HAL
open science

Analyse/Synthèse tridimensionnelle de textures fibreuses

Cedric Chapoullie

To cite this version:

Cedric Chapoullie. Analyse/Synthèse tridimensionnelle de textures fibreuses. Matériaux. Université de Bordeaux, 2014. Français. NNT : 2014BORD0100 . tel-01131194

HAL Id: tel-01131194

https://theses.hal.science/tel-01131194

Submitted on 13 Mar 2015

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.

THÈSE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES
ET DE L'INGENIEUR (ED 209)

SPÉCIALITÉ : AUTOMATIQUE ET PRODUCTIQUE, SIGNAL ET IMAGE,
INGÉNIERIE COGNITIQUE

Par Cédric, CHAPOULLIE

ANALYSE / SYNTHESE TRIDIMENSIONNELLE DE TEXTURES FIBREUSES

Sous la direction de : M. Christian GERMAIN (Professeur des Universités)
(co-directeur : M. Gérard VIGNOLES (Professeur des Universités)
co-encadrant : M. Jean-Pierre DA COSTA (Maître de conférences))

M. Eric MAIRE	Directeur de Recherche, CNRS	Rapporteur
M. Jean-Charles PINOLI	Professeur, ENS des Mines, Saint-Etienne	Rapporteur
M. Jean-Pierre GUEDON	Professeur, Ecole Polytechnique, Nantes	Président du jury
M. Christian GERMAIN	Professeur, IMS Bordeaux	Membre du jury
M. Jean-Pierre DA COSTA	Maitre de conférences, IMS Bordeaux	Membre du jury
M. Gérard VIGNOLES	Professeur, LCTS, Bordeaux	Membre du jury
M. Michel CATALDI	Chef de Département Caractérisation matériaux, SAFRAN Herakles	Membre invité

ANALYSE / SYNTHESE TRIDIMENSIONNELLE DE TEXTURES FIBREUSES

Cette thèse s'inscrit dans le contexte de l'étude de matériaux fibreux tissés et traite de l'analyse morphologique de leur texture et de la simulation des arrangements des fibres dans un fil.

Le volet « analyse » consiste à extraire des données caractérisant la géométrie des fibres et des fils composant le renfort tissé et s'appuie sur des images tridimensionnelles issues de tomographies rayon X à haute résolution. Une chaine de traitement d'images visant à séparer et identifier les fils et les fibres est proposée. Elle s'appuie sur un algorithme de labellisation du fil et des fibres. Les caractéristiques telles que les diamètres et les orientations de fibres et la densité locale de fibres dans le fil sont ensuite calculées.

Le volet « simulation » vise à générer un renfort fibreux « virtuel ». Un algorithme fondé sur la résolution de modèles dynamiques permet de placer au sein d'un fil, des objets représentant les fibres tout en respectant des contraintes issues des paramètres issus du volet « analyse » ou choisis arbitrairement par l'utilisateur. L'ensemble des fibres composant le fil sont alors synthétisés en respect de ces contraintes.

Ces deux volets sont appliqués avec succès à la caractérisation et à la synthèse de renforts fibreux de composites thermostructuraux. Les caractéristiques géométriques, estimées sur des tomographies à haute résolution, font ressortir des phénomènes tels que le cisaillement intra fils. La synthèse permet de simuler le placement de fibres à partir de paramètres géométriques obtenus à haute résolution, au sein d'un fil dont l'enveloppe est obtenue à basse résolution et donc sur une longueur plus représentative du tissage.

Mots clés : composite à matrice céramique, tomographie à haute résolution, segmentation et labellisation, orientation, synthèse de fibres

---

Tridimensional analysis and synthesis of fibrous texture

The aim of this work is to study fibrous woven materials and to develop morphological analysis of their texture enabling simulation of fibrous layout in yarns.

The "analysis" stage consists in data extraction to characterize the geometry of fibers and yarns constituting the woven material, based on tridimensional images generated by high resolution X-ray tomography. An image processing workflow to separate and identify fibers and yarn is proposed. Then, diameters, fiber orientations and local fiber density in yarns are computed.

The "simulation" stage targets to generate virtual fibrous materials. An algorithm based on the resolution of a dynamic model allows placing objects representing fibers into a yarn. It uses as input the characteristic parameters previously extracted in the analysis stage or arbitrarily chosen ones. Consequently, all fibers are synthesized according to these constraints.

These two stages are successfully applied to characterize and synthesize woven ceramic matrix composites. Geometrical characteristics, extracted from the high-resolution tomographic images, highlight yarn phenomena like shearing planes. The synthesis simulates fibers placement, merging geometrical parameters extracted on high and low resolution. Indeed, using fiber parameters extracted from high resolution images and yarn envelopes from low resolution ones enable generating a result with a more representative woven length.

Keywords: ceramic matrix composites, high-resolution tomography, segmentation and labeling, orientations, fiber synthesis

---

Note : Cette thèse est réalisée dans le cadre d'un cofinancement CIFRE DGA et SAFRAN Herakles

Remerciements

Je tiens en premier lieu à sincèrement remercier mes encadrants de thèse, messieurs Christian Germain, Jean-Pierre Da Costa ainsi que Gérard Vignoles, pour leur soutien quotidien, leurs conseils et leur regard critique. Sans nos réunions, nos discussions (et quelques séances de debug) cette thèse n'aurait pu être menée à bien.

Je remercie Yannick Berthoumieu de m'avoir accueilli au sein l'équipe signal et image au sein du laboratoire IMS. Je remercie de même Francis Teyssandier pour m'avoir permis de bénéficier du même suivi que chaque thésard du laboratoire LCTS.

Je suis particulièrement reconnaissant à messieurs Eric Maire et Jean-Charles Pinoli pour avoir pris sur leur temps et montré l'intérêt porté à mon travail en rapportant ce manuscrit. Je remercie aussi Jean-Pierre Guédon pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Je remercie la DGA et SAFRAN Herakles pour la confiance qu'ils m'ont accordé au travers du financement de cette thèse CIFRE. Plus particulièrement, je remercie Michel Cataldi de m'avoir donné ma chance en me proposant ce sujet de thèse et du suivi dont il a fait preuve durant ces trois années de recherche.

Plus largement, je tiens à remercier toute l'équipe du laboratoire IMS, des doctorants aux professeurs en passant par le personnel administratif pour leur bonne humeur et leur sympathie quotidienne. Je ne tenterai pas de lister l'ensemble des gens que j'ai pu croiser durant ces trois ans mais je tiens à tous vous remercier que ce soit pour nos discussions, nos fous rires, nos pauses et bien entendu nos longues périodes de travails consciencieux.

Pour finir, je souhaite remercier du fond du cœur mes proches. Tout d'abord, ma famille pour m'avoir continuellement changé les idées et m'avoir soutenu surtout cette dernière année. Ensuite, je remercie l'ensemble de mes amis, les thésards pour tous nos repas et pauses mais aussi tous les autres pour les soirées, les restaurants, les apéros et tout ce qui a pu me faire oublier l'espace de quelques heures la rédaction toujours dans la bonne humeur. Une pensée toute particulière se tourne vers Céline pour sa présence, son aide et sa compréhension lors des longs week-ends studieux. Merci à tous.

Sommaire

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 LES MATERIAUX THERMOSTRUCTURAUX 2
1.2 LES COMPOSITES A MATRICE CERAMIQUE ET FIBRES CERAMIQUES LONGUES 2
1.3 L'APPROCHE *MATERIAU VIRTUEL* 5
1.4 OBJECTIFS DE LA THESE ET ORGANISATION DU MEMOIRE 8

CHAPITRE 2 ETAT DE L'ART ET PROPOSITIONS METHODOLOGIQUES POUR L'INVESTIGATION DE MATERIAUX COMPOSITES FIBREUX 9

2.1 INTRODUCTION 10
2.2 ETAT DE L'ART 10
2.2.1 Méthodes d'acquisition d'images 10
2.2.1.1 Tomographie assistée par ordinateur 10
2.2.1.2 Rayonnement synchrotron 11
2.2.1.3 Microscopie électronique à balayage 12
2.2.1.4 Choix d'une méthode d'acquisition 13
2.2.2 Méthodes d'analyse de matériaux tissés 15
2.2.2.1 Analyse de matériaux tissés par traitement d'images 2D 15
2.2.2.2 Analyse de matériau en trois dimensions 16
2.2.2.2.1 Analyse de fibres en trois dimensions 17
2.2.2.2.2 Analyse de fils en trois dimensions 19
2.2.3 Simulation numérique de matériaux 21
2.2.3.1.1 Méthodes de synthèse matériaux 21
2.2.3.1.2 Synthèse par empilement d'objets: application à la synthèse de propergol 21
2.2.3.2 Synthèse de matériaux : le cas des matériaux fibreux 24
2.2.3.2.1 Processus de points 24
2.2.3.2.2 Synthèse de fibres 25
2.2.3.2.3 Synthèse de fibres et de fils 28
2.3 PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE POUR UNE APPROCHE MATERIAU VIRTUEL 32
2.3.1 Approche matériau virtuel : vue globale 32
2.3.2 Choix d'une technique d'imagerie : la tomographie à rayons X 34
2.3.2.1 Données à haute résolution 34
2.3.2.2 Données à basse résolution 37
2.4 CONCLUSION 38

CHAPITRE 3 ALGORITHMES POUR L'ANALYSE DE LA STRUCTURE D'UN MATERIAU COMPOSITE FIBREUX 39

3.1 INTRODUCTION 40
3.2 EXTRACTION DE FILS 40
3.2.1 Présentation globale de l'approche 41
3.2.2 Extraction des masques de fils de chaine et de fils de trame 42
3.2.2.1 Obtention d'un masque binaire grossier des fibres 42
3.2.2.2 Séparation des fils de chaine et de trame 43
3.2.2.3 Obtention des masques fins de chaine et de trame 46
3.2.3 Labellisation des tronçons de fils isolés 47
3.2.3.1 Sélection des tronçons de fils isolés 47
3.2.3.2 Labellisation des tronçons 48
3.2.4 Algorithme de poursuite 49
3.2.4.1 Présentation globale de l'algorithme 49
3.2.4.2 Sélection des candidats 51
3.2.5 Utilisation de l'algorithme 52
3.3 EXTRACTION DE FIBRES 54
3.3.1 Présentation globale de l'approche 54
3.3.2 Extraction d'axes de fibres 54
3.3.2.1 Extraction des fibres par squelettisation 55
3.3.2.2 Méthode géométrique 56
3.3.2.3 Comparaison des deux méthodes 58
3.3.3 Labellisation des fibres 59

3.3.3.1 Etape préliminaire ... 59
3.3.3.2 Algorithme de poursuite ... 61
3.4 EXTRACTION DE PARAMETRES CARACTERISTIQUES ... 61
3.4.1 Analyse des diamètres de fibres ... 62
3.4.2 Distribution des orientations des fibres par rapport à l'orientation du fil ... 63
3.4.3 Densité de fibres dans le fil ... 65
3.5 RESULTATS ... 67
3.5.1 Segmentation des blocs de données tomographiques ... 67
3.5.2 Etude des diamètres ... 69
3.5.2.1 Distribution des diamètres dans un bloc issu de tomographie à haute résolution ... 69
3.5.2.2 Evolution de diamètre le long d'une fibre ... 70
3.5.3 Etude des orientations ... 71
3.5.3.1 Etude basse résolution ... 71
3.5.3.2 Etude haute résolution ... 72
3.5.4 Etude de la densité ... 73
3.5.4.1 Etude basse résolution ... 73
3.5.4.2 Etude en haute résolution ... 74
3.5.5 Etude générale des données à haute résolution ... 75
3.6 CONCLUSION ... 79

CHAPITRE 4 SYNTHESE D'UN MATERIAU COMPOSITE TISSE VIRTUEL ... 81

4.1 INTRODUCTION ... 82
4.2 METHODE BASEE SUR LES PROCESSUS DE POINT ... 82
4.2.1 Présentation de la méthode ... 82
4.2.2 Limites de la méthode ... 84
4.3 METHODE BASEE SUR LA DYNAMIQUE D'OBJETS BIDIMENSIONNELLE ... 85
4.3.1 Présentation de l'algorithme de Verlet ... 85
4.3.1.1 Algorithme de base ... 85
4.3.1.2 Estimation des paramètres de l'algorithme de Verlet ... 87
4.3.1.3 Cas d'étude simplifié ... 89
4.3.1.4 Accélération de l'algorithme initial ... 90
4.3.2 Adaptation à la synthèse 2D de sections de fils ... 91
4.3.2.1 Confinement dans une enveloppe de fil ... 92
4.3.2.2 Gestion de la densité ... 94
4.4 PROLONGEMENT AU CAS TRIDIMENSIONNEL ... 95
4.4.1 Présentation de la méthode ... 95
4.4.2 Etude de la courbure des fibres 3D synthétisées ... 96
4.5 RESULTATS DE SYNTHESE ... 99
4.5.1 Evaluation de l'effet des paramètres ... 99
4.5.1.1 Amplitude du potentiel densité et de la distance à l'enveloppe ... 100
4.5.1.2 Masse ... 102
4.5.1.3 Taille de l'élément cylindrique de base ... 104
4.5.2 Matériaux virtuels synthétisés ... 106
4.5.2.1 Synthèse à partir des données à haute résolution ... 106
4.5.2.2 Synthèse à partir des données à basse résolution ... 107
4.6 CONCLUSION ... 109

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES ... 111

5.1 CONCLUSION ... 112
5.2 PERSPECTIVES ... 113

BIBLIOGRAPHIE ... 115

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1 LES MATERIAUX THERMOSTRUCTURAUX 2
1.2 LES COMPOSITES A MATRICE CERAMIQUE ET FIBRES CERAMIQUES LONGUES 2
1.3 L'APPROCHE *MATERIAU VIRTUEL* 5
1.4 OBJECTIFS DE LA THESE ET ORGANISATION DU MEMOIRE 8

1.1 Les matériaux thermostructuraux

Les industries de pointe des secteurs tels que l'aéronautique, le spatial ou l'énergie cherchent à utiliser des matériaux à la fois résistants tant mécaniquement que thermiquement. Pour leurs applications les plus exigeantes, leur choix s'est tourné depuis plusieurs années vers l'utilisation de matériaux thermostructuraux, afin de générer les structures les plus fiables et les plus légères possibles pour un fonctionnement à des températures élevées (au-dessus de 300°C et jusqu'à 4000°C).

Les matériaux thermostructuraux sont pour la plupart des matériaux composites, c'est-à-dire qu'ils résultent de l'association de plusieurs matériaux en vue d'obtenir un produit final dont les propriétés sont supérieures à celles de chacun des constituants initiaux. Pour la majeure partie, ils sont constitués d'une architecture fibreuse placée dans une matrice [CHR 02, KRE 08].Quand il est convenablement effectué, l'assemblage de fibres fragiles et d'une matrice fragile (car faite en matériau réfractaire) mène à un matériau non-fragile, car la fissuration peut se localiser et se multiplier à l'intérieur. De plus, la faible densité des constituants et l'existence d'une certaine porosité résiduelle garantissent la légèreté du matériau (2 à 3 fois plus légers que certains alliages). Il y a ainsi des composites à matrice céramique (CMC), et des composites carbone/carbone (C/C).

On retrouve typiquement ces matériaux dans les moteurs d'avions militaires, les tuyères des boosters des fusées Ariane ou des missiles tactiques ou encore dans les systèmes de freinage des avions ou des voitures de sport (Figure 1).

Figure 1 : Exemple d'utilisation de composites thermostructuraux: freins (à gauche), sortie de réacteur d'avion (au centre), divergent déployable de fusée (à droite)

Les caractéristiques exceptionnelles des thermostructuraux, et en particulier des CMC, s'obtiennent au prix d'un processus de fabrication complexe, associé à un coût de production élevé. Nous allons rappeler ci-après les principales étapes de la fabrication des CMC faisant l'objet de ce travail, puis décrire leurs propriétés plus en détail.

1.2 Les Composites à Matrice Céramique et fibres céramiques longues

L'étude porte sur des CMC produits par Herakles dans le but d'une incorporation dans des turbines de réacteurs pour la propulsion aéronautique civile. Ils ont prévus pour une utilisation longue (jusqu'à 10 ans) dans des gammes de températures allant de 300°C à 1000°C, voire davantage, et pour remplacer des superalliages 2,5 fois plus denses et plus limités en températures d'utilisation.

L'architecture du renfort est un tissage de torons ou fils, eux-mêmes constitués de centaines de fibres céramiques de très haute technologie, dont le procédé d'élaboration, par filage à partir de polymères puis avec divers traitements thermiques et chimiques est en soi bien complexe. Ces fibres ont de bonnes propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, allongement à la rupture) associées à une excellente résistance aux sollicitations thermiques (elles sont réfractaires et stables jusqu'à au moins 1100°C) et chimiques : elles résistent bien à l'oxydation, au contraire des fibres de carbone [GOU 90]. Ces fibres sont en général à base de carbure de silicium, produit par la pyrolyse d'un polymère de type polysilazane [YAJ 75] filé à l'état fondu puis réticulé avant pyrolyse. Les fibres employées dans ce travail sont déjà des fibres de troisième génération, comportant une structure formée de grains de SiC quasi-pur et de taille nanométrique, liés par une phase « joint de grain » pouvant contenir des impuretés : O, C libre, Al, B en substitution, etc… [CHO 95, ICH 00] Malgré leurs qualités, elles sont tout de même sensibles à l'oxydation à haute température [CHR 05], sous contraintes : leur résistance mécanique diminue progressivement, par fissuration sous-critique [GAU 06, LAF 09]. Un habillage par une matrice protectrice est donc nécessaire [GUO 99].

Différentes techniques de tissage existent, donnant lieu à des motifs plus ou moins complexes. Les structures ainsi créées constituent la *texture sèche* ou *renfort fibreux*. La première génération de renforts consistait généralement en la confection de nappes de tissu, empilées simplement les unes sur les autres : on parle de « 2D tissé ». Mais la trop grande sensibilité à la délamination de ce type d'architecture a orienté les concepteurs vers les architectures 3D. Une technique simple et efficace pour les matériaux à fibres de carbone est l'aiguilletage [GEO 88]: on transfère des fibres dans la direction perpendiculairement à l'empilement grâce à des aiguilles à barbes (similaires à des harpons). Mais, vu la très grande rigidité et la faible résistance en flexion des fibres de céramique, ceci est impossible à mettre en pratique. On utilise plutôt des techniques de « tissage 3D » ou de guipure, en faisant passer les fils de trame au-dessus et au-dessous de plusieurs fils de chaîne placés à des hauteurs différentes ; ainsi on obtient un motif auto-bloquant dans la troisième direction (dit aussi « interlock ») (Figure 2).

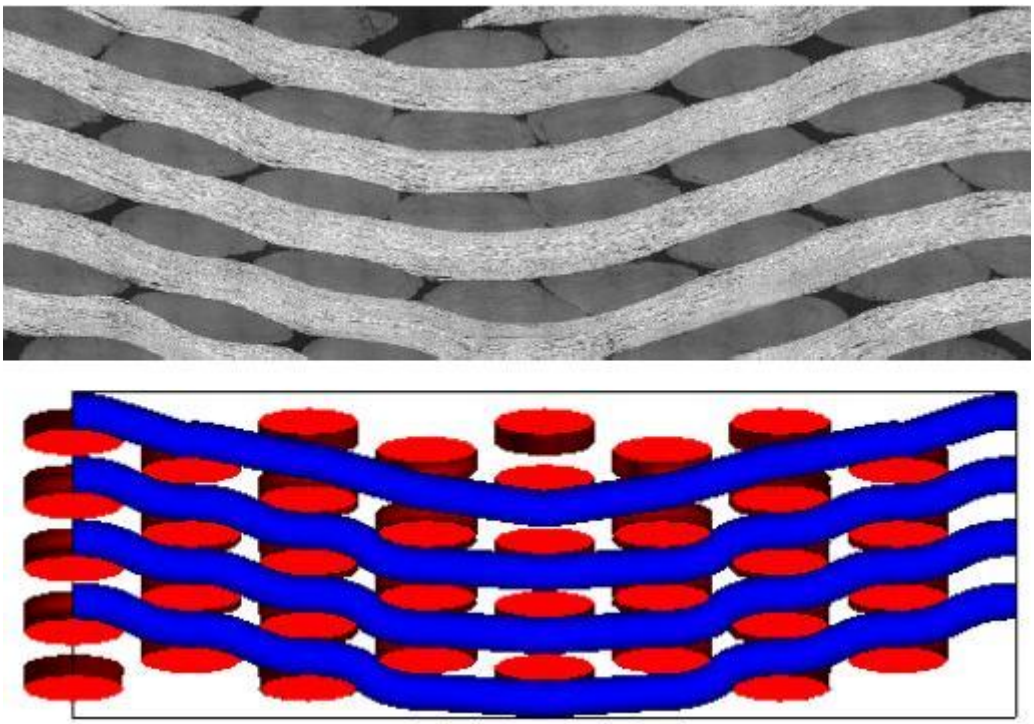


Figure 2 : Organisation d'un texture fibreuse de type interlock Interlock [GUS 98]

Ce renfort fibreux fait généralement l'objet d'une adjonction d'interphase (c'est-à-dire d'une fine couche protectrice) puis de matrice. L'interphase optimise la liaison Fibre/Matrice en assurant le transfert des efforts et en protégeant les fibres de la rupture prématurée par déviation des fissures matricielles [MAR 89]. Ainsi le composite résultant possède une déformation à rupture significativement supérieure et un comportement de type « endommageable ». L'interphase est donc le constituant critique sur lequel repose la qualité mécanique de ces matériaux. Il s'agit la plupart du temps d'une couche sub-micrométrique de carbone pyrolytique (ou pyrocarbone), un matériau choisi pour sa grande anisotropie mécanique: c'est un bon « fusible mécanique » car il dévie les fissures perpendiculaires aux fibres [VIG 13]; par contre, il est très sensible à l'oxydation au-dessus de 400°C.

La matrice assure plusieurs rôles dans le matériau. Premièrement, et au contraire des Composites à Matrice Organique plus courants, elle contribue à améliorer la rigidité de l'ensemble du matériau, et permet de transférer efficacement les contraintes mécaniques d'une fibre à l'autre. Ensuite, elle assure un rôle protecteur, pour empêcher les agressions extérieures (essentiellement, l'oxydation) sur les fibres et les interphases. Le carbure de silicium SiC présente l'avantage de créer une couche passivante de silice à haute température (>1200°C) ; par contre, à des températures plus basses, il faut un autre composer pour générer efficacement un oxyde condensé permettant de bloquer le passage des gaz oxydants. Pour ce faire, on emploie des carbures de bore, qui donnent un oxyde liquide dès 450°C. On a souvent recours à une structuration multicouche [GOU 90] pour combiner au mieux les propriétés des différents constituants (Figure 3).

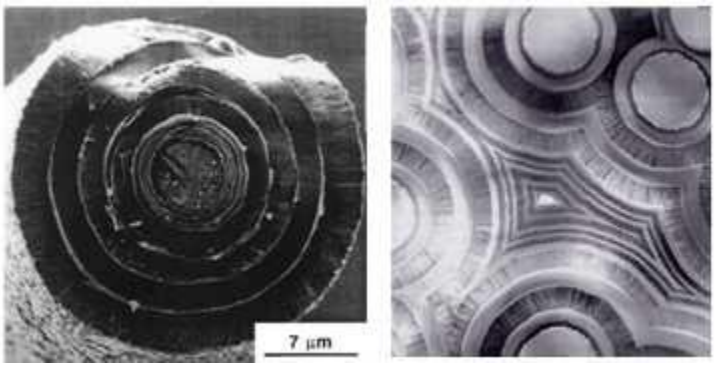


Figure 3 : Composite avec une matrice céramique multicouche [NAS01, BOU05]

L'ajout des interphases et de la matrice (en une ou plusieurs séquences) peut se faire par voie liquide ou gazeuse. La voie liquide consiste à imprégner le réseau fibreux par un polymère ou une barbotine (suspension de poudre micrométrique) puis à pyrolyser l'ensemble, pour obtenir un résidu solide, en général fissuré, intercalé entre les fibres [DON 02, JEH 06]. On peut également imprégner un métal fondu qui va réagir avec les phases solides présentes [ICH 02]; dans ce cas, il faut souvent protéger au préalable les fibres par l'introduction d'une première couche par une autre méthode. La voie gazeuse consiste à utiliser l'infiltration de gaz précurseurs, qui diffusent entre les fibres avant de réagir à haute température avec la surface pour donner un dépôt qui vient enrober les fibres [NAS 09]. Cette méthode, qui possède de nombreuses variantes, est celle qui mène aux dépôts de plus haute qualité, tout en respectant les fibres; par contre, elle est intrinsèquement lente, sauf pour les variantes dites à gradient de température qui, elles, sont énergivores. En conséquence, des approches de modélisation ont été développées depuis longtemps pour permettre une optimisation et une réduction des coûts [VIG 06]. Il ressort de ces approches que la structure

du milieu fibreux à infiltrer a une influence sur les paramètres optimaux d'infiltration [VIG 13bis].

Les CMC présentent donc différentes échelles d'analyse: l'échelle des fibres, l'échelle du fil, l'échelle du tissage. Bien entendu, ces différentes échelles ne sont pas indépendantes : le motif de tissage induit des contraintes sur les fils et donc une modification de leur morphologie (forme de la section, orientations, courbures). Ces modifications morphologiques entraînent une répartition spécifique des fibres à l'échelle intra-fil (variations de densités, foisonnement des orientations de fibres, etc.) ayant elle-même des implications quant aux propriétés de percolation, perméation, diffusion, etc … du matériau lors du dépôt matriciel [VIG 07]. L'étude des propriétés structurales du matériau requiert donc une analyse des divers constituants du matériau à différentes échelles, s'appuyant sur des moyens d'investigation variés, adaptés aux échelles d'analyse : microscopie optique, microscopies électroniques, micro-tomographie X. Il y a par conséquent un travail important en matière d'analyse d'images pour exploiter au mieux ces caractérisations.

1.3 L'approche *Matériau Virtuel*

La production à l'échelle industrielle des CMC ne sera économiquement viable que si les coûts de fabrication sont abaissés significativement, tout en garantissant les performances et la durée de vie de ces matériaux. Dans ce but, l'optimisation du matériau (et du ou des procédés de fabrication associés) en variant ses paramètres structuraux, c'est-à-dire les motifs de tissage, le nombre et l'épaisseur des couches de la matrice, est un élément clé du développement. Malheureusement, la production d'échantillons est très longue et coûteuse. Par conséquent, les approches de modélisation semblent très intéressantes: une prédiction de la variation des propriétés lorsqu'on modifie un paramètre structural peut être rapide et peu onéreuse, à condition que la modélisation soit suffisamment fiable.

Pour que cette fiabilité soit garantie, il faut d'une part être suffisamment précis dans la description de l'architecture du matériau et d'autre part disposer d'une bonne description des phénomènes physiques, mécaniques et chimiques responsables du comportement du matériau. On parle souvent – peut-être par abus de langage – d'approche « *matériau virtuel* », ou bien de « *matériau numérique* ». L'analyse et la synthèse d'images s'avèrent donc être des éléments-clés de la procédure de modélisation, car elles permettent de disposer d'une base cohérente pour la validation vis-à-vis de l'expérience. La structure des matériaux est observée et l'information obtenue peut être utilisée soit directement, soit indirectement pour simuler le comportement du matériau. Une classe de méthodes « réalistes » consiste à effectuer des simulations directes – par exemple par éléments finis – dans des représentations 3D fidèles des matériaux, comme celles produites par les techniques d'imagerie 3D par tomographie X ou par ultra-sons [KIM 97]. Par contre, aucune garantie n'est apportée sur la représentativité des quelques images 3D obtenues vis-à-vis de l'entièreté du matériau, sauf si on est capable d'en obtenir un nombre suffisamment grand. D'un autre côté, il est toujours possible de partir de représentations de la géométrie du matériau produites *a priori*, lesquelles doivent incorporer le plus possible de paramètres permettant de tenir compte de leur « non-idéalité », et ces paramètres doivent être obtenus à partir de l'analyse d'un grand nombre d'images. Toutefois, les simulations directes gardent leur intérêt car elles peuvent permettre de capturer des effets qu'une approche *a priori* pourrait manquer.

Dans le cas des CMC à renforts fibres longues, une stratégie de matériau virtuel a été entreprise [VIG 14] en essayant de combiner les avantages des deux approches. Elle est fondée sur la synthèse d'échantillons simulés rendus plus réalistes car s'appuyant directement sur les propriétés morphologiques de matériau réels. Ces propriétés sont déduites de l'analyse

d'images d'échantillons réels issus de matériaux de référence. Cette approche permet ainsi d'élaborer un matériau nouveau « in silico » en faisant varier les règles de tissage, les propriétés des fibres et des fils. Une modélisation de l'insertion de matrice est disponible [ROS 11, COU 08], ce qui permet de disposer d'un matériau virtuel complet. Dès lors, des modélisations mécaniques ou thermiques peuvent être réalisées de façon totalement informatisée, sans avoir à fabriquer préalablement le matériau d'intérêt, gagnant ainsi un temps précieux et réduisant les coûts d'étude lors du développement de nouveaux matériaux. Ce concept peut s'appliquer à tout matériau composite reposant sur un renfort fibreux tissé, mais il prend une importance toute particulière dans le cas des composites à matrice céramique, dont les échantillons s'avèrent particulièrement coûteux et complexes à élaborer.

La construction d'un matériau virtuel constitue toutefois un défi dans le cas des matériaux thermostructuraux en raison de leur caractère multi-échelle [COU 08].

Si chaque échelle du matériau peut être étudiée à l'aide d'une approche spécifique, la synthèse d'un matériau virtuel réaliste nécessite la prise en compte de l'ensemble de ces phénomènes d'échelle [VIG 14]. Elle requiert la simulation d'un tissage de fils, la prise en compte de l'impact du tissage sur leur morphologie, la synthèse de fibres à l'intérieur des fils et la simulation de dépôt matriciel.

La Figure 4 et la Figure 5 montrent respectivement la structuration des approches à l'échelle de la fibre et celle du tissage. De nombreuses similarités sont présentes si ce n'est la géométrie des éléments étudiés qui sont intrinsèquement distincts. Le point commun le plus important à ces deux architectures est la possibilité de pouvoir travailler à la fois sur des images issues d'acquisitions sur matériau réel ou directement de manière logicielle.

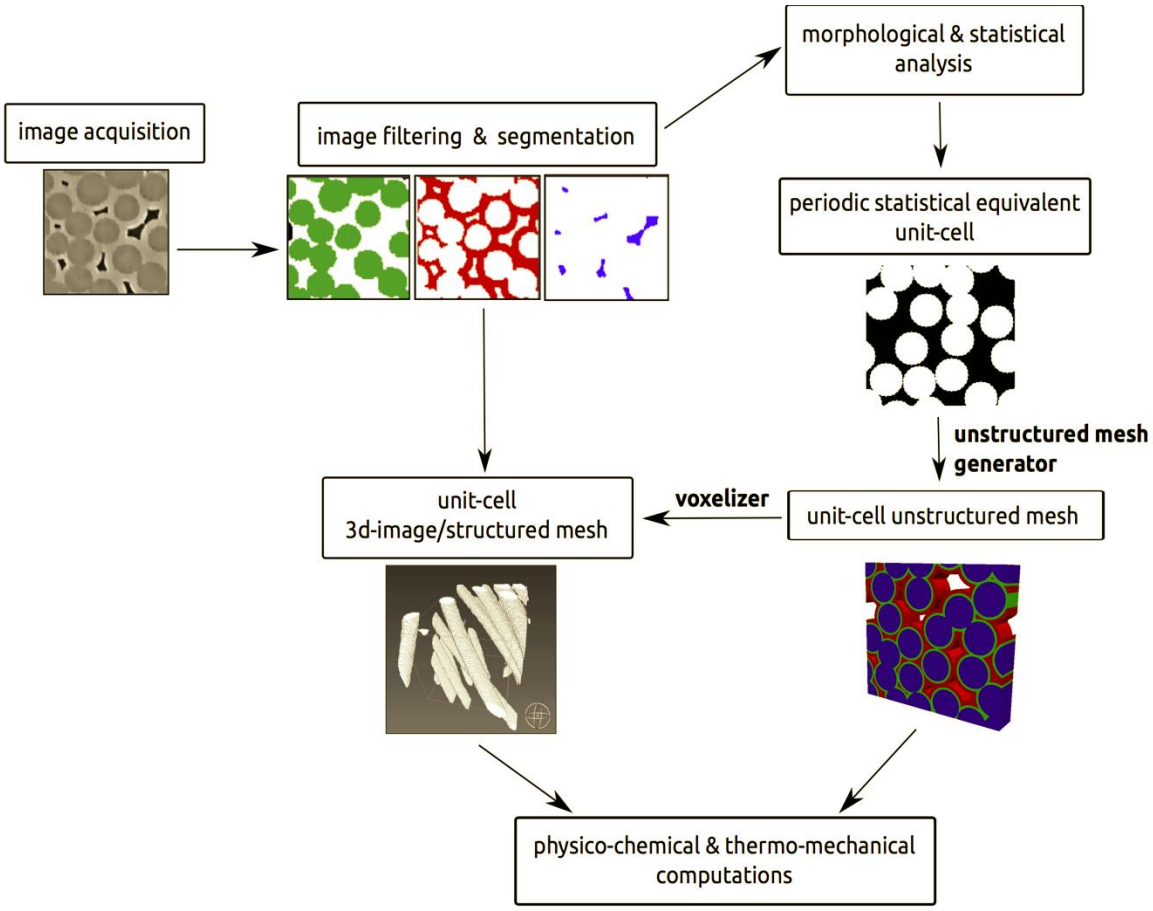


Figure 4 : Schéma bloc de l'approche de matériau virtuel appliqué à l'étude de fibres [COU 12]

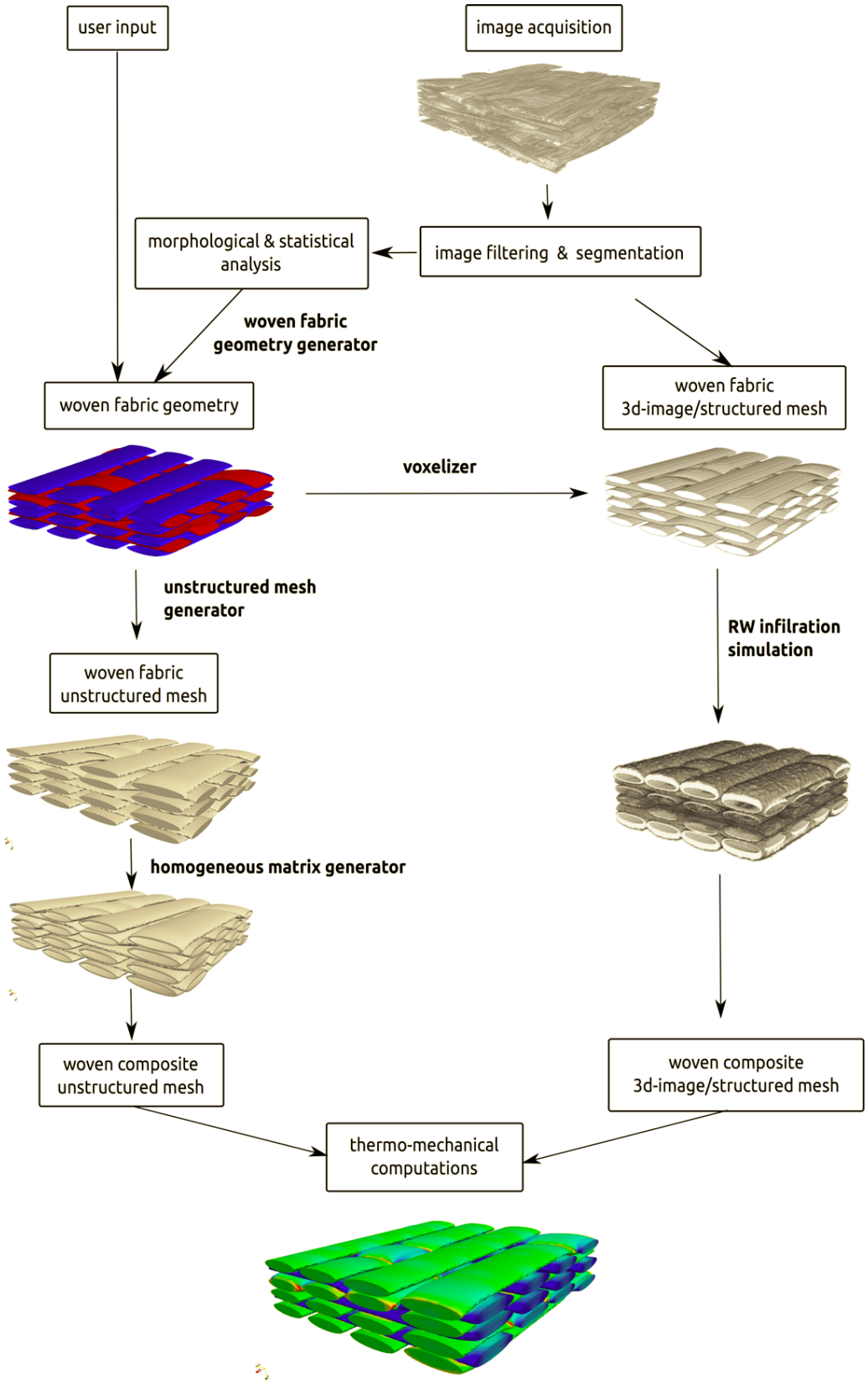


Figure 5 : Schéma bloc de l'approche de matériau virtuel appliqué à la fabrication de tissage imprégné [COU 12]

1.4 Objectifs de la thèse et organisation du mémoire

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent l'étude de matériaux composites thermo structuraux et se placent dans le contexte, plus large, d'une approche matériau virtuel visant à une modélisation complète et réaliste des matériaux et de leurs propriétés. Nous nous intéressons en particulier à l'analyse et à la simulation des arrangements de fibres à l'intérieur des fils. Les matériaux ciblés sont des matériaux composites tissés avant renforcement par une matrice. Les données utilisées sont des images tomographiques à deux niveaux de résolution révélant soit l'organisation mutuelle des fils induite par le tissage, soit les arrangements de fibres à l'intérieur des fils.

Outre ce chapitre introductif, le mémoire va se décomposer de la manière suivante.

Le deuxième chapitre dressera un état de l'art en matière d'imagerie, d'analyse et de simulation de matériaux thermostructuraux. Cette étude bibliographique permettra de dégager un canevas méthodologique visant à la construction d'un matériau virtuel. Nous identifierons les étapes méthodologiques clés restant à traiter dont notamment l'analyse et la simulation des arrangements de fibres à l'échelle intra-fil. Ces deux axes constitueront les deux contributions majeures de ce mémoire et seront développées dans les chapitres suivants.

Le troisième chapitre porte sur l'analyse morphologique du renfort fibreux. En premier lieu, nous proposons une méthode de labellisation des fibres et des fils (définis comme des ensembles structurés de fibres) composant le renfort. La méthode proposée s'appuie sur des algorithmes de traitement d'image et opère à plusieurs échelles sur des données tomographiques à haute résolution. Plus précisément, elle est constituée d'une combinaison d'opérations de morphologie mathématique et de géométrie différentielle, et repose sur des hypothèses a priori sur les formes des objets étudiés et sur leur agencement spatial. Elle opère d'abord à l'échelle des fibres puis à celle des fils.

En second lieu divers paramètres morphologiques sont extraits des fibres labellisées, en vue de caractériser le matériau étudié. Les paramètres pris en compte sont notamment les diamètres de fibres, les orientations de fibres dans le fil et la densité locale de fibres. Ces paramètres constituent un jeu de caractéristiques représentatives des fils de chaine et des fils de trame.

Le quatrième chapitre aborde la génération d'un renfort fibreux « virtuel ». Il s'appuie sur les paramètres précédemment extraits qui constituent les entrées d'un algorithme de synthèse d'un fil constitués de fibres. L'algorithme synthétise les fibres sous contrainte d'une enveloppe de fil, en s'appuyant soit sur des paramètres issus directement de la phase d'analyse, soit de paramètres choisis arbitrairement par l'utilisateur. Cet algorithme est basé sur une méthode de résolution de modèles dynamiques mise à profit dans un contexte de placement d'objets représentant les fibres.

Enfin, le chapitre cinq dressera un bilan de nos contributions et proposera quelques perspectives quant à la poursuite de l'approche matériau virtuel.

Chapitre 2

Etat de l'art et propositions méthodologiques pour l'investigation de matériaux composites fibreux

Sommaire

2.1 INTRODUCTION 10
2.2 ETAT DE L'ART 10
2.2.1 Méthodes d'acquisition d'images 10
2.2.1.1 Tomographie assistée par ordinateur 10
2.2.1.2 Rayonnement synchrotron 11
2.2.1.3 Microscopie électronique à balayage 12
2.2.1.4 Choix d'une méthode d'acquisition 13
2.2.2 Méthodes d'analyse de matériaux tissés 15
2.2.2.1 Analyse de matériaux tissés par traitement d'images 2D 15
2.2.2.2 Analyse de matériau en trois dimensions 16
2.2.2.2.1 Analyse de fibres en trois dimensions 17
2.2.2.2.2 Analyse de fils en trois dimensions 19
2.2.3 Simulation numérique de matériaux 21
2.2.3.1.1 Méthodes de synthèse matériaux 21
2.2.3.1.2 Synthèse par empilement d'objets: application à la synthèse de propergol 21
2.2.3.2 Synthèse de matériaux : le cas des matériaux fibreux 24
2.2.3.2.1 Processus de points 24
2.2.3.2.2 Synthèse de fibres 25
2.2.3.2.3 Synthèse de fibres et de fils 28
2.3 PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE POUR UNE APPROCHE MATERIAU VIRTUEL 32
2.3.1 Approche matériau virtuel : vue globale 32
2.3.2 Choix d'une technique d'imagerie : la tomographie à rayons X 34
2.3.2.1 Données à haute résolution 34
2.3.2.2 Données à basse résolution 37
2.4 CONCLUSION 38

2.1 Introduction

La proposition d'une approche méthodologique conduisant à la construction d'un matériau virtuel requiert différentes étapes allant de l'observation et de l'analyse d'échantillons réels, à la création d'algorithmes de simulation prenant en compte l'aspect composite et multi-échelle des matériaux.

