



HAL
open science

Comportement mécanique de textiles tricotés techniques pour des applications composites = Mechanical behaviour of technical knitted fabrics for composite applications

Laura Balea, Gilles Dusserre, Gérard Bernhart, Nicolas Dumont

► To cite this version:

Laura Balea, Gilles Dusserre, Gérard Bernhart, Nicolas Dumont. Comportement mécanique de textiles tricotés techniques pour des applications composites = Mechanical behaviour of technical knitted fabrics for composite applications. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 10 p. hal-00391023

HAL Id: hal-00391023

<https://hal.science/hal-00391023>

Submitted on 11 Jun 2009

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.

Comportement mécanique de textiles tricotés techniques pour des applications composites

Mechanical behaviour of technical knitted fabrics for composite applications

L. Balea¹, G. Dusserre¹, G. Bernhart¹ et N. Dumont²

1 : Université de Toulouse; INSA, UPS, Mines Albi, ISAE; ICA (Institut Clément Ader), CROMeP;
Campus Jarlard, F-81013 Albi cedex 09, France
e-mail : lbalea@enstimac.fr, dusserre@enstimac.fr, bernhart@enstimac.fr

2 : Textile Aéro Tarn
81360 Montredon Labessonnié
e-mail : nicolas.dumont.tat@orange.fr

Résumé

Les textiles tricotés constituent une voie intéressante et peu explorée de renforcement de matériaux composites, notamment pour la réalisation de pièces de formes complexes, tridimensionnelles. Cependant leurs propriétés mécaniques dans le plan sont réduites. L'amélioration de ces propriétés implique une optimisation du renfort fibreux et la compréhension du comportement mécanique du textile en fonction des paramètres de tricotage et de la nature des fibres qui la constituent. Cet article présente des essais de traction réalisés sur des préformes tricotées de contexture côte et jersey à base de fibres de verre, de basalte et de carbone. La mise en œuvre d'une modélisation du comportement de tricots jersey basée sur la théorie de l'élasticité a permis de réaliser des études paramétriques et de mettre en évidence les paramètres influant sur le comportement des tricots.

Abstract

Knitted fabrics, due to their high deformability, are an interesting and few investigated way for reinforcing composite materials, particularly for manufacturing 3D and complex shapes parts. However, their in-plane mechanical properties are limited. Improving these properties requires an optimisation of the knitted preform structure and the understanding of its behaviour according to the knitting parameters and fibre material. This paper reports tensile test results carried out on 1x1 rib and plain knitted fabrics made of glass, basalt and carbon fibres. The mechanical behaviour modelling of a plain-knitted fabric based on the theory of elasticity is carried out in order to study the influence of materials and knitting parameters on the fabric behaviour.

Mots Clés : matériaux composites, renfort tricoté, comportement mécanique, essai de traction, modélisation
Keywords : composite materials, knitted perform, mechanical behaviour, tensile testing, modelling

1 Introduction

Depuis des décennies, l'industrie utilise des textiles techniques en tant que renforts de composites à matrice organique. La diversité des techniques de fabrication de ces textiles permet d'obtenir des renforts fibreux se présentant sous différentes formes et structures. Jusqu'à maintenant, l'industrie s'est majoritairement intéressée aux composites à renforts unidirectionnels, tissés ou bien tressés possédant d'excellentes propriétés mécaniques du fait de l'orientation des fibres qui sont sollicités dans leur sens longitudinal. Cependant et malgré de nombreuses recherches, certains inconvénients subsistent dans l'utilisation de ces types de composites. Parmi ceux-ci nous retiendrons particulièrement, le coût de mise en forme. Cela s'explique par l'impossibilité d'obtenir directement des pièces tridimensionnelles de forme complexe qui nécessitent donc d'être assemblées manuellement. Un autre inconvénient majeur découle de cette caractéristique, les pièces réalisées sont fragilisées du fait d'une discontinuité dans les fibres au niveau des assemblages. De manière générale, ces composites présentent une sensibilité élevée à l'impact, et leurs propriétés mécaniques sont très affaiblies après impact.

Le tricotage est une technique de mise en forme de structures textiles à partir d'une ou de plusieurs mèches de fibres. Les tricots sont obtenus par entrelacement du fil sur lui-même pour former une chaîne de

mailles reliées entre elles [1]. Selon la direction dans laquelle les boucles sont formées, les tricots sont classés en deux familles: les tricots à mailles jetées et les tricots à mailles cueillies (Fig. 1). L'objet de cette étude est le tricot à mailles cueillies dont la géométrie d'une maille cueillie est décrite figure 1.

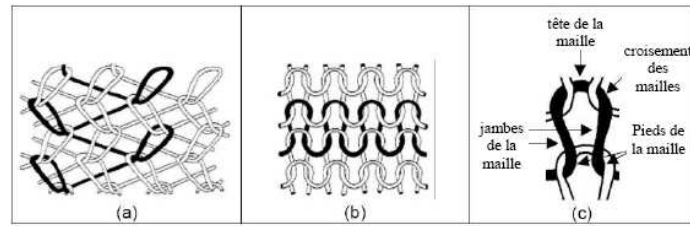


Fig. 1 : (a) tricot à mailles jetées, (b) tricot à mailles cueillies, (c) maille d'un tricot à mailles cueillies [2]

La structure ainsi obtenue donne au tricot une importante déformabilité se traduisant par une modification de la structure de la maille sous de faibles charges, ce qui confère à ce type de textile une excellente drapabilité. Le tricotage permet en outre de réaliser des préformes fibreuses directement à la forme de la pièce finale, comme par exemple des pièces tubulaires, coniques, en forme de dômes, des jonctions de tubes sans couture ou bien des préformes avec des trous sans nécessité de découpe ni perçage et donc sans discontinuité des fibres. Cette technologie possède également l'avantage de pouvoir modifier l'agencement des mailles dans la structure même du tricot, de la densifier ou bien d'ajouter des fils supplémentaires, permettant de réaliser une multitude de contextures différentes. En outre ce procédé de mise en forme de textiles a un potentiel d'automatisation particulièrement intéressant.

D'un point de vue mécanique, les propriétés à l'impact des composites à renforts tricotés sont intéressantes. La forme tridimensionnelle des mailles réduit les zones interlaminaires riches en résine, limitant considérablement le délaminage [3]. Cependant, les propriétés mécaniques dans le plan de ces matériaux sont relativement faibles. Cela est dû en partie à la perte de l'alignement des mèches fibreuses mais également à de faibles taux de fibres dans le composite. L'amélioration des propriétés mécaniques des composites à renforts tricotés est nécessaire. Celle-ci implique une optimisation du renfort fibreux et une compréhension du comportement des textiles tricotés en fonction de différents paramètres liés à la structure de la préforme tricotée, et également à la nature du matériau.

