés dans la direction rangée diminue la contrainte à rupture dans la direction 0° mais permet tout de même une amélioration en comparaison à la résine non renforcée. La direction rangée ne bénéficie de ce renforcement qu'à partir de deux flottés.

En particulier le renfort JC1 donne des propriétés proches des JC2 et JC3 dans la direction colonne, mais proches du Jersey dans les directions 90° et 45°. Le JC1 de carbone a la particularité de doubler la capacité de déformation à 45 et 90° du composite à renfort Jersey, alors que les JC1 verre et basalte ont une influence quasi nulle sur le comportement dans ces directions.

#### 3.2 Champs de déformation

La (Fig. 3) montre que les composites à renforts tricotés présentent une importante hétérogénéité de leur comportement avec des déformations locales qui peuvent varier du simple au double en fonction de la position sur le renfort. Ces hétérogénéités sont directement liées à la texture du renfort et à la direction de sollicitation. Dans la direction colonne, les hétérogénéités sont dues à l'alternance de zones riches en résine et riches en fibres et la présence des fils flottés n'est pas mise en évidence en comparaison au composite à renfort Jersey [7]. Les tractions à 45° et 90° révèlent la présence des fils flottés par des bandes plus rigides correspondant aux colonnes chargées et donc plus riches en fibres. Cette étude indique que le dimensionnement mécanique de pièces en composites à renforts tricotés par homogénéisation du matériau ne pourra s'appliquer que si les singularités géométriques de la pièce (perçages, rayons de courbure) sont très grandes devant la taille du volume élémentaire représentatif (environ 15 mm).

#### 3.3 Rupture

Les composites étudiés présentent une rupture perpendiculaire à la direction de sollicitation lors des essais à 0 et 90°, mais orientée à 45° lors des essais à 45° (Fig. 4). Ces observations sont cohérentes avec les champs de déformation observés [8].

Dans la direction colonne, la rupture intervient le long des fils flottés, dans des zones où les fibres sont majoritairement perpendiculaires à la sollicitation. La présence du fil flotté fragilise le matériau car la fissure n'a pas besoin de bifurquer lorsqu'elle atteint le croisement entre deux mailles consécutives, comme c'est le cas avec un renfort Jersey [7-9]. La fissure suit alors le fil flotté et non le fil tricoté.

De la même manière les composites à renfort Jersey rompent dans la direction rangée le long des zones riches en fibres perpendiculaires à la sollicitation. Le mécanisme est inchangé par la présence de fils flottés si ce n'est que la fissure se propagera préférentiellement entre une colonne de mailles chargées et une colonne de mailles flottées où de nombreuses fibres sont orientées à 45° de la sollicitation et subissent du cisaillement entre les filaments.

Lors des essais à 45°, les composites à renfort Jersey s'endommagent comme dans la direction 90° par cisaillement de zones riches en fibres orientées dans la direction colonne. L'ajout de fils flottés entraîne la présence de zones continues riches en fibres orientées dans la direction rangée. Le même mécanisme est donc à l'origine de la rupture des composites à renforts Jersey et Jersey chargé mais ce mécanisme ne se fait pas dans la même direction dans les deux cas.