De nombreuses méthodes d'investigation ont été proposées et mises en œuvre dans la littérature pour la caractérisation et la simulation de matériaux et, en particulier, de matériaux thermostructuraux. Dans un premier temps, nous dresserons dans ce chapitre un état de l'art de ces méthodes. Il concernera notamment les méthodes d'acquisition d'images, les approches algorithmiques pour l'analyse d'images 2D ou 3D, et les méthodes de synthèse ou de simulation de matériaux virtuels.

Dans un second temps, nous tirerons parti de cet état de l'art pour proposer un canevas méthodologique général visant à la synthèse d'un matériau virtuel et pour préciser les points spécifiques développés dans la suite du mémoire.

2.2 Etat de l'art

2.2.1 Méthodes d'acquisition d'images

Dans ce mémoire de thèse, nous allons présenter, entre autre, des méthodes d'analyse d'images de matériaux composites tissés. L'étape préalable à ce type d'étude concerne l'acquisition de telles images. Commençons par présenter les différentes techniques utilisées à l'heure actuelle dans le but de générer des données d'imagerie tridimensionnelles ainsi que bidimensionnelles à haute et très haute résolution.

2.2.1.1 Tomographie assistée par ordinateur

Pour commencer, présentons la technique de tomographie assistée par ordinateur (micro computed tomography - µCT). Cette technique consiste à obtenir une image en focalisant un rayon X sur un échantillon et en récoltant la projection du faisceau après absorption par l'échantillon. Plus précisément, l'échantillon est placé sur un socle rotatif qui permet donc de prendre un ensemble d'image bidimensionnelle de l'échantillon sous le faisceau de rayons X pour différents angles. A partir de ces images, la distribution interne de masse de l'échantillon peut être reconstruite par inversion de la transformée de Radon. Suite à cela, typiquement, un filtrage est réalisé sur la géométrie de faisceau parallèle. Un tomographe assisté par ordinateur focalise communément un faisceau de la taille du micromètre. L'avantage principal de cette technique est l'obtention de la structure tridimensionnelle de l'échantillon à haute résolution de manière non destructrice. La technique est dite non destructrice au sens où l'échantillon n'est pas coupé en son sein mais elle nécessite en fait la découpe d'un échantillon moins large que le faisceau pour permettre une acquisition optimale. Cette technique est détaillée plus précisément dans les travaux de Banhart [BAN 08] et Stock [STO 08].

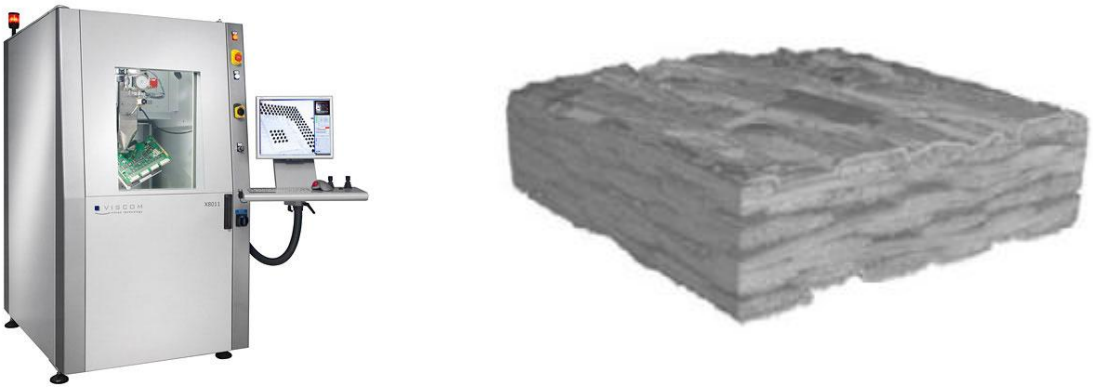


Figure 6 : Micro tomographe industriel à gauche et résultat typique obtenu sur un matériau tissé [ROS 11]

La technique de tomographie assistée par ordinateur a été appliquée pour la première fois sur un squelette humain en 1967 par G. N. Hounsfield. A partir de là, les avancées techniques ont augmenté considérablement la résolution et la précision de l'acquisition, permettant d'utiliser cette technique dans le domaine de l'étude de matériaux. Actuellement, de petits tomographes assistés par ordinateur sont utilisés à échelle industrielle sur des problématiques de développement de nouveaux matériaux mais aussi de contrôle non destructif.

2.2.1.2 Rayonnement synchrotron

Comparée à la tomographie assistée par ordinateur, la radiation synchrotron offre une qualité d'acquisition et une résolution bien supérieure. Bien que la première observation de rayonnement synchrotron fût réalisée en laboratoire dans les années 1950, la première imagerie aux rayons X issue de rayonnement synchrotron ne fut suggérée qu'en 1980 par Spiller [SPI 80].

Le synchrotron est un accélérateur de particules circulaire dans lequel un champ électrique et un champ magnétique sont synchronisés dans le but d'accélérer un faisceau de particules décrivant un parcours circulaire tout le long de l'appareil (Figure 7). Les particules sont injectées avec une énergie initiale grâce à divers accélérateurs linéaires avant de rentrer dans le synchrotron. Le rayonnement synchrotron est basé sur l'accélération de particules chargées, typiquement un faisceau d'électrons. Le faisceau ainsi créé passe ensuite par un atténuateur métallique dans le but d'obtenir un faisceau monochromatique. La densité et la puissance du faisceau est telle qu'elle permet d'obtenir une très haute résolution de l'ordre du nanomètre. Pour prendre l'exemple de l'ESRF ID19, une résolution de 1,4µm est obtenue sur un échantillon de plus d'un millimètre cube.

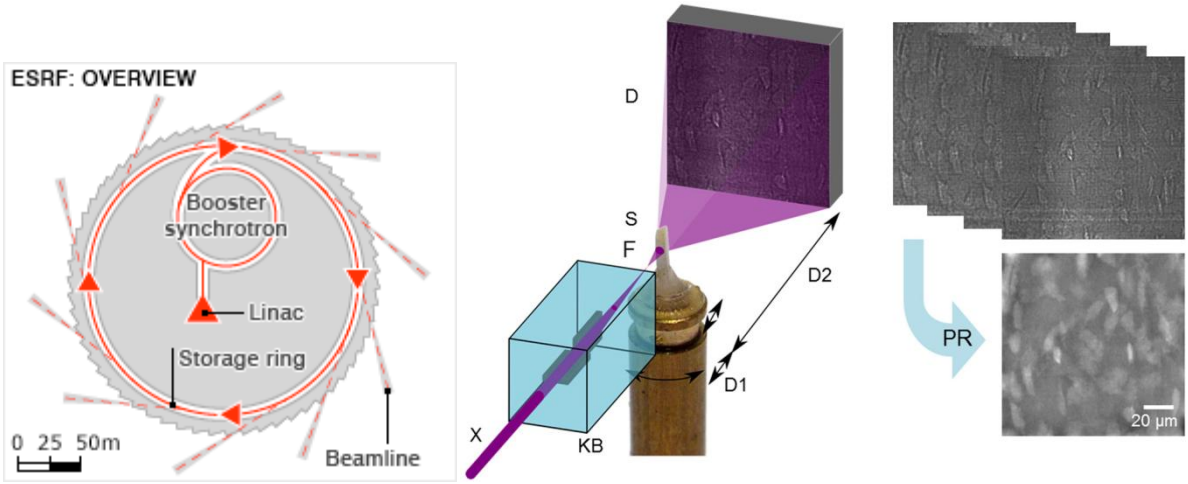


Figure 7 : Schéma de l'accélérateur de particule de l'ESRF à gauche, schéma de l'acquisition d'un échantillon à droite [LAN 12]

2.2.1.3 Microscopie électronique à balayage

La première image issue d'un microscope électronique à balayage a été obtenue en 1935. Ce type d'acquisition est basé sur un microscope à électrons [OAT 72]. Une surface est scannée à l'aide d'un faisceau d'électron à haute énergie. Le faisceau d'électron est généré en chauffant une cathode qui résulte par l'émission d'électron d'une énergie entre 0.5 et 40keV. Le faisceau d'électron ainsi créée subit différentes transformations en traversant différents dispositifs tels que de lentilles pour focaliser le rayon. Le faisceau interagit ensuite avec l'échantillon à étudier émettant à la fois des électrons ainsi qu'un rayonnement X caractéristique. La résolution d'un microscope électronique à balayage est très fine et peut atteindre des valeurs inférieures à l'ordre du micromètre.

Par contre, ce type d'acquisition ne peut être utilisé que sur des matériaux à surface conductrice. Dans le cas d'étude de matériaux non conducteur, un pré-traitement consistant à déposer une fine couche de matériau conducteur est réalisé (typiquement une fine couche d'or). Ce type de technique, par ailleurs, permet seulement d'obtenir des images bidimensionnelles de l'échantillon étudié. Pour obtenir une représentation tridimensionnelle, une première méthode consiste à enchainer différentes acquisitions en abrasant une partie du matériau entre chaque prise [MUN 82]. Cette méthode d'obtention d'image tridimensionnelle ne peut être considérée comme non destructive.

Une seconde méthode de visualisation tridimensionnelle appelée visualisation stéréoscopique consiste à prendre différentes vues de l'échantillon en le déplaçant autour d'un axe de rotation (appelé « tilt ») afin de rendre compte du relief à la surface de l'objet. Même si cette méthode ne permet pas de connaitre l'architecture de l'intérieur même de l'échantillon il permet tout de même d'obtenir un rendu fidèle de la géométrie de sa surface via la notion de dimension de profondeur qui ne peut être obtenue sur une simple image bidimensionnelle.

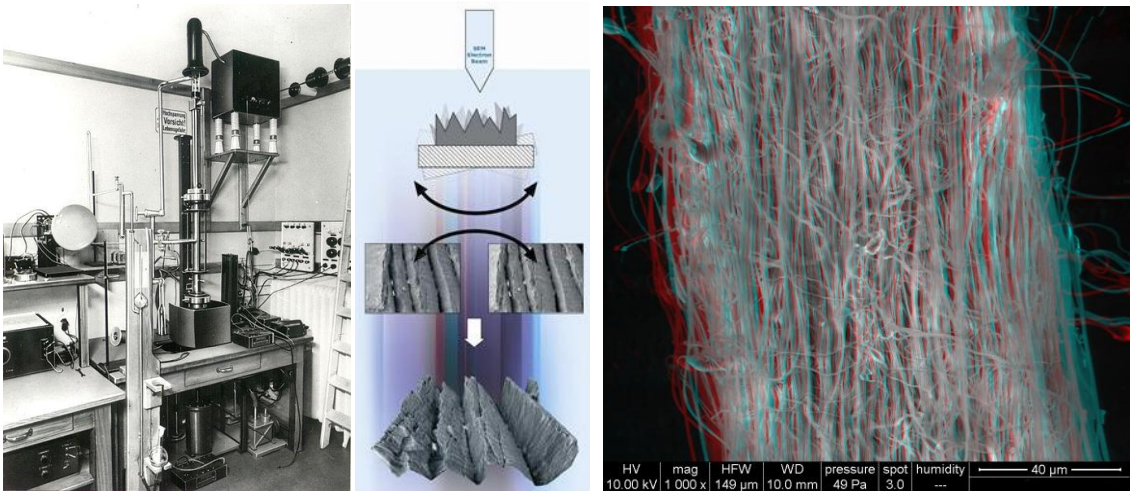


Figure 8 : Premier microscope électronique de 1935 à gauche, schéma d'acquisition d'une image stéréoscopique via SEM au centre [NAN 14], visualisation stéréoscopique de nanofibres electrofilées à droite [BM3 14]

2.2.1.4 Choix d'une méthode d'acquisition

Sachant que nous souhaitons étudier des matériaux composites thermostructuraux, la première question légitime est le choix de la méthode d'acquisition. Nous voulons étudier une image tridimensionnelle afin de pouvoir rendre compte le plus fidèlement possible des caractéristique du matériau. En ne gardant que ce point à l'esprit, les quatre méthodes précédentes semblent aussi bien indiquées les unes que les autres.

Pour garantir une acquisition fidèle à l'échantillon étudié, les méthodes non destructives sont à préférer aux méthodes destructives. Ainsi, les microscopies électronique à balayage et acoustique à balayage sont à proscrire vu que leurs rendus 3D sont générés par abrasion et donc destruction de l'échantillon.

Reste donc à faire un choix entre la tomographie « de laboratoire » (la source étant un tube à rayons X) et la tomographie sous rayonnement synchrotron. La première est plus facile d'accès que la seconde mais la seconde garantit un gain et une résolution bien supérieurs [KIN 94]. Nous prenons donc le parti d'utiliser la meilleure qualité d'image en réalisant des acquisitions via le rayonnement synchrotron. Plus de détails sur ces acquisitions sont donnés dans le paragraphe 2.3.2.

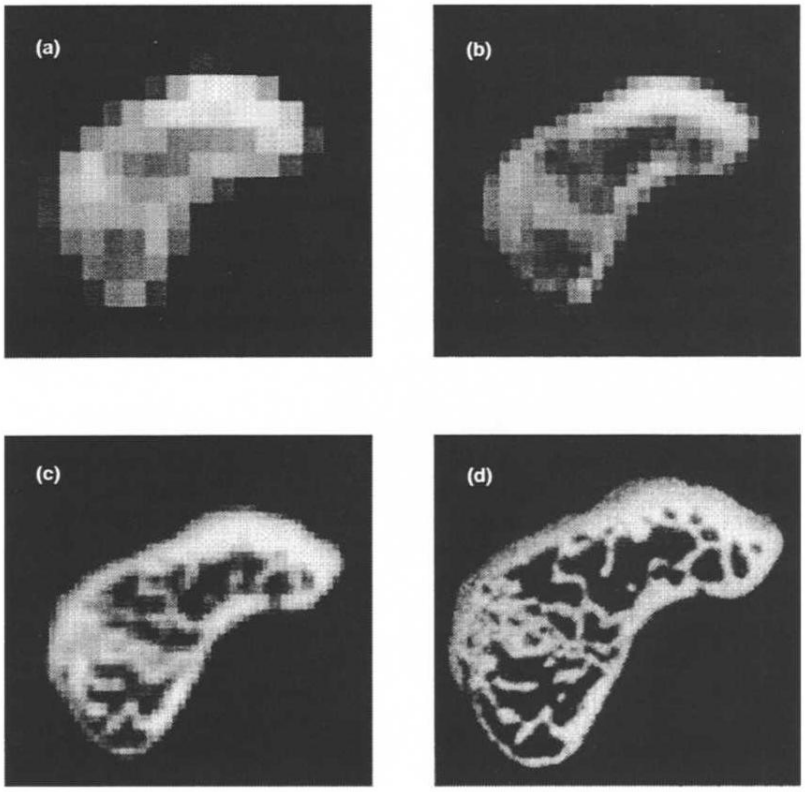


Figure 9 : Comparaison de tomographies d'os de rat à différentes résolutions. Image (a) à 250µm/voxel (résolution typique d'un tomographe médical). Image (b) à 100µm/voxel (résolution typique d'un tomographe industriel). Image (c) à 50µm/voxel (résolution typique d'un microtomographe). Image (d) à 17µm/voxel (résolution typique d'un rayonnement synchrotron) [KIN 94].

2.2.2 Méthodes d'analyse de matériaux tissés

En ce qui concerne l'étude des matériaux composites tissés, l'un des points critiques sur lequel portent de nombreux travaux de recherches est l'étude de leur tissage, de leurs fils et des fibres qui les composent. Dans cette optique, différentes techniques ont vu le jour, certaines basées directement sur les propriétés mécaniques du matériau et simulant de manière virtuelle le tissage. D'autres techniques sont basées sur l'étude d'images bidimensionnelles (issues de la microscopie), ou tridimensionnelles (issues par exemple de tomographies à rayons X). Commençons par faire un point sur les diverses méthodes actuellement utilisées que ce soit pour de la caractérisation à l'échelle « micro » c'est-à-dire à l'échelle de la fibre ou encore de la caractérisation à l'échelle « méso » c'est-à-dire du fil.

2.2.2.1 Analyse de matériaux tissés par traitement d'images 2D

Une seconde voie d'étude des matériaux tissés utilise le traitement d'images comme outil d'extraction de paramètres. Contrairement à la méthode précédente qui nécessite une connaissance approfondie du comportement mécanique du matériau étudié, les méthodes issues de traitement d'image s'appuient seulement sur l'information contenue dans l'image acquise, c'est-à-dire que ce type de méthode exploite les niveaux de gris des pixels et la forme des objets (sections, orientation, …). A partir de ces études, il est possible de calculer des statistiques afin de dégager des tendances et de classifier les objets étudiés, (fils ou fibres), en fonction de leur comportement.

Le moyen le plus communément utilisé pour obtenir une image de matériau consiste à réaliser une acquisition microscopique d'une section d'un échantillon afin d'en obtenir une représentation a deux dimensions. Cette méthode est utilisée dans de nombreux domaines de l'étude de matériaux. Par exemple, on la retrouve dans l'étude de matériaux de type composites non tissés [COS 01]. Les opérations de traitement d'image sont souvent utilisées dans le but de segmenter les images. L'image subit d'abord diverses opérations en vue de séparer les zones d'intérêt des zones sans intérêt. Dans le cas d'étude de M. Coster, il s'agit de délimiter les zones de particules d'un matériau particulaire utilisé en ingénierie civile.

Une fois cette étape réalisée et avant de pouvoir l'analyser et donc d'en extraire des résultats statistiques sur sa composition, une étape de labellisation est réalisée. Cette étape consiste à attribuer une étiquette différente pour chaque objet d'intérêt de l'image. M. Coster pour cela utilise une méthode non supervisée de ligne de partage des eaux. Sur ce résultat labellisé, il est ensuite possible d'extraire de nombreux paramètres caractéristiques tels que les fractions surfaciques de particules, le nombre de connectivités, la surface moyenne par objet…

Cette étude est un cas typique d'utilisation de traitement d'image appliqué à la caractérisation de matériau en commençant par une acquisition d'image, un traitement de l'image pour segmenter et labelliser les objets d'intérêt et finissant par l'extraction d'un jeu de paramètres.

Ce type d'étude est utilisé fréquemment dans le domaine de l'étude de matériaux fibreux tissés ou non. Ces études conservent le même esprit dans leur structure. Elles débutent par une extraction d'images bidimensionnelles sur lesquelles sont réalisés divers traitements afin d'en extraire des paramètres. Typiquement, plusieurs études ont porté sur l'orientation des fibres [DAV 97] [BLA 06] dans le but de comprendre l'architecture du matériau ou

encore sur l'extraction de paramètres de fibres (diamètres de fibres, distance du plus proche voisin, …) [YAN 97] ou de fils dans l'optique de développer un modèle réaliste du matériau.

En ce qui concerne l'extraction d'orientations, les approches de R. Blanc et de N. C. Davidson différent. Le premier utilise la connaissance a priori de la section de fibre en modélisant chaque section par une ellipse puis à partir de chaque ellipse une étude d'orientation est réalisée. Cette méthode a pour but de différencier les fibres les unes des autres et de la labelliser en fonction de leur orientation et donc, dans le cas d'un matériau tissé, en fonction de leur appartenance à un fil (Figure 10).

N. C. Davidson réalise une première acquisition de l'échantillon à haute résolution puis en réalise une seconde après laminage de l'échantillon. La méthode s'appuie aussi sur le traitement de sections elliptiques sur lesquelles, pour chaque objet, sont calculés les moments d'ordre un et deux pour en déduire les orientations de chaque fibre. Mais l'utilisation de la seconde image permet de lever l'incertitude sur les angles faibles.

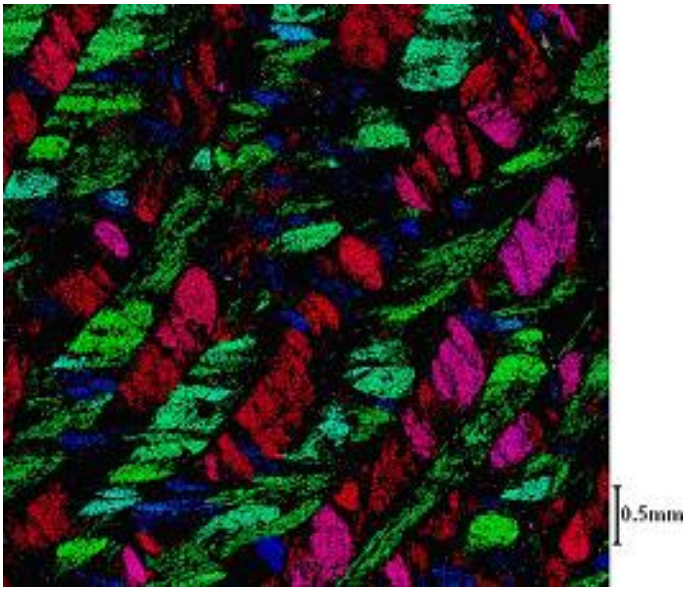


Figure 10 : Fibres labellisées en fonction de leur orientation [BLA 06]

Pour finir, l'approche de S. Yang sur les composites à matrice carbone utilise elle aussi le même type de méthodologie. Il part d'une image obtenue par microscopie puis enchaine divers traitements d'image afin de supprimer les contacts entre fibres, retirer les fibres en bordure d'image et ne conserver que les centres des sections circulaires de fibres. A partir de là, il extrait divers paramètres tels que les distributions de distance au plus proche voisins ou encore les diamètres de fibres. Suite à cela, il développe son modèle d'arrangement.

Notons que, si ces méthodes opèrent toutes en 2D, elles permettent dans une certaine mesure une inférence sur des propriétés 3D, telle que l'orientation des fibres. Cette inférence n'est possible qu'en s'appuyant sur des hypothèses fortes [BLA 06] ou sur des dispositifs d'acquisition compliqués [DAV 97].

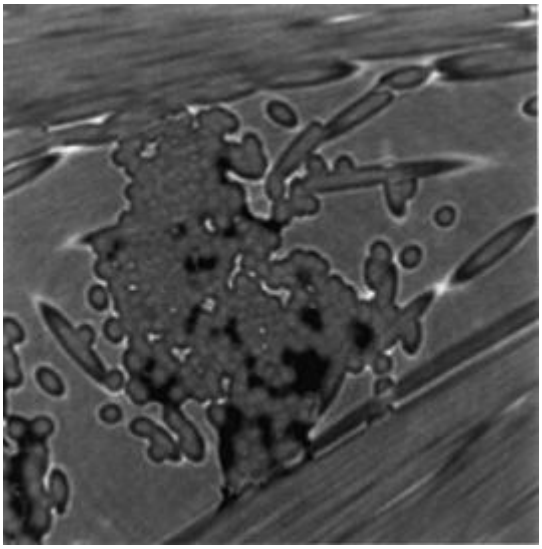
2.2.2.2 Analyse de matériau en trois dimensions

Les récentes avancées technologiques en ce qui concerne les méthodes d'acquisition d'image ont permis le développement de nombreuses méthodes d'analyse de matériaux tissés

à partir d'images tridimensionnelles issues de tomographies. Les résolutions actuelles sont telles que l'observation des fils mais aussi des fibres dans les matériaux tissés est devenue possible. Ces résolutions permettent d'atteindre tous les paramètres morphologiques d'un matériau à condition d'en identifier et d'en caractériser chaque composante par analyse d'image.

2.2.2.2.1 Analyse de fibres en trois dimensions

L'acquisition d'images tridimensionnelles de matériaux composites fibreux permet depuis plus d'une dizaine d'année d'atteindre des résolutions très inférieures au diamètre des fibres. Le traitement des images 3D est naturellement devenu un outil de choix pour l'étude de fibres en 3D. Les recherches ont d'abord porté sur la segmentation des diverses phases d'un composite tissé, de la segmentation de la fibre à la segmentation de la porosité [VIG 01] [MAR 07 bis]. Les méthodes utilisées restent similaires à celles déjà appliquées sur les images bidimensionnelles. Elles commencent généralement par une étape de prétraitements qui est constituée de filtrages, d'un seuillage et d'opérations de morphologie mathématique. Suite à quoi les zones d'intérêt sont labellisées pour en extraire des paramètres tels que les taux de porosité ou les taux de fibres. J. Martin-Herrero utilise pour la labellisation des fibres un *a priori* de forme permettant la poursuite de chaque fibre par le déplacement d'une boule en son sein (Figure 11).



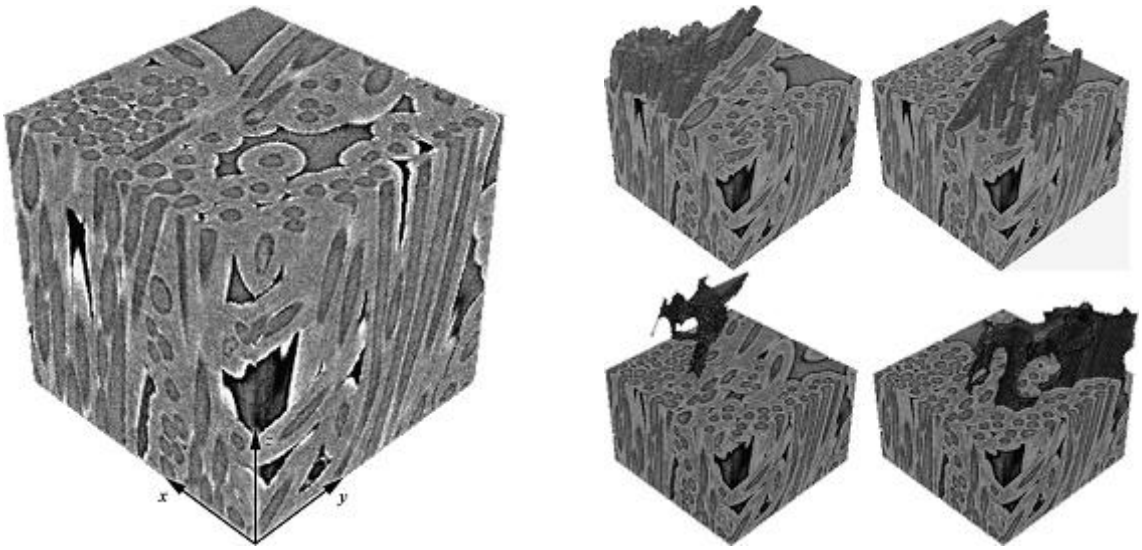


Figure 11 : Segmentation de porosité par [VIG 01] : section de l'image 3D initiale (haut gauche), section de l'image 3D segmentée (haut droit). Segmentation de fibres et porosité de [MAR 07 bis] : image initiale (bas gauche), image segmentée superposée à l'image initiale (bas droit)

Après la segmentation des diverses parties d'une image tridimensionnelle, la problématique principale reste l'extraction de paramètres. Par rapport à son homologue bidimensionnel, l'image tridimensionnelle donne directement accès à des paramètres tels que l'orientation des fibres dans les renforts fibreux [TAN 06] [ALT 09] [COI 05] [MUL 08 ter]. Une fois la segmentation réalisée, la méthode utilisée par J. C. Tan [TAN 06] et H. Altendorf [ALT 09] (Figure 12) ou par C. Mulat [MUL 08 ter] (Figure 13) est de travailler sur les axes de fibres et donc de réaliser par diverses opérations de traitement d'image une squelettisation des fibres.

Figure 12 : Calcul d'orientation par [ALT 09] : section de l'image initiale (gauche), segmentation (centre), résultat (droite)

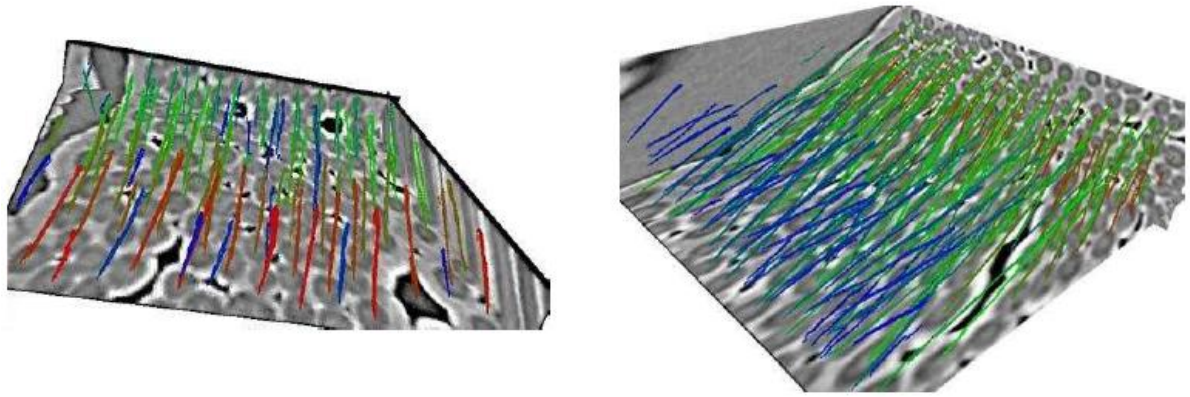


Figure 13 : Détection d'axes de fibres sur données tridimensionnelles par [MUL 08 ter]: donnée 200x200x34 à gauche, 300x90x300 à droite

2.2.2.2.2 Analyse de fils en trois dimensions

Si les acquisitions tridimensionnelles ont permis de travailler sur les fibres des matériaux tissés, elles ont aussi permis de travailler à une échelle plus large, c'est à dire au niveau du fil et du tissage. Différentes techniques sont utilisées, ayant toutes pour but une meilleure compréhension du tissage, mais aussi une estimation des paramètres mécaniques qui seront fournis dans un second temps à un modèle de simulation - par exemple de perméabilité [HIV 10] ou de déformation [BAD 09]. Ce type d'étude s'appuie sur l'image tridimensionnelle dont l'étape clef est de réussir à extraire les fils dans l'image avant d'en obtenir la modélisation.

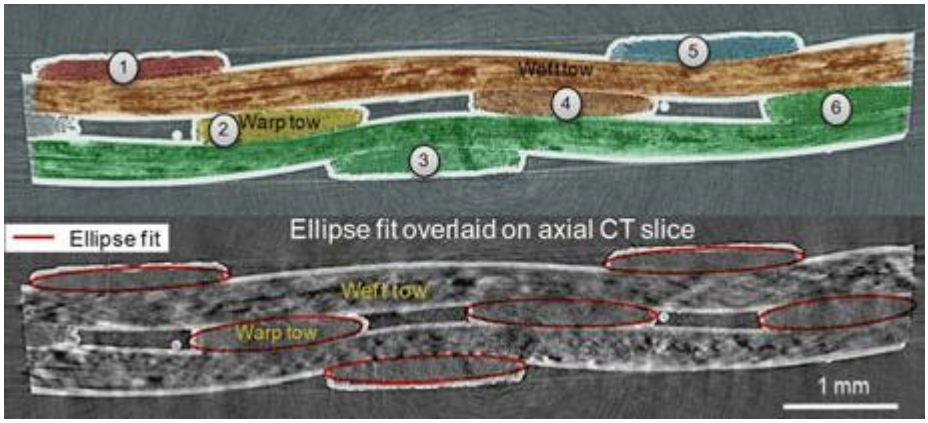


Figure 14 : Segmentation de fils (en haut) et approximation des fils par des ellipses (en bas) par [BAL 12]

Le but commun de chacune de ces études est de comprendre le comportement du matériau et plus précisément de caractériser le plus finement possible le tissage. Dans leurs travaux, [BAL 12], H. Bale *et al.* décrivent de manière exhaustive le tissage en évaluant les paramètres après avoir segmenté et labellisé les fils de l'image tridimensionnelle acquise par tomographie aux rayons X réalisée au synchrotron [PEA 97] [ATT 99]:

- Détermination des coordonnées globales du matériau et de la cellule unitaire
- Orientation globale des fils
- Variation de la position du centre de fil
- Variation de taille de section de fils

Kinney *et al*. [KIN 93] quant à eux utilisent la tomographie à rayon X à haute définition afin de comprendre le dépôt matriciel sur un composite tissé et cela de manière non

destructrice. Ils mesurent ainsi le grossissement du carbure de silicium dans un matériau composé de fibres Nicalon durant la phase de dépôt CVI (chemical vapor infiltration). Leurs expérimentations ont mis en évidence que la surface disponible pour le dépôt matriciel est indépendante de l'architecture des fibres et de leur position dans la préforme et que cette surface est dominée par des macroporosités en fin de dépôt.

2.2.3 Simulation numérique de matériaux

La synthèse de matériaux virtuels est une problématique émanant des contraintes liées à l'utilisation industrielle de matériaux complexes (composites tissés, mousses, milieux granulaires, etc…). En effet, si l'on prend l'exemple des matériaux thermostructuraux, les études grandeur nature sont longues et très coûteuses : pour pouvoir tester un nouveau matériau et connaitre ses propriétés physiques, il faut réaliser le type de tissage souhaité, déposer la matrice puis le tester mécaniquement et thermiquement.

En revanche, la simulation numérique permet de faciliter l'étude de nouveaux matériaux ou de nouveaux procédés de fabrication, raccourcissant ainsi les temps de développement et de mise en production de façon non négligeable. La contrepartie de ce type d'étude est la nécessité de définir des modèles fiables en vue d'obtenir des simulations aussi réalistes que possible.

2.2.3.1.1 Méthodes de synthèse matériaux

La synthèse de matériaux virtuels est utilisée dans de nombreux domaines industriels utilisant des matériaux complexes tels que les composites. Chaque type de matériau requiert la construction d'une ou plusieurs méthodes de synthèse spécifiques, répondant à la structure du matériau d'intérêt et au type de comportement que l'on souhaite étudier. Nous allons présenter ci-après plusieurs modèles développés en vue de synthétiser des matériaux, qu'ils soient composites ou non, fibreux ou non.

2.2.3.1.2 Synthèse par empilement d'objets: application à la synthèse de propergol

L'un des domaines dans lequel les outils de synthèse se sont fortement développés est celui des combustibles solides tels le propergol. Ce type de combustible est constitué d'un ensemble de particules de tailles diverses et de forme sphérique. Cela a donné lieu à de nombreux travaux développant des modèles mathématiques permettant de générer virtuellement le combustible afin de l'étudier et d'en comprendre le comportement. L'intérêt de s'intéresser à la synthèse de propergol dans le contexte de l'étude des composite fibreux est la similitude de comportement entre une section bidimensionnelle de propergol et celle d'un fil. En effet, dans les deux cas d'étude, le matériau peut être vu comme un empilement de sections circulaires. Intéressons nous donc plus en détail aux modèles utilisés dans la synthèse de combustible solide.

Pour reformuler la problématique soulevée par la synthèse de propergol solide, l'enjeu se trouve dans l'utilisation d'un modèle permettant un placement, sans recouvrement, de disques dans le cas bidimensionnel, ou de sphère dans le cas tridimensionnel. On peut retrouver la résolution de ce type de problèmes dans les travaux de Graham *et al*. [GRA 98]qui comparent deux méthodes de placement de disques de même diamètre à l'intérieur d'un disque plus grand sans recouvrement et avec un nombre de disques le plus grand possible. Pour ce faire, ils utilisent deux algorithmes qui tentent chacun de maximiser la plus petite distance *d(S)* entre deux cercles d'un ensemble *S*.

$$d(S) = \min\{\|s_i - s_j\|\} ; 1 \leq i < j \leq n\} \quad \textbf{(1)}$$

avec: n le nombre de cercles

$S = \{s_1, s_2, \dots , s_n\}$ l'ensemble des cercles

Le premier est basé sur des forces de répulsions entre les disques, que l'on cherche à minimiser afin d'obtenir la configuration optimale. Le second, quant à lui, est basé sur un

déplacement aléatoire sans recouvrement des disques dans lequel on impose à l'initialisation une valeur nulle à la fonction de minimum de distance inter cercles (*d(S) = 0*). Ensuite, on augmente cette valeur progressivement jusqu'à convergence, i.e. jusqu'à la maximisation de cette fonction, de façon à atteindre la configuration optimale de répartition des cercles (Figure 15).

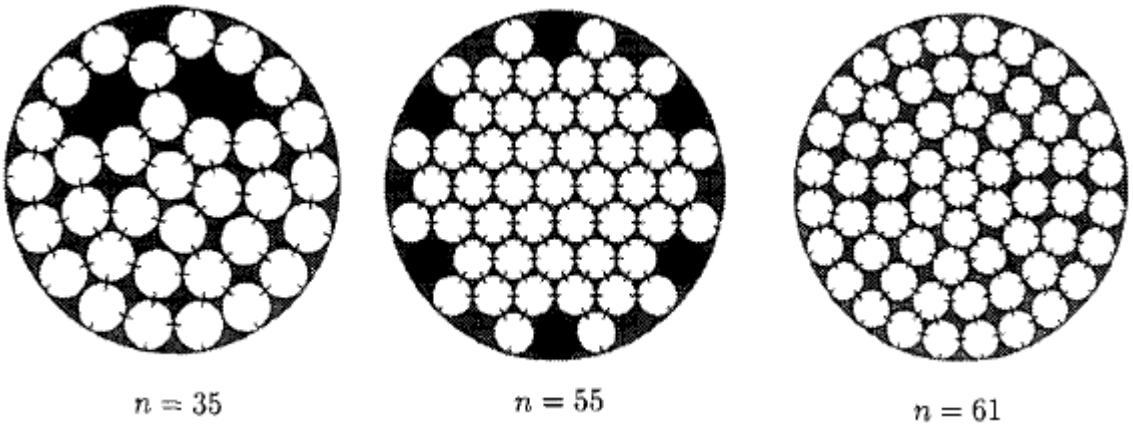


Figure 15 : Résultats de placement optimaux pour 35, 55 et 61 cercles de même diamètre [GRA 98]

Les deux algorithmes admettent un temps de calcul similaire mais sont tous les deux fortement dépendants de la configuration initiale pour ce qui est d'obtenir un optimum global du système.

Ces travaux donnent une base fiable à la création de modèles plus complexes dans le but de synthétiser un matériau multi phases tel que le propergol solide. Les travaux de Voivret *et al.* [VOI 07], portent sur la synthèse bidimensionnelle de propergol suivie de l'utilisation de divers outils d'analyse. Nous allons nous intéresser aux modèles de synthèse présentés. Deux méthodes de synthèse basées sur un dépôt successif de disques de différents diamètres sont proposées.

La première méthode consiste à lâcher aléatoirement la particule qui va tomber et glisser le long des particules déjà empilées jusqu'à trouver une position d'équilibre (Figure 16 à gauche). La seconde méthode quant à elle consiste à déterminer pour chaque particule à placer la position la plus basse à laquelle elle peut être placée en fonction de son diamètre (Figure 16 à droite). Ainsi, nous pouvons voir que pour une même problématique, deux modèles différents sont utilisés. Ces modèles donnent des résultats légèrement différents (Figure 17) mais qui permettent de mettre en œuvre par la suite les outils d'analyse développés par C. Voivret *et al*.