Des essais de traction ont été réalisés sur des tricots secs à base de fibres de verre, de basalte et de carbone. Ces résultats sont confrontés à une modélisation analytique du comportement en traction de tricots de contexture jersey sollicités dans la direction colonne et rangée. Une étude paramétrique est ensuite réalisée.

2 Matériaux et procédure expérimentale

2.1 Matériaux

2.1.1 Choix des fibres

Trois natures de fibres sont étudiées, la fibre de verre, de basalte et de carbone (Tab. 1). Les fibres ont été choisies avec des diamètres de mèche proches dans le but de réaliser des tricots de géométries équivalentes. Le diamètre a été évalué à partir du diamètre et du nombre de filaments en considérant un empilement hexagonal parfait des fibres dans la mèche. Le module de flexion de la mèche, déterminé à partir du module d'Young du matériaux et du moment quadratique d'un filament. Celui-ci est calculé comme la somme des moments quadratiques de chaque filament. Un calcul à l'aide du théorème de Huygens a montré que cette simplification implique une erreur quasiment nulle et que la forme de la mèche (circulaire ou elliptique) à une influence complètement négligeable.

| | VERRE | BASALTE | CARBONE |
|--|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Nombre N_f et diamètre d_f de filaments par mèche* | 1800 filaments de 16 μm | 1672 filaments de 13 μm | 6000 filaments de 7 μm |
| Densité linéaire (tex=g.km ⁻¹) * | 600 | 600 | 400 |
| Diamètre de mèche (d) (mm) | 0,713 | 0,558 | 0,569 |
| Module d'Young E(GPa)* | 80 | 84 | 238 |
| Moment quadratique de la mèche $I = N_f \times \pi \times d_f^4 / 64$ (mm ⁴) | 3,2.10 ⁻⁹ | 1,4.10 ⁻⁹ | 1,2.10 ⁻¹⁰ |
| Rigidité en traction de la mèche $E \times N_f \times \pi \times (d_f / 4)^2$ (MPa.mm ²) | 28953 | 18642 | 54956 |
| Module de Flexion $B = E \times I$ (N.mm ²) | 0,463 | 0,197 | 0,163 |

* données fournisseur

Tab. 1 : Caractéristiques des mèches

2.1.2 Contextures

Pour caractériser l'influence de la nature de la fibre sur le comportement du tricot sec, l'étude est réalisée sur des contextures simples: la côte et le jersey. La côte est une contexture dite double fonture, chaque rangée est réalisée en alternant une maille d'un côté (maille avant) et une maille de l'autre (maille arrière) du tricot (Fig. 2 a et b). Pour la structure jersey toutes les mailles sont réalisées du même côté du tricot (Fig. 2 c et d), c'est une contexture simple fonture.

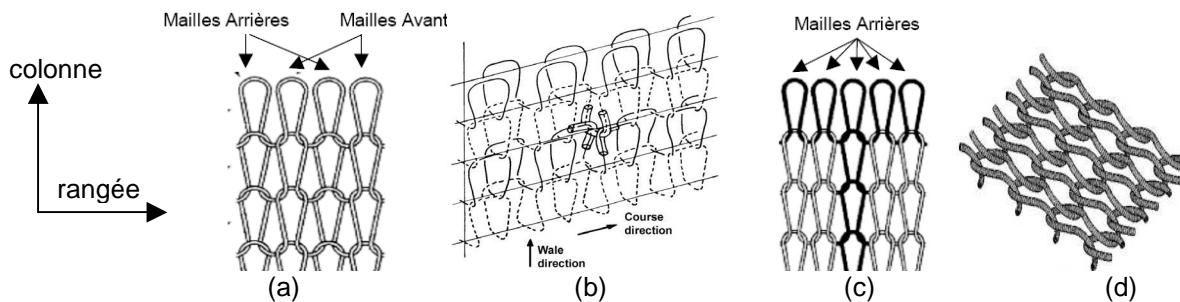


Fig. 2 : Schéma de la contexture (a) côte en 2D (b) côte en 3D [4] (c) jersey en 2D et (d) jersey en 3D

Des photos des différents tricots prises à différentes échelles permettent d'observer la géométrie des mailles (Fig. 3) et de mesurer leurs dimensions projetées dans le plan. Les filaments sont positionnés parallèlement dans les mèches (Fig. 3 d). Les éprouvettes avant essai présentent en surface un duvet du à des fibres rompues pendant le processus de tricotage. Les tricots double fonture présentent ces défauts sur les deux faces, les éprouvettes simple fonture présentent les défauts sur une seule face. La quantité de fibres rompues n'est pas quantifiée, cependant elle est plus importante pour les tricots en fibres de carbone, les filaments étant plus fins.

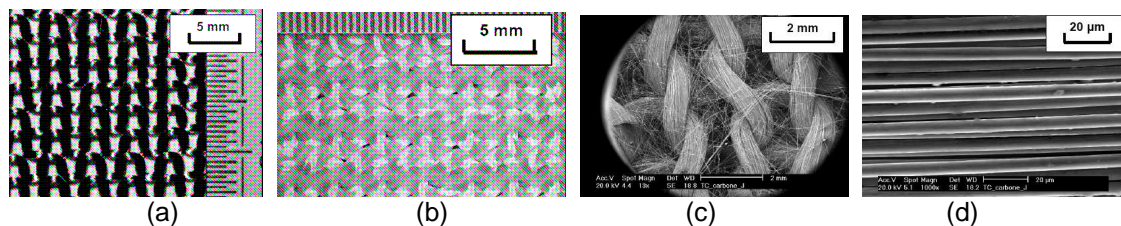


Fig. 3: (a) jersey basalte; (b) côte verre; (c) MEB, jersey carbone; (d) MEB jersey carbone

2.2 Essais de traction

2.2.1 Epreuves

Les contextures sont sollicitées dans chacune de ses deux directions (la direction rangée et la direction colonne). Les tricots ont tous été réalisés sur une même machine pour obtenir des paramètres géométriques équivalents pour un même essai (Tab. 2). Les dimensions de mailles sont calculées à partir des dimensions du tricot et du nombre de mailles. La longueur de fil est calculée à partir de la masse du tricot et de la densité linéaire de la mèche.