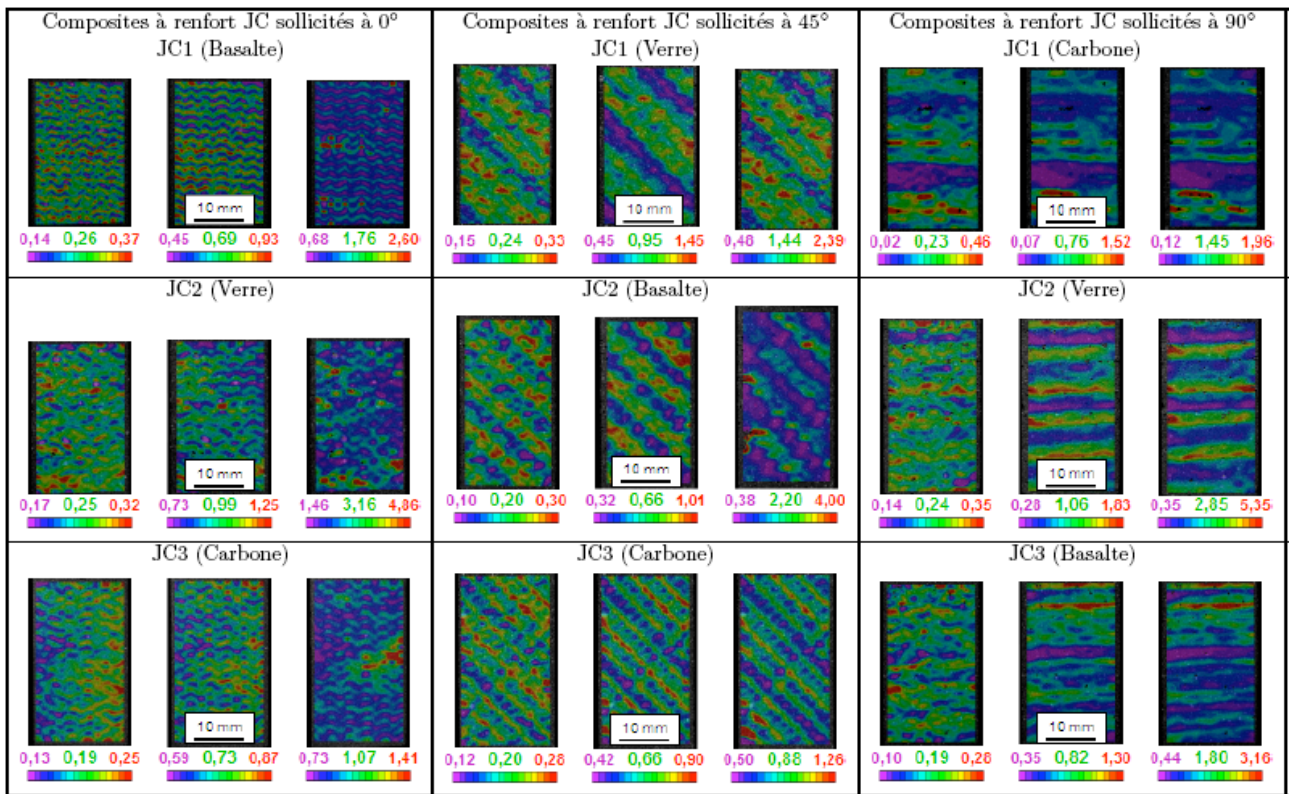


Fig. 3. Champs de déformation dans la direction de sollicitation des matériaux étudiés.