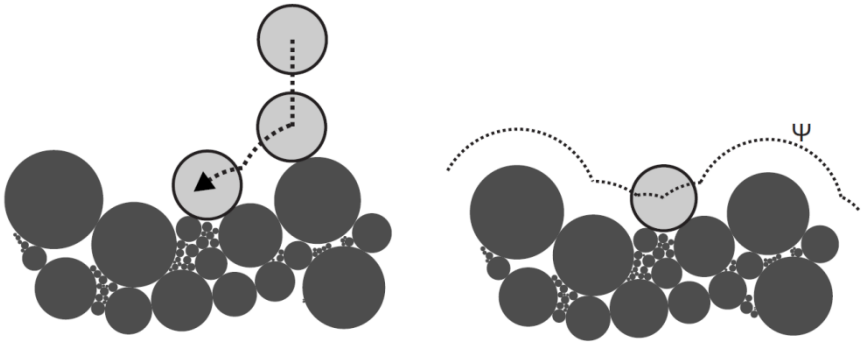


Figure 16 : Illustration de méthode de dépôt basée sur un placement aléatoire (à gauche) et sur un jeu de potentiels (à droite) [VOI 07]

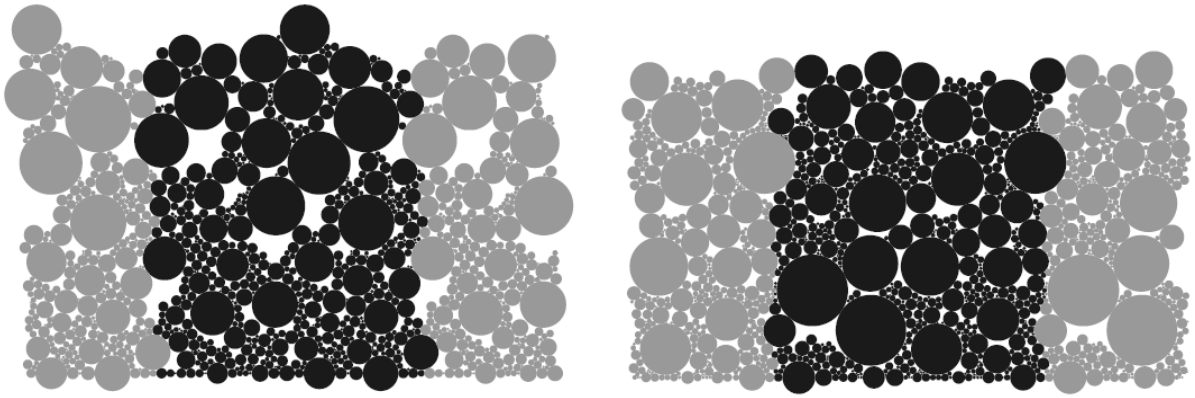


Figure 17 : Deux exemples d'empilements générés par placement aléatoire (à gauche) et par jeu de potentiel (à droite) pour une même distribution des tailles de particules [VOI 07]

La synthèse de propergol a aussi donné lieu à la génération de modèles tridimensionnels. Dans leurs travaux K. Matous *et al.* [MAT 07] réalisent une synthèse tridimensionnelle aléatoire basée sur un modèle différent de ceux présentés précédemment. La méthodologie présentée commence par une phase d'initialisation au cours de laquelle, des points sont placés aléatoirement dans le domaine cubique de travail. Une fois cette étape préliminaire réalisée, les points deviennent des sphères dont le rayon va croître linéairement au cours du temps. Le taux de croissance est déterminé par la distribution finale de taille de sphères souhaitée. Les collisions entre particules sont gérées de façon à empêcher les recouvrements. La synthèse est considérée avoir convergé lorsque la fraction volumique obtenue est satisfaisante (Figure 18).

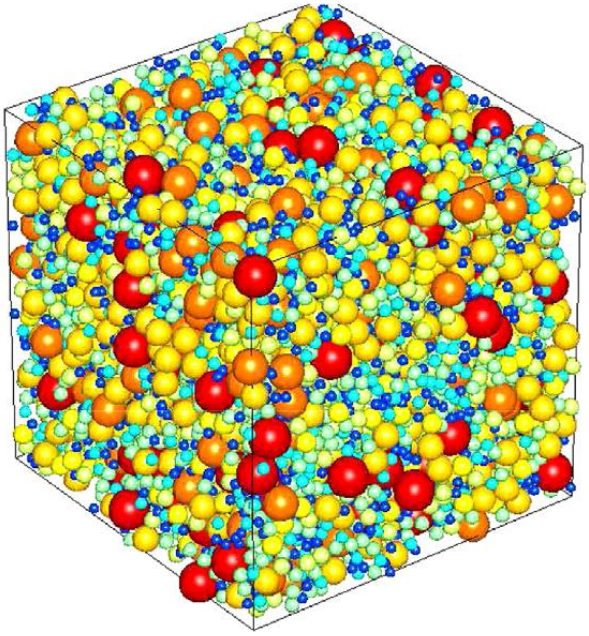


Figure 18 : Bloc de synthèse de propergol généré aléatoirement comprenant 10 000 sphères colorées en fonction de leurs diamètres [MAT 07]

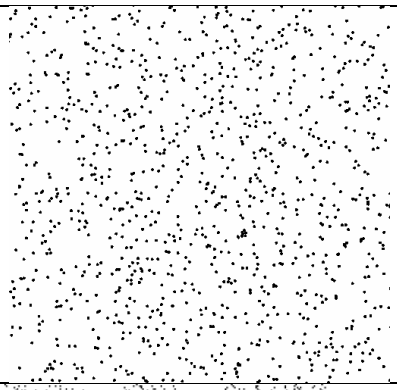
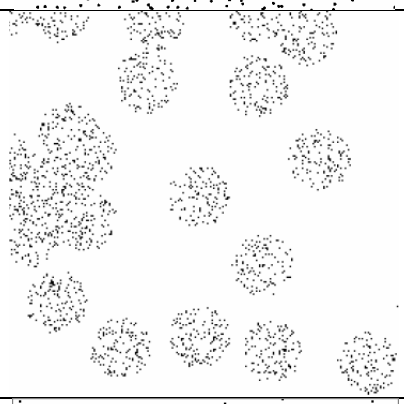
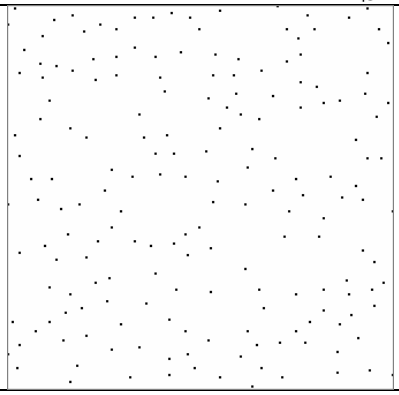
Nous pouvons voir dans cette partie que pour un cas d'étude assez simple, divers modèles de synthèse ont été développés ayant tous pour objectif de fournir un résultat proche d'une observation réelle.

2.2.3.2 Synthèse de matériaux : le cas des matériaux fibreux

Que ce soit dans l'étude de tissage ou de fibres non tissées, la synthèse de matériaux fibreux a donné lieu à divers travaux que nous allons passer en revue.

2.2.3.2.1 Processus de points

Une manière de modéliser le positionnement des fibres dans un matériau est d'utiliser des règles stochastiques. Pour cela, l'utilisation des processus de points peut être exploitée [STO 95]. Ce type de processus aléatoire basé sur une loi de Poisson régit le placement d'objets de type point dans un espace à deux dimensions.

Type de Processus de point	Caractéristique	Représentation
Processus de Poisson	Le nombre de points présents dans un ensemble borné *B* est défini par : $$P[N(B)=k]=\frac{e^{-\mu\lvert B\rvert}(\mu\lvert B\rvert)^k}{k!}$$ Avec μ l'intensité du processus de Poisson et *N(B)* est la variable aléatoire indiquant le nombre de points inclus dans *B*.	
Processus agrégé de Neyman-Scott	Leur construction consiste à remplacer chaque point (point père) d'un processus de Poisson, par un ensemble de points (points fils) identiquement et indépendamment distribués autour du point père dans un disque de taille donnée. Seuls les points fils sont conservés pour former un processus de Neyman-Scott.	
Processus régulier de Matérn	Soit un processus de Poisson. Chaque point est marqué de façon aléatoire et indépendante par un nombre tiré d'une loi continue uniforme. Si la distance entre deux points du processus est inférieure à un seuil critique constant, on conserve le point, affecté de la marque la plus faible. Cette procédure est effectuée indépendamment pour chaque paire de points du processus	

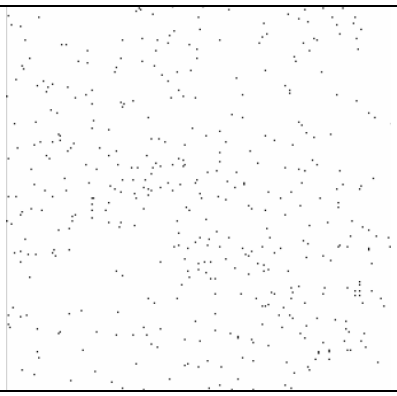
Processus de Cox (processus poissonnien doublement aléatoire)	Distribution de Poisson conditionnée par une intensité qui est elle-même un processus aléatoire *Z*. le nombre de points du processus de Cox dans un ensemble infinitésimal dB est une variable aléatoire égale à l'intégrale de l'intensité *Z(u)* sur cet ensemble : $N(dB) = \int_{dB} Z(u)du$	

Tableau 1 : Description de quelques Processus de points [STO 95]

Sur le Tableau 1, quatre principaux types de processus de points sont présentés. Ces quatre types de modèles peuvent être utilisés pour de la synthèse de fibres. Le processus de Poisson permet de synthétiser un milieu isotrope. Les processus agrégés permettent de synthétiser des matériaux plus structurés tels que les fibres dans un fil. Les processus réguliers peuvent être exploités pour garantir un espace minimal entre chaque point et donc sont adaptés au placement de cercles ou d'ellipse représentant par exemple des sections de fibres. Pour finir, les processus doublement aléatoires sont intéressants dans les cas de placement d'objets selon une densité particulière.

2.2.3.2.2 Synthèse de fibres

Les matériaux fibreux, tissés ou non tissés ont fait l'objet de diverses méthodes de synthèse. Dans ses travaux H. Altendorf [ALT 11] s'est intéressée à l'étude de systèmes fibreux tridimensionnels et plus particulièrement à leur modélisation par l'utilisation de marcheurs aléatoires. Les marcheurs aléatoires utilisés sont définis par leur direction, leur rayon et leur longueur de pas, ce qui permet de synthétiser des réseaux fibreux de différents types (aussi bien isotropes qu'orientés). Les distributions de ces trois paramètres sont directement fournies en entrée en fonction du matériau que l'on souhaite synthétiser. Le nombre de fibres synthétisées est obtenu à partir de la fraction volumique de fibres que l'on souhaite obtenir après génération.

Dans sa première étape, cette méthode revient donc à synthétiser la donnée en utilisant des marcheurs aléatoires contraints en orientation et position par des distributions stochastiques fournies en entrée. A ce stade, la donnée obtenue est un enchevêtrement de chaines de boules autorisant les recouvrements.

Afin de garantir une donnée synthétisée sans recouvrement, cette méthode admet une seconde étape, elle-même divisée en deux sous-étapes. La première sous-étape consiste à appliquer au modèle une force de répulsion pour séparer les boules qui se recouvrent. La seconde sous-étape, quant à elle, consiste à utiliser une force de relaxation en vue de conserver la structure générale entre les boules.

Ce modèle mathématique permet donc de synthétiser de nombreux types de matériaux fibreux en les contrôlant via des distributions stochastiques en entrée. Il est donc possible de faire varier la taille des fibres ainsi que leur orientation pour s'adapter au modèle que l'on souhaite étudier (Figure 19).

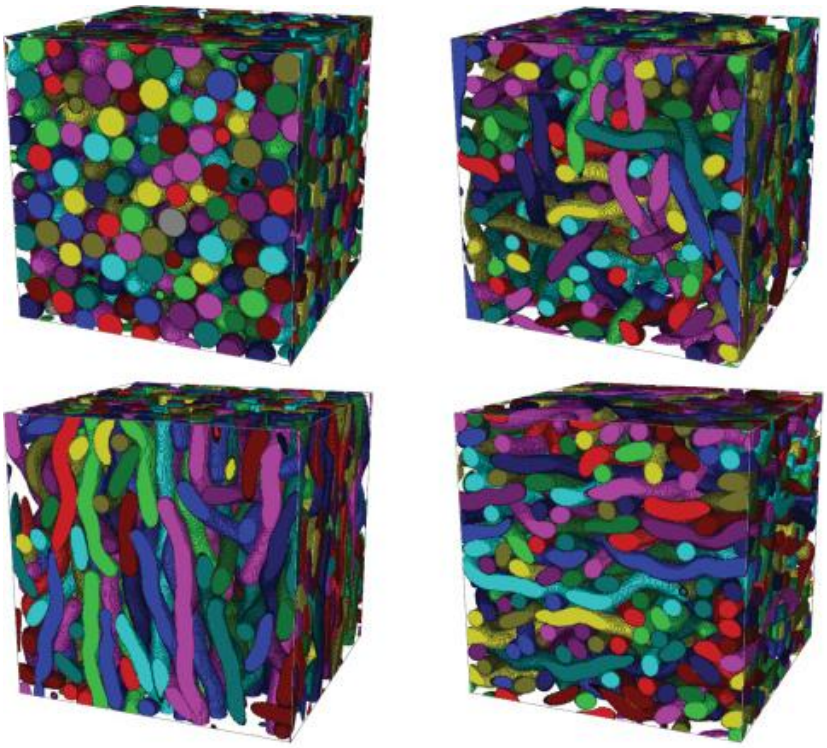


Figure 19 : Synthèse de fibres sphériques (en haut à gauche), de fibres allongée avec orientation isotropique (en haut à droite), de fibres orientée selon l'axe vertical (en bas à gauche) et de fibres orientée dans le plan horizontal (en bas à droite) [ALT 11]

Ce schéma en deux étapes - une première phase d'initialisation stochastique et une seconde phase d'exploitation de forces en vue d'obtenir un modèle réaliste - est aussi utilisé par Gaiselmann *et al.* [GAI 13] dans leurs travaux sur les matériaux fibreux non-tissés. Dans ce modèle, les fibres sont représentées par un parcours polygonal (polygonal track), c'est-à-dire, par une séquence de vecteurs aléatoires de longueur et d'angle donnés. Ainsi, la méthode revient à placer un ensemble de parcours polygonaux aléatoires dans la zone de travail tridimensionnelle puis à les dilater par une sphère afin de modéliser le caractère volumique des fibres. A ce stade, cette approche ne garantit pas le non recouvrement. Une seconde étape basée sur l'utilisation de forces permet de supprimer les zones de recouvrement et ainsi de permettre l'obtention d'une donnée de synthèse plus réaliste.

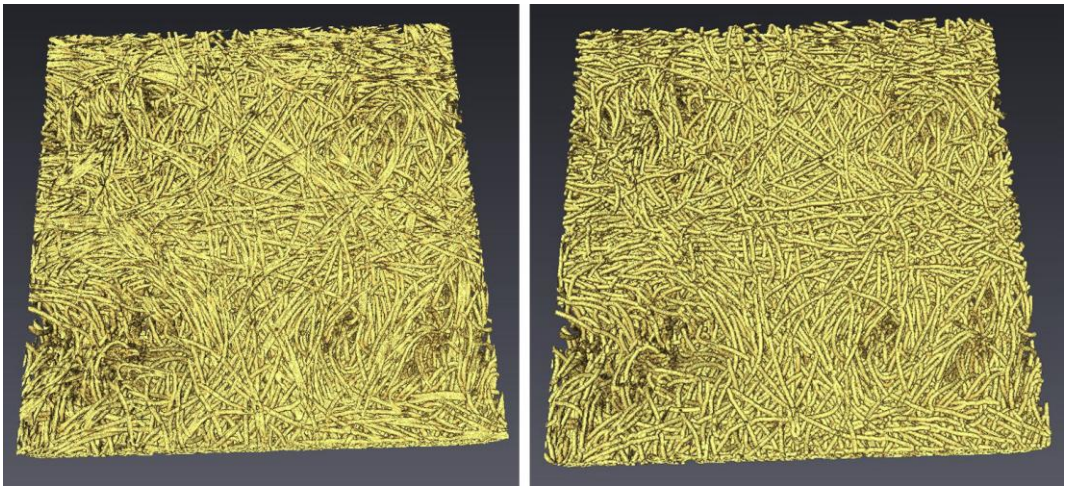


Figure 20 : Donnée expérimentale obtenue par tomographie (à gauche) et fibres extraites (droite) [GAI 13]

Dans le domaine de la synthèse de fibres, les placements aléatoires sont fréquemment utilisés comme nous venons de le voir. La modélisation de fibres est aussi très commune dans les études sur maillages de type éléments finis, pour la caractérisation des comportements de rupture par exemple. Dans leurs travaux, Qin et Mishnaevsky [QIN 09] réalisent une génération aléatoire de faisceaux de fibres parallèles. La méthode utilisée commence par une étape d'initialisation bidimensionnelle durant laquelle des disques représentant les fibres sont placés de manière régulière avant d'être déplacés aléatoirement jusqu'à garantir une distance minimale fixée en entrée entre couples de disques (Figure 21 en haut à gauche). Ensuite les fibres étant parallèles entre elles, la généralisation à trois dimensions se fait en extrudant naturellement les fibres (Figure 21 en bas à droite). Pour finir un maillage de l'image de synthèse est réalisé (Figure 21 en haut à droite et en bas à gauche) avant de permettre l'étude du comportement du matériau à la rupture.

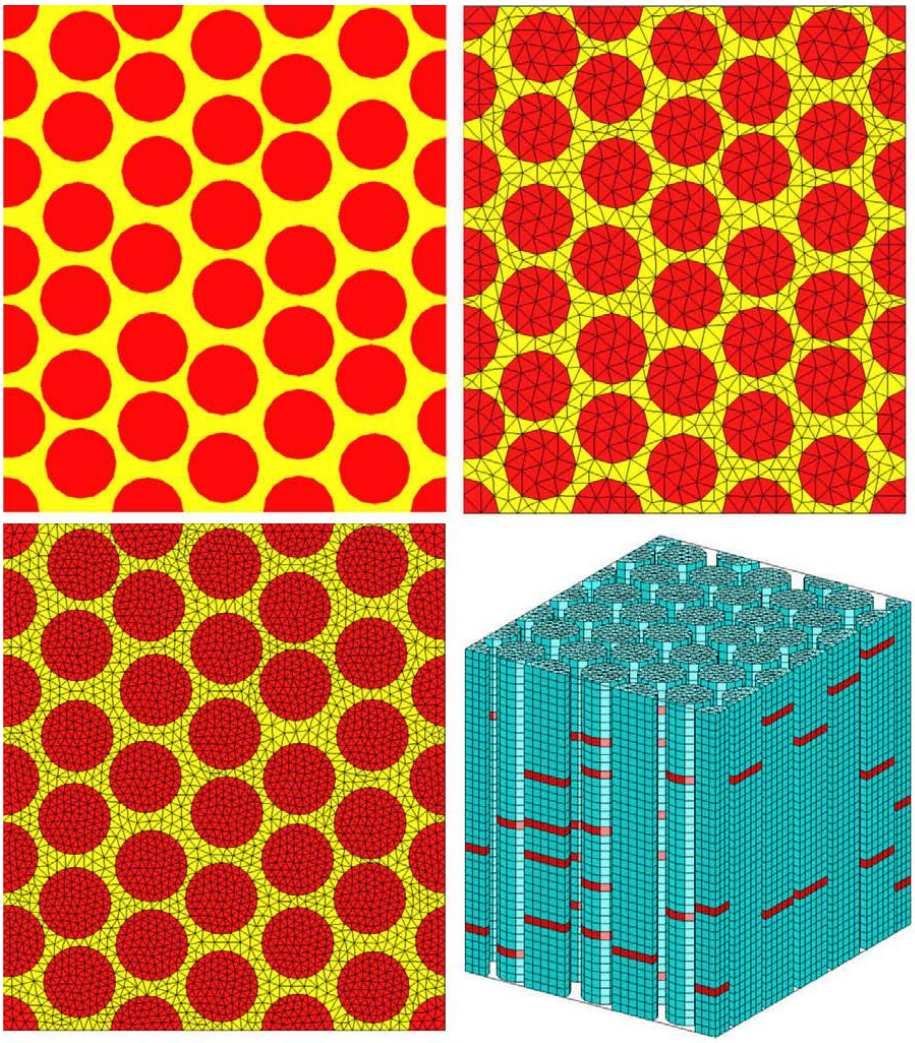


Figure 21 : Exemples de volumes élémentaires représentatifs de synthèse sans maillage (en haut à gauche), avec maillage grossier (en haut à droite), avec maillage fin (en bas à gauche) et représentation 3D (en bas à droite) [QIN 09]

Dans ses travaux, G. Couégnat [COU 08, COU 10] écrit une méthodologie de génération de cellules élémentaires composées d'un nombre réduit de fibres à partir d'un autocorrélogramme expérimental. L'approche proposée est de générer des cellules représentatives en utilisant l'information de la covariance qui rend compte à la fois de la fraction volumique moyenne de la phase considérée, son arrangement morphologique et des

distances caractéristiques de la microstructure. Le but est alors de construire des cellules élémentaires, de taille inférieure à la taille du volume élémentaire représentatif géométrique, mais dont la covariance reste la plus proche possible de la covariance de la microstructure de référence. La covariance de la microstructure de référence est obtenue par l'étude directe d'une image bidimensionnelle. Après quelques étapes de binarisation et de morphologie mathématique, les fibres sont identifiées et l'autocorrélogramme calculé via la transformée de Fourier de l'image.

A partir de cette covariance de référence, l'algorithme de G. Couegnat réalise un placement de fibre qui tend à minimiser l'erreur entre la covariance de la structure générée et celle la structure de référence. Quelques résultats sont présentés dans la Figure 22.

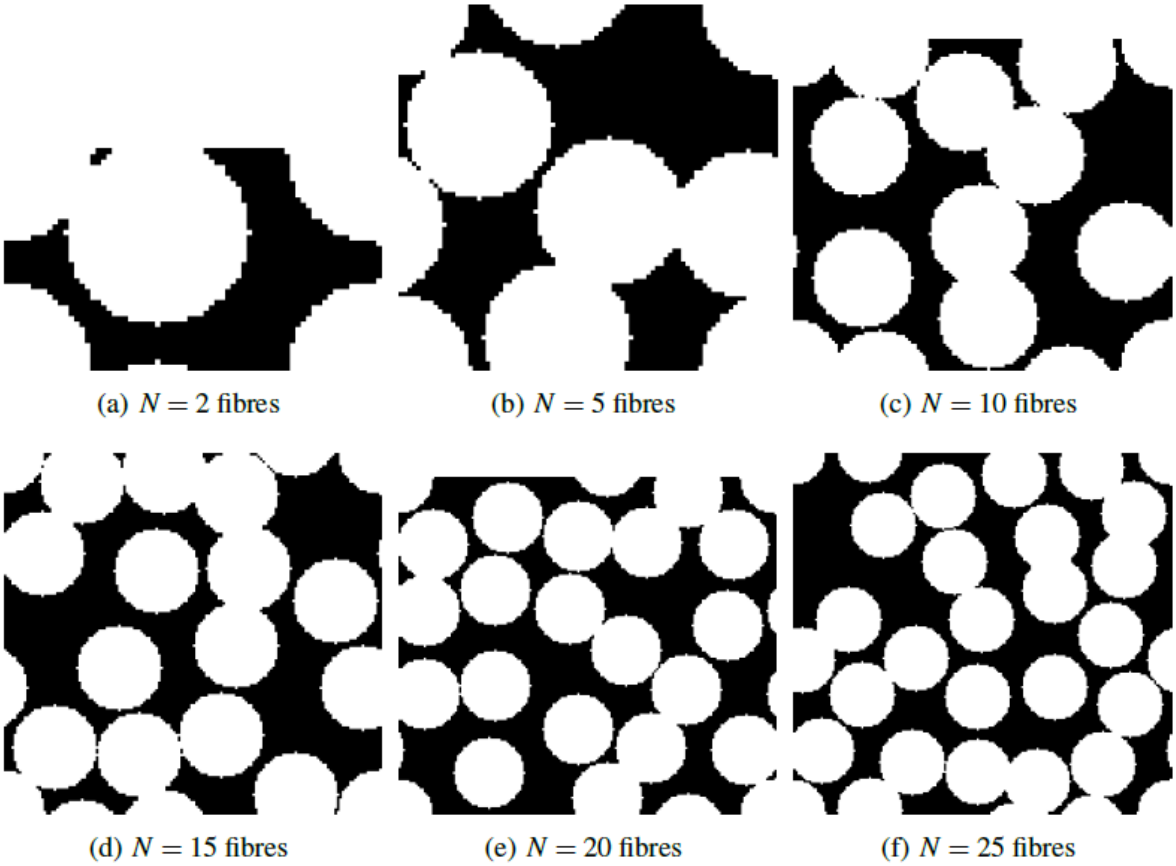


Figure 22 : Exemples de cellules élémentaires pour un fil CMC obtenues par optimisation de la covariance [COU 08]

2.2.3.2.3 Synthèse de fibres et de fils

La synthèse de matériaux tissés a fait l'objet de plusieurs travaux. L'une des voies pour comprendre et analyser l'architecture d'un matériau texturé consiste à réaliser une simulation informatique de l'opération de tissage telle qu'elle est faite de manière industrielle. L'avantage d'une telle méthode est d'accéder à un résultat réaliste aux deux échelles d'analyse. A l'échelle mésoscopique, ce type de simulations permet d'obtenir des formes de fils conformes à celles observées sur des matériaux réels tandis qu'à l'échelle microscopique, il permet de reproduire de façon fidèle le comportement des fibres à l'intérieur du fil.

S. Lomov *et al.*[LOM 02] ont développé un logiciel (WiseTex [LOM 10]) basé sur une procédure de modélisation géométrique applicable à une très large gamme de renforts tissés, aussi bien 2D (à base satin) que 3D (multicouche). Les modèles utilisés sont issus de l'étude directe de matériaux existants à différentes échelles. Ci-après les étapes utilisées pour la génération d'un matériau composite tissé tel que nous les étudions.

La première étape consiste à décrire la structure du renfort, i.e. la séquence de tissage. Le renfort est décomposé en zones de chaîne et de trame, et en couches. Les fils de trame sont repérés par un couple (*i;k*) correspondant au fil de trame de la *k*-ième couche de la *i*-ième zone de trame. Similairement, le fil de chaîne (*j; l*) correspond au *l*-ième fil de chaine de la *j*-ième zone de chaine. La structure du tissage peut alors être codée sous forme d'une matrice dont l'élément (*i; j*) donne la couche de l'intersection du *i*-ième fil de chaîne avec le *j*-ième fil de trame (Figure 23). A partir de ce codage, les fils peuvent être placés de manière simple en prenant comme base des fils de section elliptique constante. Les fils sont considérés rectilignes sur les parties sans contact et semi-elliptiques sur les parties en contact. S'en suit une phase de relaxation afin d'obtenir un positionnement des fils plus réaliste.

Afin de rendre le matériau virtuel généré le plus réaliste possible, WiseTex prend en compte les caractéristiques intrinsèques du matériau telles que ses caractéristiques mécaniques et de perméabilité [VER 05] (Figure 24 et Figure 25). Les modèles ainsi générés peuvent être soumis à des contraintes de type compression, tension bi-axiale et cisaillement pour une étude réaliste de leur comportement.

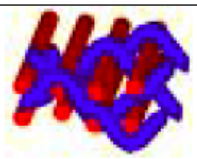
Principle	*Example*	*Picture*
2D and 3D woven		
Matrix where *(i,j)* element gives a layer of intersection of *i*-th warp with *j*-th weft row (Lomov et al. 2000)	1 0 2 1 1 0 2 1 1 0 2 1 1 0 2 1	

Figure 23 : Exemple de matrice codant la topologie d'un renfort tissé [LOM 02]

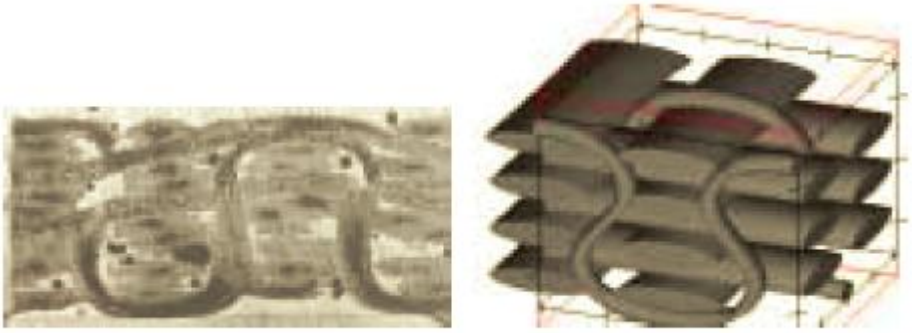


Figure 24 : Déformation typique des fils en Z sur un composite tissé (image microscopique à gauche et génération de matériau virtuel à droite) [LOM 02]

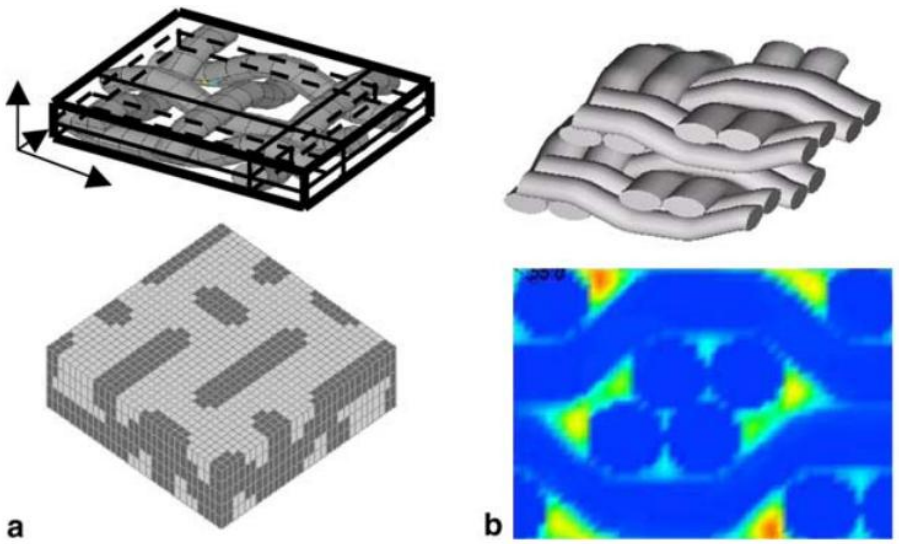


Figure 25 : Calcul de perméabilité : (a) Cellule unitaire (en haut) et représentation en voxels (en bas), (b) deux couches de monofilaments modélisées avec WiseTex (en haut) et visualisation du champ de vitesse de flux (en bas) [VER 05]

Dans ses travaux, D. Durville [DUR 09] propose un modèle à neuf degrés de liberté pour caractériser les fibres en se basant sur trois vecteurs caractérisant les translations et déformations de sections de fibres. Afin de synthétiser la forme de fils, une initialisation est réalisée avec superposition des fibres entre elles. Le type de tissage est également précisé (satin, toile, etc...). Ensuite, l'algorithme modifie la position des fibres afin qu'il n'y ait plus aucune superposition et que le type de tissage soit respecté (Figure 26).

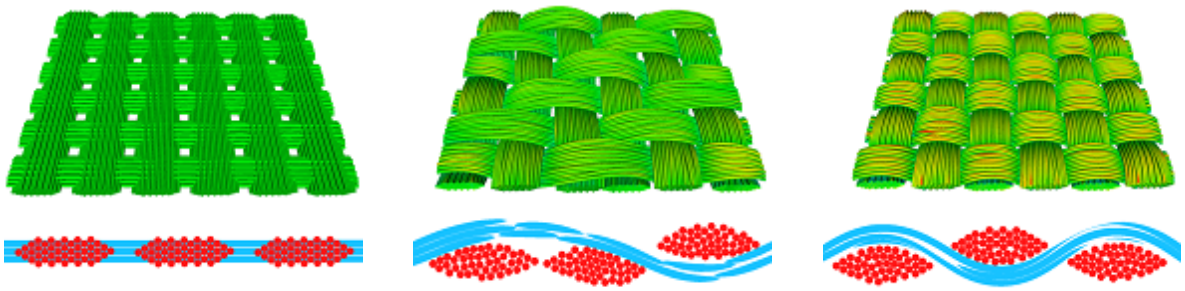


Figure 26 : Résultat de simulation de tissage, initialisation (à gauche), serge (au centre), toile (à droite). Résultat tridimensionnel en haut et coupe bidimensionnelle en bas [DUR 09]

Une fois le matériau virtuel obtenu, il peut être analysé. D. Durville l'utilise pour en extraire les facteurs de forme suite à des tests en charge ou encore pour étudier le comportement mésoscopique c'est-à-dire celui des fils. A partir du résultat de la synthèse, il étudie les tensions subies par le fil et met en évidence les différentes zones de contraintes. Typiquement, les tensions verticales et horizontales sont étudiées ainsi que les cisaillements ou les torsions Cette méthode d'analyse admet tout de même un défaut : son coût calculatoire très élevé. Sur les résultats présentés, les fils ne sont composés seulement que de 24 à 44 fibres.

[COU 11] quant à lui, présente une méthode de synthèse de matériaux tissés en commençant par générer le renfort. Pour cela, la géométrie interne du tissage est élaborée à partir du motif de tissage que l'on souhaite obtenir et de règles géométriques simples telles que la forme de la section du fil et son épaisseur. Les interactions entre fils sont déduites de la géométrie du tissage, les positions des centres sont calculées en utilisant une procédure de

minimisation d'énergie. Cette approche permet donc la génération d'un tissage de fils considérés comme rigides et pleins (Figure 27 à gauche) dans lesquels les propriétés du matériau peuvent être assignées localement en fonction de l'ondulation.

Afin de rendre le modèle plus réaliste, les fils pleins sont décomposés en ensemble de « macro-fibres » c'est-à-dire un ensemble de fibres virtuelles représentant chacune un petit groupement de fibres réelles. Une fois les macro-fibres placées dans les fils, un algorithme de relaxation simule la charge appliquée sur le matériau lors de l'opération de tissage. Les propriétés du matériau ne sont plus évaluées globalement pour le fil mais pour chaque macro-fibre (Figure 27 à droite).

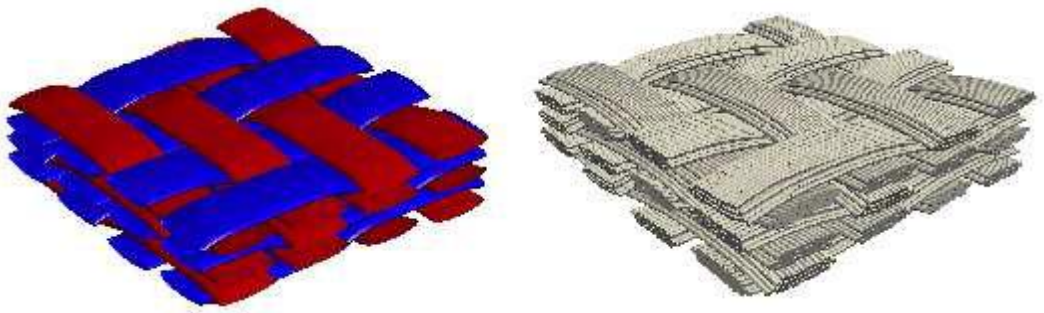


Figure 27 : Modèle géométrique de tissage (à gauche) et représentation intermédiaire avec fibres (à droite) [COU 11]

Alors que le modèle de G. Couégnat est basé sur une approche géométrique et mécanique, celui proposée par S. Rief, E. Glatt, A. Wiegman procède d'une approche qui consiste elle aussi en deux étapes [RIE 09] : une première qui vise à synthétiser le tissage de fils et une seconde remplace les fils issus du résultat précédent par un faisceau fibreux.

Tout d'abord, en ce qui concerne la génération du tissage de fils, ceux-ci sont modélisés par des objets compacts sans structure interne. Leur section est considérée de forme elliptique constante. L'enchevêtrement de fils est déterminé par le type de tissage que l'on souhaite obtenir. Ainsi, le diagramme de tissage est fourni en entrée de l'algorithme de synthèse déterminant ainsi pour un fil donné sa position par rapport aux fils de son voisinage. A partir de là, un modèle mathématique génère les fils, sous la contrainte du diagramme de tissage fourni.

Une fois les fils générés, il reste à générer le faisceau fibreux. Les fibres sont modélisées pour une section circulaire constante. Leur position dans le fil est fixée aléatoirement et la position relative des fibres dans le fil est constante (Figure 28 à gauche) ce qui n'est pas réaliste pour de nombreux types de matériaux fibreux. Pour rendre le modèle plus réaliste, chaque fibre se voit imposer une oscillation latérale aléatoire (Figure 28 au centre). De plus, un effet de torsion peut-être rajouté là encore pour rendre le matériau virtuel plus proche du matériau réel (Figure 28 à droite).

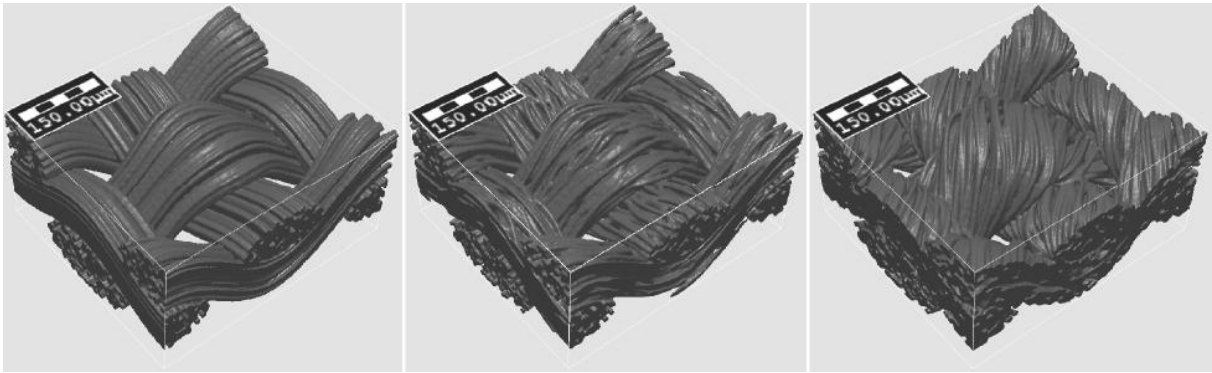


Figure 28 : Matériau tissé virtuel multifilament sans déformation aléatoire (à gauche), avec déformation aléatoire mais sans torsion (au centre), avec déformation aléatoire et torsion (à droite) [RIE 09]

Nous avons pu voir que les modèles utilisés pour la synthèse de matériaux virtuels sont de multiples formes. Notons tout de même que nombre de ces méthodes sont basées sur l'exploitation de modèles mathématiques contraints par des lois mécaniques et/ou stochastiques. Nos travaux sont aussi fondés sur ce principe. Nous cherchons à proposer un modèle le plus réaliste possible visant à synthétiser des fibres virtuelles dans une enveloppe de fil connue.

2.3 Proposition d'une méthodologie pour une approche Matériau Virtuel

2.3.1 Approche matériau virtuel : vue globale

Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre d'un projet relatif à la virtualisation de matériaux thermostructuraux. Le principe de ce projet est de développer des moyens numériques susceptibles de simuler les opérations de tissage, non seulement à l'échelle du fil mais également à l'échelle des fibres et capables d'intégrer des paramètres issus de l'analyse de données réelles par imagerie 3D. L'objectif ultime est de disposer de modèles numériques multi-échelles utilisables pour les simulations de densification du matériau, de sollicitation mécanique, thermique, etc. L'existence de tels modèles numériques permettra alors de faciliter et d'accélérer les phases de développement et de mise en production de nouveaux matériaux.

Une approche possible pour la synthèse d'un matériau virtuel tissé repose sur plusieurs étapes :

(i) la caractérisation d'un tissage réel à l'échelle des fils : aplatissement, courbure, déviations, etc. ;
(ii) la caractérisation des arrangements mutuels de fibres à l'intérieur d'un fil ;
(iii) l'élaboration d'une grammaire permettant de déduire les règles de dispersion intra-fil à partir de la disposition effective des fils dans le tissage ;
(iv) la synthèse de tissages virtuels de fils ;
(v) le placement de fibres à l'intérieur de fils en respectant la grammaire préalablement établie.

Dans le cas d'un composite thermo structural, cette série d'étapes sera complétée par la densification des structures fibreuses par simulation de dépôt matriciel. Dans [VIG 14], nous

décrivons plus en détail l'approche de matériau virtuel que nous utilisons. Comme détaillé dans la Figure 29, le point de départ de l'approche est l'acquisition de l'information morphologique par imagerie 2D et 3D. Les images sont extraites à basse et haute résolution, c'est à dire à l'échelle de la fibre et à celle du fil. A partir de ces acquisitions, deux voies de traitement sont possibles. La première (flèches continues) est de récupérer les objets (fils à grande échelle et de fibres à plus petite échelle), puis d'en extraire des données statistiques pour un futur matériau de synthèse ou maillage 2D ou 3D afin de réaliser des simulations physico-chimiques et des calculs mécaniques. L'autre méthode (lignes en pointillés) est d'extraire directement les statistiques d'image sans aucune reconnaissance de formes et de générer le matériau virtuel seulement avec ce type de données comme contraintes. La production de modèles de CMC par une synthèse d'image implique généralement deux étapes. La première est la production de l'armature (texture sèche) et la seconde porte sur l'insertion de dépôt matriciel. Les modèles d'infiltration peuvent être exécutés soit sur des images de synthèse (lignes lisses) ou directement sur les images originales (lignes en pointillés).

Une fois que l'architecture complète du CMC a été produite, il est possible de réaliser des simulations mécaniques, thermiques et thermomécaniques et d'obtenir ainsi une estimation des forces et faiblesses du matériau virtuel soumis à des contraintes mécaniques et thermiques.