| | | Nombre de colonnes | Nombres de rangées | Largeur d'une maille* (mm) | Hauteur d'une maille* (mm) | Longueur de fil par maille** (mm) | Dimensions du tricot (L x H x e) (mmxmmxmm) | Densité surfacique (g.m ⁻²) |
|-------------------------|---------|--------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|---|---|
| CÔTE TRACTION COLONNE | Basalte | 68 | 168 | 1,70 | 1,69 | 9,77 | 115x285x3,97 | 2043 |
| | Verre | 68 | 144 | 1,77 | 1,74 | 10,16 | 120x240x4,12 | 1990 |
| | Carbone | 56 | 174 | 1,69 | 2,17 | 9,04 | 98x380x4,24 | 986 |
| CÔTE TRACTION RANGEE | Basalte | 100 | 64 | 1,68 | 1,80 | 10,55 | 115x335x4,2 | 2106 |
| | Verre | 100 | 80 | 1,7 | 1,24 | 9,26 | 100x340x3,9 | 2224 |
| | Carbone | 100 | 55 | 1,5 | 1,94 | 11,36 | 105x300x3,74 | 1554 |
| JERSEY TRACTION COLONNE | Basalte | 22 | 124 | 4,38 | 2,63 | 13,11 | 100x330x1,44 | 689 |
| | Verre | 23 | 120 | 4,35 | 2,63 | 14,1 | 100x315x1,58 | 727 |
| | Carbone | 23 | 120 | 4,09 | 2,74 | 16,26 | 90x340x1,49 | 568 |
| JERSEY TRACTION RANGEE | Basalte | 86 | 38 | 3,84 | 2,63 | 13,25 | 330x100x1,62 | 787 |
| | Verre | 86 | 38 | 3,84 | 2,63 | 12,71 | 330x100x1,61 | 756 |
| | Carbone | 80 | 38 | 4,00 | 2,63 | 14,02 | 320x100x1,54 | 533 |

* Largeur et hauteur projetées dans le plan. (Dimensions du tricot / densité linéaire de mailles)

** Longueur totale et non projetée de mèche dans la maille

Tab. 2 : Caractéristiques des éprouvettes

2.2.2 Mise en place des essais

Les essais sont réalisés sur une machine électromécanique Instron 5800R équipée de mors pneumatiques. Les essais sont pilotés en déplacement avec une vitesse constante de 50 mm/min.

La distance entre les mors est définie à 200 mm pour toutes les éprouvettes mis à part les éprouvettes de contexture côte en traction direction colonne qui étaient de dimensions inférieures, pour lesquelles la longueur utile a été définie à 170 mm. Les tricots ne sont pas tendus au début de l'essai.

2.3 Résultats

Quelque soit la nature de la fibre, la contexture (côte ou jersey), ou la direction de sollicitation, le comportement général d'un tricot sec en traction est identique. On distingue plusieurs étapes au cours de la sollicitation direction colonne d'un tricot sec (Fig. 5). Le début de la courbe correspond à la résistance au frottement entre les mèches et les fibres (1). La deuxième partie de la courbe est linéaire (2). On observe une importante déformation sous de faibles charges. Le tricot se comporte comme une structure, la déformation étant essentiellement due à un changement dans la configuration de la maille : celle-ci s'allonge dans la direction de sollicitation et se rétrécit dans la direction transverse, tandis que les mèches s'alignent. Les mailles glissent entre elles avec frottement au niveau des croisements et la forme de la section du fil se modifie et s'aplatit avec une réorganisation des fibres dans la mèche sous l'effet de compression locale. La maille est essentiellement soumise à des efforts de flexion dans la mèche. La troisième étape (3) commence lorsque les pieds de la maille se touchent. Le tricot continue de se comporter comme une structure. Les jambes des mèches continuent de s'aligner, la maille s'agrandit dans la direction de sollicitation mais ne se rétrécit plus dans la direction transverse. Les mailles glissent entre elles et la section du fil décroît jusqu'à un point d'extension critique de la maille à partir duquel l'effort se transmet aux fibres qui sont alors sollicitées en traction au niveau des jambes des mailles et en cisaillement au niveau des croisement (4). La rupture s'initie par cisaillement à l'entrecroisement des mailles adjacentes (5) ce qui provoque un démaillage tout au long de la colonne et conduit à la rupture.

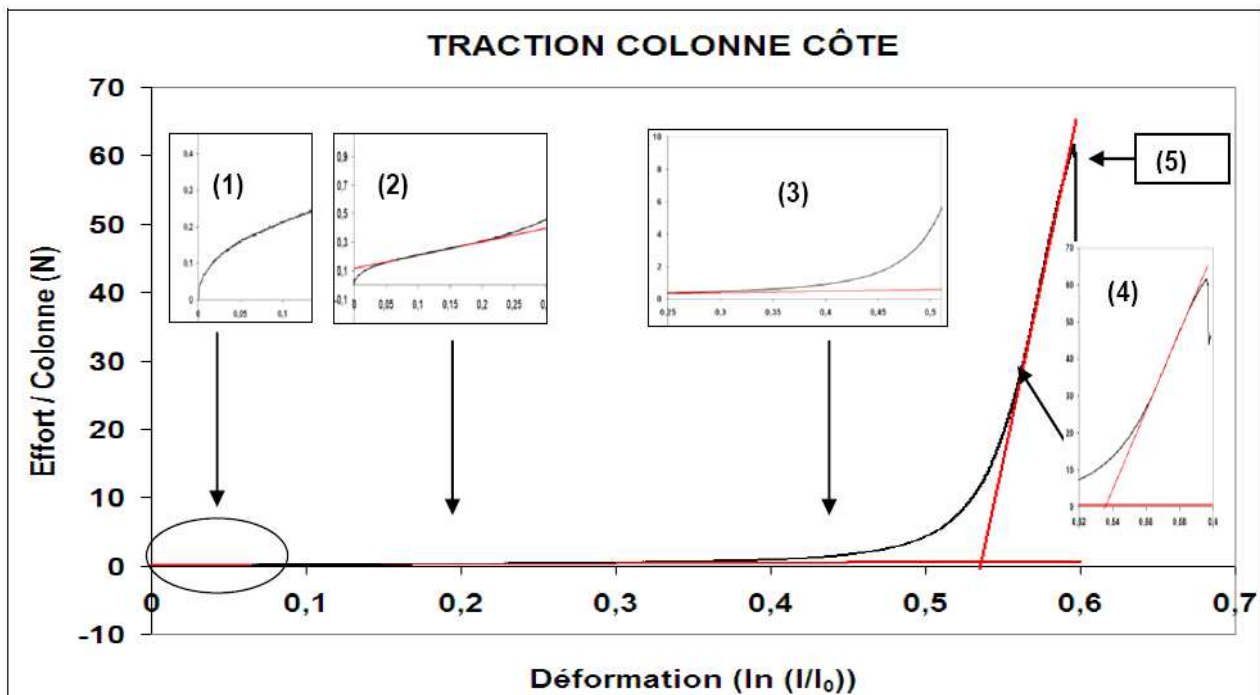


Fig. 5 : Comportement d'un tricot en traction colonne

Dans le cas d'une traction dans la direction rangée, la courbe a la même allure. Dans les deux cas, deux zones principales sont distinguées: la première concerne la déformation structurale du tricot et la seconde concerne la reprise d'effort dans les fibres.