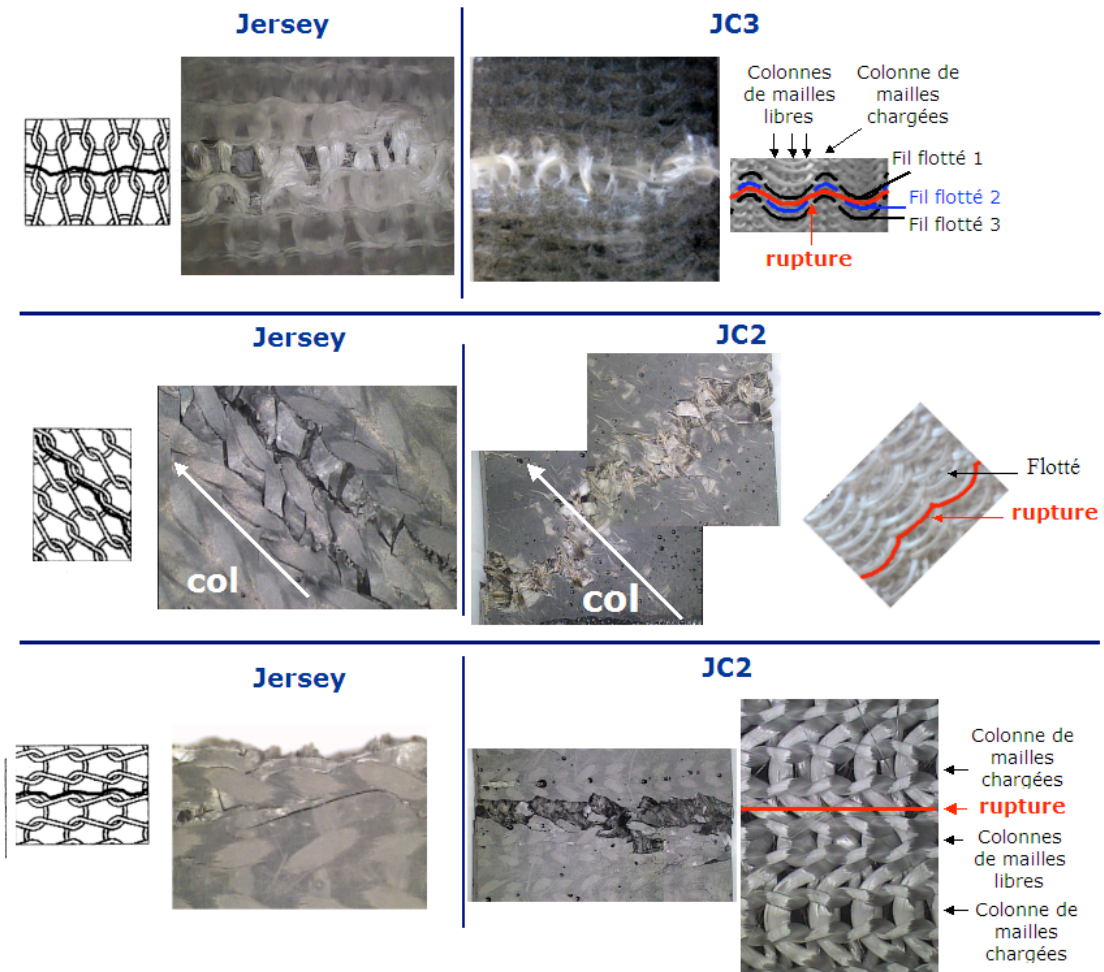


Fig. 4. Modes de rupture des composites à renforts tricotés.

## 4. Influence du renfort sur le comportement du composite

### 4.1 Influence du nombre de fils flottés

L'objectif de l'ajout de fils flottés est d'augmenter les propriétés du composite dans la direction rangée. La (Fig. 5) montre que cet objectif n'est pas atteint avec un seul fil flotté puisque cet ajout dégrade la direction colonne sans améliorer la direction rangée, que ce soit en terme de rigidité ou de résistance. L'effet devient intéressant à partir de deux flottés ; le renforcement de la direction rangée est sensible pour le module et très significatif pour la contrainte à rupture. De plus, l'augmentation du taux de fibre entraîne une perte de propriétés dans la direction colonne moins importante qu'avec un seul fil flotté. Le renforcement du Jersey par trois fils flottés entraîne un renforcement supplémentaire de la direction rangée. Les modules élastiques et les contraintes à rupture les plus importants sont obtenus pour cette configuration. En contrepartie, l'effet de l'augmentation du taux de fibre n'est plus bénéfique pour la direction colonne, en partie à cause de la dégradation des fibres lors du tricotage. Pour ce renfort, les propriétés mécaniques dans cette direction sont parmi les plus faibles mesurées, principalement en terme de résistance. On constate donc une grande diversité de propriétés mécaniques atteignables pour les composites à renforts tricotés. Les renforts JC2 donnent des propriétés presque isotropes avec des contraintes à rupture de l'ordre de 100 MPa. Un renforcement de l'une ou l'autre des directions principales est envisageable en utilisant les contextures Jersey pour la direction colonne ou JC3 pour la direction rangée.