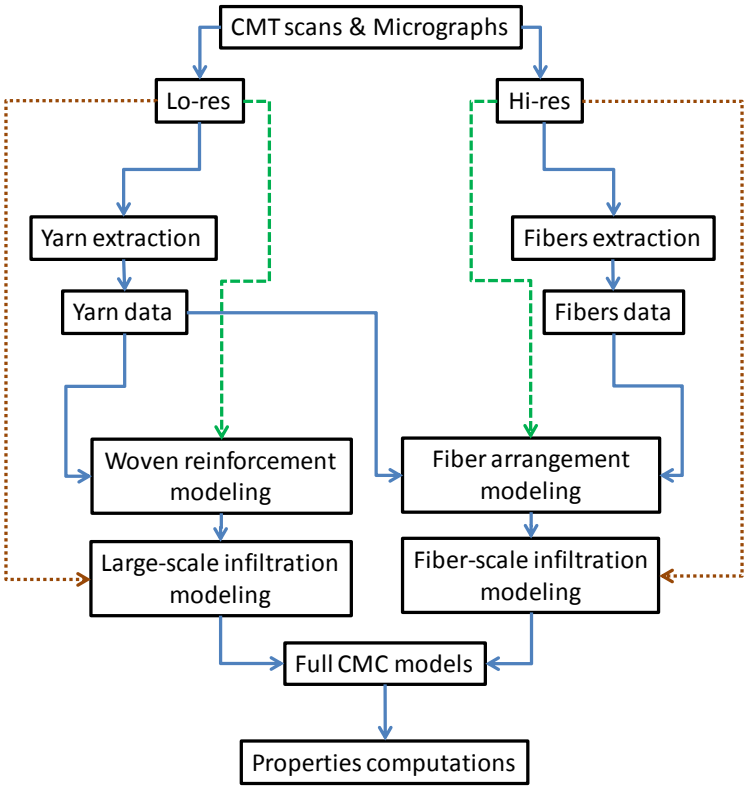


Figure 29 : Schéma général de l'analyse à double échelle et de la stratégie de modélisation de fibres et de fils [VIG 14]

Comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, certaines approches ont d'ores et déjà été proposées concernant la caractérisation et la synthèse de tissages virtuels [HIV 10] [BAD 09] [COU 11], la segmentation de fibres à l'échelle intra-fil [MAR 07 bis] [TAN 06] [ALT 09] [COI 05] et la simulation de densification [ROS 11].

Les contributions présentées dans ce mémoire concernent en particulier les points (ii) et (v) ci-dessus.

Le point (ii) est relatif à la caractérisation des arrangements de fibres dans les fils et fera l'objet du chapitre 3. Cette caractérisation requiert l'identification préalable des fils et des fibres à partir de données d'imagerie 3D. Nous proposons pour cela deux algorithmes de segmentation originaux s'appuyant sur des principes de géométrie différentielle. Une fois les fibres et les fils identifiés, nous proposons différentes approches algorithmiques pour la caractérisation des arrangements de fibres dans les fils. En particulier nous verrons comment générer des cartographies de densités et d'orientation locales de fibres.

Le point (v) concerne le placement de fibres dans des tissages de fils virtuels selon des règles de placement préalablement établies. Il sera traité au chapitre 4. Nous proposerons pour cela une solution algorithmique pour la synthèse de fibres contrainte par une enveloppe de fils et une carte de densité de fibres. Afin d'élaborer et de tester nos algorithmes, nous utiliserons comme contrainte les enveloppes de fils et les cartes de densités mesurées sur des tissages réels.

Notons que le placement de fibres dans un fil nécessite la formulation d'une grammaire (point(iii) ci-dessus) permettant de déduire les règles de placement de fibres dans le fil à partir de la géométrie du tissage : comment varient la densité ou le foisonnement d'orientation en fonction de l'aplatissement ou de la courbure des fils ? Comment les contacts entre fils influent-ils sur la densité des fibres, sur le cisaillement du fil ? Etc. L'apprentissage d'une telle grammaire et la synthèse de contraintes régissant le placement de fibres dans le fil ne seront pas abordés dans ce mémoire.

2.3.2 Choix d'une technique d'imagerie : la tomographie à rayons X

Afin d'élaborer et de tester les algorithmes de caractérisation et de synthèse évoqués ci-dessus, nous avons choisi d'utiliser des données de tomographie. En effet, si l'observation de sections par microscopie optique ou électronique permet d'extraire des informations pertinentes sur la taille et la morphologie des fibres et des fils, elle permet difficilement d'en décrire l'organisation tridimensionnelle. L'utilisation de données tomographiques est, de ce point de vue, plus pertinente.

Le matériau étudié dans nos travaux est de type SiC/SiC. C'est un tissage tridimensionnel de type « interlock ». Il est composé de fibres Nicalon. Le matériau est observé en *texture sèche* c'est à dire qu'il n'a subi aucun dépôt de matrice. Afin de garantir sa tenue, il a été enrobé dans de la résine époxy. Notons tout de même que l'opération d'enrobage a pu modifier la structure des fibres en texture sèche, celles-ci n'étant pas totalement rigides et fixées les unes aux autres. De même, l'usinage de l'échantillon a pu avoir quelque peu modifié cette structure. Les résultats obtenus dans ce chapitre sont relatifs au matériau après enrobage et font abstraction de ces perturbations.

Les images tridimensionnelles utilisées ont été obtenues par micro tomographie à rayon X à l'ESRF sur la ligne ID19 [ESR 13]. Deux résolutions ont été utilisées dont nous détaillons les caractéristiques ci-dessous.

2.3.2.1 Données à haute résolution

Les premières données tomographiques ont été acquises à une résolution de 1,38µm/pixel A cette résolution, seuls des échantillons d'environ 1 mm^3 peuvent être observés. La maille élémentaire du matériau y est alors imperceptible, rendant le type de tissage impossible à caractériser à partir de l'échantillon. On peut toutefois observer que les

fils sont orientés selon deux directions privilégiées correspondant aux deux orientations de tissage.

Deux données tomographiques à haute résolution vont être traitées. Leur différence provient de l'orientation de l'échantillon durant l'acquisition. En ce qui concerne le premier échantillon appelé HR1 (Figure 30), l'axe de rotation choisi pour l'acquisition est colinéaire à l'orientation des fils de chaine (en rouge sur l'image).

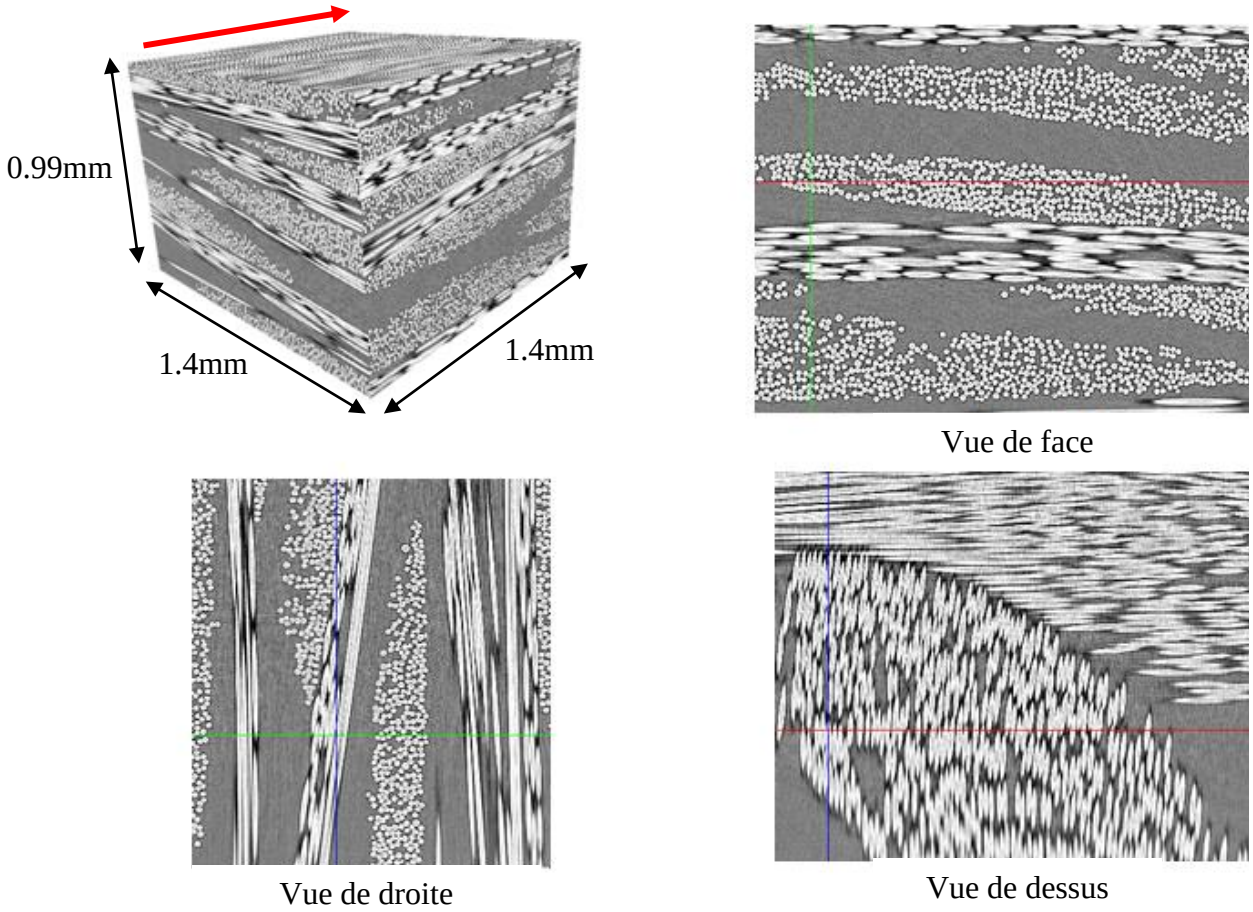


Figure 30 : Donnée tomographique HR1 de CMC avant renforcement matriciel orienté en 0°/90° à une résolution de 1,38µm/voxel. Vue tridimensionnelle et vue de section de face, de coté et de haut (respectivement en haut à gauche, en haut à droite, en bas à gauche et en bas à droite). Axe de rotation durant l'acquisition en rouge

L'acquisition du second bloc tomographique appelé HR2 a été réalisée de telle sorte que l'axe de rotation soit dans le plan formé par les directions des fils de chaine et des fils de trame, à 45° de ces deux directions (cf. Figure 31).

Il apparaît clairement une différence de qualité entre ces deux blocs de données comme en atteste la Figure 32. En effet, dans les conditions d'acquisition du bloc HR1, les fils de chaine se présentent toujours orthogonalement au faisceau d'électrons. Ils ont par conséquent une définition très précise. Inversement, les fils de trame, pouvant se présenter dans la direction du faisceau durant l'acquisition, admettent une définition plus pauvre, comme en témoigne l'effet de flou très marqué dans la donnée (Figure 32, images de gauche), risquant de nuire à la détection et à la segmentation des fibres.

En revanche, les conditions d'acquisitions du bloc HR2 offrent une qualité comparable pour les fils de trame et de chaîne qui se présentent de façon équivalente face au faisceau. La qualité d'image est similaire pour les fils de chaine et de trame. Bien qu'elle soit inférieure à celle obtenue sur les fils de chaine du bloc à 0°/90°, elle permet d'aborder le traitement des deux directions de fils de façon identique (cf. Figure 32 à droite).

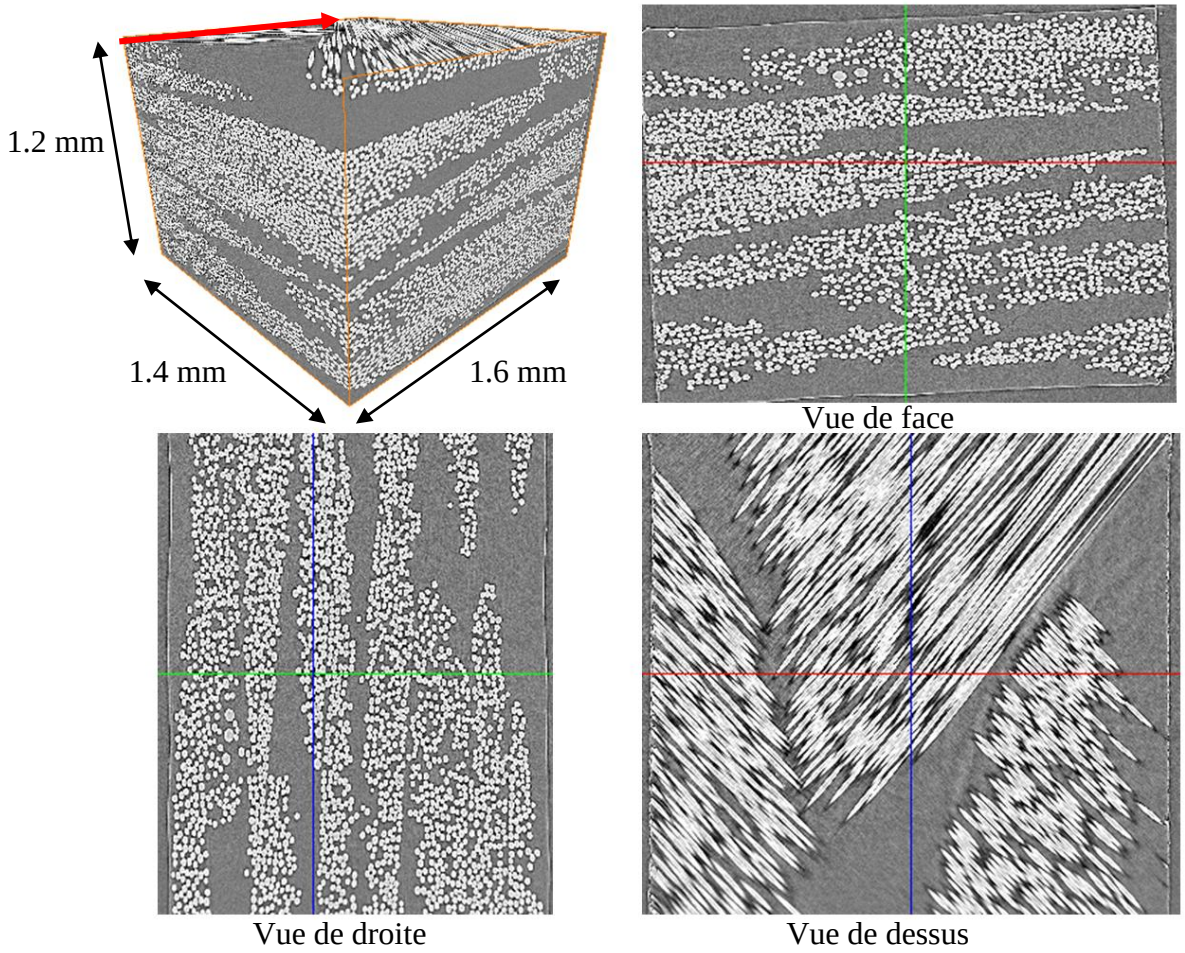


Figure 31 :Donnée tomographique HR2 de CMC avant renforcement matriciel, orienté en -45°/45°. Résolution de 1,38µm/voxel. Vue tridimensionnelle et vue de section de face, de coté et de haut (respectivement en haut à gauche, en haut à droite, en bas à gauche et en bas à droite). Axe de rotation durant l'acquisition en rouge

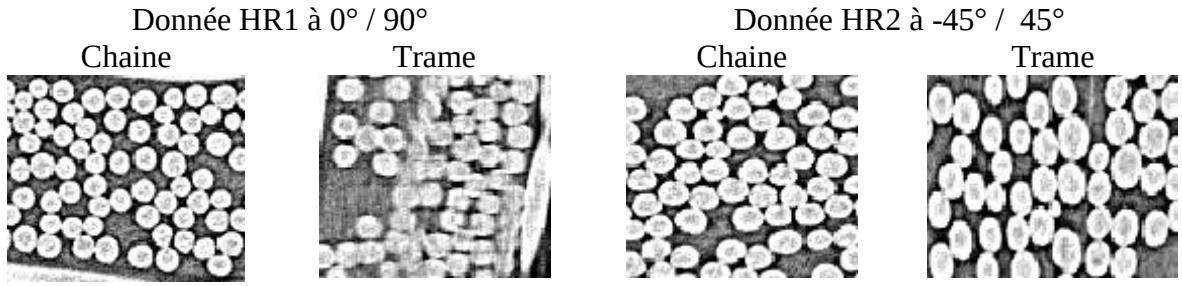


Figure 32 : Zoom sur les fils de chaine et de trame des deux blocs de données (Donnée HR1 à gauche avec respectivement fil de chaine puis fil de trame, donnée HR2 à droite. Chaque image montre les sections de fibres par vue de face pour la chaine et de droite pour la trame)

2.3.2.2 Données à basse résolution

Nous nous sommes également intéressés à l'étude de données tomographiques à plus basse résolution. Les basse résolution. Les données à basse résolution appelées BR1 sur lesquelles nous avons travaillé sont travaillé sont issues de conditions d'acquisition similaires à celles réalisées sur la donnée HR1. La HR1. La résolution de ces données est de 5,5µm/voxel (

Figure 33).

L'échantillon observé est alors plus grand (environ 160mm^3) permettant d'observer le tissage du matériau mais rendant impossible la distinction des fibres les unes des autres. L'étude de cette donnée sera donc centrée sur le fil et le tissage.

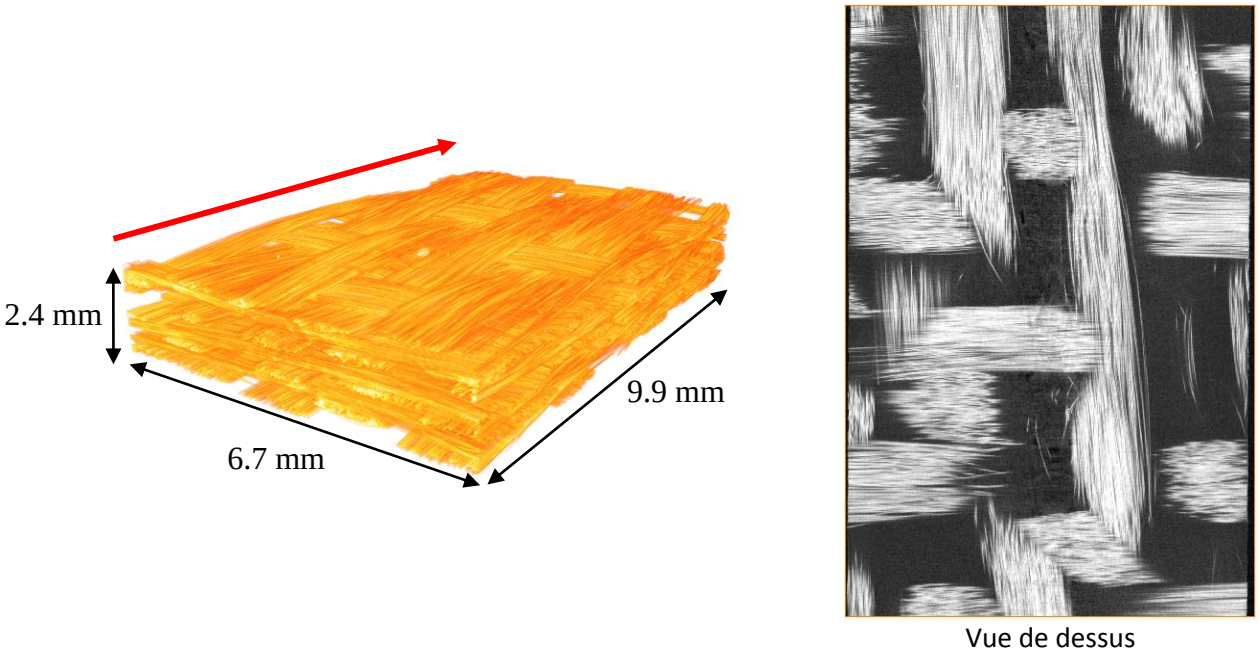


Figure 33 : Donnée tomographique de CMC avant renforcement matriciel orienté en 0°/90° à une résolution de 5.5µm/voxel. Vue tridimensionnelle (à gauche) et vue de section de dessus (à droite). Axe de rotation durant l'acquisition en rouge

A cette résolution, il n'est pas possible de délimiter précisément chaque fibre. En effet, le diamètre d'une fibre correspond typiquement à 2 à 3 pixels et peut même être inférieur au pixel, ce qui ne permet pas d'envisager une segmentation à cette échelle. Par contre, comme on peut le voir sur la Figure 34, il est possible de discerner certaines porosités intra-fil.. Comme nous allons le montrer, le contraste induit par ces porosités nous permet de mesurer des champs de gradients et d'en déduire une estimation de l'orientation locale. De plus, l'analyse locale de l'évolution des niveaux de gris permet d'accéder à une cartographie des densités locales, sauf lorsque l'acquisition de la donnée est telle que dans les zones denses, des zones de saturation apparaissent (Fig. 85).

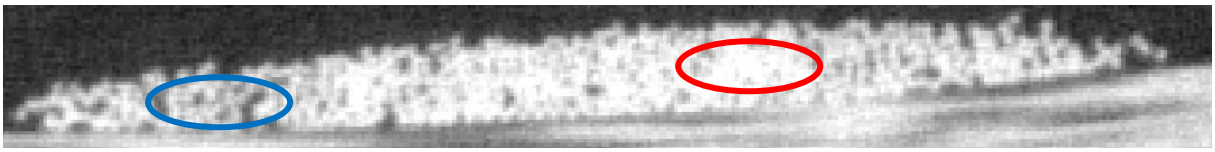


Figure 34 : Zoom sur un fil à basse résolution. Zone de forte porosité intra-fil entourée en bleu, zone de saturation entourée en rouge

2.4 Conclusion

L'étude bibliographique réalisée dans ce chapitre a montré que de nombreux travaux ont porté sur la caractérisation de matériaux composites à partir d'images bidimensionnelles ou tridimensionnelles. Dans le cas des matériaux composites tissés, les méthodes développées sont relatives à la caractérisation des fibres, notamment de leur taille ou de leurs orientations [TAN 06] [ALT 09] [COI 05]. La littérature traite aussi, à plus grande échelle, de la caractérisation des fils, de leur surface, de leur orientation, de leur porosité [HIV 10] [BAL 12]. Une troisième échelle concerne le tissage lui-même, la compréhension de ses arrangements, des effets de déformation et d'infiltration [PIE 09] [BAD 09].

Toutefois, ces études ont le défaut de se concentrer toujours sur une échelle en particulier sans tenir compte de l'échelle inférieure ou supérieure. Or, nous avons mis en évidence que la conception d'un matériau virtuel reproduisant de façon réaliste les matériaux thermostructuraux devait nécessairement présenter un aspect multi-échelle. A titre d'exemple, la simulation réaliste d'un tissage de fils, doit prendre en compte la propension des fils à changer de morphologie sous les contraintes mécaniques subies lors des opérations de tissages. Ces modifications morphologiques découlent du fait qu'un fil est un arrangement souple d'un grand nombre de fibres. Inversement, la distribution spatiale des fibres au sein d'un fil ne peut-être simulée qu'en prenant en compte les contraintes de courbure, d'écrasement ou de torsion subies par ces fibres et découlant du processus de tissage.

Nous avons donc proposé une démarche méthodologique pour la conception d'un matériau virtuel. Cette démarche procède en plusieurs étapes. Pour certaines d'entre elles, spécifiquement la caractérisation de tissages réels et la synthèse de tissages virtuels, des solutions sont d'ores et déjà disponibles dans la littérature. En revanche, l'analyse et la simulation des arrangements de fibres dans un fil restent à développer. C'est sur ces deux points que vont porter les deux chapitres suivants. En particulier, nous allons présenter au chapitre 3 des approches algorithmiques pour la segmentation, l'identification et la caractérisation des fils et des fibres puis, au chapitre quatre, pour la simulation de placement de fibres dans un fil sous contraintes.

Afin d'élaborer ces algorithmes, nous utiliserons des données obtenues par tomographie à rayons X à deux niveaux de résolution. Le premier niveau permettra la caractérisation des fils à l'échelle du tissage. Le second permettra l'analyse des arrangements des fibres à l'intérieur des fils.

Chapitre 3

Algorithmes pour l'analyse de la structure d'un matériau composite fibreux

Sommaire

3.1 INTRODUCTION 40
3.2 EXTRACTION DE FILS 40
3.2.1 Présentation globale de l'approche 41
3.2.2 Extraction des masques de fils de chaine et de fils de trame 42
3.2.2.1 Obtention d'un masque binaire grossier des fibres 42
3.2.2.2 Séparation des fils de chaine et de trame 43
3.2.2.3 Obtention des masques fins de chaine et de trame 46
3.2.3 Labellisation des tronçons de fils isolés 47
3.2.3.1 Sélection des tronçons de fils isolés 47
3.2.3.2 Labellisation des tronçons 48
3.2.4 Algorithme de poursuite 49
3.2.4.1 Présentation globale de l'algorithme 49
3.2.4.2 Sélection des candidats 51
3.2.5 Utilisation de l'algorithme 52
3.3 EXTRACTION DE FIBRES 54
3.3.1 Présentation globale de l'approche 54
3.3.2 Extraction d'axes de fibres 54
3.3.2.1 Extraction des fibres par squelettisation 55
3.3.2.2 Méthode géométrique 56
3.3.2.3 Comparaison des deux méthodes 58
3.3.3 Labellisation des fibres 59
3.3.3.1 Etape préliminaire 59
3.3.3.2 Algorithme de poursuite 61
3.4 EXTRACTION DE PARAMETRES CARACTERISTIQUES 61
3.4.1 Analyse des diamètres de fibres 62
3.4.2 Distribution des orientations des fibres par rapport à l'orientation du fil 63
3.4.3 Densité de fibres dans le fil 65
3.5 RESULTATS 67
3.5.1 Segmentation des blocs de données tomographiques 67
3.5.2 Etude des diamètres 69
3.5.2.1 Distribution des diamètres dans un bloc issu de tomographie à haute résolution 69
3.5.2.2 Evolution de diamètre le long d'une fibre 70
3.5.3 Etude des orientations 71
3.5.3.1 Etude basse résolution 71
3.5.3.2 Etude haute résolution 72
3.5.4 Etude de la densité 73
3.5.4.1 Etude basse résolution 73
3.5.4.2 Etude en haute résolution 74
3.5.5 Etude générale des données à haute résolution 75
3.6 CONCLUSION 79

3.1 Introduction

Comme nous l'avons vu précédemment, la simulation d'un matériau composite fibreux tissé requiert une analyse multi-échelle préalable des structures constituant ce matériau. Nous proposons dans ce chapitre, une approche algorithmique fondée sur des méthodes de traitement d'images tridimensionnelles acquises par micro-tomographie à rayons X à deux niveaux de résolution. Cette approche vise à segmenter les fibres et les fils puis à en extraire un certain nombre de paramètres qui ne pourraient être obtenus sans cette segmentation à double échelle. Les algorithmes présentés s'appuient sur des principes de morphologie mathématique et de géométrie différentielle. Dans un premier temps, ces algorithmes vont permettre la séparation des enveloppes de fils les unes des autres et l'identification des fibres individuelles. Dans un second temps, ils permettront la mesure et la cartographie d'un ensemble de paramètres caractéristiques des fibres dont les principaux sont les diamètres, la densité locale et les orientations des fibres dans le fil.

Ces opérations vont être appliquées à la caractérisation d'un matériau composite tissé avant renforcement matriciel. Nous fournissons, Figure 35, une représentation 3D d'un extrait de donnée tomographique à très haute résolution montrant un réseau fibreux. On peut noter que les fils sont composés d'un ensemble de fibres et admettent, dans le cas présent, deux directions privilégiées définies par les fils de chaine et les fils de trame.

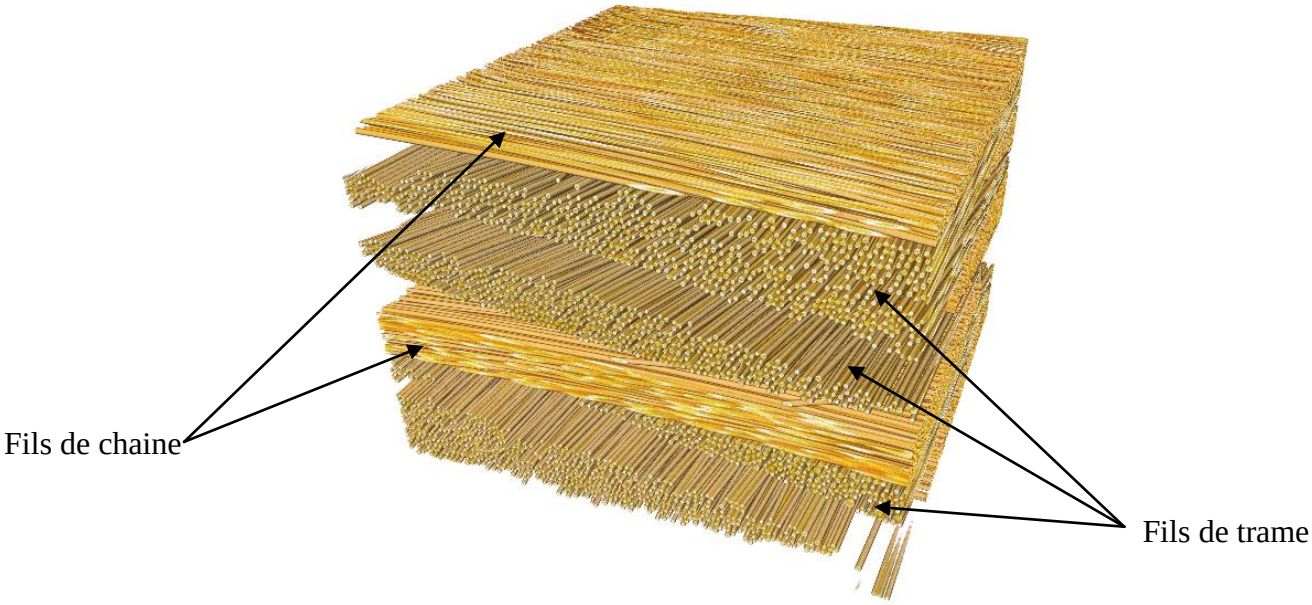


Figure 35 : Visualisation tridimensionnelle d'un matériau composite tissé (obtenue par simple seuillage sur les niveau de gris afin de séparer le fond des fibres)

3.2 Extraction de fils

Pour commencer, nous allons traiter l'échelle mésoscopique c'est-à-dire l'échelle du fil. L'objectif est de proposer une méthode qui, à partir d'une image tridimensionnelle d'un tissage, fournit en sortie une image labellisée de l'ensemble des fils du tissage, c'est-à-dire une image dans laquelle chaque fil sera identifié par un label différent. La labellisation utilisée sera différente d'une simple labellisation en composantes connexes qui, du fait des contacts

entre fils, ne montrerait qu'un faible nombre de composantes et ne permettrait pas la différenciation des fils.

3.2.1 Présentation globale de l'approche

L'approche d'extraction de fils est composée d'un enchaînement de deux étapes principales illustrées Figure 36.

La première étape est une étape de segmentation. Elle consiste, à partir d'une image tridimensionnelle en niveau de gris, à séparer les enveloppes de fils de chaîne et de fils de trame en utilisant l'information d'orientation locale. Cela a pour but de diminuer le nombre de contacts inter-fils et de permettre un travail sur des fils ayant des orientations moyennes très proches.

La seconde étape est une étape de labellisation. Elle consiste, à partir des enveloppes de fils de chaine et de fils de trame, à donner un label différent à chaque fil sachant que les fils sont partiellement en contact. Pour cela, nous proposons une solution appelée *algorithme de poursuite* basée sur l'utilisation des orientations locales ayant pour but la labellisation des fils sous contrainte des enveloppes précédemment extraites.

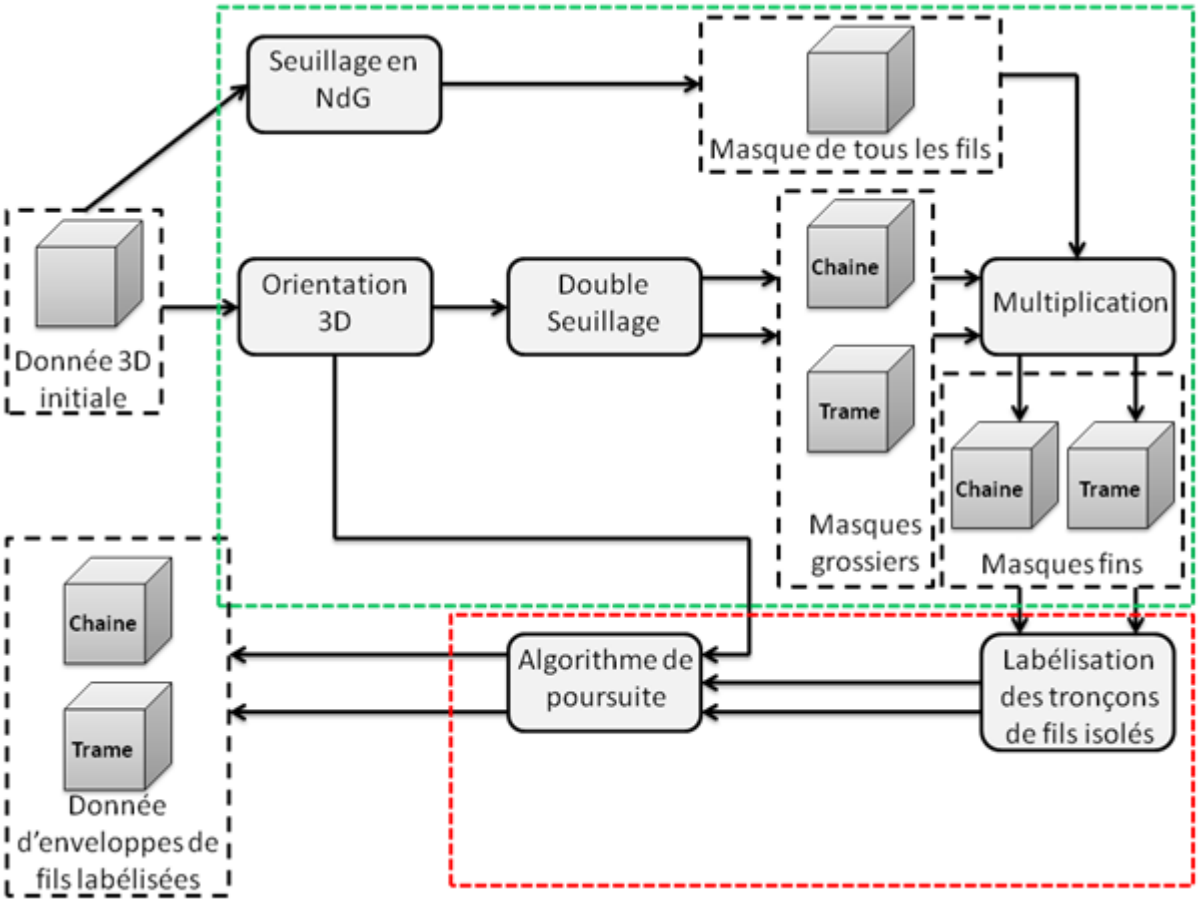


Figure 36: Schéma bloc de l'application d'extraction d'enveloppes de fils. L'application est divisée en deux parties. En vert: segmentation en parallèle des fils de trame et des fils de chaines. En rouge: labellisation des fils segmentés

3.2.2 Extraction des masques de fils de chaine et de fils de trame

Pour commencer, nous allons décrire l'étape permettant la segmentation des enveloppes de fils de chaines et de fils de trame. Elle se subdivise en deux sous-étapes indépendantes : l'obtention d'un masque binaire global des fils et la discrimination des zones de chaîne et de trame par critère d'orientation.

3.2.2.1 Obtention d'un masque binaire grossier des fibres

Comme souvent au sein des chaines de traitement des images, la première étape consiste à obtenir une image binaire des régions d'intérêts. Pour cela, diverses méthodes existent en fonction du type d'image à traiter [COC 95] :

- les approches contours basées sur des méthodes variationnelles lorsque l'information nécessaire à la segmentation de l'objet est contenue dans son contour,
- les approches régions basées sur les caractéristiques internes de l'objet étudié (surface, intensité lumineuse, colorimétrie, texture).

Le type d'images que nous traitons présente une différence marquée entre les niveaux de gris des objets d'intérêts (les fibres) et ceux du reste de l'image (Figure 37). Nous pouvons noter sur l'image à basse résolution (à gauche) qu'un simple seuillage permet d'obtenir une image binaire de bonne qualité. Par contre en ce qui concerne l'image à haute résolution (à droite) on peut remarquer que l'intérieur des fibres admet un niveau de gris similaire à celui de la résine enrobant les fibres. Pour résoudre ce cas de figure, un algorithme de seuillage à hystérésis [COC 95] sera utilisé.

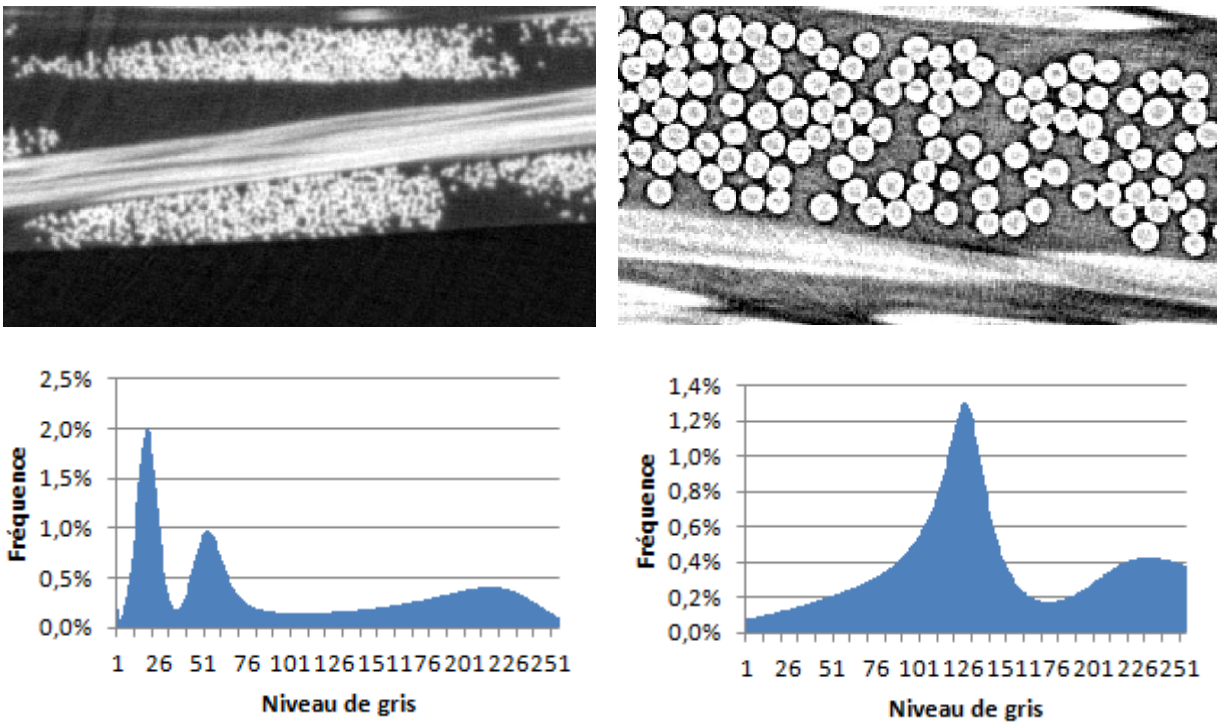


Figure 37 : Etude des histogrammes de niveaux de gris pour une image à basse résolution (à gauche) et une image à haute résolution (à droite) de matériau composite

Cette première étape permet d'obtenir un bloc binaire préliminaire contenant l'ensemble des fibres et fils du bloc de données. Il restera à traiter ce bloc afin d'obtenir les enveloppes de fils de chaine et de trame. Le résultat du seuillage est présenté Figure 38.

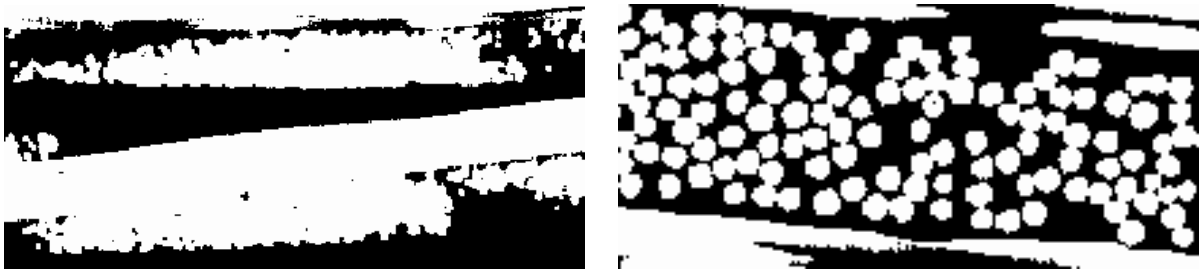


Figure 38 : Masques binaires des fibres obtenus par seuillage des images de la Figure 37. A gauche : résultat de seuillage simple de l'image basse résolution. A droite : résultat de seuillage par hystérésis de l'image haute résolution.

3.2.2.2 Séparation des fils de chaine et de trame

Dans le but de réduire au maximum les contacts entre fils mais aussi dans un intérêt futur de comparer les caractéristiques des fils de chaine et des fils de trame, il nous faut discriminer ces deux types de fils. Leur différence principale résulte du tissage et réside dans leurs orientations orthogonales. Aussi, exploiter la notion d'orientation locale s'avère une approche pertinente.

Le tenseur de structure [KNU 89] est un outil permettant d'analyser l'anisotropie locale de structures tridimensionnelles. Son calcul repose sur la description des variations locales du gradient de l'image.