Les courbes (Fig. 6) présentent les résultats obtenus en traction colonne et rangée sur des tricots jersey et côte en fibres de verre, basalte et carbone. L'origine des courbes a été recalée au niveau de la reprise d'effort étant donné que les tricots n'étaient pas tendus en début d'essai. Du fait des grandes déformations atteintes, la déformation rationnelle a été choisie pour représenter les résultats. Il faut cependant noter qu'il s'agit d'une déformation macroscopique de la structure et en aucun cas d'une déformation physique du matériau.

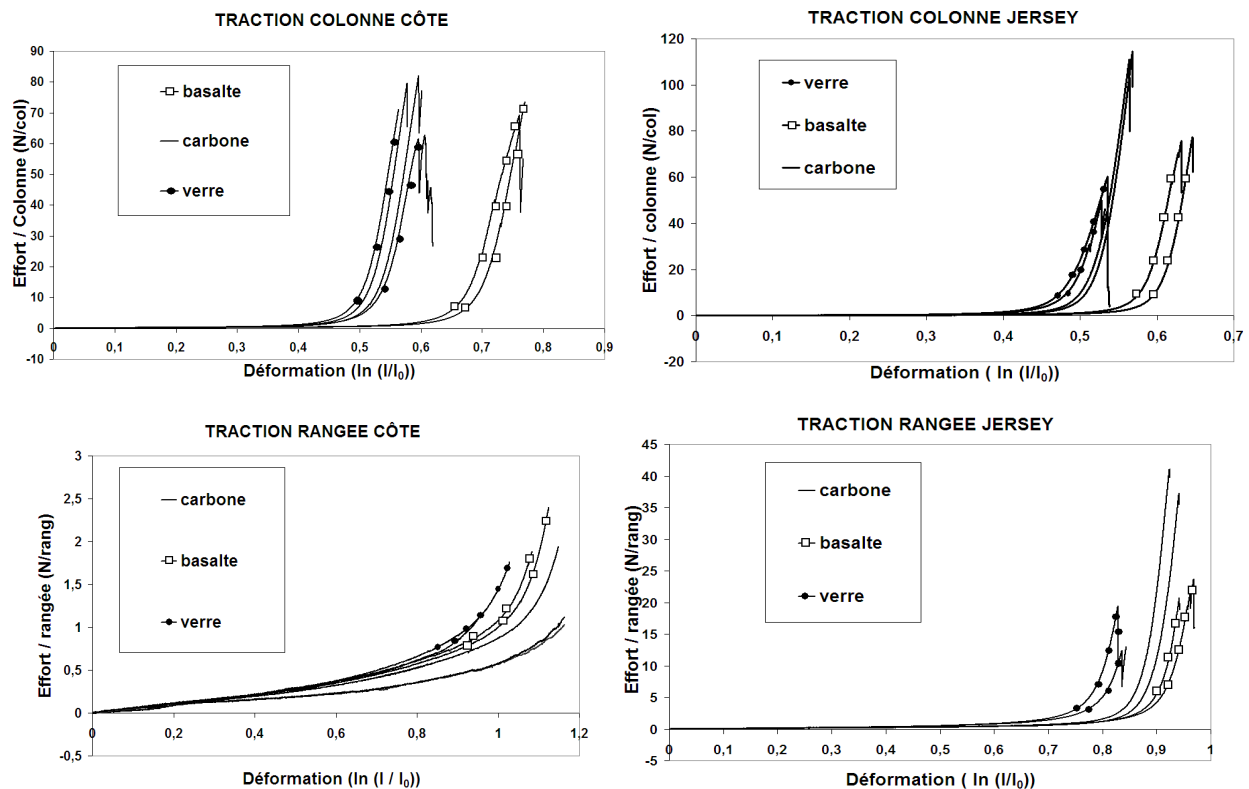


Fig. 6 : Courbes effort-déformation de chaque contexture, direction de sollicitation et nature de fibre

2.3.1 Influence de la contexture

Les résultats montrent une importante influence de la contexture sur le comportement du tricot sec. En ce qui concerne la déformation structurale du tricot, les contextures côte présentent un taux de déformation plus important que les contextures jersey, particulièrement dans la direction rangée. Celui-ci est principalement dû à la capacité de la maille à se déformer. Proportionnellement aux dimensions de la maille, les tricots côte possèdent une longueur de fil plus importante que les jersey, celle-ci provient de la structure du tricot et de la longueur de fil nécessaire pour passer sur une même rangée d'une maille avant à une maille arrière (Fig. 2 b).

Concernant la seconde partie de la courbe, dans le cas des tractions colonne, l'effort à la rupture ramené à la colonne est plus élevé pour les tricots jersey. Du fait de la géométrie tridimensionnelle de la contexture côte et de la densité de mailles environ deux fois plus élevée, les mèches sont plus courbées et travaillent donc moins dans la direction longitudinale des fibres, ce qui affaiblit la résistance sur une colonne. Rapporté à la largeur de tricot, les contextures côte présentent une résistance plus importante, du fait de la densité de mailles plus élevée, augmentant ainsi le nombre de fibres travaillantes.

2.3.2 Influence de la nature de la fibre

Pour une même contexture et une même direction de sollicitation, les géométries des mailles sont proches (Tab. 2). Les mèches de basalte et carbone sont de diamètre équivalent, la mèche de verre est plus épaisse (Tab. 1). En début de sollicitation, la déformation, essentiellement due à la modification de la configuration de la maille sous de faibles charges, a lieu par flexion de la mèche. Un agrandissement de la première partie de la courbe (Fig. 7) permet de constater que les tricots en fibres de verre (dont la mèche présente un module de flexion plus élevé) résistent mieux à la déformation. Le module de flexion de la mèche de basalte est plus élevé que celui d'une mèche de carbone, cependant les courbes des tricots carbone et basalte ont tendance au départ à se confondre. En même temps que la maille se déforme, les mèches des mailles adjacentes glissent entre elles. La présence de fibres rompues dans la mèche de carbone accentue le frottement augmentant la résistance à la déformation. Le blocage des mailles intervient plus tôt pour les tricots verre dont le diamètre de mèche est plus élevé. La partie linéaire, très marquée pour les tricots basalte et verre, est quasiment inexistante pour les tricots carbone, dont la résistance à la déformation augmente plus rapidement. Au cours de la déformation, la forme de la section de la mèche se modifie, les filaments se déplacent les uns par rapport aux autres et la mèche s'aplatit au niveau des croisements. La section plus petite des fibres de carbone facilite ces déplacements amenant un blocage de la maille en largeur plus rapide.