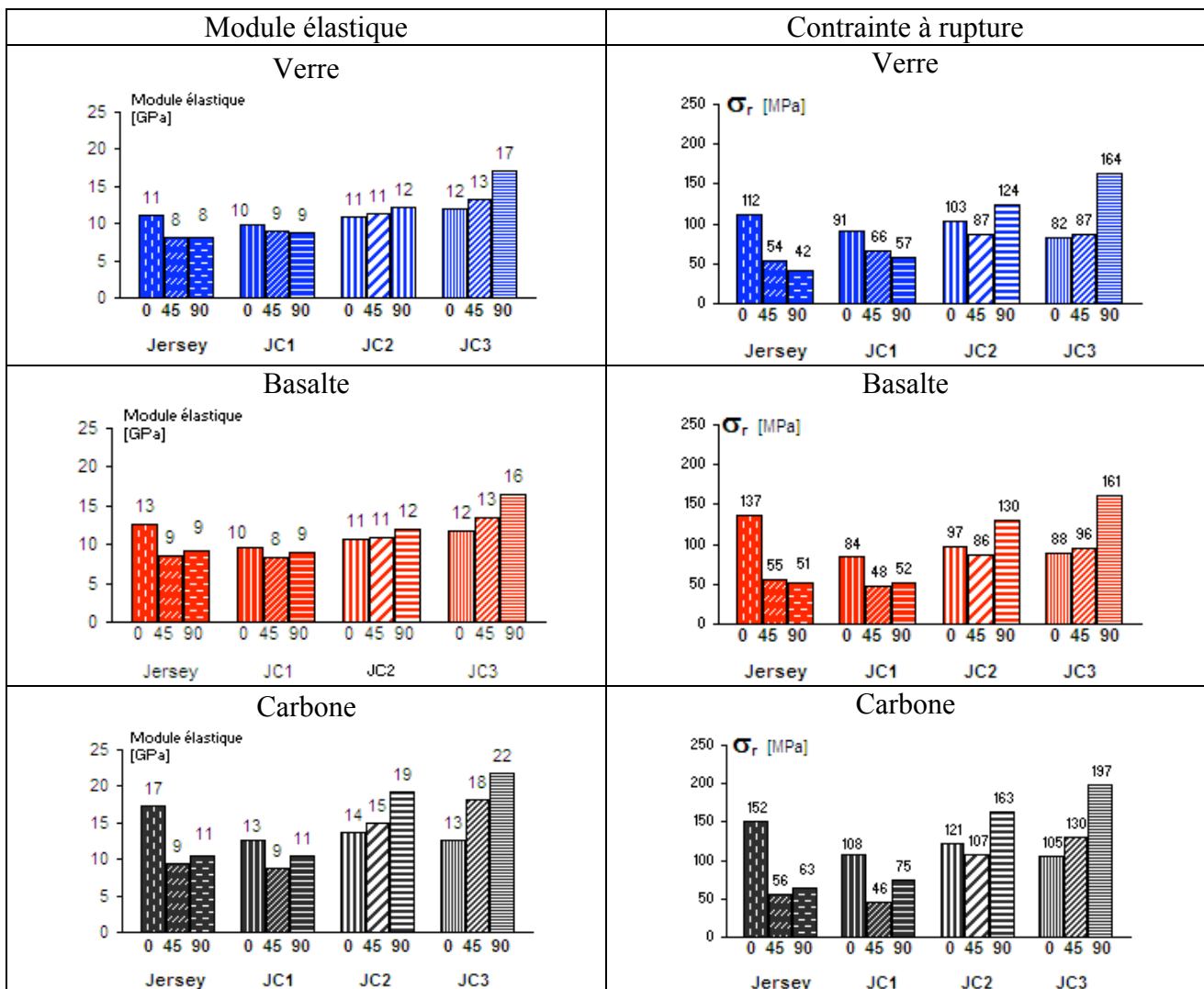


Fig. 5. Influence de la contexture (JC, JC1, JC2, JC3) sur les modules élastiques et les contraintes en rupture des composites.