Dans le cas d'objets de forme cylindrique dont l'orientation varie faiblement dans l'espace, une approche optimale a été proposée par C. Mulat [MUL 08] pour le calcul du gradient. En particulier, C. Mulat a proposé l'utilisation du gradient G3D10 (Figure 39) optimisé pour l'estimation de l'orientation d'objets cylindriques. Cet opérateur est robuste et admet peu de biais en comparaison d'autres opérateurs locaux tels que ceux de Sobel [SOB 68] ou Prewitt [PRE 70] par exemple.

$$O_0 = 0_{5,5}\ ;\ O_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 6 & 4 & 0 \\ 2 & 6 & 12 & 6 & 2 \\ 0 & 4 & 6 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}\ ;\ O_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 3 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\ ;\ O_{-1} = -O_1\ ;\ O_{-2} = -O_2$$

Figure 39 : Filtre gradient G3D10. Ce filtre, à réponse impulsionnelle finie, est défini par un masque de convolution tridimensionnel de taille 5x5x5 dont les coefficients selon l'axe de dérivation sont donnés dans l'ordre par O_{-2}, O_{-1}, O_0, O_1 et O_2. $0_{5,5}$ désigne une matrice de zéros de taille 5x5.

Le tenseur de structure, noté T, se calcule à partir des gradients selon les axes X, Y et Z respectivement notés I_x, I_y, I_z. Il s'agit d'une matrice 3x3 définie par :

$$T = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y & I_x I_z \\ I_x I_y & I_y^2 & I_y I_z \\ I_x I_z & I_y I_z & I_z^2 \end{bmatrix} \quad \textbf{(2)}$$

Le tenseur T permet le calcul de trois vecteurs d'orientation notés $\overrightarrow{U_1}$, $\overrightarrow{U_2}$ et $\overrightarrow{U_3}$. Prenons l'exemple d'un motif 3D anisotrope pour lequel le niveau de gris varie de façon radiale et tel que les iso-surfaces forment des cylindres de base circulaire (cf. Figure 40). Ces trois vecteurs définissent une base orthonormée dont le vecteur $\overrightarrow{U_3}$ donne la direction locale de l'axe du cylindre, le vecteur $\overrightarrow{U_1}$, orthogonal à $\overrightarrow{U_3}$, pointe vers l'axe du cylindre et le vecteur $\overrightarrow{U_2}$, orthogonal aux deux autres, est tangent à l'iso-surface.

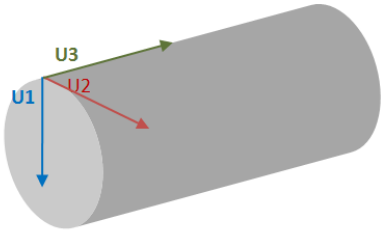


Figure 40 : Vecteurs d'orientation U_1, U_2 et U_3 générés sur une iso-surface cylindrique

Ces trois vecteurs s'obtiennent de la manière suivante :

- le vecteur $\overrightarrow{U_1}$ est le vecteur propre de T associé à sa plus forte valeur propre
- le vecteur $\overrightarrow{U_2}$ est le vecteur propre associé à la seconde valeur propre la plus forte,
- le vecteur $\overrightarrow{U_3}$ est le vecteur propre associé à la valeur propre la plus faible

Trouver les valeurs propres de T nécessite donc la diagonalisation d'une matrice symétrique de taille 3x3. Pour cela nous utilisons la résolution détaillée par Eberly [EBE 06] utilisant elle-même la méthode de Cardan. Elle consiste à résoudre l'équation :

$$\det(T - \lambda . Id_3) = 0 \qquad \textbf{(3)}$$

$$\begin{vmatrix} I_{xx} - \lambda & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} - \lambda & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

Après développement, il vient :

$$\lambda^3 - c_2\lambda^2 + c_1\lambda - c_0 = 0 \qquad \textbf{(4)}$$

avec : $c_0 = I_{xx} . I_{yy} . I_{zz} + 2. I_{xy} I_{xz} I_{yz}{}^2 - I_{xx} I_{yz}{}^2 - I_{yy} I_{xz}{}^2 - I_{zz} I_{xy}{}^2$

$c_1 = I_{xx} . I_{yy} - I_{xy}{}^2 + I_{xx} I_{zz} - I_{xz}{}^2 + I_{yy} I_{zz} - I_{yz}{}^2$

$c_2 = I_{xx} + I_{yy} + I_{zz}$

Nous nous ramenons ensuite à une équation de la forme $x^3 + ax + b = 0$. Pour cela, nous posons le changement de variable $\lambda = x + \frac{c_2}{3}$.

On obtient alors :

$$a = \frac{3c_1 - c_2{}^2}{3} \; et \; b = \frac{-2c_2^3 + 9c_1c_2 - 27c_0}{27} \qquad \textbf{(5)}$$

D'après la méthode d'Eberly, les racines sont de la forme:

$$x = \rho.\cos\left(\theta + \frac{2k\pi}{3}\right) \quad \textbf{(6)}$$

avec : $k \in \{0\,;1\,;2\}$

$$\rho = 2\sqrt{\frac{-a}{3}}$$

$$\theta = \frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\frac{3b}{a\rho}\right)$$

On obtient donc en faisant le changement de variable inverse :

$$\lambda = \rho.\cos\left(\theta + \frac{2k\pi}{3}\right) + \frac{c_2}{3} \quad \textbf{(7)}$$

A partir de ces valeurs propres il est facile de trouver leurs vecteurs propres associés.

Dans le cas d'une image montrant des structures fibreuses, il est donc possible de calculer en chaque pixel le tenseur de structure local et d'obtenir le vecteur $\overrightarrow{U_3}$. Dans le cas d'un pixel appartenant à une fibre, assimilable à une structure cylindrique, le vecteur $\overrightarrow{U_3}$ nous renseigne sur l'orientation locale de la fibre.

A titre d'illustration, nous représentons à la Figure 41 une cartographie des orientations de fibres calculées sur deux sections d'images 3D, à basse résolution (à gauche) et à haute résolution (à droite). Les orientations représentées sont ici les orientations des projections des vecteurs $\overrightarrow{U_3}$ sur le plan de tissage. Pour réaliser ce calcul, nous avons utilisé le gradient G3D10 [MUL 08] et avons lissé le tenseur par un masque rectangulaire de taille 9x9 pour la haute résolution et 3x3 pour la basse résolution.

Cette information va donc permettre de discriminer les voxels de trame des voxels de chaîne. Cette discrimination peut être réalisée par un simple seuillage sur les angles que forment les vecteurs $\overrightarrow{U_3}$ dans le plan horizontal à l'image (plan de tissage) (Figure 42).

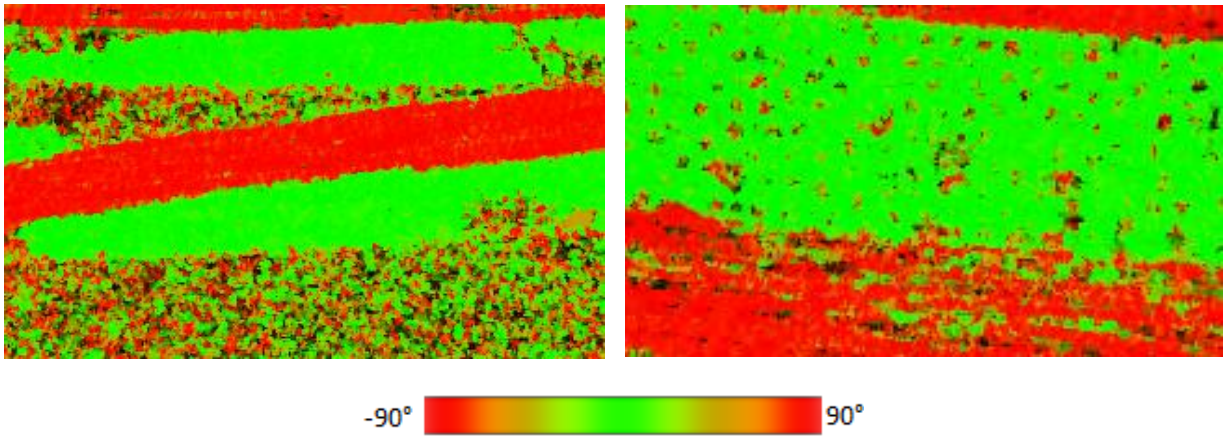


Figure 41 : Angles des vecteurs U_3 projetés dans le plan de tissage et représentés sur le plan orthogonal. Les zones orientées selon Oy sont représentées en rouge, celles orientées selon Ox en vert. A gauche : image basse résolution. A droite : image haute résolution.

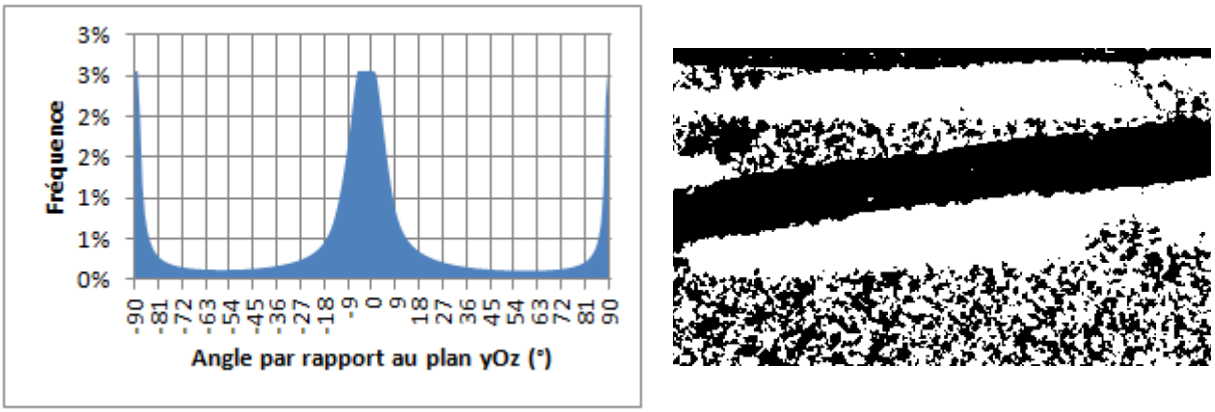


Figure 42 : Histogramme des angles d'orientation locaux (à gauche) par rapport au plan yOz calculé sur les données HR1et masque obtenu en seuillant grossièrement les fibres orientées selon Ox (à droite)

3.2.2.3 Obtention des masques fins de chaine et de trame

A ce stade de l'application, nous disposons de deux masques: le premier est un masque binaire différenciant les fibres du reste de l'image, le second discriminant les zones de fils de trame des zones de fils de chaine (Figure 42 à droite).

Notons que chaque masque possède en l'état des défauts. En particulier, le calcul et le seuillage des orientations s'avèrent sensibles au bruit et aux discontinuités observées en bordure d'échantillon ou à proximité de *ring artefacts*, anneaux superposés à la structure scannée [KIN 89], très courants sur les tomographies (voir Figure 43).

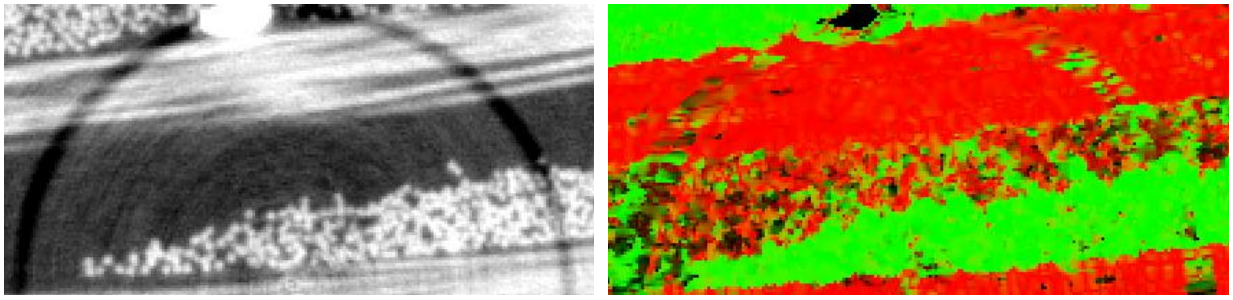


Figure 43 : Résultat du calcul d'orientation dans une zone bruitée par des ring artefacts

Par ailleurs, le masque binaire issu de la segmentation en niveau de gris, permet difficilement de délimiter les fils mais, en contrepartie, est peu sensible aux défauts de type ring artefacts (Figure 44).

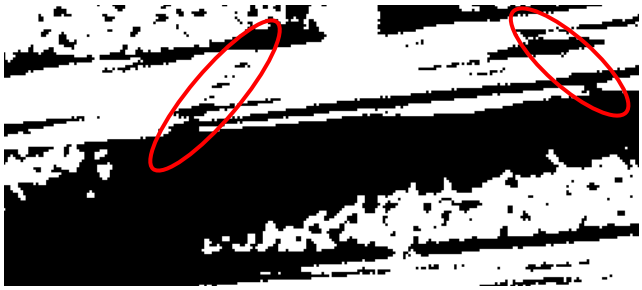


Figure 44 : Résultat du seuillage en niveau de gris sur une zone avec des ring artefacts (défauts de segmentation entourés en rouge)

La combinaison des deux types de masques binaires par simple multiplication, complétée par quelques opérations morphologiques [SER 82] de type fermeture et suppression de trous permet alors d'obtenir des enveloppes de fils plus précises (Figure 45).

Figure 45 : Image initiale (à gauche), enveloppe de fils de chaine (au centre), enveloppe de fils de trame (à droite)

Cette combinaison permet en effet de bénéficier des avantages de chacun des masques et d'annuler leurs défauts. Autrement dit, on sépare les enveloppes de chaine des enveloppes de trame sans prendre en compte les rings artefacts ou les effets de bord.

3.2.3 Labellisation des tronçons de fils isolés

A l'issue des opérations précédentes, deux masques binaires comprenant respectivement les enveloppes de fils de chaine et de fils de trame sont disponibles. Pour chacun de ces masques, il reste à identifier les enveloppes individuelles des fils. Nous présentons pour cela une méthode basée pour partie sur des outils de géométrie différentielle mais également sur des a priori de forme d'objet.

L'approche de labellisation d'enveloppe se décompose en deux étapes. La première étape consiste à labelliser uniquement les portions d'enveloppe de fil qui ne sont en contact avec aucun autre fil. Nous appellerons ces portions, les tronçons de fils isolés. La seconde étape consiste, pour chaque tronçon, à propager son label le long de l'enveloppe de fil en suivant les orientations locales jusqu'à labellisation totale du fil.

3.2.3.1 Sélection des tronçons de fils isolés

Pour commencer il nous faut sélectionner les tronçons de fils isolés. Pour cela nous exploitons un a priori de taille de section de fil. Plus précisément, nous utilisons une approche multi-2D, c'est-à-dire procédant section par section. Les sections doivent avoir pour seule contrainte de ne pas être des coupes longitudinales de fils. Pour chaque section nous calculons la surface de chaque zone de pixels connexes. Si cette surface est inférieure à une surface prédéterminée, nous considérons qu'il s'agit d'un fil unique.

Sur la Figure 46 nous pouvons voir un exemple d'utilisation du critère de surface qui permet de conserver la section du fil représentée en bleu qui n'est en contact avec aucun autre fil. La section du bas qui est composée de deux enveloppes de fils en contact n'a pas été retenue.

Figure 46 : Sélection de tronçons sur une coupe orthogonale. A gauche : section d'une image originale. Au milieu : masque binaire des fils de trame résultant du seuillage. A droite : résultat de la sélection des tronçons de fils isolés. Seule la composante connexe représentée en bleue a été retenue.

3.2.3.2 Labellisation des tronçons

Une fois les critères de sélection des tronçons de fils établis, il reste à les labelliser. Notre choix s'est tourné vers un algorithme rapide: l'algorithme hybride de J. Martin-Herrero & C. Germain [MAR 07]. Cet algorithme est dit hybride au sens où il est à la fois récursif et itératif. Les algorithmes purement récursifs admettent un grand nombre d'appels récursifs. Ils ont tendance à induire des débordements de piles lors de la labellisation d'objets de grande dimension. Compte tenu de la dimension des données tomographiques utilisées, le choix de cet algorithme semble tout indiqué (Figure 47).

Entrée/Sortie: image binaire avec les objets d'intérêt à *-1*, un pixel de coordonnée *(x,y)* est noté $p_{x,y}$

Algorithme:
0 → *label*
Pour toute valeur de *x, y* **Si** $p_{x,y} < 0$ {**incrémenter** *label*, Label(x, y)}

Label(*x, y*)
    Tant que $p_{x-1,y} < 0$ **décrémenter** x
    $x \rightarrow m$
    Tant que $p_{m,y} < 0$ {*label* → $p_{m,y}$, **incrémenter** *m*}
    Tant que $x<m$
        Si $p_{x,y-1} < 0$ Label(*x*, *y* − *1*)
        Si $p_{x,y+1} < 0$ Label(*x*, *y* + *1*)
        Incrémenter *x*
Fin Label

Figure 47 : Algorithme de labellisation hybride de J. Martin-Herrero [MAR 07]

Cet algorithme est appliqué indépendamment sur chaque section du bloc afin d'en labelliser les composantes connexes. Un post traitement est ensuite exécuté selon la direction orthogonale aux sections afin de fusionner les labels connexes de façon à n'en garder qu'un par tronçon. L'algorithme modifié est présenté Figure 48.

Entrée/Sortie: image binaire 3D avec les objets d'intérêt à *-1*, un pixel de coordonnée *(x,y,z)* est noté $p_{x,y,z}$

Algorithme:
0 → *label*
Pour chaque valeur de *z*
    Pour chaque valeur de *x, y* **Si** $p_{x,y,z} < 0$ {**incrémenter** *label*, Label(x, y, z)}
Fin pour

Pour chaque valeur de *z*
    Si $p_{x,y,z} > 0$ *et* $p_{x,y,z-1} > 0$
        Pour chaque valeur de *i, j*
            Si $p_{x,y,z} = p_{i,j,z}$ { $p_{x,y,z-1} \rightarrow p_{i,j,z}$ }
        Fin pour
    Fin si
Fin pour

Label(*x, y, z*)
    Tant que $p_{x-1,y,z} < 0$ **décrémenter** x
    $x \rightarrow m$
    Tant que $p_{m,y,z} < 0$ {*label* → $p_{m,y,z}$, **incrémenter** *m*}
    Tant que *x<m*
        Si $p_{x,y-1,z} < 0$ Label(*x*, *y – 1*,*z*)
        Si $p_{x,y+1,z} < 0$ Label(*x*, *y + 1*,*z*)
        Incrémenter *x*
Fin Label

Figure 48 : Adaptation en multi-2D de l'algorithme hybride pour la labellisation de tronçons

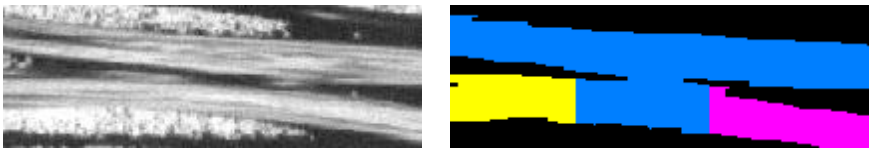


Figure 49 : Labellisation de tronçons en vue longitudinale. A gauche : image initiale. A droite : résultat de la labellisation des tronçons isolés. Les pixels n'appartenant pas à des tronçons isolés sont labellisés en bleu

3.2.4 Algorithme de poursuite

A ce stade, seuls les tronçons de fils isolés ont été labellisés. Il reste donc à traiter toutes les portions de fils en contact avec un ou plusieurs fils voisins. Pour cela nous proposons un algorithme de poursuite consistant à propager les labels des tronçons isolés le long de l'enveloppe des fils jusqu'à labellisation totale des fils.

3.2.4.1 Présentation globale de l'algorithme

L'algorithme de poursuite a pour principe de propager les labels des tronçons de fils à l'intérieur du masque d'enveloppe de fils extrait précédemment. Il nécessite deux entrées : le masque d'enveloppe binaire dans lequel on a préalablement introduit les tronçons de fils labellisés et les vecteurs des orientations locales.

La version de l'algorithme que nous détaillons Figure 50 fonctionne en multi-2D (c'est-à-dire qu'il travaille de manière itérative tranche 2D par tranche 2D). Ce choix permet de diminuer la taille de la donnée en mémoire à un instant donné.

Le principe de l'algorithme est le suivant : pour chaque pixel non encore labellisé du masque, il s'agit de trouver le label le plus pertinent. Pour cela, il nous faut suivre le vecteur d'orientation locale qui amène vers le tronçon voisin donnant le label du candidat.

```
Poursuite (masque_fil, U3, dmax)
        Pour chaque section longitudinale k de masque_fil
                Tant que flag
                        0 →flag
                        Candidate(masque_fil, k) →img_candidate
                        Pour chaque img_candidate = 1
                                Pour dist allant de 1 à dmax
                                        Enregistrement du label à position initiale +/- dist*U3
                                Fin pour
                                most_probable_label→candidate
                                1 →flag
                        Fin pour
                Fin tant que
        Fin pour
Fin poursuite
```

Figure 50 : Algorithme de Poursuite

Afin de sélectionner le label le plus probable, nous introduisons un paramètre supplémentaire en entrée de l'algorithme noté *dmax*. Ce paramètre détermine la distance maximale de recherche pour chaque candidat. Ainsi lors de la recherche du label du candidat on recueille les labels dans la direction du vecteur $\overrightarrow{U_3}$ jusqu'à la distance *dmax* (Figure 51). Ensuite, selon le principe du vote, le label le plus souvent rencontré est sélectionné comme label le plus probable et est affecté au pixel candidat. De plus, il est toujours plus probable que le label du candidat soit celui du label d'un pixel proche que d'un pixel éloigné. Une pondération est donc opérée lors de la récolte des labels possibles consistant à attribuer un poids plus fort aux labels dont la distance au candidat est faible. Pour finir, notons que plus la distance *dmax* est importante, plus le choix du label est robuste, au détriment toutefois du temps de calcul. Il est donc souhaitable de faire un compromis entre la qualité de résultat que l'on souhaite et le temps que l'on veut y consacrer.

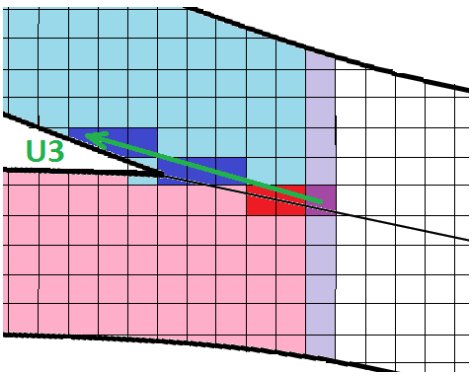


Figure 51 : Schéma de recherche de label (rouge et bleu) pour un candidat (violet) le long de U_3 (vert). Pour une distance égale à 8 voxels, 2 label rouges sont trouvés et 6 labels bleus. Le candidat sera donc un label bleu.

3.2.4.2 Sélection des candidats

L'algorithme de poursuite consiste à répandre les labels de chaque tronçon de fil isolé à l'intérieur des enveloppes de fils précédemment extraites. Cet algorithme est dépendant du choix de candidat exprimé à chaque itération. Nous allons présenter ici plus en détail cette opération.

```
Choix_candidat(masque_fil)
        Pour chaque voxel(x, y) dans k section
                Si voisin(masque_fil (x, y, k)) est labélisé et masque_fil (x, y, k) est labélisable
                        1→img_candidate(x,y,k)
                Fin si
        Fin pour
Fin Choix_candidat
```

Figure 52 : Algorithme de choix de candidat

Comme on peut le voir dans l'algorithme (Figure 52), un pixel est considéré comme un candidat potentiel selon trois critères :

- il doit être *labellisable* : il doit appartenir à l'enveloppe de fil ;
- il ne doit pas encore être labellisé ;
- il doit être voisin d'un pixel labellisé.

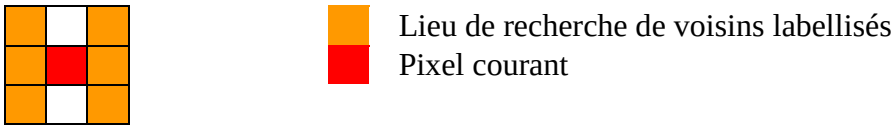
Différents systèmes de voisinage peuvent être utilisés, par exemple:

- 4 voisins en 2D
- 8 voisins en 2D
- 6 voisins en 3D
- 26 voisins en 3D

Ces types de voisinages sont standards et n'admettent aucun a priori de position du voisin. Or, dans le contexte dans lequel nous nous plaçons, nous savons que les enveloppes sont unidirectionnelles : soit ce sont les enveloppes de fils de trame, soit les enveloppes de fils de chaîne. Ainsi, il est impossible qu'un label se propage dans le sens orthogonal à l'orientation moyenne de l'enveloppe de fil. Il est donc possible de définir deux types de voisinages comme suit :

Sens moyen de l'orientation d'enveloppe:

Voisinage 2D:



Voisinage 3D:

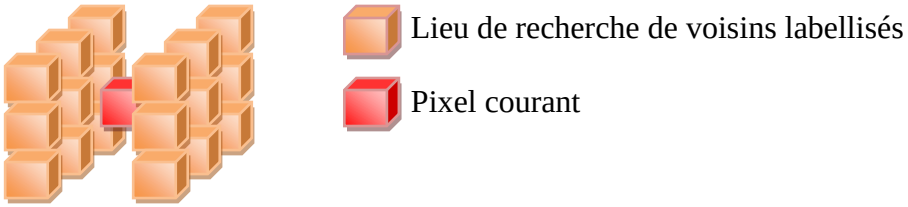


Figure 53 : Définition des voisinages 2D et 3D utilisés lors de la recherche des candidats à l'étape de labellisation

L'utilisation de ce type de voisinage admet deux intérêts majeurs. Premièrement, il évite des erreurs d'identification de label en pénalisant la direction orthogonale. En effet, il est possible dans une zone bruitée que le vecteur d'orientation soit faux et soit dirigé dans la direction orthogonale à celle du fil. Avec ce type de masque, le pixel en question ne pourra pas prendre un mauvais label dans une direction improbable. Deuxièmement, en diminuant le nombre de lieux de recherche de voisins, on réduit le temps de calcul de la fonction *Candidate* ce qui est intéressant car le nombre de candidats sur un bloc tomographique peut être très élevé.

3.2.5 Utilisation de l'algorithme

A ce stade, lorsque l'algorithme est lancé sur un bloc tridimensionnel contenant les tronçons de fils isolés, il travaille tranche par tranche. Sur chacune d'entre-elles, il répand les labels de chaque tronçon en parallèle jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de candidat *labellisable*.

Une fois cette convergence obtenue, le bloc de sortie ne respecte pas encore la contrainte que nous nous sommes fixée : un fil peut être constitué de plusieurs labels. En effet, chaque fil possède autant de labels qu'il comporte de tronçons isolés. Il faut donc ajouter un post traitement pour harmoniser ces labels.

Ce post-traitement suit le même principe que l'algorithme de poursuite. Il faut sélectionner des candidats de la même façon que pour la poursuite à l'exception que l'on considèrera cette fois comme candidats les pixels labellisés connexes à un pixel dont le label est différent du leur. Ensuite, pour chaque label, nous récupérons la liste des labels probables de correspondance. Plusieurs situations peuvent se produire :

- 2 labels dans le cas d'un tronçon en milieu de fil,
- 1 label dans le cas d'un tronçon en bord de fil,
- aucun label dans le cas d'un fil sans contact qui ne comporte qu'un seul label.

Il ne reste plus qu'à faire correspondre ces labels entre eux via l'algorithme présenté Figure 54.

Ainsi donc, l'algorithme de poursuite dans sa globalité permet, à partir des tronçons de fils isolés et des enveloppes de fils (Figure 55 gauche) de répandre les labels dans la totalité de l'enveloppe en suivant l'orientation locale pour ne pas déborder dans les enveloppes adjacentes. A la fin de cette étape, les enveloppes sont entièrement labellisées (Figure 55 au centre) mais ne sont pas encore identifiées en détail. Pour valider cela, une fonction de correspondance permet de recoller entre eux les labels d'un même fil afin de n'en conserver qu'un seul par fil (Figure 55 droite).

Entrée: *TabMax* Tableau de 3 lignes et N colonnes (N étant le nombre de labels) dont la première ligne contient les labels présents dans le bloc à traiter, la seconde le premier label de correspondance (0 s'il n'existe pas), la troisième le second label de correspondance (0 s'il n'existe pas)

Sortie: *TabEqu* Tableau de 2 lignes et N colonnes dont la première ligne contient les labels présents dans le bloc à traiter et la seconde les labels par lesquels ils seront remplacés.

Fonctions intermédiaires: max2(a), renvoie TabMax[2 , i] tel que TabMax[1 , i] = a
max3(a), renvoie TabMax[3 , i] tel que TabMax[1 , i] = a
equivalence(a,b),réalise b →*TabEqu*[2 , *i*] tel que *TabEqu*[1 , *i*] = a

```
TabEqu CorrespLabel (TabMax)
        Pour i allant de 1 à N
                TabMax[ 1 , i] →TabEqu[ 1 , i]
                0 →TabEqu[ 2 , i]
        Fin pour

        Pour i allant de 1 à N
                Si TabEqu[ 2 , i ] = 0
                        TabEqu[ 1 , i ] →labelCourant
                        labelCourant→TabEqu[ 2 , i ]
                        file = enfile( TabEqu[ 1 , i ] )

                        Tant que file n'est pas vide
                                defile(file) →labelTmp
                                Si max1(labelTmp ) n'a pas été traité
                                        file = enfile(max2(labelTmp))
                                        equivalence(max2(labelTmp),labelCourant)
                                Fin si
                                Si max2(labelTmp ) n'a pas été traité
                                        file = enfile(max3(labelTmp))
                                        equivalence(max3(labelTmp),labelCourant)
                                Fin si
                        Fin tant que
                Fin si
        Fin pour
Fin CorrespLabel()
```

Figure 54 : Algorithme de mise en correspondance de labels

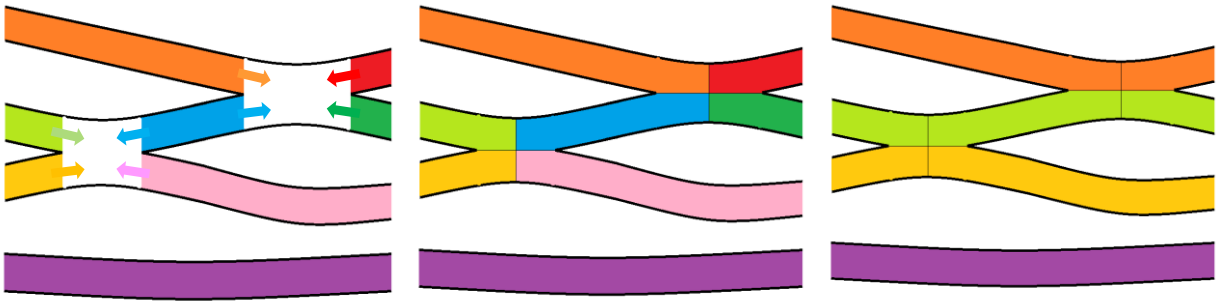


Figure 55 : Schéma du fonctionnement de l'algorithme de poursuite : en couleur sont représentées les zones labellisées. A gauche : donnée avant poursuite, les flèches représentent les vecteurs d'orientations qui décideront de la direction de diffusion des labels. A centre : donnée après poursuite, les fils sont entièrement labellisés mais possèdent plusieurs labels. A droite : donnée finale avec un seul label par fil

3.3 Extraction de fibres

Les matériaux tissés sont des matériaux à triple échelle: l'échelle macroscopique qui est celle du tissage, l'échelle mésoscopique qui est celle du fil et l'échelle microscopique favorable à l'étude des fibres qui composent les fils. Une méthode d'extraction et de labellisation de fils vient d'être présentée. Une méthode similaire fonctionnant à l'échelle microscopique a été développée afin de labelliser chaque fibre d'un bloc d'image tridimensionnel.

3.3.1 Présentation globale de l'approche

L'approche proposée suit un schéma assez similaire à celui de la méthode de labellisation des enveloppes de fils (

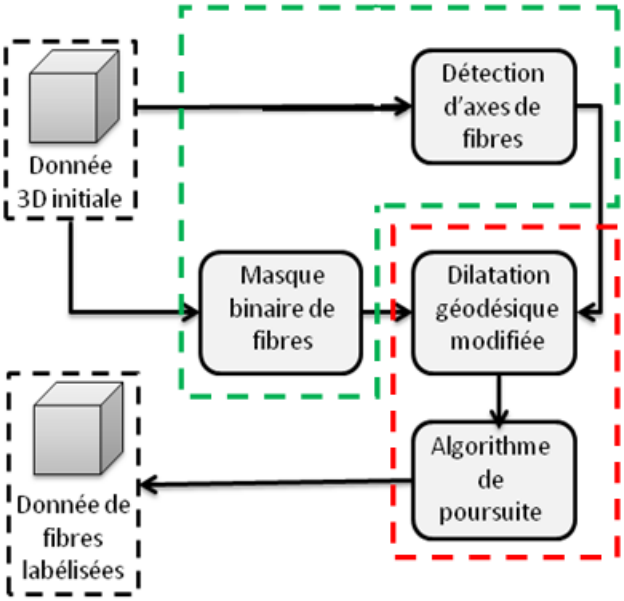


Figure 56). Elle consiste également en deux parties.

Premièrement, nous réalisons deux opérations préliminaires. Les fibres sont segmentées en vue d'obtenir une image binaire définissant les zones d'intérêt dans l'image tridimensionnelle. Parallèlement, nous réalisons une extraction des axes de fibres dans le but d'avoir une zone de travail dans laquelle aucun contact entre fibres n'est notable, et sur laquelle nous pouvons réaliser une première phase de labellisation.

Deuxièmement, nous généralisons la labellisation sur la totalité des fibres selon une chaine de traitement comportant notamment une opération de poursuite de fibre qui s'inspire de l'algorithme de poursuite de fil présenté précédemment.

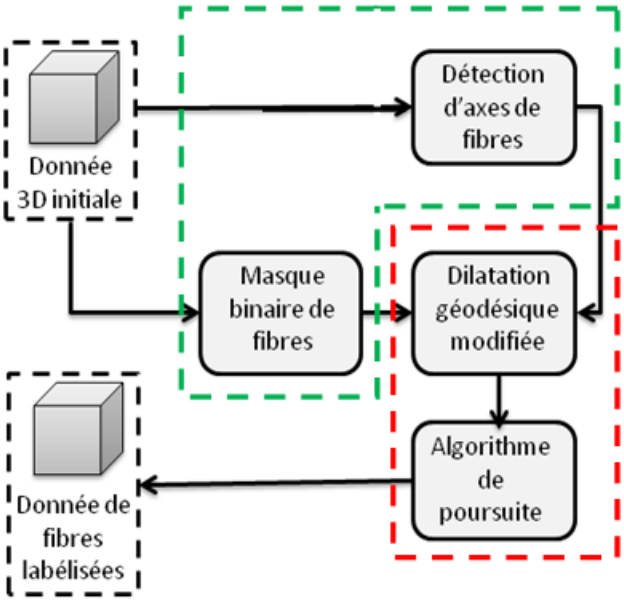


Figure 56 : Schéma bloc de l'application de labellisation de fibres. En vert: segmentation des fibres et extraction d'axes. En rouge: labellisation des fibres segmentés

3.3.2 Extraction d'axes de fibres

Contrairement aux fils qui possèdent un faible nombre de zones de contact entre eux, les fibres sont assemblées en torons et, de ce fait, admettent un nombre de contacts très important avec leurs voisines. Ces contacts et l'absence de contraste entre fibres voisines rendent délicate l'utilisation d'une approche contour ou d'une approche région pour la segmentation des fibres. Aussi, à l'instar de l'approche proposée par [MUL 08 bis], nous proposons d'identifier les fibres à partir de leurs axes. Nous allons présenter deux méthodes différentes d'extraction d'axes de fibres : la première méthode, dite *par squelettisation*, est basée sur des opérations de morphologie mathématique, la seconde dite *géométrique* se fonde sur des principes de géométrie différentielle.

3.3.2.1 Extraction des fibres par squelettisation

Cette première méthode consiste à extraire, sur chaque section de l'image, les pixels relatifs aux axes de fibres. Cette opération est réalisée par squelettisation du masque des fibres obtenu lors du traitement des fils (paragraphe 3.2). La squelettisation nécessite une étape préliminaire consistant en un amincissement du masque binaire par érosion morphologique [SER 82] dont l'objectif est d'éliminer les contacts entre fibres voisines (cf. Figure 57).

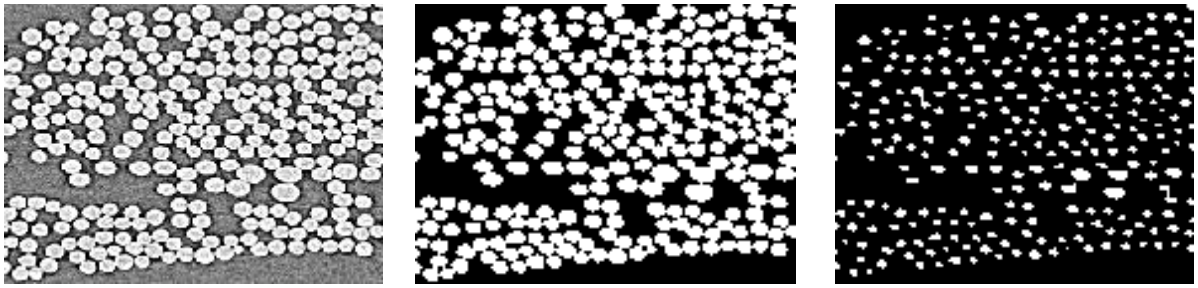


Figure 57 : Image d'entrée (gauche), image seuillée (centre), image seuillée après érosion (droite)

Une fois les fibres amincies, leur squelettisation est réalisée par une version modifiée de l'algorithme itératif de Hilditch [HIL69]. Cet algorithme a pour principe de retirer les pixels périphériques jusqu'à qu'il n'en reste qu'un. Un jeu de contraintes garantit l'unicité du pixel restant. Le principe est le suivant.

Pour chaque pixel d'intérêt *P* de l'image, on calcule le nombre d'intersections de Hilditch (noté X_H) défini comme suit:

x_4	x_3	x_2
x_5	***P***	x_1
x_6	x_7	x_8

$$X_H(P) = \sum_{i=1}^{4} b_i \quad avec \quad b_i = \begin{cases} 1 & si\ x_{2i-1} = 0\ et\ (x_{2i} = 1\ ou\ x_{2i+1} = 1) \\ 0 & sinon \end{cases} \tag{8}$$

Un pixel *P* d'intérêt est marqué s'il respecte les quatre critères suivant :
1°) Au moins un voisin de *P* égal à 0 n'est pas marqué,
2°) $X_H(P) = 1$,
3°) Si x_3 est marqué, $x_3 = 0$ ne change pas $X_H(P)$,
4°) Si x_5 est marqué, $x_5 = 0$ ne change pas $X_H(P)$,

Une fois l'image traitée, les pixels marqués sont éliminés puis on relance une itération jusqu'à ce que plus aucun pixel ne soit éliminé.

Les contraintes 3 et 4 assurent la stabilité des doubles lignes [Hil69]. Elles ne sont pas utiles dans notre cas où l'on ne souhaite conserver qu'un pixel seul pixel par section de fil (Figure 58).

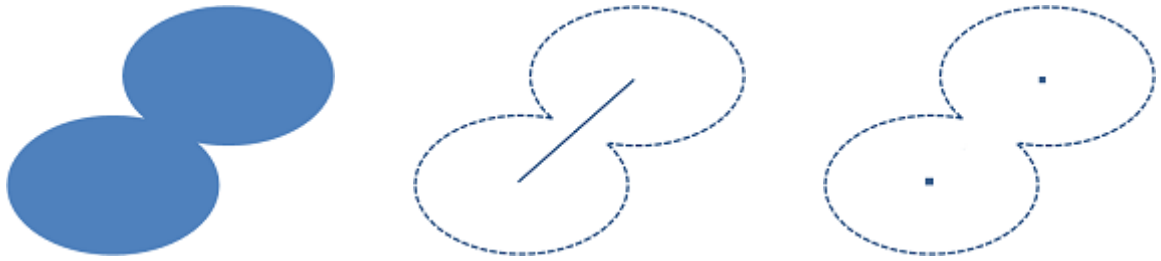


Figure 58 : Image initiale (gauche), image traitée avec les contraintes 3 et 4 (centre), image traitée sans les contraintes 3 et 4 (droite)

Une fois l'image parcourue, les pixels marqués sont mis à 0 pour ne garder que les pixels d'axe à 1, comme illustré à la Figure 59.

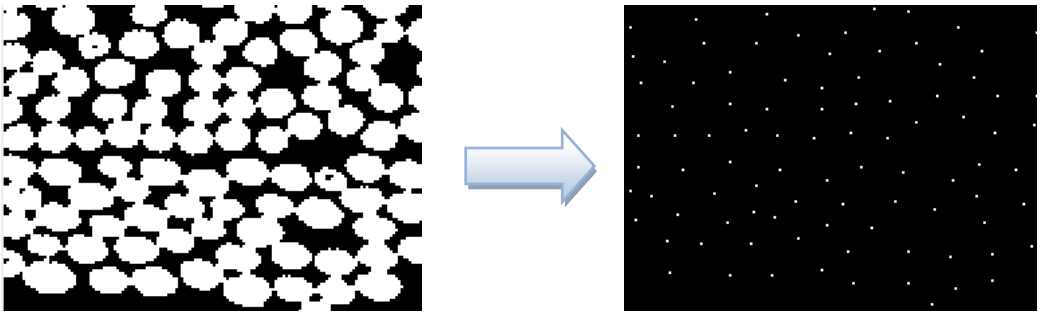


Figure 59 : Amincissement des fibres

3.3.2.2 Méthode géométrique

La seconde méthode envisagée pour la détermination des axes de fibres procède en 3D selon des principes de géométrie différentielle [MUL 08 bis].