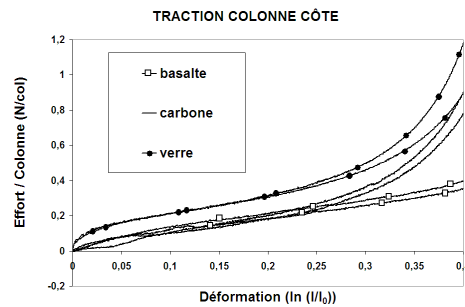


Fig. 7 : Agrandissement de la courbe effort-déformation au niveau de la déformation structurale du tricot

Une fois le point d'extension critique de la maille atteint, l'effort est repris par les fibres qui sont alors sollicitées en traction, la charge appliquée augmente rapidement et de manière linéaire. Les rigidités, déterminées en calculant la valeur des pentes (Fig. 8) et les charges à la rupture sont comparées. Les résultats montrent bien que le comportement du tricot est lié aux propriétés du matériau. Dans le cas des contextures jersey, les tricots en carbone, dont la mèche est plus rigide et plus résistante à la traction, se distinguent de manière significative des tricots en verre et en basalte, avec une rigidité plus importante et une charge à la rupture plus élevée. En comparant, les courbes de basalte et de verre, les résultats ne sont pas aussi évidents. Les filaments de basalte étant plus fins, la section de la mèche l'est également réduisant la surface de travail en traction et donc la rigidité de la mèche. Les tricots en basalte présentent pourtant de meilleures propriétés. Le diamètre intervient dans la résistance de la mèche mais également dans la géométrie de la maille. A longueur de fil équivalent, après blocage, plus le diamètre est important, plus les mèches sont courbées et plus la largeur de maille est importante. Les mèches sont donc plus alignées dans le tricot basalte, augmentant la proportion de fibres travaillant longitudinalement ce qui a pour conséquence d'augmenter la rigidité.

Dans le cas des contextures côte en traction colonne, la rigidité des tricots en carbone est plus élevée que celle des tricots en verre et que celle des tricots en basalte. Les résistances à la rupture des différents matériaux sont relativement proches. Les petites dimensions de mailles et la structure tridimensionnelle du tricot implique une forte courbure de la mèche, réduisant la proportion de fibres alignées dans le tricot.

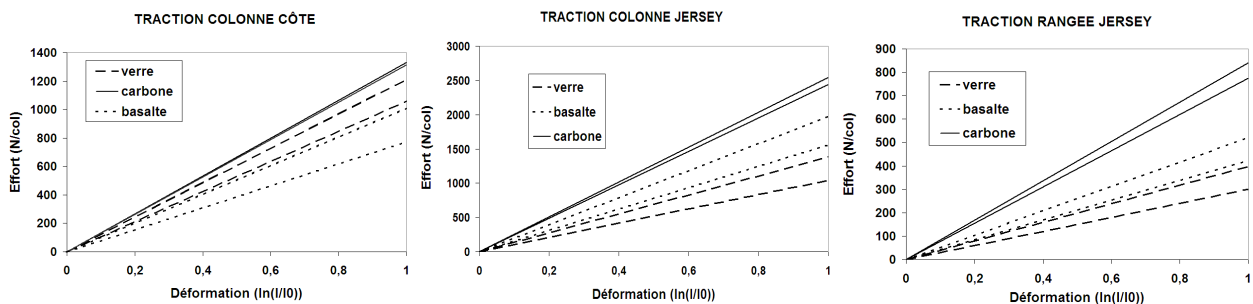


Fig. 8 : Représentation des pentes de la zone de déformation des fibres

3 Modélisation du comportement du tricot jersey

Comme constaté précédemment, la comparaison expérimentale des natures de fibre met en jeu un grand nombre de paramètres (N_f , d_f , $E...$), ce qui rend difficile l'interprétation des résultats expérimentaux. Cette partie vise à étudier l'influence de la nature de fibre et des paramètres géométriques de la maille sur le comportement mécanique du tricot jersey en mettant en œuvre une modélisation basée sur la théorie de l'élasticité [5].

3.1 Analyse théorique

Le modèle est basé sur la théorie de l'élasticité en grandes déformations de Timoshenko [6] et permet de calculer les courbes effort-déformation en traction dans la direction colonne et rangée.

3.1.1 Hypothèses du modèle

La mèche du tricot est considérée comme une tige élastique homogène, naturellement droite, incompressible, inextensible et de section circulaire; les effets de frottement entre les fibres sont négligés. Toutes les mailles sont planes et de configuration identique. Les mèches des mailles adjacentes sont entièrement en contact dans toute la zone de croisement. Les efforts de réaction entre deux mailles sont modélisés par une force concentrée R dont la direction est perpendiculaire à la mèche et varie avec l'état

d'extension de la maille (Fig. 9 a). Les propriétés d'extension sont directement liées au changement de configuration de la maille et l'analyse s'effectue par symétrie sur un quart de maille.