### 4.2 Influence de la nature des fibres

La (Fig. 6) présente ces mêmes résultats en mettant l'accent sur la nature de la fibre. De manière générale, les fibres de verre et de basalte donnent des propriétés proches, tandis que l'utilisation de fibres de carbone permet d'obtenir des propriétés légèrement supérieures. Cependant, l'augmentation des propriétés par le recours aux fibres de carbone est estompée par un endommagement plus important lors du tricotage. Les composites à renforts tricotés ne sont donc pas les applications où le carbone sera le plus performant, rendant son utilisation peu judicieuse en regard de considérations économiques.

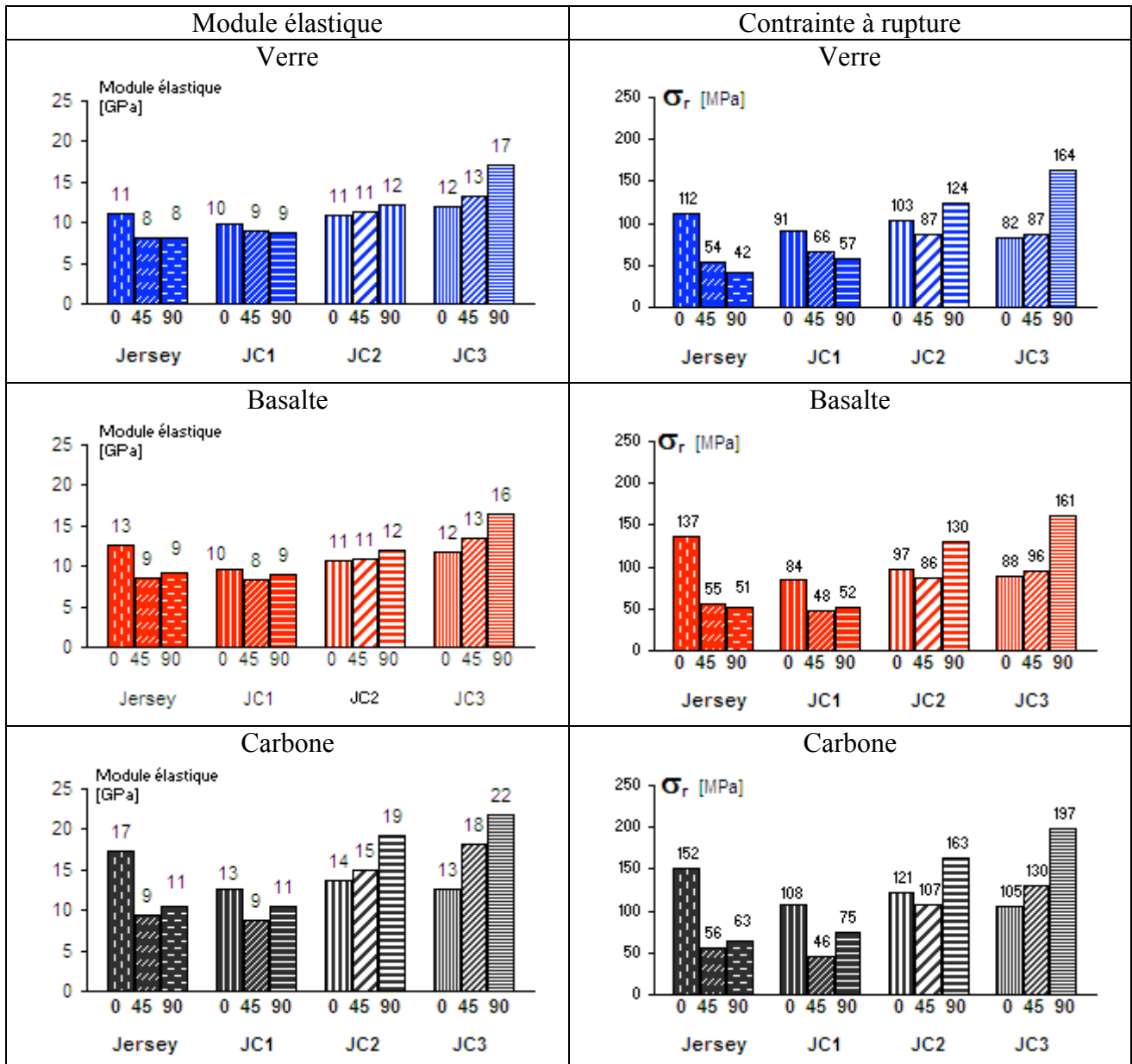


Fig. 6. Influence de la nature de fibre (Verre, Basalte, Carbone) sur les modules élastiques et les contraintes à rupture des composites.