A partir de l'image en niveau de gris, nous avons extrait les vecteurs d'orientations selon la méthode développée en (3.2.2.2) fondée sur l'utilisation du tenseur de structure. Ce même tenseur de structure peut être exploité pour estimer les courbures locales des fibres et identifier les positions probables des pixels d'axe.

Considérons le tenseur de structure calculé en un voxel appartenant à une fibre. Le vecteur $\overrightarrow{U_1}$ = $[U_{1x}, U_{1y}, U_{1z}]^t$ désigne le vecteur propre unitaire associé à la valeur propre la plus forte du tenseur. A partir de ce vecteur $\overrightarrow{U_1}$, il est possible de calculer une base orthonormée $(\overrightarrow{U_1}, \vec{a}, \vec{b})$ telle que :

$$\vec{a} = \frac{1}{\sqrt{U_{1x}^2\left(U_{1y}^2 + U_{1z}^2\right) + 4U_{1y}^2U_{1z}^2}} \begin{bmatrix} 2U_{1y}U_{1z} \\ -U_{1x}U_{1z} \\ -U_{1x}U_{1y} \end{bmatrix} \quad \textbf{(9)}$$

et

$$\vec{b} = \vec{a} \wedge \vec{U}_1 = \vec{a} \wedge \frac{1}{\sqrt{U_{1x}^2 + U_{1y}^2 + U_{1z}^2}} \begin{bmatrix} U_{1x} \\ U_{1y} \\ U_{1z} \end{bmatrix} \quad \textbf{(10)}$$

Si deux des coordonnées de $\overrightarrow{U_1}$ sont nulles l'expression (9) n'a pas lieu d'être, on lui préfèrera dans ce cas l'expression suivante :

$$\vec{a} = \frac{1}{\sqrt{2\left(U_{1x}^2 + U_{1y}^2 + U_{1z}^2 - U_{1x}U_{1y} - U_{1x}U_{1z} - U_{1y}U_{1z}\right)}} \begin{bmatrix} U_{1y} - U_{1z} \\ U_{1z} - U_{1x} \\ U_{1x} - U_{1y} \end{bmatrix} \quad \textbf{(11)}$$

Une fois la base orthonormée obtenue, il reste à calculer les courbures principales k_n à de l'isocontour passant par le voxel. Il s'agit des courbures minimale et maximale de cette surface. Elles s'observent selon deux directions perpendiculaires appelées directions principales [DON 99]. Leur calcul nécessite celui de la pseudo hessienne Γ_N définie par :

$$\Gamma_N = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_x}{\partial x} & \frac{\partial N_x}{\partial y} & \frac{\partial N_x}{\partial z} \\ \frac{\partial N_y}{\partial x} & \frac{\partial N_y}{\partial y} & \frac{\partial N_y}{\partial z} \\ \frac{\partial N_z}{\partial x} & \frac{\partial N_z}{\partial y} & \frac{\partial N_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad \textbf{(12)}$$

Les courbures sont alors fournies par l'expression :

$$k_n = -\frac{1}{2}\left(a^T \Gamma_{U1} a + b^T \Gamma_{U1} b \pm \sqrt{\left(a^T \Gamma_{U1} a - b^T \Gamma_{U1} b\right)^2 + \left(a^T \Gamma_{U1} b + b^T \Gamma_{U1} a\right)^2} \right) \quad \textbf{(13)}$$

La distance *d* à l'axe de la fibre est le rayon de courbure obtenu en inversant la courbure la plus grande (cf. [MUL 08 bis] pour plus de détails). Cette distance est utilisée pour retrouver la position de passage probable de l'axe de la fibre. Il suffit pour cela, à partir du voxel d'intérêt, de se déplacer d'une distance *d* dans la direction de $\overrightarrow{U_1}$ et de marquer le voxel d'arrivée comme position de passage probable de l'axe.

Notons que, le vecteur $\overrightarrow{U_1}$ étant défini au signe près, une indétermination subsiste. Dans l'algorithme présenté à la Figure 60, deux voxels sont marqués, dans les deux directions opposées $\overrightarrow{U_1}$ et $-\overrightarrow{U_1}$.

L'opération de *marquage* des voxels d'axe consiste à incrémenter la valeur du voxel sur l'image de sortie, préalablement initialisée à zéro.

Ces opérations sont répétées pour chaque voxel de l'image. L'image de sortie (Figure 61) montre alors une accumulation de détections autour des positions probables des axes.

Une fois l'image d'accumulation obtenue, une seconde passe annule tous les voxels qui n'appartiennent pas au masque binaire des fibres. Pour finir, seuls les voxels de forte accumulation sont conservés.

```
K0, K1: valeurs des courbures locales
U1,1(x , y ) : composant en x du vecteur U1 en (x,y)
U1,2(x , y ) : composant en y du vecteur U1 en (x,y)
imageSortie : image de sortie initialisée à zéro pour chaque pixel

ProbaAxe(imageNdG)
        Pour chaque valeur de k
                Pour chaque voxel(x, y) de la section k
                        1/Max(K0 , K1) → rayon
                        imageSortie( x + rayon * U1,1(x , y) , y + rayon * U1,2(x , y) ) += 1
                        imageSortie( x-rayon * U1,1(x , y) , y-rayon * U1,2(x , y) ) += 1
                Fin pour
        Fin pour
Fin ProbaAxe
```

Figure 60 : Algorithme d'obtention de la carte des « vraisemblances » d'axe

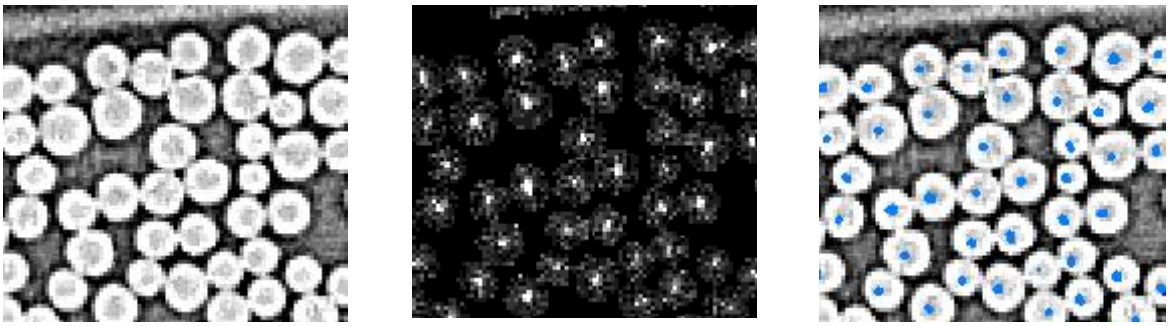


Figure 61 : Image initiale (gauche), détections d'axes limitées au masque des fibres (centre), image finale de voxels d'axes superposée à l'image initiale (droite)

3.3.2.3 Comparaison des deux méthodes

La méthode basée sur la morphologie mathématique a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et de donner un résultat plus que satisfaisant dans le cas où les fibres sont orthogonales à la section de travail. Par contre, le nombre de paramètres à régler est élevé. En particulier les paramètres morphologiques relatifs à l'opération d'érosion, s'ils sont mal choisis, vont fortement détériorer la qualité du résultat.

De plus, cette méthode est fortement dépendante de l'orientation des fibres à cause de l'amincissement des sections. En effet, autant l'amincissement d'un cercle conserve bien le centre du cercle, autant celui d'une ellipse ne conservera pas uniquement le point d'intersection des petits axes et grands axes. Les meilleurs résultats ne s'obtiennent que lorsque la section est orthogonale à la fibre or cette contrainte dépend de l'acquisition des données d'entrée et rien ne peut nous garantir que cela soit respecté. De plus, chaque fibre, même globalement orientée orthogonalement à la section d'étude, admet une variabilité de son orientation locale ce qui implique une section elliptique. Ce type de section ne garantit donc pas que le pixel issu de la squelettisation soit sur l'axe de la fibre.

La méthode basée sur la géométrie différentielle admet un premier avantage, elle est presque totalement non supervisée: il n'y a qu'un seul paramètre à régler qui est un seuil dans la recherche des maxima locaux (poids à partir duquel un maximum local est considéré comme un centre possible). Ceci rend l'utilisation du calcul d'axes à la fois simple et rapide.

De plus, le calcul d'axes s'effectuant partiellement en 3D, il peut se réaliser sur des sections elliptiques dans les plans 2D, sans mauvaises détections du pixel d'axe de fibre permettant ainsi d'obtenir des résultats très satisfaisants sur toutes les orientations de fibres. Par contre, cette approche s'appuie sur l'utilisation de gradients ce qui implique donc une forte sensibilité aux bruits et aux artefacts. En effet, réaliser un calcul de gradient tend à amplifier les hautes fréquences et donc à augmenter l'influence des défauts présents dans les données.

Un dernier point délicat est que l'information de la position du centre est en grande partie contenue dans les surfaces des fibres, où le gradient prend de fortes valeurs. Or au niveau des amas denses de fibres, leur surface est presque indiscernable et donc les informations ne sont pas suffisantes pour obtenir les centres. Mais dans ce cas, les méthodes fondées sur la morphologie mathématique sont aussi défaillantes.

Pour son caractère non supervisé et son indépendance vis à vis des orientations de fibres, notre choix se tourne vers la méthode basée sur la géométrie différentielle pour la suite du manuscrit.

3.3.3 Labellisation des fibres

L'algorithme d'extraction d'axes de fibres a comme résultat une collection de voxels répartis le long des axes de fibres. Ces voxels ne forment pas nécessairement une seule et même composante connexe pour chaque fibre, et de courtes interruptions de l'axe apparaissent parfois le long des fibres. Afin d'aboutir à une labellisation pleine et entière des fibres il est donc indispensable de procéder à des traitements supplémentaires.

Le premier de ces traitements est une labellisation des composantes connexes d'ores et déjà détectées : elles constituent des portions d'axes de fibres. Une fois ces portions d'axes identifiées, une dilatation géodésique à l'intérieur du masque binaire de fibres permet de transformer ces portions d'axes en tronçons de fibres. Pour finir, l'algorithme de poursuite employé pour la labellisation d'enveloppes de fils (paragraphe 3.2.4) est appliqué à la poursuite des fibres.

3.3.3.1 Etape préliminaire

La labellisation des portions d'axes de fibres est réalisée de manière similaire à celle des tronçons de fils (cf. paragraphe 3.2.3). Elle est conduite en multi-2D selon une direction non orthogonale à la direction moyenne des fibres. Pour chaque section et pour chaque voxel d'axe, on cherche dans une petite fenêtre de la tranche précédente un voxel labellisé. Le label de ce dernier est alors affecté au voxel étudié. Est considéré comme petite, une fenêtre de taille inférieure au rayon moyen des fibres étudiées. Si aucun pixel labellisé n'est trouvé, un nouveau label est affecté. Cette étape produit des portions d'axes labellisées organisées en chapelets le long des axes de fibres.

Nous appliquons ensuite à chaque portion d'axe labellisée une opération apparentée à une dilatation géodésique [SER 82] afin d'étendre chaque portion d'axe vers la surface de la fibre.

Définition de la dilatation géodésique [SER 82]*:*
La dilatation géodésique de l'image *X* dans *R* par un élément structurant *B* est définie par:

$$\delta_B^R(X) = \delta_B(X) \cap R$$

avec $\delta_B(X)$ la dilatation de *X* par l'élément structurant *B* et R est un masque binaire contraignant la dilatation.

L'image binaire contraignant la dilatation à l'intérieur de la partie d'intérêt est le masque binaire des fibres obtenu par seuillage (cf. paragraphe 3.2.2.1).

Une particularité de l'opération réalisée provient du fait que la dilation est conduite de façon concurrente pour toutes les portions d'axes labellisées. Si une des fibres n'est pas labellisée sur une portion, ce seront les labels des fibres voisines qui se répandront dans le masque par dilatation. Or, comme nous l'avons exprimé précédemment, la détection d'axe de fibres par géométrie différentielle a tendance à ne pas détecter les axes de fibre dans les zones de fortes densités.

Pour remédier à ce problème, nous remplaçons la dilatation géodésique par une version modifiée que nous appellerons *pseudo-dilatation géodésique* (Figure 62). Cette version interdit aux labels de se répandre dans le masque des fibres voisines.

cercle(a*, R) :* Définit le cercle de centre *a* et de rayon *R*
image_axes : Image de sortie initialisée sur l'image des axes de fibres labellisés

```
pseudoDilatGeod(masque_fibre , coef_2eme_passe)
        // Dilatation par le plus grand cercle inscrit dans le masque
        Pour toute valeur de k
                Pour chaque image_axes (x, y, k) de la section k
                        Si image_axes (x, y) est labéllisé
                                1 → rayon
                                Tant que cercle(image_axes (x, y, k), rayon) ∈ masque_fibre (x, y, k)
                                        Propager label(image_axes (x,y, k)) sur cercle(image_axes (x,
                                                                                        y, k), rayon)
                                        rayon + 1 → rayon
                                Fin tant que
                        Fin si
                Fin pour
        // Dilatation géodésique du cercle contrainte par le masque des fibres
                Faire coef_2eme_passe fois
                Pour chaque image_axes (x, y, k) de la section k
                        Si image_axes (x, y, k) est labélisé et voisin de non labellisé
                                Si voisin non labélisé ∈ masque_fibre (x, y, k)
                                        Labéliser voisin avec label(image_axes (x , y, k))
                                Fin si
                        Fin si
                Fin pour
                Fin faire

        Fin pour
Fin pseudoDilatGeod
```

Figure 62 : Algorithme de pseudo dilatation géodésique

Pour cela, pour chaque tranche et pour chaque pixel labellisé, nous plaçons le plus grand cercle inscrit dans le masque ayant pour centre le pixel labellisé. Une fois chaque pixel traité, nous réalisons une faible dilatation (typiquement 3 pixels, noté X dans l'algorithme) pour garantir la labellisation presque complète des fibres sans déborder sur les voisines. Les pixels du masque des fibres non labellisées seront traités ultérieurement.

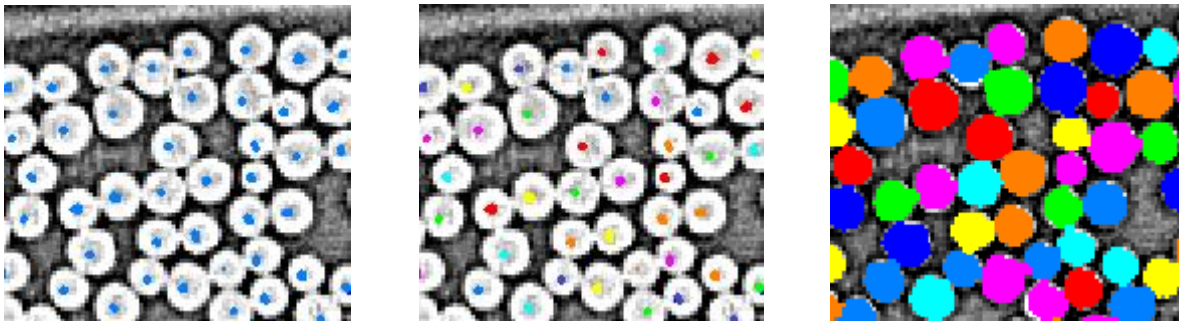


Figure 63 : Résultat de l'extraction de portions d'axes (à gauche), labellisation des portions d'axes (au centre), résultat de la pseudo dilatation géodésique (à droite).

3.3.3.2 Algorithme de poursuite

De manière similaire à la labellisation totale des enveloppes de fils après extraction des tronçons, nous allons réutiliser l'algorithme de poursuite pour finaliser la labellisation des fibres. En effet, à ce niveau de la labellisation, il reste dans la donnée de sortie de nombreux pixels de fibres non labellisés et chaque fibre est composée d'une multitude de labels

différents. Les voxels non labellisés sont typiquement ceux des zones où les axes de fibre n'ont pas pu être déterminés en raison de la trop forte densité de fibres.

Afin de propager les portions de fibres labellisées, nous allons utiliser la méthode de poursuite présentée dans la partie 3.2.4 en l'adaptant légèrement. En effet, la taille et la tortuosité des fibres est bien différente de celle des fils. Afin de s'adapter à leur taille il faut réduire le paramètre d_{max} pour qu'il soit de l'ordre du diamètre moyen de fibre (Figure 64).

Figure 64 : A gauche : sections en vue de dessus de quelques fibres avant application de l'algorithme de poursuite (en bleu foncé les pixels non labélisés, en couleur vives les pixels labellisés, en noir la résine). A droite : résultat après application de l'algorithme de poursuite (à droite)

L'algorithme de poursuite permet donc d'obtenir une image tridimensionnelle finale dans laquelle toutes les fibres sont labellisées et ne possèdent chacune qu'un seul et unique label (Figure 65). Cet algorithme fonctionne quelle que soit l'orientation des fibres par rapport aux axes principaux de l'image 3D.

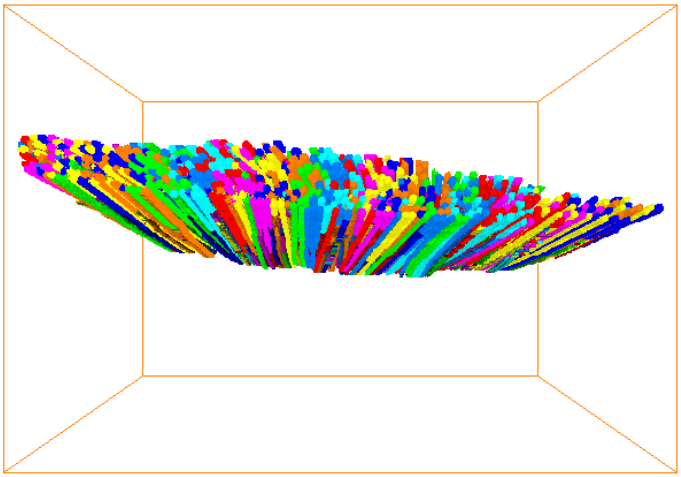


Figure 65 : Sélection d'un fil et des fibres labellisées qui le composent

3.4 Extraction de paramètres caractéristiques

Ce paragraphe va traiter de l'extraction de paramètres caractérisant le matériau composite tissé. En effet, une fois les fils et les fibres labellisés, tous les éléments sont en notre possession pour analyser avec précision le matériau et en extraire les paramètres le caractérisant. Nous allons présenter les méthodes d'extraction de paramètres qui semblent judicieux pour comprendre l'architecture du matériau mais qui permettront aussi de paramétrer au mieux l'algorithme de synthèse de fibres qui sera développé dans le chapitre suivant.

3.4.1 Analyse des diamètres de fibres

Le premier paramètre sur lequel va porter l'extraction est le diamètre des fibres. Cette étude va être réalisée de deux manières. En effet, en gardant à l'esprit que les paramètres extraits peuvent être des paramètres d'entrée dans un algorithme de synthèse de fibres virtuelles, deux notions sont importantes à connaitre. Tout d'abord, afin de générer des fibres réalistes, il faut connaitre la distribution des diamètres des fibres dans la totalité de l'échantillon étudié et/ou dans les fils étudiés. Dans un second temps, il est pertinent d'étudier la variation de diamètre le long d'une fibre afin de configurer le modèle de synthèse le plus réaliste possible. Notons que même si la distribution des diamètres de fil peut facilement être obtenue en 2D, l'exploitation de donnée 3D permet en outre de mesurer la variabilité du diamètre d'une fibre tout au long de celle-ci.

La mesure de diamètre est réalisée en multi-2D, c'est-à-dire section par section. La seule contrainte du sens de parcours est que les sections traitées ne soient pas longitudinales aux fibres. Pour chaque section, le diamètre d est calculé à partir de la surface de la section $S_{ellipse}$ de la fibre assimilée à une ellipse et de l'angle entre le vecteur orthogonal à la section O_i et le vecteur d'orientation locale de fibre $\overrightarrow{U_3}$ (Figure 66).

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{S_{ellipse}}{\pi} \times \frac{\vec{U}_3 . \vec{O}_z}{|\vec{U}_3| . |\vec{O}_z|}} \quad \textbf{(14)}$$

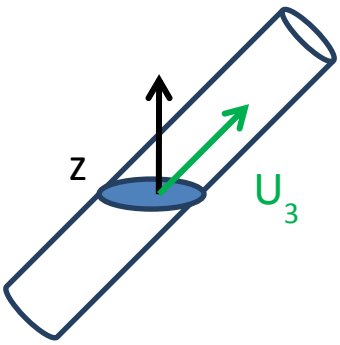


Figure 66 : Schéma de la section elliptique de fibre (en bleu) avec les vecteur *Oz* (en noir) et U_3 (en vert)

L'analyse de l'image entière permet de dresser un histogramme de la répartition des diamètres (Figure 67). Dans le cas où l'on souhaite restreindre l'étude à un seul fil, il suffit de n'étudier que les fibres contenues dans son enveloppe.

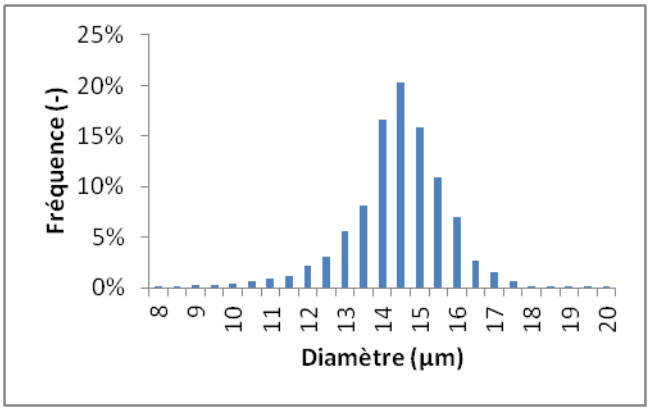


Figure 67 : Exemple d'histogramme des diamètres de fibres calculés pour un fil donné

Comme indiqué ci-dessus, il est également possible d'étudier les variations du diamètre le long d'une fibre. La Figure 68 illustre le tracé de ces variations pour une fibre particulière, et montre que sur l'échantillon considéré, ces variations semblent négligeables.

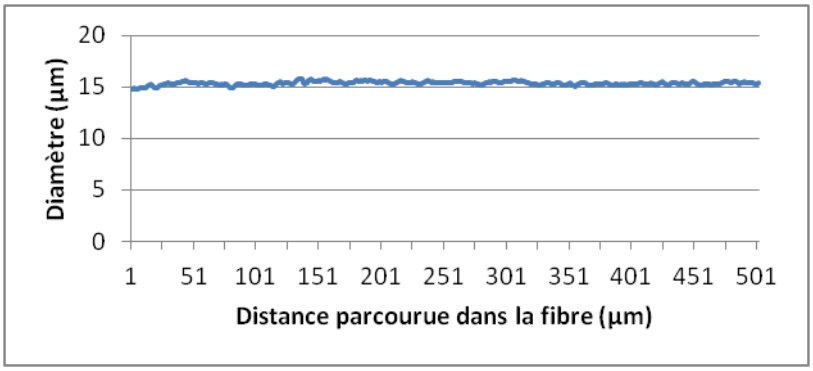


Figure 68 : Etude de l'évolution du diamètre le long d'une fibre. Les valeurs successives ont été moyennées sur une fenêtre de 7µm.

3.4.2 Distribution des orientations des fibres par rapport à l'orientation du fil

Le second paramètre sur lequel porte notre analyse de matériau tissé est l'orientation des fibres par rapport à l'orientation locale du fil. Cette étude utilise non seulement les informations des enveloppes de fils labellisés mais aussi le bloc de données tridimensionnelles comportant les fibres labellisées. L'algorithme procède dans le sens de la profondeur du fil choisi. Pour chaque section, la première étape est de calculer le repère orthonormé lié au fil. Ce repère n'est autre que la rotation du repère naturel du bloc de données tel que l'axe de profondeur du bloc de donnée noté $\vec{k}$ soit le même que l'orientation globale du fil sur cette section, noté $\overrightarrow{U_3}$.

<u>Obtention du repère lié au fil :</u>

Le calcul du repère lié au fil ($\vec{x}$, $\vec{y}$, $\vec{z}$) se réalise par rotation du repère de l'image ($\vec{\imath}$, $\vec{\jmath}$, $\vec{k}$). Pour opérer une rotation en trois dimensions, il nous faut définir un vecteur autour duquel s'opère la rotation ainsi qu'un angle. Il est décidé par souci de clarté de définir la rotation telle

que le vecteur $\vec{z}$, résultant de la rotation du vecteur $\vec{k}$ du repère du bloc de données, coïncide avec le vecteur $\overrightarrow{U_3}$ d'orientation locale du fil. Ainsi, le vecteur $\overrightarrow{U_3}$ n'est autre que le vecteur $\vec{z}$ du repère que nous cherchons à calculer.

Le vecteur autour duquel s'opère la rotation, noté $\vec{V}_{Rot}$, peut être obtenu en calculant le produit vectoriel entre les vecteur $\vec{k}$ et $\overrightarrow{U_3}$.

$$\vec{V}_{Rot} = \frac{\vec{U}_3 \wedge \vec{k}}{\|\vec{U}_3 \wedge \vec{k}\|} \tag{15}$$

L'angle de rotation θ peut quant à lui être défini à π près de la manière suivante ($\overrightarrow{U_3}$ étant lui aussi défini à π près, cette incertitude n'est pas gênante):

$$\theta = cos^{-1}\left(\frac{\vec{U}_3 . \vec{k}}{\|\vec{U}_3\| . \|\vec{k}\|}\right) \tag{16}$$

Une fois le vecteur et l'angle de rotation connus, il suffit d'utiliser la matrice de rotation M_{Rot} suivante sur les vecteurs $\vec{\imath}$ et $\vec{\jmath}$ pour obtenir les vecteurs $\vec{x}$ et $\vec{y}$.

$$\vec{V}_{Rot} = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}$$

$$M_{Rot} = \begin{bmatrix} V_x^2 + (1 - V_x^2)c & V_x V_y (1-c) - V_z s & V_x V_z (1-c) + V_y s \\ V_x V_y (1-c) + V_z s & V_y^2 + (1 - V_y^2)c & V_y V_z (1-c) - V_x s \\ V_x V_z (1-c) - V_y s & V_y V_z (1-c) + V_x s & V_z^2 + (1 - V_z^2)c \end{bmatrix} \quad avec \quad \begin{matrix} c = \cos\theta \\ s = \sin\theta \end{matrix} \tag{17}$$

<u>Obtention de l'orientation des fibres :</u>

Une fois le repère ($\vec{x}$, $\vec{y}$, $\vec{z}$) obtenu, il reste à calculer l'orientation de la fibre dans ce nouveau repère. Cette orientation est donnée par deux axes (Figure 69) :

- l'angle par rapport au plan xOz noté α, dit angle de lacet ;
- l'angle par rapport au plan yOz noté β, dit angle de tangage.

Ces angles se calculent selon les équations :

$$\begin{aligned} \alpha &= cos^{-1}\left(\frac{\|\vec{x} \wedge (\overrightarrow{U_{3\,Fibre}} \wedge \vec{x})\|}{\|\overrightarrow{U_{3\,Fibre}}\|}\right) \\ \beta &= cos^{-1}\left(\frac{\|\vec{y} \wedge (\overrightarrow{U_{3\,Fibre}} \wedge \vec{y})\|}{\|\overrightarrow{U_{3\,Fibre}}\|}\right) \end{aligned} \tag{18}$$

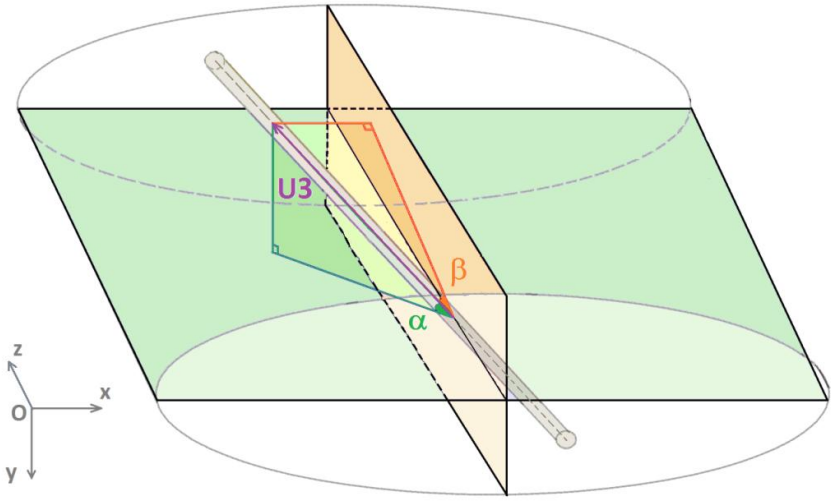


Figure 69 : Schéma des angles extrait pour l'orientation de fibres. *α* est l'angle de lacet, *β* l'angle de tangage.

Ces deux données fournissent l'orientation d'une fibre dans un fil et pourront donc donner des informations sur la tortuosité et les contraintes subies par un fil (Figure 70).

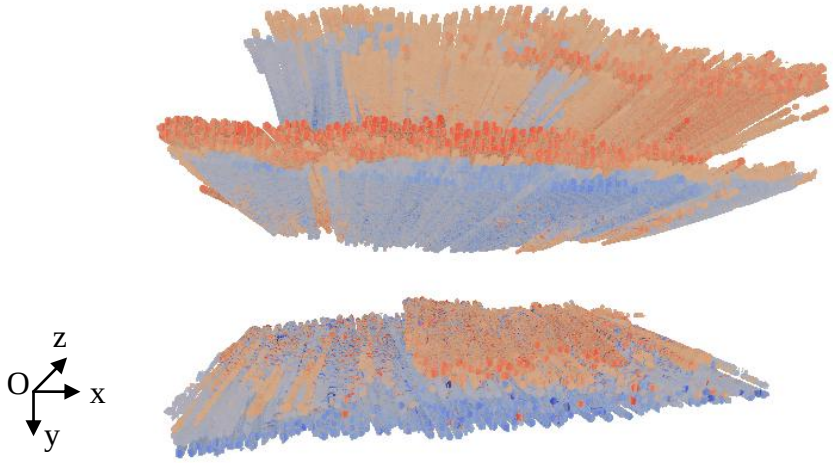


Figure 70 : Représentation 3D des angles de lacet *β* des fibres par rapport au plan yOz (en rouge les angles positifs et en bleu les angles négatifs).

3.4.3 Densité de fibres dans le fil

Le troisième paramètre auquel nous nous intéressons est utile, soit en tant qu'entrée d'un algorithme de synthèse, soit en tant que paramètre de validation d'un résultat de synthèse. Nous allons calculer ici la densité de fibres dans le fil. Pour cela, il nous faut utiliser en entrée les deux données labellisées : les enveloppes de fils et les fibres.

Afin de ne prendre aucun a priori directionnel, nous allons calculer la densité locale sur un élément circulaire. L'algorithme s'articule de la manière suivante (Figure 71):

Disque(a,b) : renvoie les pixels appartenant au disque de centre *a* et de rayon *b*
Densité(*FibreLabellisée* , *FilLabellisé*) **Pour chaque valeur de** *k*

```
                Pour chaqueFilLabellisé(x, y, k)est labellisé
                        0→densité
                        0→nombre
                        Pour chaquedisque(FilLabellisé(x, y, k),rayon) labélisé
                                Pour chaque disque(FibreLabellisé(x, y, k),rayon) labélisé
                                        densité+ 1 →densité
                                Fin si
                                nombre + 1→nombre
                        Fin pour
                        densité/nombre→densité(x , y , z)
                Fin pour
        Fin pour
Fin Densité
```

Figure 71 : Algorithme de calcul de densité locale

Cette méthode permet d'obtenir à la fois une carte des densités (Figure 72) et un histogramme des densités permettant de caractériser les contraintes exercées sur le fil (juger si celui-ci est plutôt foisonnant ou non, par exemple).

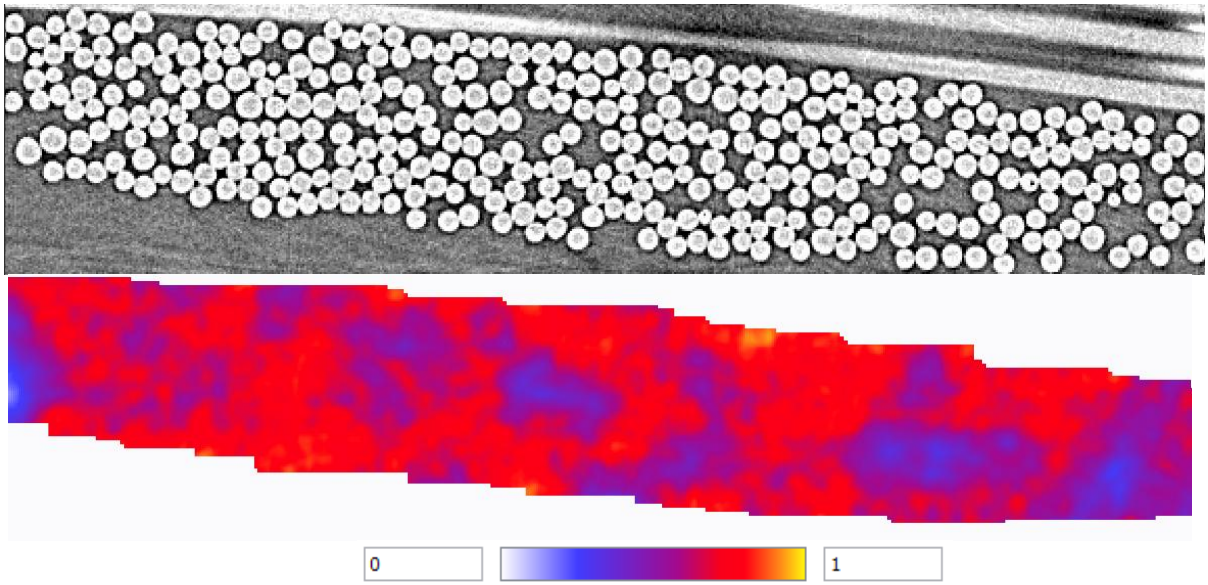


Figure 72 : En haut : extrait d'une image de fil en haute-résolution. En bas : cartographie de la densité locale calculée sur un cercle de 31 pixels de diamètre

3.5 Résultats

Dans cette partie, nous allons mettre en œuvre les outils d'analyse sur les données tomographiques à haute (1,4µm/voxel) et basse (5,5µm/voxel) résolutions présentées au chapitre 2. Seront présentés tour à tour les résultats concernant :

- les diamètres de fibres,
- les orientations de fibre par rapport à l'orientation locale du fil,
- les densités locales de fibres dans le fil.

Un comparatif de la totalité de ces paramètres sera réalisé sur tous les fils discernables des blocs de données analysés.

3.5.1 Segmentation des blocs de données tomographiques

La première étape avant même l'extraction des paramètres caractérisant le matériau est la segmentation des données brutes. Comme développé dans les parties 3.2 et 3.3, nous segmentons sur chacun des blocs de données tomographiques à la fois les enveloppes de fils et les fibres individuelles avant de pouvoir lancer l'extraction de paramètres. Par ailleurs, la segmentation a permis de séparer les fils de chaine (Figure 73 et Figure 76) et les fils de trame ce qui permet une étude des fibres en fonction du type de fil auquel elles appartiennent et ainsi une comparaison de leurs comportements (Figure 74).

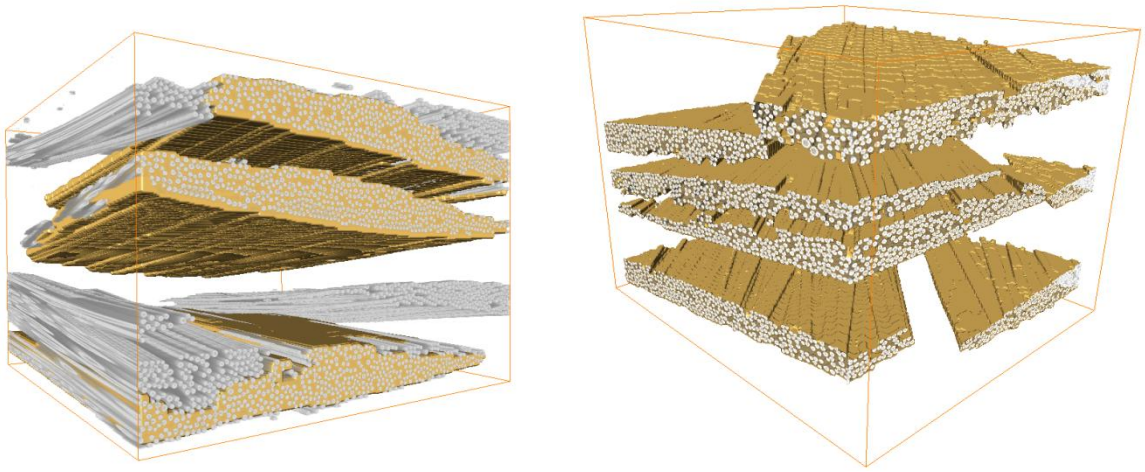


Figure 73 : Segmentation d'enveloppes de fils de chaine (en jaune) superposées aux fibres qui les composent (en gris). A gauche bloc HR1 où seul les fils non coupés par les bords de la donnée sont masqués en jaune. A droite bloc HR2 où tous les fils sont masqués (car ils sont tous coupés par les bords de la donnée)

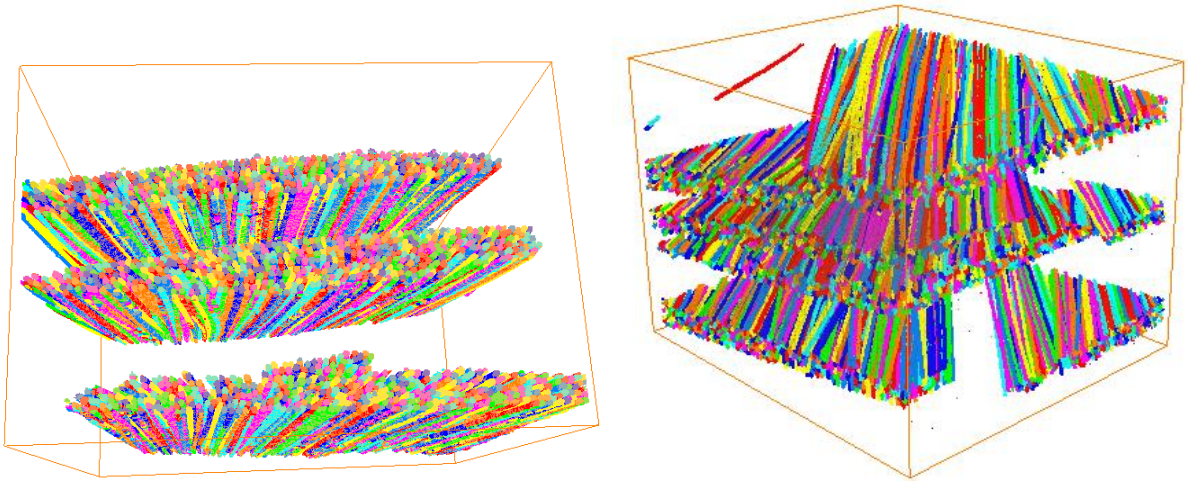


Figure 74 : Segmentation des fils de chaine et des fibres qui les compose sur le bloc de données HR1 (à gauche) et HR2 (à droite)

Concernant les données HR1 et HR2 à haute résolution, la qualité des fils de chaine et fils de trame est fortement différente à cause de leurs conditions d'acquisition respectives (paragraphe 0). En effet, les fils de trame du bloc HR1 sont très fortement flous ce qui nuit à la qualité de la segmentation et de l'extraction des axes de fibres. La Figure 75 met en évidence ces difficultés. Sur les fils de trame du bloc HR1, très peu d'axes sont correctement extraits ce qui implique une segmentation finale de la moitié des fibres composant les fils. Ce problème n'apparait aucunement sur le bloc HR2 grâce à son acquisition particulière à -45°/45°.