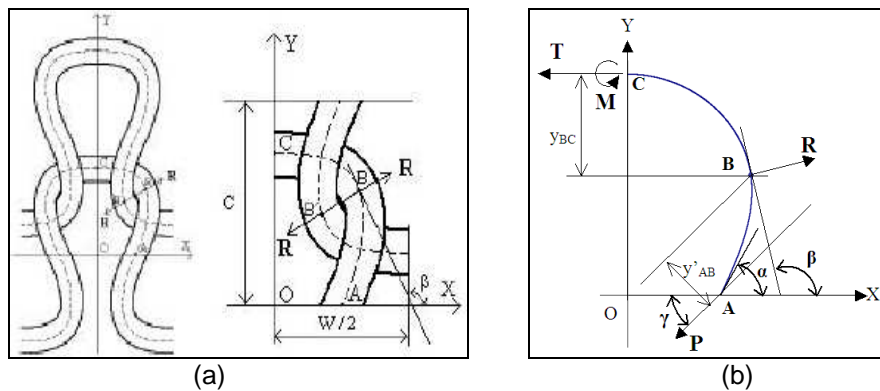


Fig. 9 : [5] (a) Structure d'une maille et élément répété, (b) Efforts et moment appliqués sur le quart de maille

3.1.2 Relations géométriques

Trois points caractéristiques du quart de maille (Fig. 9 a) sont considérés: le point d'inflexion A de la maille, le point d'application de la réaction B et le sommet de la tête de maille C dont les coordonnées sont reliées aux paramètres géométriques de la maille (eq.1 à 4), β étant l'angle entre la tangente à la maille en B et l'axe Ox.

$$W/4 = X_B - (d/2 \cos(\beta - \pi/2)) \quad (\text{eq. 1})$$

$$C/2 = Y_B - (d/2 \cos(\beta - \pi/2)) \quad (\text{eq. 2})$$

$$X_B - X_A = d/2 \cos(\beta - \pi/2) \quad (\text{eq. 3})$$

$$L/4 = S_{AB} + S_{BC} \quad (\text{eq. 4})$$

Avec W, la largeur de maille, C, la hauteur, d le diamètre de la mèche, L, la longueur de fil par maille.

3.1.3 Equations d'équilibre

Le quart de boucle (Fig. 9 b) est soumis en A à un effort P, dont la direction, définie par l'angle γ, varie en fonction de la configuration de la maille. La force P peut être divisée en deux composantes P_x et P_y. P_y correspond à l'effort appliqué sur la maille lorsqu'elle est sollicitée dans la direction colonne. En C, un effort T, dirigé parallèlement à l'axe Ox et un moment fléchissant M sont appliqués. La force T correspond à l'effort appliqué en traction rangée. L'équilibre statique permet d'obtenir une relation entre ces efforts, les angles β et γ et les coordonnées des points A, B et C (eq. 5 et 6).

$$T = -P(\sin \gamma \tan \beta + \cos \gamma) \quad (\text{eq. 5})$$

$$M = P[y'_{AB} + y_{BC}(\sin \gamma \tan \beta + \cos \gamma)] \quad (\text{eq. 6})$$

3.1.4 Analyse élastique

L'analyse basée sur la théorie de l'élasticité est effectuée séparément sur deux tronçons AB et BC. Elle relie le moment de flexion et la courbure de la mèche par le module de flexion. L'intégration sur chacun des deux tronçons de cette équation fournit les relations entre les coordonnées des points caractéristiques A et B, les longueurs de courbe S_{AB} et S_{BC} et les efforts appliqués en faisant intervenir les angles α, β et γ; α étant l'angle entre la tangente à la courbe en A et l'axe Ox.

La connaissance de ces angles permet de calculer directement les paramètres géométriques de maille L, C, W et les efforts appliqués, T, P, R et M. En réalité, les valeurs de L, C et W sont connus, et la détermination de α, β et γ amène au calcul des efforts appliqués. α, β et γ ne peuvent être calculés directement et doivent être déterminés numériquement par la résolution d'un système non linéaire.

3.2 Mise en œuvre et limites du modèle

L'analyse théorique a permis de relier les paramètres géométriques d'une maille aux efforts auxquels elle est soumise en passant par la résolution d'un système d'équations non linéaires. Au cours d'un essai de traction, la configuration de la maille se modifie et la valeur des paramètres évolue. En imposant un incrément de déformation, la nouvelle configuration de la maille ainsi que les efforts qui lui sont appliqués peuvent être déterminés permettant ainsi de tracer les courbes effort-déformation en traction colonne et

rangée. La résolution du système est effectuée numériquement par une boucle d'optimisation, selon un algorithme de Newton.

Dans les deux cas, l'état initial, correspondant à l'état de référence, est calculé à partir des paramètres initiaux connus C_0 , W_0 , L , d et B . Les résultats du calcul donnent un premier jeu de paramètres α_0 , β_0 et γ_0 permettant de déterminer P_0 , T_0 et M_0 . L'effort appliqué dans la direction colonne sera égal à $P_Y - P_{Y0}$ et dans la direction rangée à $T - T_0$. La mèche étant considérée comme incompressible et inextensible, la longueur de fil par maille L et le diamètre de mèche d restent constants tout au long des essais.

3.2.1 Traction dans la direction colonne.

En traction colonne, la hauteur de maille C augmente et est imposée. La largeur W diminue jusqu'à atteindre le point de blocage correspondant au moment où les pieds des mailles entrent en contact et donc où $W=4.d$. Avant blocage, la valeur de W n'est pas connue, d'où la nécessité d'introduire une nouvelle équation pour la résolution du système. On considère l'effort transversal T constant et égal à T_0 entre le début de l'essai et le point de blocage. A partir des équations 8 et 9 et de cette condition les valeurs de α , β et γ peuvent être déterminées pour chaque configuration. Après le point de blocage, la valeur de W reste constante et égale à quatre fois le diamètre de mèche. A partir de cette condition et des équations 8 et 9, α , β , γ peuvent être calculés. L'effort appliqué est ainsi déterminé quelque soit la configuration de la maille.

3.2.2 Traction dans la direction rangée.

En traction rangée, la largeur de maille W augmente et est imposée. La hauteur C diminue et est inconnue, d'où la nécessité d'introduire une nouvelle équation pour la résolution du système. En considérant que les mailles ne glissent pas entre elles dans ce cas de sollicitation, la longueur de fil S_{BC} reste constante. En utilisant cette condition et les équations 7 et 9, les valeurs de α , β et γ peuvent être calculées permettant de déterminer les efforts appliqués quelque soit la configuration de la maille.

3.2.3 Limites du modèle.

Ce modèle prend en considération la déformation due à la modification de la configuration géométrique de la maille. Il ne fait intervenir que les effets dus à la flexion de la mèche et n'est valable que pour de faibles efforts. Il sera complété ultérieurement par la reprise d'effort de la mèche en traction.

3.3 Résultats

3.3.1 Comparaison avec l'expérience

La comparaison entre les courbes expérimentales et théoriques est réalisée en traction colonne sur les tricots à base de fibres de verre et de basalte et en traction rangée sur les tricots à base de fibres de verre. Dans le cas de la traction rangée (Fig. 10), les courbes sont proches. A partir d'une certaine déformation, la longueur de fil (L) commence à augmenter et la limite du modèle est atteinte (Fig. 10 détail).