## 5. Conclusion

Le comportement mécanique de composites à renfort tricoté a été étudié expérimentalement en fonction du nombre de fils flottés insérés dans la rangée et de la nature des fibres.

La flexibilité du procédé de tricotage permet de fabriquer des composites ayant des propriétés mécaniques très variées allant d'un matériau quasi-isotrope (JC2) à un matériau renforcé dans la direction colonne (Jersey) ou la direction rangée (JC3). Des contraintes à rupture supérieures à 100 MPa peuvent être atteintes dans les deux directions et jusqu'à 200 MPa dans la direction rangée pour le JC3. Cette grande variété de propriétés mécaniques est d'autant plus intéressante qu'elle peut être obtenue sur une même pièce en une seule opération de tricotage, permettant d'adapter la contexture du renfort suivant les directions de chargement de la pièce.

Une étude de l'influence croisée du nombre de fils flottés et du pas de charge de ces fils flottés permettrait d'optimiser les contextures en éliminant par exemple les colonnes non flottées pour les contextures avec plusieurs flottés.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Textile Aéro Tarn pour l'élaboration des préformes tricotées et particulièrement MM. Bernard Cabanes, Nicolas Dumont et Francis Planel. Ce travail de recherche a bénéficié d'une contribution financière de la région Midi-Pyrénées sous la forme d'une demi-allocation de thèse.

## Références

- [1] O.A. KHONDKER, K.H. LEONG, I. HERSZBERG, H. HAMADA, « Impact and compression-after-impact performance of weft-knitted glass textile composites ». *Compos. Part A*, Vol. 36, pp. 638-648, 2005.
- [2] Y. ZHANG, Z.M. HUANG, S. RAMAKRISHNA, « Tensile behaviour of multilayer knitted fabric composites with different stacking configuration ». *App. Compos. Mater.*, Vol. 8, pp. 279-295, 2001.
- [3] L. BALEA, G. DUSSERRE, G. BERNHART, N. DUMONT, « Comportement mécanique de textiles tricotés techniques pour des applications composites ». *Recueil des résumés et comptes rendu des 16èmes Journées Nationales Composites – JNC16* Toulouse, France, 2009.
- [4] G. DUSSERRE, E. JOURDAIN, G. BERNHART, « Effect of deformation on knitted glass preform in-plane permeability ». *Polym. Compos.*, Vol. 32, pp. 18-28, 2011.
- [5] K.H. LEONG, S. RAMAKRISHNA, Z.M. HUANG, G.A. BIBO, « The potential of knitting for engineering composites – A review ». *Compos. Part A*, Vol. 31, pp. 197-220, 2000.
- [6] O.A. KHONDKER, T. FUKUI, A. NAKAI, H. HAMADA, « Initial fracture of the welt weft-knitted textile composites ». *Compos. Part A*, Vol. 35, pp. 1185-1194, 2004.
- [7] G. DUSSERRE, L. BALEA, N. BEN SALEM, G. BERNHART, « Influence of knitted reinforcements on the composite mechanical behaviour ». *Proc. of ACMA2010*, Marrakech, Morocco, 2010.
- [8] L. BALEA, « Comportement des matériaux composites à renforts tricotés élaborés par injection de résine ». *Thèse de doctorat*, Université de Toulouse, France, 2011.
- [9] S. RAMAKRISHNA, « Characterization and modeling of the tensile properties of plain weft-knit fabric-reinforced composites ». *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 57, pp. 1-22, 1997.