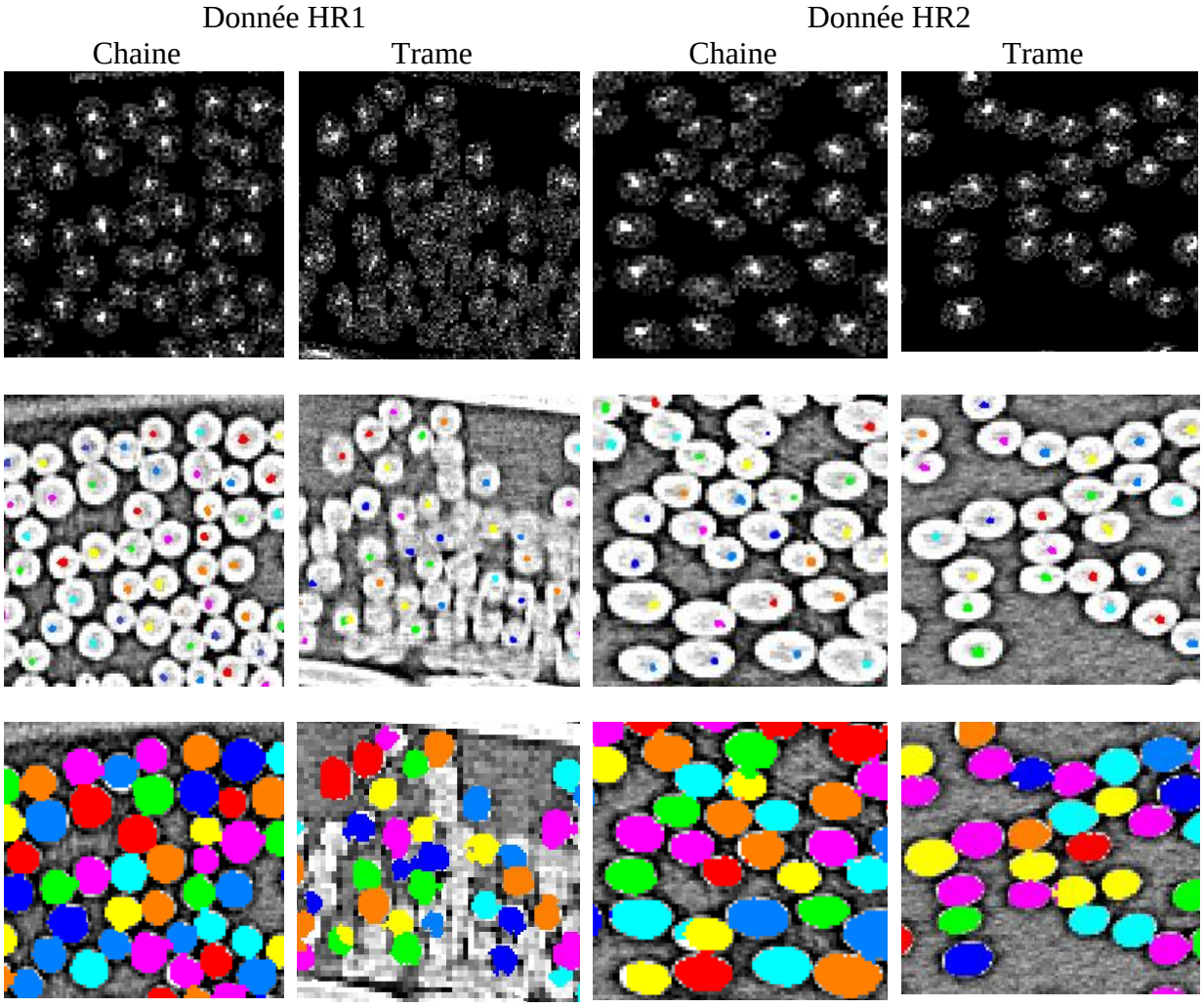


Figure 75 : Comparaison de la qualité des fils de chaine et des fils de trame sur les donnée HR1 (à gauche) et HR2 (à droite) dans le cas de la segmentation de fibres

Un travail similaire a été réalisé sur le bloc à basse définition (Figure 76). Les fibres n'étant pas discernables, seules les enveloppes de fils ont été extraites. Seront ensuite extraits différents paramètres caractéristiques à partir de ces enveloppes.

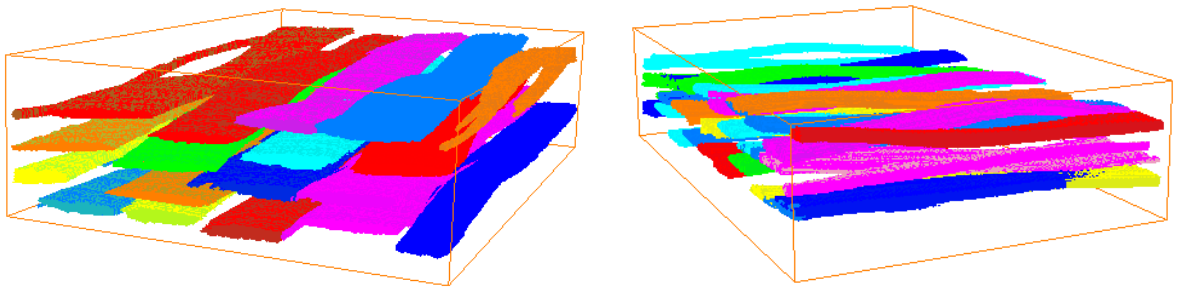


Figure 76 : Enveloppes de fils de chaine et de fils de trame labélisées extraites du bloc de données à basse résolution

3.5.2 Etude des diamètres

Pour commencer nous allons nous intéresser aux diamètres de fibres. Il peut paraitre étonnant de se pencher sur les diamètres via l'étude de tomographies. En effet, les diamètres sont une donnée très facilement accessible par microscopie traditionnelle dont les images bidimensionnelles atteignent des résolutions bien supérieures à 1,4µm/voxel et donc assurent une précision de la mesure sans comparaison.

Dans notre contexte, le fait de s'intéresser à la distribution de diamètres de fibres dans le bloc peut être vu comme une validation de la qualité de la segmentation qui est opérée lors de l'étape de labellisation précédant l'extraction de paramètres. Par ailleurs, l'information tridimensionnelle est indispensable à l'étude des variations de diamètres le long d'une fibre.

Notons que l'étude des diamètres ne peut être réalisée que sur les données à haute résolution c'est à dire à 1,4µm/voxel. En effet, à une résolution plus basse (5,5µm/voxel), la forte densité intra-fil rend très difficile la séparation des fibres. De plus, à cette résolution, l'incertitude liée à l'estimation de leur diamètre (de l'ordre de 2 voxels) est rédhibitoire.

3.5.2.1 Distribution des diamètres dans un bloc issu de tomographie à haute résolution

La Figure 77 présente l'histogramme des diamètres de fibres Nicalon obtenus en microscopie optique par la méthode de la coupe biaise [BLA 06]

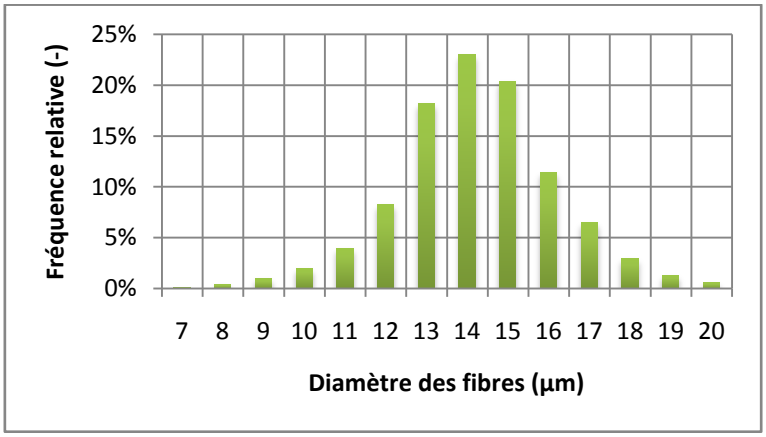


Figure 77 : Distribution de diamètres de fibre Nicalon obtenue par analyse d'image issue de microscopie

Cette distribution s'apparente à une gaussienne de moyenne égale à 14,49 microns et d'écart-type égal à 2,03 microns. Comparons ce résultat avec les extractions réalisées sur la totalité des fibres labélisées des blocs HR1 et HR2 (Figure 78).

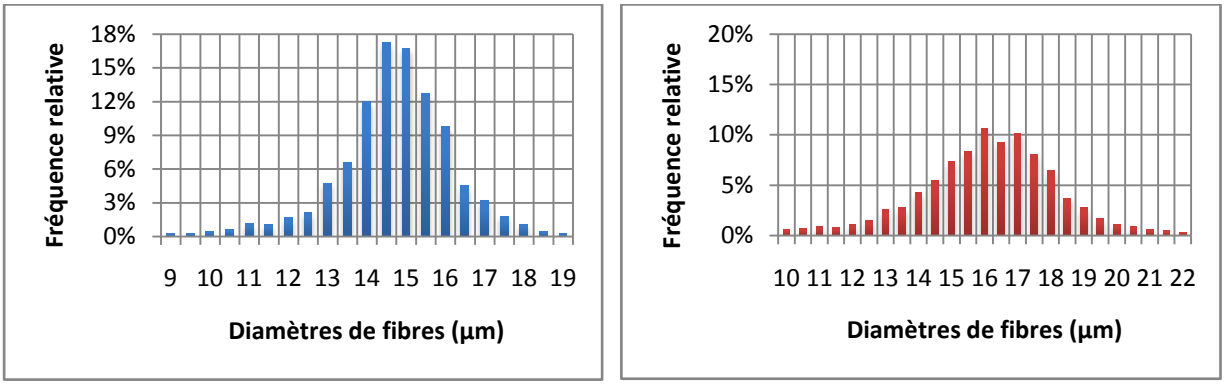


Figure 78 : Distribution de diamètres de fibres extraite sur le bloc de donnée à 0°/90° (à gauche) et sur le bloc de donnée à -45°/45° (à droite)

Sur le Tableau 2, nous pouvons voir les moyennes et écarts types calculées sur la donnée microscopique de référence ainsi que sur les fils labellisés des blocs HR1 et HR2. On peut constater en ce qui concerne le bloc HR1 que les moyennes et écarts types sont de même ordre que ceux trouvés sur le bloc de référence bidimensionnel et donc en déduire que la segmentation réalisée a été précise. Par contre, pour ce qui est du bloc HR2, on peut noter que la moyenne est surévaluée d'environ 1,4µm – soit la taille d'un voxel – et que l'écart-type est 66% plus grand que celui obtenu sur la donnée de référence. On peut en conclure que la segmentation obtenue sur le bloc de donnée HR2 est légèrement moins précisece qui est certainement dû au contraste moindre observé sur ce bloc, du fait des orientations respectives des fibres et de l'axe de rotation de l'échantillon. Pour autant, il convient de rappeler que le bloc HR2 donne accès à la fois aux fils de trame et de chaine, ce qui n'est pas le cas du bloc HR1.

Donnée	Moyenne (µm)	Ecart type (µm)
Microscopie [BLA 06]	14,49	2,03
HR1	14,39	1,75
HR2	15,70	3,33

Tableau 2 : Moyenne et écart type des distributions de diamètres

3.5.2.2 Evolution de diamètre le long d'une fibre

L'évolution du diamètre le long d'une fibre est une information qui ne peut être obtenue simplement par l'étude de sections 2D. Importante pour la connaissance du matériau lui-même et de ses caractéristiques mécaniques, cette donnée est également primordiale pour sa simulation par l'algorithme de synthèse que nous allons utiliser par la suite.

Par souci de lisibilité, nous présentons ci-après les résultats obtenus sur trois fibres prises aléatoirement dans un fil. Dans la Figure 79, nous pouvons observer la variation du diamètre tout au long des fibres (cf. partie 3.4.1). On remarque que ce dernier varie très faiblement sur 1mm de longueur.

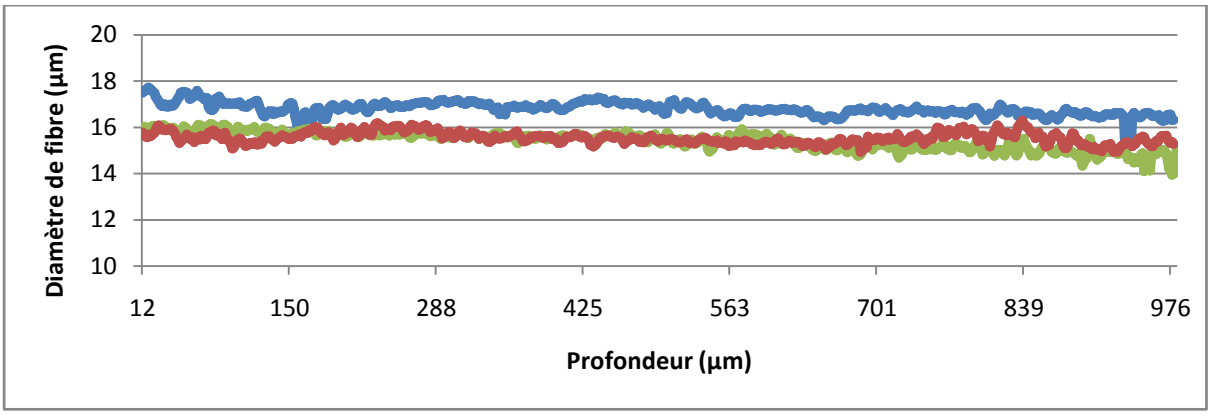


Figure 79 : Evolution du diamètre le long de trois fibres

3.5.3 Etude des orientations

Poursuivons par l'orientation des fibres par rapport à l'orientation moyenne du fil. L'intérêt de l'étude de ce paramètre est, d'une part, de mettre en évidence des arrangements spécifiques des fibres tels que des plans de cisaillement et autres phénomènes de torsion, et d'autre part de pouvoir comparer les structures internes des fils de chaine et des fils de trame.

3.5.3.1 Etude basse résolution

Rappelons que si les fibres sont indiscernables à cette résolution, un gradient local entre les zones de fibres et les porosités peut néanmoins être calculé et donc une orientation locale déduite.

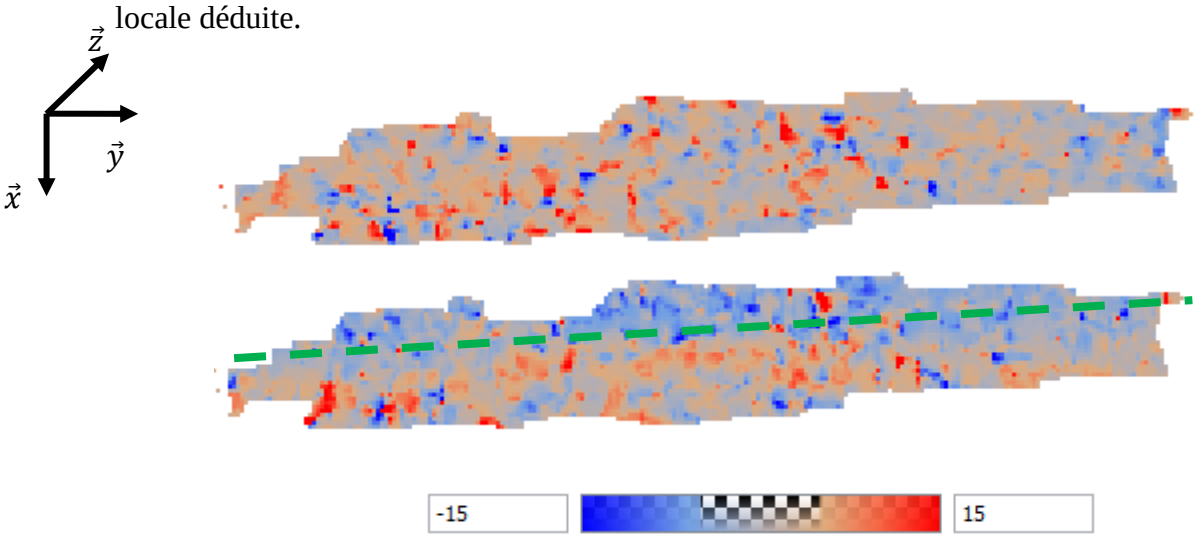


Figure 80 : Angles de tangage *α*par rapport au plan *yOz* (en haut) et angle de lacet *β* par rapport à *xOz* (en bas) obtenus sur un fil à basse résolution (échelle en degrés). Plan de cisaillement matérialisé par une ligne verte discontinue.

Dans la Figure 80, nous pouvons voir le résultat du calcul d'angle local de fibre par rapport à l'orientation du fil. En ce qui concerne l'angle de tangage α par rapport au plan *yOz*, nous pouvons observer une répartition aléatoire des angles sans structure apparente. Notons par ailleurs l'aspect très pixélisé de la carte d'angle dû à la faible définition à laquelle nous travaillons. En ce qui concerne les angles de lacet β par rapport au plan *xOz* par contre, on peut voir se détacher, sur l'exemple étudié, une configuration de plan de cisaillement. En effet,

on identifie clairement deux régions distinctes d'angles négatifs sur le haut du fil et positifs sur le bas du fil.

Ainsi, nous voyons qu'il est possible d'étudier les fils à basse résolution et d'en extraire une configuration particulière malgré le fait de ne pouvoir distinguer les fibres les unes des autres. Ainsi, si cette étude est probante mais si l'on souhaite étudier plus en détail les orientations, une étude à haute résolution est nécessaire.

3.5.3.2 Etude haute résolution

L'exploitation des données à haute résolution permet d'analyser avec bien plus de finesse l'orientation des fibres que ce qui a été réalisé à basse résolution de par la connaissance précise des fibres. Cette étude fournit les distributions des angles de fibres par rapport au fil mais produit aussi les cartes d'orientation et permettant ainsi de situer précisément les zones de fortes contraintes.

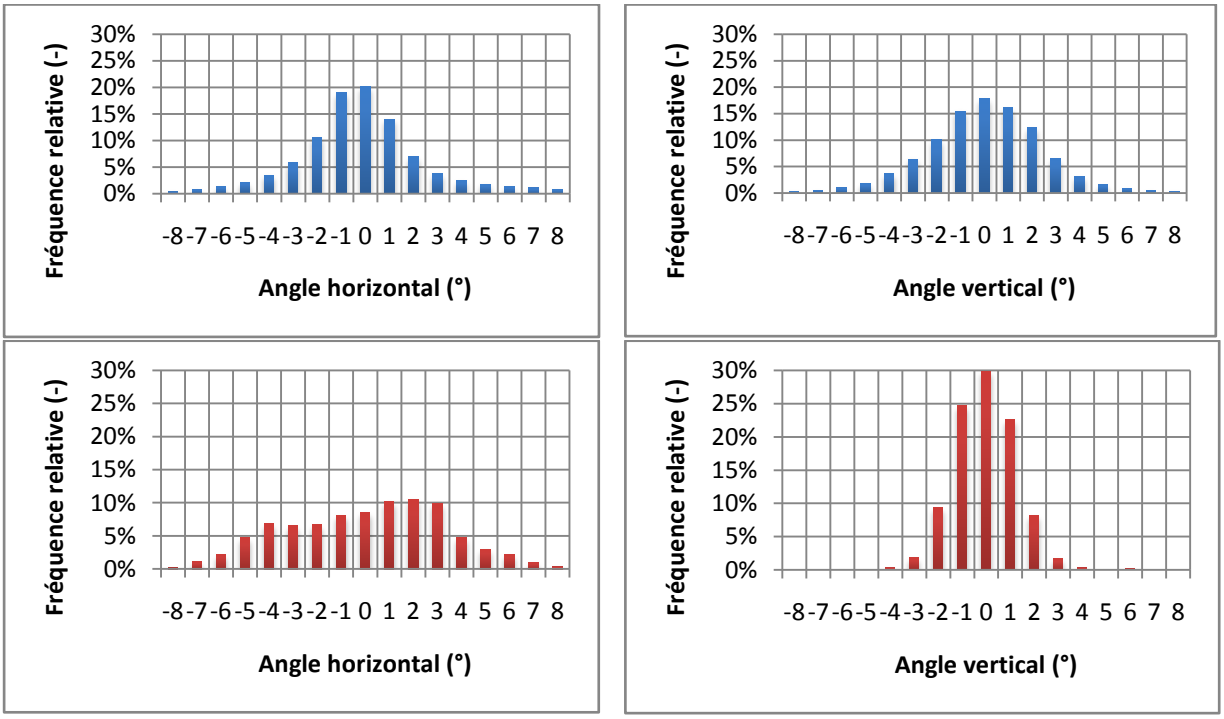


Figure 81 : Distributions les angles de lacet β et de tangage α calculées sur un fils du bloc HR1 (en haut) et sur un fil du bloc HR2 (en bas)

Sur la Figure 81, nous avons extrait les distributions d'angles sur toute la profondeur d'un fil de chaque bloc de données. En ce qui concerne les résultats obtenus sur le fil du bloc HR1 (distributions en bleu) nous pouvons voir que les distributions des angles de lacet et de tangage sont unimodales et centrées sur 0°. Cela signifie que le fil étudié n'a pas subi de fortes contraintes lors du tissage et que les orientations des fibres sont réparties de manière homogène dans l'espace. Par ailleurs, le fait que cette distribution soit légèrement étalée traduit le caractère foisonnant du fil.

Inversement, en ce qui concerne les distributions obtenues sur le fil issu du bloc HR2 (en rouge) on peut noter que la distribution des angles de lacet est bimodale ce qui traduit deux angles privilégiés au cœur du fil étudié. D'un point de vue du comportement des fibres, cela se traduit par la présence d'un plan de cisaillement au sein du fil (Figure 82).

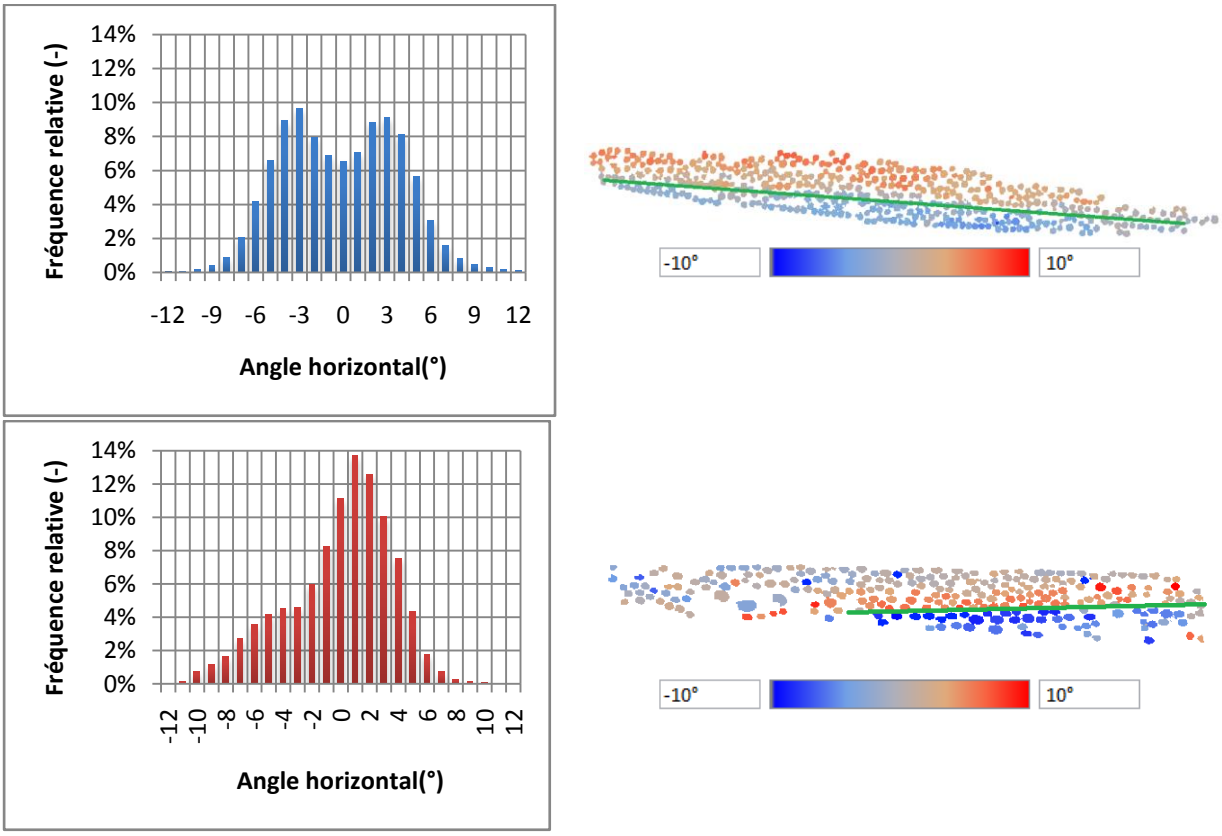


Figure 82 : Distribution des angles de lacet au sein d'un fil comportant un plan de cisaillement (à gauche), carte des angles associés (à droite).Une ligne verte matérialise la position approximative du plan de cisaillement. Le fils du haut est issu du bloc HR1 et celui du bas du bloc HR2.

3.5.4 Etude de la densité

Une fois le paramètre d'orientation étudié, nous allons concentrer nos efforts sur un second paramètre: la densité de fibres dans le fil. Ce paramètre est d'un intérêt tout particulier car il constitue l'une des contraintes de l'algorithme de synthèse que nous avons développé.

3.5.4.1 Etude basse résolution

Pour commencer, nous allons nous intéresser à l'étude de la densité sur le bloc de données à basse résolution. A cette échelle nous sommes capables de discerner les pixels qui appartiennent aux fibres et ceux qui sont inclus dans une porosité intra-fil. Ainsi, sans même pouvoir séparer les fibres les unes des autres, il nous est possible de calculer une densité locale en n'utilisant non pas les résultats de segmentation de fibre mais une image binaire extraite par seuillage (partie 3.2.2.1). Notons tout de même que, sur les zones saturées de l'image, la densité aura tendance à être sous-estimée.

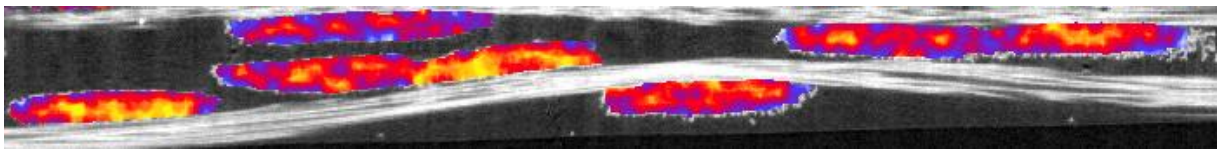


Figure 83 : Densité obtenue sur donnée tomographique à une résolution de 5,5µm/voxel

Sur la Figure 83, on peut voir la carte de densité calculée sur les fils orthogonaux à la vue. Nous pouvons constater des densités très fortes (en jaune) dans les zones saturées mais surtout notons que les zones de fortes densités se concentrent principalement au niveau des contacts avec les fils orthogonaux (qui résultent donc du tissage). Inversement, les zones de faibles densités sont présentes sur les faces non contraintes des fils. Cette carte montre que même si les densités obtenues à basse résolution sont moins précises que celles à haute résolution, elles restent très utiles pour décrire le placement des fibres dans les fils. Elle seront donc exploitables pour nos algorithmes de synthèse de fibres dans une portion de fil de grande taille.

3.5.4.2 Etude en haute résolution

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à l'étude des densités sur les données à haute résolution. La haute résolution offrant une meilleure visibilité des fibres et des porosités qui les entourent, elle va permettre d'obtenir des cartes de densités bien plus précises que précédemment et donc de mieux représenter les arrangements des fibres dans les fils.

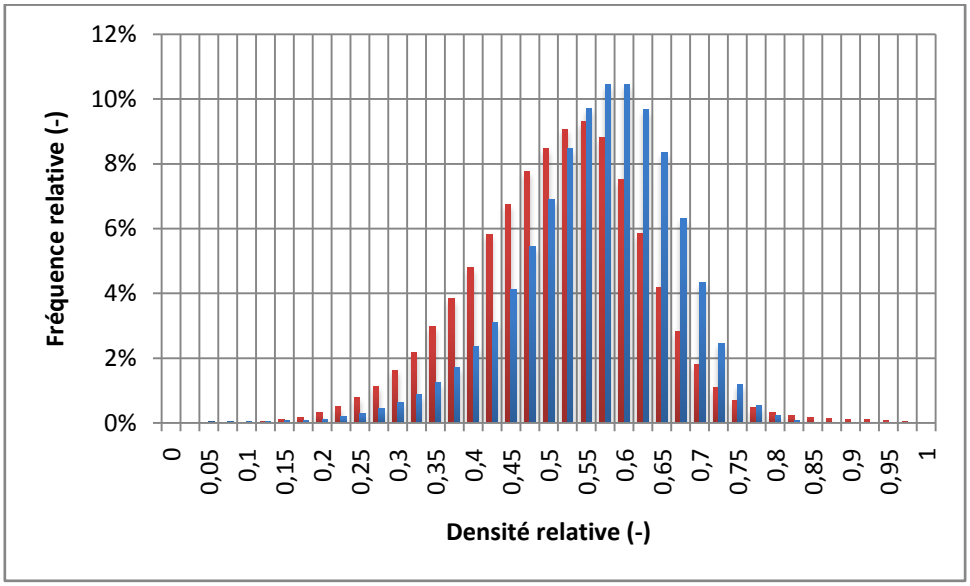


Figure 84 : Exemple de distributions des densités calculées sur un fil à haute résolution des blocs HR1 (en bleu) et HR2 (en rouge)

Sur la Figure 84, on peut voir les distributions de densités prises sur deux fils différents. Nous pouvons noter que la distribution bleue (fil issu du bloc HR1 et entouré en bleu sur la Figure 85) admet de nombreuses zones de forte densité. Le mode de la distribution est centré sur 0,6. En se reportant à la Figure 85 on peut voir que le fil en question est fortement contraint par son environnement. Il est encadré au-dessus et en dessous par des fils de trame qui le compriment et des zones de fortes densités apparaissent à la périphérie du fil en question.

Inversement, la distribution représentée en rouge sur la Figure 84 (associée au fil entouré en rouge sur la Figure 85), présente un mode centré sur 0,55. Elle montre également un étalement plus important notamment vers les valeurs de densité faible. Ceci est le signe

d'un fil foisonnant subissant peu de contraintes de la part des fils voisins. On peut confirmer cette interprétation en observant le fil concerné sur la section de bloc tridimensionnel présenté à la Figure 85. En effet, le fil est lui aussi entouré par deux fils de trame mais qui sont bien plus écartés autorisant ainsi un fort foisonnement et une forte porosité au fil.

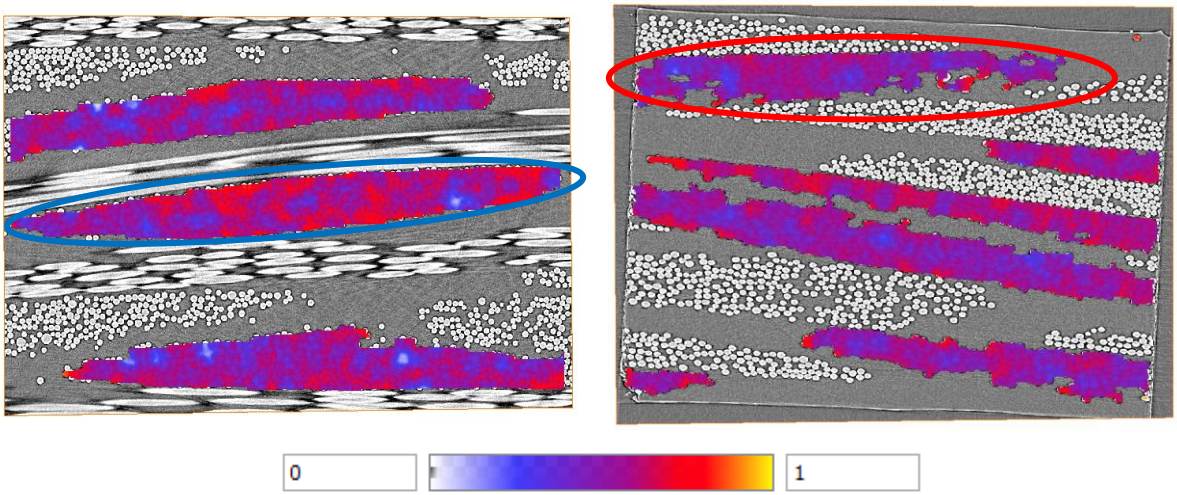


Figure 85 : Carte de densité relative obtenue sur les fils de chaine sur le bloc HR1 (à gauche) et sur le bloc HR2 (à droite) calculée sur un cercle de 43µm de diamètre

Ainsi, l'étude de la densité permet de répondre à deux attentes. Premièrement, elle permet de cartographier les contraintes subies par les fils et dues aux motifs de tissage. Deuxièmement, cette étude nous permet de générer des cartes de densité précises qui pourront être réutilisées dans l'algorithme de synthèse de fibres afin de contraindre de manière réaliste la génération d'un matériau virtuel.

3.5.5 Etude générale des données à haute résolution

Dans cette dernière partie, nous allons présenter les résultats obtenus pour chaque fil de trame et/ou de chaine de chacun des blocs de tomographie à haute résolution que nous avons présentés. Nous pourrons ainsi comparer les résultats obtenus entre les différents fils ainsi que ceux obtenus entre la chaine et la trame.

Les paramètres qui vont être étudiés sont les suivants:

- Le nombre de fibres par section:

Nous évaluons le nombre moyen et le nombre maximal de fibres par section. Ce paramètre permet de rendre compte de la proportion de fils considérée dans l'étude sachant que les fils possèdent chacun un nombre nominal de 500 fibres d'après leur fabricant.

- La surface de la section:

De même que pour le nombre de fibres, nous évaluons la surface moyenne et maximale de section de fil dans le bloc ce qui nous permet d'évaluer rapidement le foisonnement du fil.

- Les diamètres de fibres:

Comme expliqué précédemment, l'extraction des diamètres permet de juger de la validité de la segmentation à l'échelle des fibres.

- Les angles de tangage et de lacet des fibres par rapport à l'orientation moyenne du fil:

Ces paramètres sont les plus pertinents dans l'étude des données tridimensionnelles. Ils permettent d'évaluer le comportement du fil. Plus précisément, si les deux distributions sont unimodales alors le fil étudié ne subit que peu de contraintes, si l'une des distributions est bimodale alors nous sommes en présence d'un fil contraint dont la topologie laisse apparaitre un plan de cisaillement. Enfin, si les deux distributions étudiées sont bimodales alors le fil a subi un phénomène de torsion.

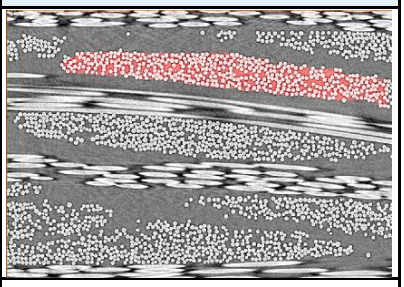
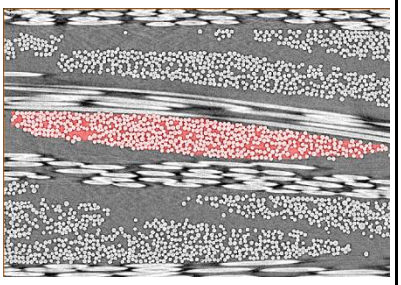
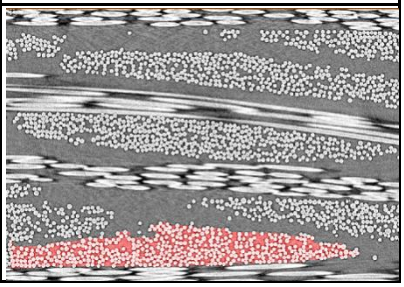
Fil #, orientation	Nombre de fibres par section (-)	Surface de section (µm²)	Diamètre de fibres (µm)	Angle de tangage (°)	Angle de lacet (°)	Environnement du fil
#1 à 0°, chaine	Moyenne : 401 Max: 421	Moyenne : 124000 Max : 132000	Moyenne : 14.3 stdDev: 1.6	Moyenne : 0.4 stdDev: 4.8	Moyenne : 0.0 stdDev: 2.9	
#2 à 0°, chaine	Moyenne : 470 Max: 495	Moyenne : 141000 Max : 145000	Moyenne : 14.4 stdDev: 1.9	Moyenne : 0.3 stdDev: 3.5	Bimodal : Mode 1 : Moyenne : -4 Mode 2 : Moyenne : 3	
#3 à 0°, chaine	Moyenne : 409 Max: 449	Moyenne : 122000 Max : 133000	Moyenne : 13.8 stdDev: 2.0	Bimodal : Mode 1 : Moyenne : -1 Mode 2 : Moyenne : 2	Moyenne : 1.8 stdDev: 9.5	

Tableau 3 : Récapitulatif des paramètres extraits sur les fils de chaine du bloc HR1

Sur le Tableau 3, les fils de chaine du bloc HR1 sont étudiés. Pour rappel, sur ce bloc seuls les fils de chaine sont identifiables et donc caractérisables à cause de l'orientation des fils lors de l'acquisition (Figure 32).En ce qui concerne le nombre de fibres par section, on peut noter qu'aucun fil n'est entier sur la totalité du bloc tridimensionnel étant donné que le nombre moyen de fibres par section est bien inférieur aux 500 fibres attendues. De plus, en ce qui concerne les maxima de nombre de fibres par section, seul le fil #2 s'approche des 500 fibres. Ce fil est le seul qui apparait entièrement sur une portion du bloc de données. Une vérification visuelle permet de noter 10 à 15 fibres non détectées par tranche soit un taux de non-détection inférieur à 3%. Ces non détections se présentent dans les zones de forte densité ou sur les fibres qui s'écartent trop du reste du fil et sont donc considérées comme n'appartenant plus au fil en question.

Pour finir concernant les orientations des fils #1 et #3, les distributions des angles de lacet sont unimodales, ce qui prouve donc qu'aucun plan de cisaillement ou configuration particulière n'est à noter. L'examen du bloc appuie ce constat puisqu'aucune zone de contact n'apparait pour ces fils. Inversement, le fil #2, entouré de deux fils de trame, admet une distribution d'angle de lacet bimodale prouvant la présence d'un plan de cisaillement. En ce qui concerne les angles de tangage, rien de particulier n'est à souligner sur les fils #1 et #2 alors que le fil #3 admet une distribution bimodale, signe d'un léger cisaillement vertical.

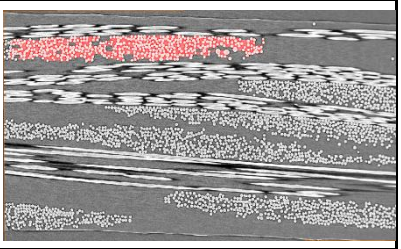
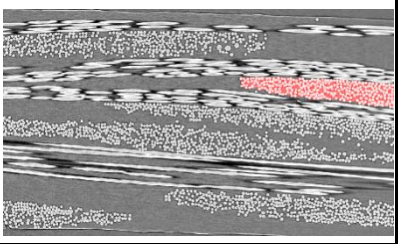
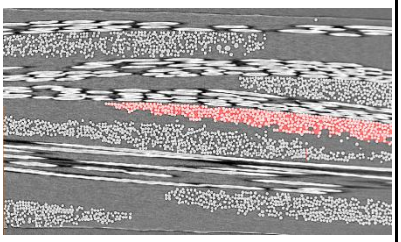
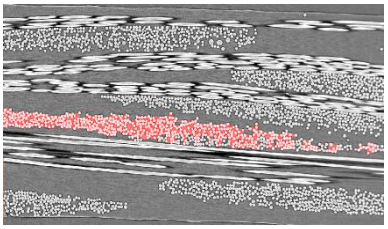
Fil #, orientation	Nombre de fibres par section (-)	Surface de section (µm²)	Diamètre de fibres (µm)	Angle de tangage (°)	Angle de lacet (°)	Environnement du fil
#1 à 45°, chaine	Moyenne : 241 Max: 376	Moyenne : 104000 Max: 154000	Moyenne : 15.2 stdDev: 4.0	Moyenne : 0.3 stdDev: 1.5	Bimodal : Mode 1 : Moyenne : -4 Mode 2 : Moyenne : 1	
#2 à 45°, chaine	Moyenne : 107 Max: 257	Moyenne : 40000 Max: 109000	Moyenne : 15.8 stdDev: 3.9	Moyenne : 0.1 stdDev: 2.0	Moyenne : 0.3 stdDev: 5.9	
#3 à 45°, chaine	Moyenne : 291 Max: 498	Moyenne : 117000 Max: 207000	Moyenne : 14.6 stdDev: 4.8	Bimodal : Mode 1 : Moyenne : -12.5 Mode 2 : Moyenne : -1	Bimodal : Mode 1 : Moyenne : -8 Mode 2 : Moyenne : -1	
#4 à 45°, chaine	Moyenne : 256 Max: 380	Moyenne : 92000 Max: 152000	Moyenne : 16.8 stdDev: 3.4	Moyenne : -0.1 stdDev: 1.8	Bimodal : Mode 1 : Moyenne : -3 Mode 2 : Moyenne : 1	

Tableau 4 : Récapitulatif des paramètres extraits sur les fils de chaine du bloc HR2

Sur le Tableau 4, les fils de chaine du bloc de données tridimensionnel HR2 sont étudiés. Pour commencer, en ce qui concerne le nombre de fibres par section, l'orientation à $\pm$45° des fibres par rapport à l'orientation de l'échantillon cubique implique que la totalité des fils du bloc sont coupés par les bords du bloc. Ainsi, aucun fil n'apparait entier sur toute la longueur du bloc ce qui explique que le nombre de fibres moyen soit largement inférieur aux 500 attendues. De plus, l'orientation est telle qu'aucun fil n'apparait en entier dans le bloc de

données. Il est donc impossible de vérifier que les fils contiennent bien les 500 fibres annoncées par le fournisseur.

Intéressons-nous aux paramètres les plus critiques dans l'étude tridimensionnelle : les angles d'orientations. Nous pouvons souligner que les fils #1, #2 et #4 possèdent une distribution d'angles de tangage unimodale mais une distribution d'angle de lacet bimodale. Cela traduit le comportement de fils fortement contraints présentant tous les trois un plan de cisaillement. Le fil #3 est quant à lui encore plus contraint que les trois autres. En effet, on observe une distribution bimodale pour les deux types d'angles étudiés ce qui suggère l'existence d'une torsion des fibres au sein du fil.