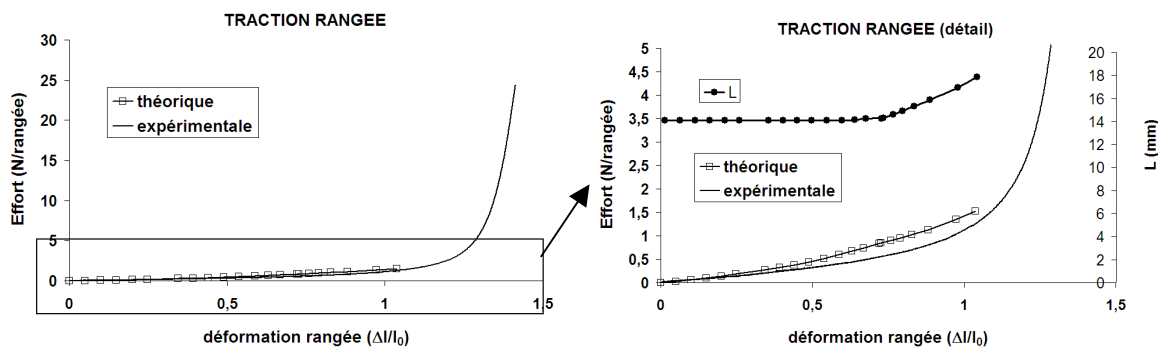


Fig. 10 : Courbes effort-déformation théoriques et expérimentales en traction rangée sur jersey en verre.

En traction colonne, les courbes sont également proches (Fig. 11). Le point à partir duquel la déformation de la maille est bloquée dans sa largeur est très marqué et correspond à la cassure observée sur les courbes théoriques (Fig. 11 détail). Il intervient peu après la perte de linéarité des courbes expérimentales. Les différences observées entre la théorie et l'expérience montrent les limites du modèle: d'une part, dans le calcul, les effets de frottement entre les mèches sont négligés, ce qui explique que les efforts soient plus faibles; d'autre part, la mèche est considérée comme incompressible et donc de section circulaire et constante. En réalité, les filaments glissent entre eux et la mèche a tendance à s'aplatir, ce qui entraîne une diminution de sa largeur au niveau des pieds des mailles après contact et retarde le blocage de la maille en largeur. Ce phénomène explique la courbure obtenue expérimentalement que l'on ne retrouve pas par le calcul.

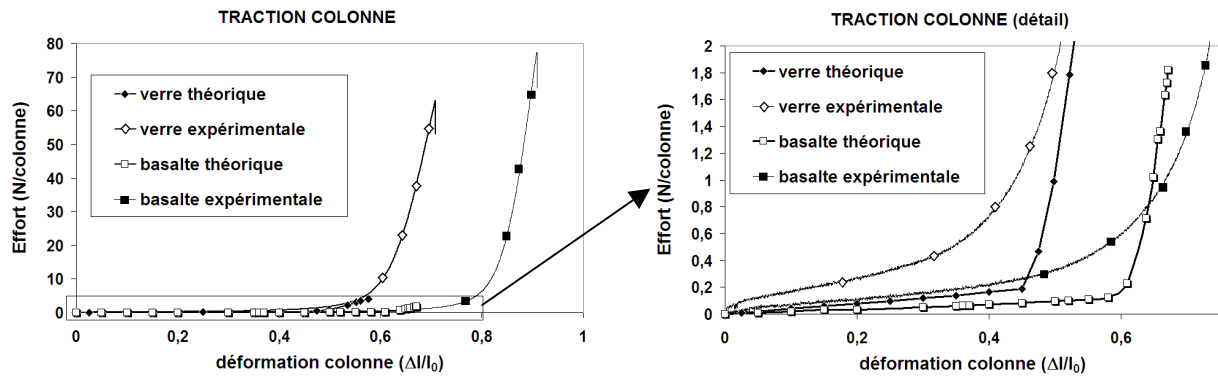


Fig. 11 : Courbes effort-déformation théoriques et expérimentales en traction colonne sur jersey en verre et basalte.

La comparaison entre les courbes théoriques de basalte et de verre (Fig. 11) est en accord avec l'étude expérimentale. Avant blocage, la mèche de verre présente une rigidité plus importante due à un module de flexion plus élevé. Le blocage intervient plus rapidement du fait que le diamètre de la mèche est plus grand pour des dimensions de mailles équivalentes.

3.3.2 Etude paramétrique

L'étude paramétrique a pour objectif de comprendre quels paramètres pilotent le comportement du tricot jersey. L'influence de la nature du matériau a été étudiée en considérant des paramètres géométriques identiques; seul le module de flexion lié au module d'Young du matériau diffère pour deux diamètres de mèches différents. L'influence des paramètres du tricot a été étudiée en faisant varier la hauteur de maille ou la longueur de fil par maille (Tab. 3).

| L (mm) | C ₀ (mm) | W ₀ (mm) | d (mm) | B basalte (N/mm ²) | B verre (N/mm ²) | B carbone (N/mm ²) |
|--------|---------------------|---------------------|--------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 14,1 | 2,75 | 4,35 | 0,713 | 0,486 | 0,463 | 1,378 |
| 14,1 | 2,75 | 4,35 | 0,96 | 1,378 | - | 3,938 |
| 13,11 | 2,63 | 4,38 | 0,558 | 0,197 | - | - |
| 13,11 | 2,75 | 4,38 | 0,558 | 0,197 | - | - |
| 13,41 | 2,63 | 4,38 | 0,558 | 0,197 | - | - |

Tab. 3: Paramètres géométriques d'une maille et module de flexion pour l'étude paramétrique

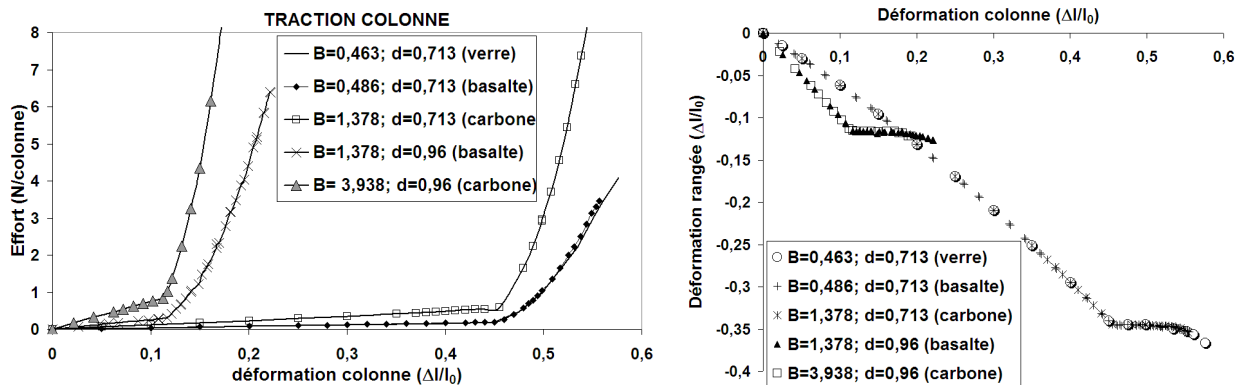


Fig. 12 : Résultats théoriques en traction colonne sur jersey en verre, basalte et carbone à paramètres géométriques identiques

Les résultats (Fig. 12) obtenus montrent que la rigidité en flexion de la mèche (produit du module d'Young du matériau et du moment quadratique de la mèche faisant intervenir le diamètre de la mèche) pilote le comportement du jersey dans le domaine de fortes déformations et faibles efforts. La nature du matériau n'intervient pas de manière significative. En effet, pour un même diamètre de mèche, une importante augmentation du module d'Young, n'influe pas sur la déformation, et agit seulement sur la rigidité du tricot, cependant les efforts calculés sont très faibles comparés aux efforts nécessaires pour atteindre la rupture. Le matériau a donc peu d'influence sur la déformation structurale de la maille. La nature de la fibre intervient de façon significative dans la deuxième partie du comportement du tricot (Fig. 8), lorsque l'effort est repris par les fibres, où ce modèle ne s'applique plus. Les paramètres géométriques de la maille, influent sur le taux de déformation du tricot. En augmentant le diamètre de la mèche, le blocage en largeur intervient plus rapidement, ce qui diminue considérablement le taux de déformation (Fig. 12). Le taux de déformation

varie aussi en fonction de la tension du fil dans la maille. En effet, pour des dimensions de maille équivalentes, une longueur de fil plus importante implique que celui-ci soit moins tendu ce qui augmente la capacité de la maille à se déformer. Inversement, à même longueur de fil et largeur de maille, l'augmentation de la hauteur entraîne une diminution du taux de déformation (Fig. 13).

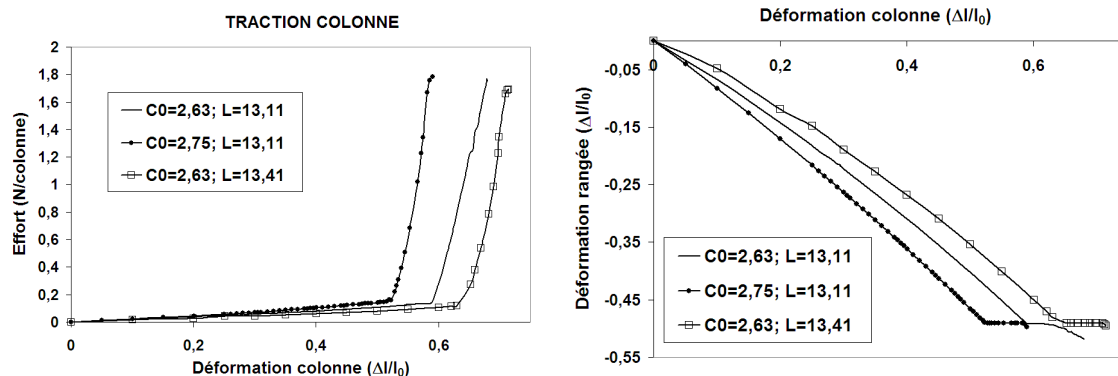


Fig. 13 : Influence des paramètres géométriques sur le comportement du tricot

La première partie du comportement d'un tricot jersey dépend essentiellement des paramètres géométriques de la maille. Lors de la mise en forme des textiles tricotés, les paramètres géométriques sont limités par le procédé de tricotage rendant difficile la réduction du taux de déformation avant blocage des mailles sur les contextures jersey. Cette réduction implique donc l'optimisation de la structure même de la préforme tricotée.

4 Conclusion

L'étude expérimentale combinée à la modélisation du comportement en traction d'un jersey ont permis de mieux comprendre le comportement mécanique d'un tricot sec. Deux étapes successives sont distinguées. La première se caractérise par une importante déformation sous de faibles efforts et est due à une modification de la configuration de la maille par flexion élastique de la mèche. Elle est essentiellement pilotée par la géométrie de la maille du tricot. La seconde partie correspond à la reprise des efforts par les fibres, entraînant une augmentation rapide des efforts et est liée à la nature du matériau mais également à la géométrie de la maille. L'importante déformabilité des préformes tricotées limite les propriétés mécaniques des composites du fait de la reprise tardive des efforts par les fibres. La recherche d'une réduction du taux de déformation associée aux limitations dues au procédé de tricotage nécessitent une optimisation de la structure de la préforme tricotée. Le modèle présenté s'applique à la première partie du comportement du tricot. Plusieurs voies d'améliorations sont envisagées: la prise en compte de la modification de la section de la mèche due au réarrangement des filaments d'une part et le frottement entre les mèches des mailles adjacentes d'autre part. Il sera complété ultérieurement par la reprise d'effort de la mèche.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Francis Planel, technicien à Textile Aéro Tarn, pour sa très large contribution à la réalisation des préformes tricotées.

Références

- [1] M. Araújo, R. Figueiro, H. Hong, « Modelling and simulation of the mechanical behaviour of weft-knitted fabrics for technical applications, Part I: General considerations ». In : *AUTEX Research Journal*, Vol. 3, N°3, 2003.
- [2] S. Ramakrishna, « Characterisation and modelling of the tensile properties of plain weft-knit fabric-reinforced composites ». In : *Composites Science and Technology*, Vol. 57, p1-22, 1997.
- [3] S.D. Pandita, D. Falconnet, I. Verpoest, « Impact properties of weft knitted fabric reinforced composites ». In : *Composite Science and Technology*, Vol. 62, pp.1113-1123, 2002.
- [4] T. W. Chou, F. K. Ko, « Textile Structural Composites ». In : *Composite Materials*, Vol. 3, p72, 1989.
- [5] M. Araújo, R. Figueiro, H. Hong, « Modelling and simulation of the mechanical behaviour of weft-knitted fabrics for technical applications, Part II: 3D model based on the elastica theory ». In : *AUTEX Research Journal*, Vol. 3, N°4, 2003.
- [6] S. P. Timoshenko, J. M. Gere, « Théorie de la stabilité élastique », 2^{ème} édition DUNOD Paris, pp. 77-82, 1966.