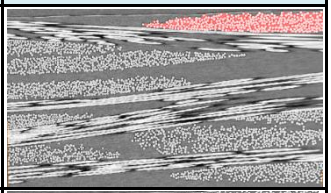
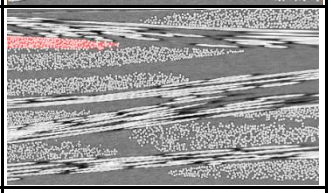
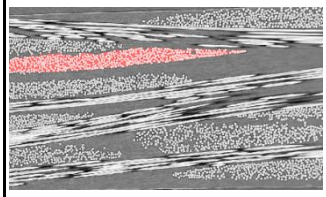
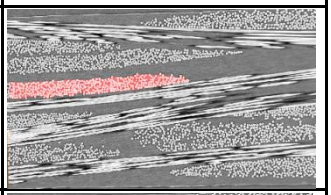
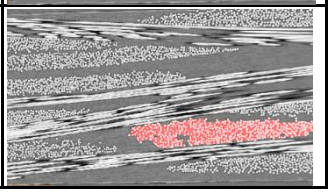
Fil #, orientation	Nombre de fibres par section (-)	Surface de section (µm²)	Diamètre de fibres (µm)	Angle de tangage (°)	Angle de lacet (°)	Environnement du fil
#1 à -45°, trame	Moyenne: 171 Max: 319	Moyenne: 66000 Max 138000	Moyenne: 17.4 stdDev: 4,0	Moyenne: 0.8 stdDev: 8.1	Moyenne: 0.0 stdDev: 4.1	
#2 à -45°, trame	Moyenne: 58 Max: 168	Moyenne: 21000 Max: 56000	Moyenne: 15,3 stdDev: 4,8	Moyenne: -0.2 stdDev: 1.3	Moyenne: -0.1 stdDev: 2.0	
#3 à -45°, trame	Moyenne: 268 Max: 420	Moyenne: 98000 Max: 152000	Moyenne: 17.8 stdDev: 3.7	Bimodal : Mode 1 : Moyenne: -6 Mode 2 : Moyenne: 1	Moyenne: 1.0 stdDev: 6.5	
#4 à -45°, trame	Moyenne: 137 Max: 304	Moyenne: 52000 Max: 116000	Moyenne: 16.6 stdDev: 3.7	Moyenne: 0.0 stdDev: 1.7	Moyenne: -0.0 stdDev: 2.3	
#5 à -45°, trame	Moyenne: 255 Max: 386	Moyenne: 120000 Max: 174000	Moyenne: 16.6 stdDev: 4.1	Moyenne: 0.1 stdDev: 2.1	Moyenne: 0.0 stdDev: 2.8	

Tableau 5 :Récapitulatif des paramètres extraits sur les fils de trame du bloc HR2

Sur le Tableau 5, les fils de trame de la donnée à HR2 est étudiée. Notons que les fils #1, #2 et #4 sont très fortement coupés par les bords de l'échantillon (leur nombre moyen de fibres est inférieur à 200) les résultats obtenus dessus seront donc forcément un peu moins représentatifs.

Comme précédemment, concentrons-nous sur les orientations des fibres dans les fils. Tout d'abord, en ce qui concerne l'angle horizontal, nous observons que toutes les distributions sont unimodales et donc qu'aucun cisaillement n'est présent. De plus, en ce qui concerne les angles verticaux, seul le fil #3 admet une distribution bimodale. Ces résultats traduisent que, pour l'échantillon étudié, les contraintes imposées aux fibres et aux fils sont plus fortes sur les fils de chaine que sur les fils de trame.

3.6 Conclusion

Au travers de ce chapitre, nous venons de proposer une méthode innovante de labellisation fonctionnant à deux échelles : celle du fil et celle de la fibre. Notre méthode est basée sur diverses opérations de traitement d'image, à la fois de morphologie mathématique et de géométrie différentielle. Elle opère sur des images tridimensionnelles en niveaux de gris. La méthodologie comprend des étapes préliminaires de segmentation, d'une part de l'enveloppe des fils, et d'autre part des fibres elles-mêmes. Puis, après une étude sur les orientations locales, les fils et les fibres qui les composent sont séparés en fonction de leur direction privilégiée. Pour un matériau tissé bidimensionnel cela revient à séparer les fils de chaîne des fils de trame.

A partir de ces opérations de segmentation et de séparation des fils en fonction de la direction privilégiée, l'étape de labellisation proprement dite peut être réalisée. Nous proposons un algorithme innovant appelé « algorithme de poursuite » qui permet à partir de tronçons initiaux labellisés, de répandre les labels en suivant les orientations locales. De plus, cet algorithme harmonise les labels afin de n'en conserver qu'un seul par fil ou fibre.

Dans un second temps, diverses méthodes d'extraction de paramètres caractéristiques ont été développées permettant l'obtention des paramètres suivants :

- Distribution de diamètres dans un bloc de donnée ou dans un fil ;
- Evolution du diamètre le long d'une fibre ;
- Orientation de fibres par rapport à l'orientation moyenne locale du fil ;
- Densité de fibres dans le fil.

Ces processus de segmentation et d'analyse ont été appliqués sur les données tomographiques à basse résolution et à haute résolution à notre disposition. Concernant les données à basse résolution, la chaine de traitement proposée a montré sa capacité à extraire correctement les enveloppes de fils tout en séparant les fils de chaines et les fils de trame.

Suite à cette extraction d'enveloppes, nous avons pu extraire les informations suivantes:

- carte basse résolution de la densité de fibres dans le fil
- carte basse résolution de l'orientation locale

La segmentation et l'estimation de paramètres morphologique a aussi été réalisée sur les données à haute résolution. Les enveloppes de fils ainsi que chacune des fibres ont été identifiées avec une très bonne précision sur les données disponibles. Cela a permis l'estimation des paramètres suivants:

- Distribution des diamètres des fibres. Evolution du diamètre de plusieurs fibres.
- Cartes haute résolution de la densité de fibres dans le fil
- Distribution des orientations locales.
- Cartes haute résolution des orientations locales.

L'étude des orientations locales à haute résolution a permis de détecter à plusieurs reprises des phénomènes de compaction, de cisaillement, voire de torsion, révélateurs des contraintes subies par les fibres dans les zones de contact entre deux fils causées par le tissage.

Les paramètres morphologiques ainsi obtenus, permettent d'une part de caractériser le matériau, de mettre en exergue le caractère contraint ou non contraint d'un fil et de comprendre son comportement. Mais ces paramètres peuvent également alimenter un algorithme de synthèse ou aider à la validation d'un résultat de synthèse de matériau virtuel. Ces approches de synthèse sont abordées au chapitre suivant.

Chapitre 4

Synthèse d'un matériau composite tissé virtuel

Sommaire

4.1 INTRODUCTION 82
4.2 METHODE BASEE SUR LES PROCESSUS DE POINT 82
4.2.1 Présentation de la méthode 82
4.2.2 Limites de la méthode 84
4.3 METHODE BASEE SUR LA DYNAMIQUE D'OBJETS BIDIMENSIONNELLE 85
4.3.1 Présentation de l'algorithme de Verlet 85
4.3.1.1 Algorithme de base 85
4.3.1.2 Estimation des paramètres de l'algorithme de Verlet 87
4.3.1.3 Cas d'étude simplifié 89
4.3.1.4 Accélération de l'algorithme initial 90
4.3.2 Adaptation à la synthèse 2D de sections de fils 91
4.3.2.1 Confinement dans une enveloppe de fil 92
4.3.2.2 Gestion de la densité 94
4.4 PROLONGEMENT AU CAS TRIDIMENSIONNEL 95
4.4.1 Présentation de la méthode 95
4.4.2 Etude de la courbure des fibres 3D synthétisées 96
4.5 RESULTATS DE SYNTHESE 99
4.5.1 Evaluation de l'effet des paramètres 99
4.5.1.1 Amplitude du potentiel densité et de la distance à l'enveloppe 100
4.5.1.2 Masse 102
4.5.1.3 Taille de l'élément cylindrique de base 104
4.5.2 Matériaux virtuels synthétisés 106
4.5.2.1 Synthèse à partir des données à haute résolution 106
4.5.2.2 Synthèse à partir des données à basse résolution 107
4.6 CONCLUSION 109

4.1 Introduction

Dans cette partie, nous présentons un algorithme de synthèse adapté aux matériaux composites tissés. Notre contexte est le suivant : une enveloppe de fil est fournie en entrée et l'algorithme synthétise un faisceau fibreux à l'intérieur de celle-ci. Comme cela a été indiqué au chapitre 2, la simulation du placement des fibres dans le fil présente un intérêt industriel indéniable, permettant d'obtenir une modélisation beaucoup plus réaliste qu'en considérant simplement le toron comme étant homogène, comme le font la plupart des approches existantes.

Nous opérons à deux échelles : la synthèse s'effectue à l'échelle microscopique c'est-à-dire l'échelle des fibres mais elle exploite des données d'entrée obtenues pour partie à l'échelle mésoscopique, c'est-à-dire celle du fil (enveloppe du fil, densité interne) et pour partie à l'échelle microscopique (diamètres des fibres, orientations). Ces paramètres peuvent être extraits directement à partir d'un bloc d'image tridimensionnel comme nous l'avons présenté dans la partie 3.2 ou encore être issue d'un modèle de synthèse tel que celui établi par [COU 11]. Notre objectif est de synthétiser l'ensemble des fibres dans l'enveloppe de fil avec un placement de fibres le plus réaliste possible.

Pour satisfaire cet objectif, deux stratégies de synthèse vont être proposées. La première approche est basée sur les processus de points tandis que la seconde s'inspire d'un algorithme de dynamique moléculaire. Ces deux stratégies partagent la même démarche: une étape d'initialisation bidimensionnelle consistant à placer la base des sections de fibres dans un plan en respectant les contraintes d'entrée, suivie d'une étape d'extrusion dans la troisième dimension, finalisant la synthèse volumique.

4.2 Méthode basée sur les processus de point

4.2.1 Présentation de la méthode

Au chapitre 3, nous avons vu qu'il était possible d'extraire différentes distributions de paramètres caractéristiques du matériau. Une fois ces caractéristiques extraites, il devient possible de proposer un algorithme de synthèse. Nous proposons une synthèse en deux étapes. La première étape d'initialisation procède en deux dimensions. Elle vise à placer les sections de fibres dans une section de l'enveloppe de fil et à déterminer leurs diamètres. La seconde étape revient à extruder les sections de fibre dans la dimension orthogonale à la tranche bidimensionnelle initiale, tout en respectant les orientations locales précédemment extraites.

<u>Initialisation :</u>

Une section 2D de l'enveloppe 3D du fil fournie en entrée est choisie comme point de départ. La loi de placement des fibres retenue s'inspire de la loi agrégée de Matérn [MAT 60] [MAT 86] puisque les positions des fibres sont tirées selon un processus poissonnien limité à l'enveloppe de fil.

Les diamètres de fibres quant à eux sont tirés selon une approximation gaussienne de la distribution des diamètres mesurés sur un échantillon réel. De plus, nous rendons impossible le placement d'une fibre si celle-ci est superposée à une fibre déjà placée (Figure 86).

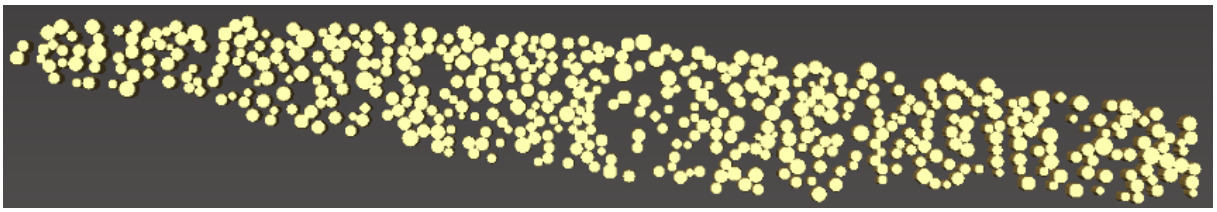


Figure 86 : Synthèse de sections de fibres dans une section de fil : placement de disques de diamètres aléatoires tirés selon l'approximation gaussienne de la distribution des diamètres réels, et de positions obtenues suivant un processus de Matérn modifié.

Des variantes plus réalistes de ce processus d'initialisation peuvent être obtenues, par exemple en contraignant la loi de placement des fibres avec une carte de densité issue de l'analyse d'un échantillon réel. On s'appuiera alors sur un processus de Cox [COX 55] en utilisant la carte de densité comme intensité conditionnelle de ce processus (paragraphe 2.2.3.2.1).

Extrusion :

Au cours de cette seconde étape chaque portion de fibre est prolongée de proche en proche par placement consécutif de cylindres respectant le diamètre retenu lors de la phase d'initialisation. Le placement de chaque cylindre est contraint par la nécessaire continuité de la fibre, par l'enveloppe de fil fournie en entrée, par une orientation et par l'impossibilité de superposition entre les cylindres de fibres voisines.

L'orientation peut être la même pour toute une section (orientation du fil pour la section). Elle peut aussi être fixée par une carte fournie en entrée (calculée sur le bloc réel) ou même générée aléatoirement d'après des lois de probabilités précédemment établies.

Un pas de travail est fixé en entrée de l'algorithme. Ce pas de travail définit la longueur de la portion sur laquelle nous considérons les fibres rectilignes. Ce pas de travail permet donc de déduire la hauteur des cylindres à placer en fonction de leur orientation. Ainsi, pour chaque pas de travail, chaque fibre est extrudée de la hauteur fixée en fonction de son orientation locale. Le parcours des fibres est aléatoire afin d'éviter de privilégier toujours les mêmes fibres vis à vis des contraintes de placement, de plus en plus sévères au fur et à mesure du placement des cylindres. La contrainte de continuité de notre fibre de synthèse, est garantie par le fait que les centres des bases de deux cylindres consécutifs doivent être superposés (Figure 87).

Lors de l'extrusion, si une superposition avec une fibre voisine ou un dépassement de l'enveloppe apparait, le cylindre n'est pas créé et l'orientation est modifiée selon une distribution de moyenne égale à l'orientation locale et d'écart type fixé en entrée en fonction de la tortuosité voulue du matériau.

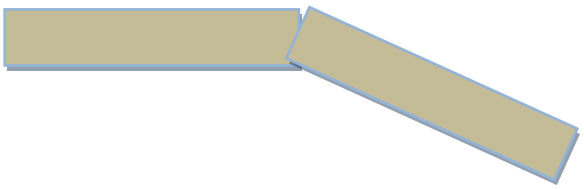


Figure 87 : Cylindres consécutifs en vue de dessus

En réalisant cette opération avec l'orientation moyenne du fil, nous obtenons le résultat suivant (Figure 88):

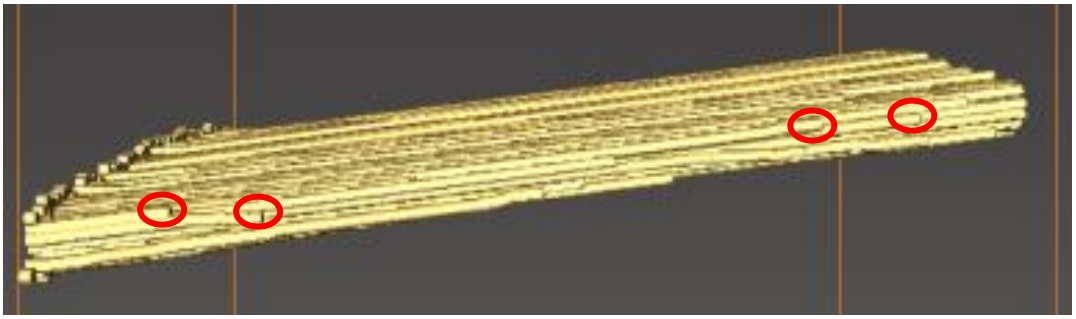


Figure 88 : Fibres extrudées dans une enveloppe de fil et contraintes par l'orientation moyenne du fil. Fibres interrompues en rouge

Ce résultat suit donc un modèle simple répondant aux contraintes suivantes :

- Diamètre de fibres constant
- Diamètres de fibres suivant une loi issue de l'étude du matériau réel
- Position initiale des fibres respectant le processus de Matérn modifié
- Fibres confinées dans l'enveloppe de fil à l'extrusion
- Les fibres ne se superposent pas

4.2.2 Limites de la méthode

Le résultat montré Figure 88 montre que plusieurs fibres sont prématurément arrêtées, principalement en bordure de fil. Cela est dû aux contraintes de non superposition avec d'autres fibres et au confinement des fibres dans l'enveloppe du fil. Cette enveloppe variant en forme et surface dans la profondeur, certaines fibres vont changer d'orientation au fur et à mesure de l'opération d'extrusion. Lors du placement d'un nouveau cylindre, ce changement de voisinage dans la profondeur va donner des configurations locales si denses qu'il sera impossible de placer un nouveau cylindre sans modifier le voisinage. Cette modification dynamique de voisinage n'étant pas mise en place, l'algorithme ne pourra converger et la fibre sera arrêtée.

Un moyen de résoudre ce problème est de modifier les tronçons précédents et les positions des fibres voisines jusqu'à convergence de l'algorithme. Ce type d'opérations itératives augmente significativement le coût calculatoire de l'approche et sa convergence n'est pas garantie. De plus, dès-lors que l'on modifie fortement le voisinage, l'orientation locale n'est plus suivie et la validité du bloc synthétisé ne peut plus être assurée.

En ce qui concerne le coût calculatoire, celui du placement initial bidimensionnel est directement contraint par la densité de l'enveloppe dans laquelle est réalisé le placement. Plus l'enveloppe est dense et donc de surface faible, plus le temps de convergence est élevé. Dans le cas extrême de forte densité l'algorithme peut être dans l'incapacité de converger sans gestion d'un processus de naissance et mort des éléments déjà placés augmentant là-encore significativement le temps de calcul déjà élevé.

4.3 Méthode basée sur la dynamique d'objets bidimensionnelle

4.3.1 Présentation de l'algorithme de Verlet

Ramené à sa phase initiale bidimensionnelle, notre objectif est de réussir à placer des objets circulaires (ou elliptique dans un contexte de placement plus général) sous différentes contraintes liées à leurs interactions ou à leur environnement : ces objets ne doivent pas se superposer ni sortir de l'enveloppe mais doivent respecter certaines contraintes de densité. Il s'agit en réalité d'un problème classique en dynamique moléculaire [CED 05] [ERC 97]. Nous nous sommes donc tournés vers les divers algorithmes utilisés dans ce champ scientifique. Nous choisissons l'algorithme proposé par L. Verlet qui est historiquement l'un des premiers introduit et surtout qui reste encore l'un des plus utilisé actuellement. De plus, cet algorithme répond particulièrement bien à notre objectif comme nous allons l'exposer dans les paragraphes qui vont suivre.

4.3.1.1 Algorithme de base

On se place dans le contexte simplifié d'un ensemble de disques se déplaçant sur un plan, et associé à un potentiel assurant que les disques ne se recouvrent pas et s'éloignent autant que possible les uns des autres. On simule leur déplacement en résolvant les équations de la dynamique, où le calcul de l'accélération découle de celui d'un jeu de forces F_i elles-mêmes induites par un jeu de potentiels U :

$$\vec{F} = -\nabla\vec{U} \tag{19}$$

$$\vec{a} = m\sum\vec{F} \tag{20}$$

L'algorithme de Verlet, [VER 67] en discrétisant ces équations, donne un couple d'équations permettant, en connaissant à l'instant t la position r, la vitesse v et l'accélération a d'un corps, de calculer à l'instant $t+dt$ sa position et sa vitesse.

$$r(t+\delta t) = r(t) + \delta t.v(t) + \frac{1}{2}\delta t^2 a(t) \tag{21}$$

$$v(t+\delta t) = v(t) + \frac{1}{2}\,\delta t[a(t) + a(t+\delta t)] \tag{22}$$

La première contrainte à introduire vise à écarter les disques les uns des autres. Dans ce but, il convient de fixer une loi de potentiel régissant les interactions inter-objets.

Le choix de cette loi potentielle est arbitraire dans le sens où aucune loi physique ne régit une répulsion inter-fibre dans un matériau tissé. La seule contrainte dans le choix de la loi est d'être positive et décroissante, pour traduire une répulsion. Le choix de la fonction exponentielle (cf. équation 23) permet d'avoir une interaction forte à courte distance et rapidement négligeable lorsque la distance augmente, favorisant ainsi la topologie locale du matériau.

Nous avons fait le choix d'utiliser un potentiel purement répulsif afin d'empêcher les fibres de se superposer. Le potentiel induit par un objet est défini par l'équation suivante :

$$U = -\sigma \exp\left(-\frac{d}{\sigma}\right) \quad \textbf{(23)}$$

où d est la distance à l'objet et σest une constante. La force induite par le potentiel décroit ainsi avec la distance à l'objet :

$$\vec{F_i} = -\nabla\vec{U} = \exp\left(-\frac{d}{\sigma}\right) \times \vec{n} \quad \textbf{(24)}$$

$\vec{n}$ est le vecteur unitaire de direction allant du centre de l'objet exerçant la force au centre de celui qui la subit.

σ influe sur la vitesse de décroissance de la force en fonction de la distance.

d est la distance entre deux objets (Figure 89) c'est-à-dire la distance entre deux centres de disques à laquelle on retranche le rayon de chaque disque.

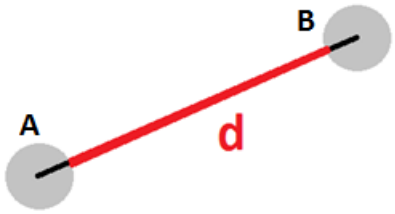


Figure 89 : Distance inter-fibre *d*

Ainsi, dans le cas d'un disque A de centre de coordonnées (x_A ,y_A), de diamètre D_A et d'un disque B de centre coordonnées (x_B , y_B), de diamètre D_B ; la distance inter-disque est définie comme suit :

$$d = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} - D_A - D_B \quad \textbf{(25)}$$

La distance ainsi définie n'est pas positive dans le cas de superpositions inter-disques. Pour en assurer la positivité, nous la redéfinissons continue par morceau de la manière suivante :

$$d = \begin{cases} \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} - D_A - D_B \,, & D_A + D_B < \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} \\ 0 \quad , & sinon \end{cases} \quad \textbf{(26)}$$

Une implémentation de l'algorithme de Verlet est présentée à la Figure 90. L'arrêt de l'algorithme est conditionné par l'énergie cinétique du système (noté *Ec* dans l'algorithme Figure 90). Lorsque celle-ci n'évolue plus, ou n'évolue que très peu, on considère que le système a convergé. Pour chaque itération et pour chaque fibre, les interactions entre couple de fibres voisines sont calculées. Sont considérées comme fibres voisines, les fibres étant à une distance inférieure à une distance seuil d_{max}. L'influence du paramètre d_{max} est évaluée dans la partie 4.3.1.2. A partir des interactions ainsi que du pas de temps noté *dt*, fixé en entrée, les nouvelles valeurs des positions, vitesses et accélération des fibres sont calculées.

La complexité calculatoire de l'algorithme dépend essentiellement du calcul des forces. Elle est de l'ordre de N^2, où N est le nombre d'objets en interaction.

Ainsi donc, pour chaque itération de l'algorithme de Verlet et pour chaque fibre, l'ensemble des forces de répulsion pour chaque couple de fibre est évalué. A partir de ces forces, l'accélération et la vitesse en à $t+\delta t$ sont calculées.

```
Tant que Ec non constante
        0 →Ec
        Pour chaque fibre
            0 →a(1)
            r(0) + dt*v(0) + 0.5*dt*dt*a(0)→r(1)

            Pour chaque fibre telle queDistance<d_max
                a(1) + exp(-distance/sigma)*(fibreVoisine.r(1) - r(1))/‖fibreVoisine.r(1)-r(1))‖→a(1)
            Fin pour

            v(0) + 0.5*dt*(a(0)+a(1)) → v(1)

            r(1) → r(0)
            v(1) → v(0)
            a(1) → a(0)

            Ec→Ec + 0.5*v(0)*v(0)
        Fin pour
Fin tant que
```

Figure 90 : Algorithme de Verlet pour le placement de fibres

4.3.1.2 Estimation des paramètres de l'algorithme de Verlet

L'algorithme de Verlet, présenté précédemment, utilise un jeu de paramètres qui doit être calibré afin que ce dernier donne le résultat le plus réaliste possible.

<u>Paramètre σ</u> :

σ régit la vitesse de décroissance de la force en fonction de la distance. Voici quelques éléments pour faciliter le choix de ce paramètre.

Soit S la surface de l'espace de travail contenant les objets en interaction (ici, l'enveloppe du fil), notons s^2 la surface moyenne carrée occupée par objet après convergence de l'algorithme et N le nombre de fibres. s est donc la distance moyenne entre deux centres d'objet pour un agencement final carré.

$$s = \sqrt{\frac{S}{N}} \tag{27}$$

Il est raisonnable de prendre comme distance caractéristique du potentiel (σ) la distance inter-fibre après convergence de l'algorithme (s). Nous allons prendre un σ de plus faible ordre de grandeur afin de diminuer les énergies locales et donc les risques de divergence de l'algorithme. Nous utilisons:

$$\sigma = \frac{s}{coef} = \frac{1}{coef} * \sqrt{\frac{S}{N}} \quad \textbf{(28)}$$

Une valeur sera proposée un peu plus loin pour la constante *coef*.

Paramètre d_{max}:

Dans le but de réduire le temps de calcul, le paramètre supplémentaire d_{max} a été introduit. Il correspond à la distance d'interaction maximale au delà de laquelle les forces de répulsion deviennent négligeables et ne sont pas calculées.

En considérant que les forces sont négligeables lorsqu'elles sont inférieures à 0.01:

$$F_{max} < 0.01 \quad \textbf{(29)}$$

$$\exp\left(\frac{-d_{max}}{\sigma}\right) < 0.01 \quad \textbf{(30)}$$

$$d_{max} > -\ln(0.01) * \sigma \quad \textbf{(31)}$$

$$d_{max} > 4.6\sigma \quad \textbf{(32)}$$

On choisit :$d_{max} = 5\sigma$

Par ailleurs, il peut être judicieux de choisir $d_{max} = s$ c'est-à-dire qu'il n'y ait plus d'interaction entre fibres lorsque l'on est au dessus de la distance moyenne inter-fibre à convergence, ce qui nous donne donc :

$$s = 5\sigma \quad \textbf{(33)}$$

D'après (28) :

$$s = 5 * \frac{s}{coef} \quad \textbf{(34)}$$

On peut donc prendre *coef* = 5 dans le cas où l'on considère la force négligeable en dessous de 0.01.

Paramètre *dt* :

dt représente le pas de temps de chaque itération.

A *t=0*, notons E_{init} l'énergie globale initiale du système. Les vitesses étant nulles à *t=0*, l'énergie initiale n'est que de l'énergie potentielle. De plus, la seule force imposée est issue d'un potentiel donc le système est conservatif. Le système ne gagnant pas d'énergie au cours du temps, au bout d'un temps assez long l'énergie potentielle globale et l'énergie cinétique seront égales.

$$\lim_{\infty} Ep = \lim_{\infty} Ec = \frac{E_{init}}{2} \quad \textbf{(35)}$$

Pour estimer δt, on peut poser que la vitesse moyenne *v* est égale à:

$$v = \frac{\delta d}{\delta t} \tag{36}$$

Avec δd le pas de déplacement moyen (que nous pouvons fixer à un pixel par exemple pour obtenir une déplacement faible par itération mais non négligeable), on peut donc écrire:

$$\lim_{\infty} Ec = \frac{E_{init}}{2} \tag{37}$$

$$\sum \frac{1}{2} v^2 = \frac{E_{init}}{2} \tag{38}$$

$$\sum \frac{1}{2} \left(\frac{\delta d}{\delta t}\right)^2 = \frac{E_{init}}{2} \tag{39}$$

$$N * (N-1) * \frac{1}{2} \left(\frac{\delta d}{\delta t}\right)^2 = \frac{E_{init}}{2} \tag{40}$$

$$\delta t = \sqrt{\frac{N(N-1)}{E_{init}}} * \delta d \tag{41}$$

Dans notre cas, nous fixons le déplacement final moyen par itération à 1 pixel ce qui donne donc :

$$\boxed{\delta t = \sqrt{\frac{N(N-1)}{E_{init}}}} \tag{42}$$

Une fois les différents paramètres de l'algorithme détaillés, nous pouvons passer à la mise en œuvre de l'algorithme lui même.

4.3.1.3 Cas d'étude simplifié

Tel qu'il a été défini ci-dessus l'utilisation de l'algorithme de Verlet ainsi configuré permet un placement des fibres, ou plutôt des disques symbolisant leurs sections, de manière homogène dans l'espace de travail. Par « homogène », nous entendons que les écarts inter-fibres sont maximisés et répartis de façon uniforme dans l'espace de travail.

Afin de tester cette version de l'algorithme de Verlet, nous allons utiliser un espace de travail périodique afin d'éviter que les objets ne se dispersent à l'infini, tout en n'ayant pas à gérer l'enveloppe d'un fil. Pour cela, le calcul de distance précédemment établi sera légèrement modifié. En effet, la distance sera calculée comme précédemment mais dans les huit configurations possibles (Figure 91). Seule la configuration qui minimise la distance sera conservée.

En utilisant l'algorithme défini précédemment, on obtient comme attendu un système dans lequel les écarts inter-fibres sont maximisés et répartis de façon homogène (Figure 92). Ainsi, avec une telle configuration il n'y a pas de superposition entre les fibres voisines mais pour autant le résultat n'est pas encore réaliste. En effet, la configuration finale n'a que très peu de points communs avec une section de fils, aucune enveloppe n'est visible et la densité y est totalement homogène. Il va donc falloir rajouter des contraintes au modèle pour que le système final soit réaliste.

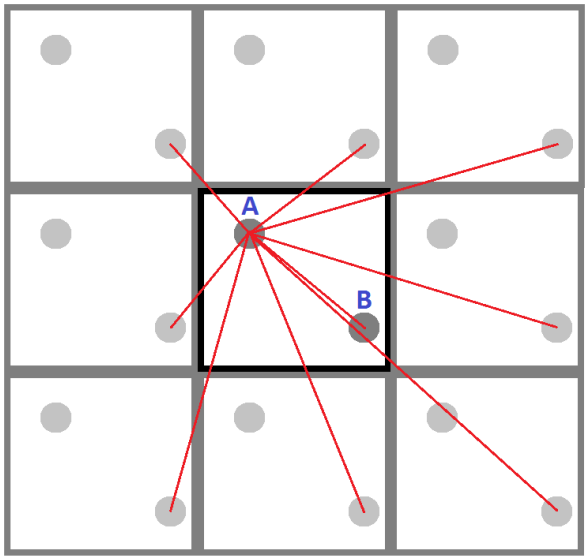


Figure 91 : Espace de travail périodique, exemple des possibilités de distances entre les fibres A et B

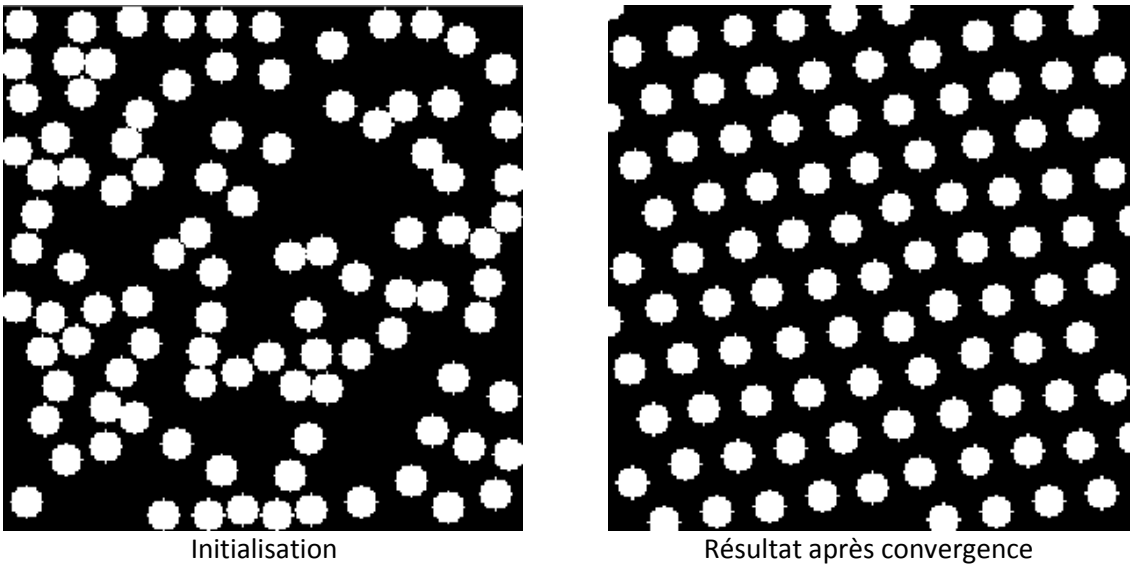


Figure 92 : Utilisation de l'algorithme de Verlet dans le cas d'un espace de travail périodique pour des fibres de même diamètre

4.3.1.4 Accélération de l'algorithme initial

Avant d'incorporer les contraintes supplémentaires à l'algorithme pour qu'il permette d'obtenir un résultat de synthèse réaliste, nous lui apportons deux modifications mineures qui rendent sa convergence plus rapide.

<u>Annulation de la vitesse globale:</u>

En l'état, l'algorithme de Verlet peut arriver à convergence en admettant une vitesse globale non nulle ce qui se manifeste par une translation globale de tout le système. Si cela n'est pas dérangeant pour un système périodique, il peut en être autrement pour un système contraint par une enveloppe. De plus, la valeur de cette vitesse résultante peut être très élevée ce qui peut être problématique. En effet, si cette vitesse est grande, sur une seule itération

chaque objet fera un grand déplacement traversant potentiellement des fibres plus ou moins éloignées et donc ne tenant pas compte de toutes les interactions. Annuler la vitesse globale permet d'assurer que ce type de comportement n'aura pas lieu et donc que l'algorithme aura un comportement plus approprié. La vitesse résultante globale du système sera donc annulée à chaque itération.

Frottements:

Afin de diminuer le temps de calcul tout en facilitant la convergence, nous modifions la seconde équation de l'algorithme de Verlet en ajoutant un frottement (noté *f*) dans le but de ralentir le déplacement des objets.

$$v(t+\delta t) = f * v(t) + \frac{1}{2}\,\delta t[a(t) + a(t+\delta t)] \quad , \quad f \in [0\,;1] \tag{43}$$

Cette modification change le critère d'arrêt de l'algorithme. En effet, l'énergie cinétique du système ne tendra plus vers une énergie constante mais sera décroissante et tendra vers zéro. L'arrêt de l'algorithme survient donc lorsque l'énergie cinétique du système est proche de zéro.

En incorporant ces deux modifications, l'algorithme devient (Figure 93) :

```
Tant queEc n'est pas proche de zéro
        0 →Ec
        0 →Vtot

        Pour chaque fibre
            0 →a(1)
            r(0) + dt*v(0) + 0.5*dt*dt*a(0)→r(1)

            Pour chaque fibre telle que distance<dmax
                a(1) + exp(-distance/sigma)*(fibreVoisine.r(1) - r(1))/‖fibreVoisine.r(1)-r(1))‖ →a(1)
            Fin pour

            f*v(0) + 0.5*dt*(a(0)+a(1)) → v(1)
            Vtot + v(1) →Vtot

            r(1) → r(0)
            v(1) → v(0)
            a(1) → a(0)

                Ec→Ec + 0.5*v(0)*v(0)
        Fin pour

        Pour chaque fibre
                v(0) – Vtot/Nombre_fibre → v(0)
        Fin pour
Fin tant que
```

Figure 93 : Algorithme de Verlet avec ajout (bleu) d'un frottement et annulation de la vitesse résiduelle

4.3.2 Adaptation à la synthèse 2D de sections de fils

Dans cette partie, nous allons aborder la mise en œuvre de nouvelles contraintes permettant de rendre le résultat de synthèse bidimensionnel obtenu par l'algorithme plus réaliste. Les contraintes ajoutées vont permettre de confiner le résultat final dans une enveloppe de fil fournie en entrée mais aussi d'obtenir une densité non homogène dans le fil.

4.3.2.1 Confinement dans une enveloppe de fil

La première étape consiste à confiner l'ensemble des fibres dans l'enveloppe d'un fil. Pour cela, une enveloppe de fil est fournie en entrée issue soit de l'étude d'une image tridimensionnelle ou de la simulation d'un tissage. Elle prend la forme d'une image binaire, comme nous l'illustrons à la Figure 94 (en haut).

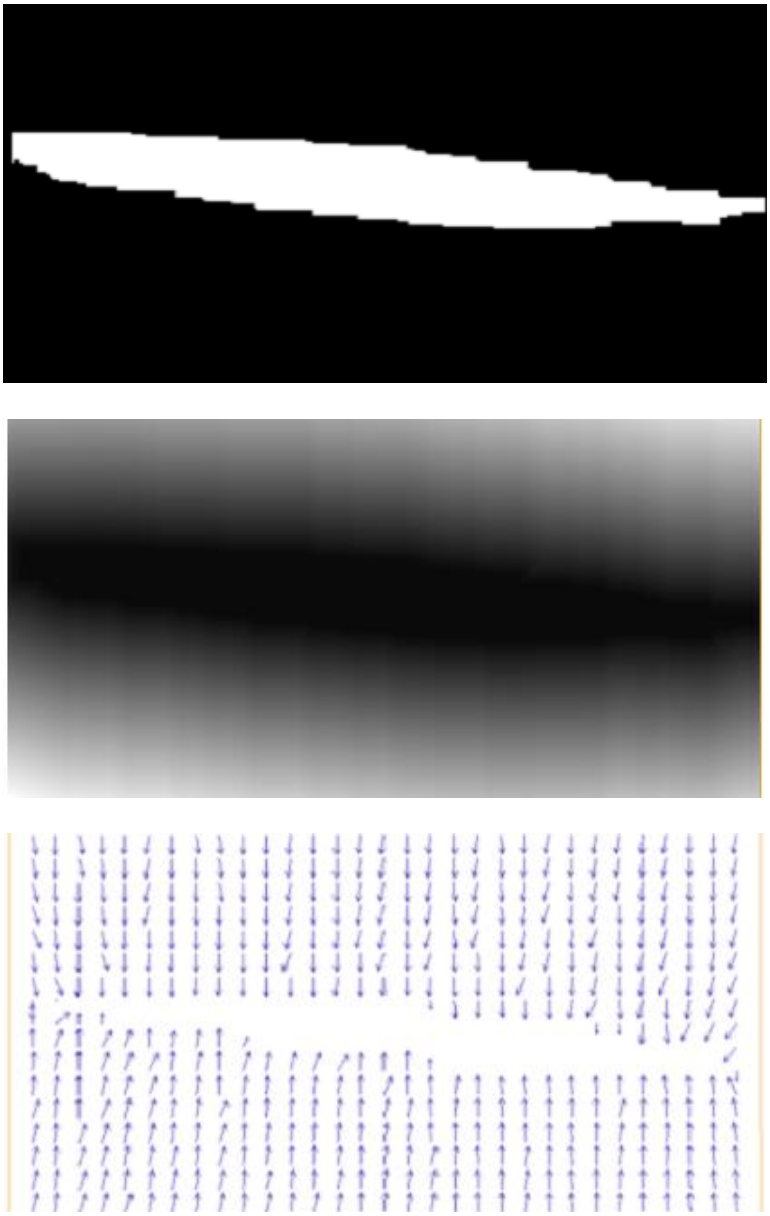


Figure 94 : Champs de force ramenant les fibres dans l'enveloppe de fil : Enveloppe de fil en blanc (en haut), carte de distance en niveau de gris (au centre, distance faible en noir, forte en blanc), champs de force issue de la carte des distances

La problématique est donc ici d'introduire cette contrainte d'enveloppe au sein de l'algorithme de Verlet. En d'autres termes, cela revient à contraindre un procédé physique (la dynamique moléculaire) par une image connue a priori (l'enveloppe de fil). Cette problématique, rencontrée dans le contexte de la reconstruction atomistique de pyrocarbones [LEY 09], peut être solutionnée en intégrant un potentiel supplémentaire, appelé « potentiel image », à l'algorithme de synthèse.

Dans le même esprit, nous allons introduire un potentiel supplémentaire dans l'algorithme de Verlet qui interviendra au niveau du calcul des forces. Ce potentiel doit générer des forces à l'extérieur de l'enveloppe (Figure 94 en haut) ayant comme objectif de ramener les fibres à l'intérieur de l'enveloppe. Pour cela nous choisissons un potentiel noté $g_{croissante}$ dans le nouvel algorithme Figure 95), qui s'appuie sur une carte des distances à l'extérieur de l'enveloppe (Figure 94 au centre). Il a pour contrainte d'être croissant, et vise à obtenir un champ de force orienté vers l'enveloppe (Figure 94 en bas).

```
Tant que Ec n'est pas proche de zéro
        0 →Ec
        0 →V_tot

        Pour chaque fibre
            0 →a(1)
            r(0) + dt*v(0) + 0.5*dt*dt*a(0)→r(1)

            Pour chaque fibre telle quedistance<d_max
                a(1) + exp(-distance/sigma)*(fibreVoisine.r(1) - r(1))/‖fibreVoisine.r(1)-r(1))‖→a(1)
                Si r(0) ∈ enveloppe
                    a(1) - ∇g_croissante (Distance)→a(1)
                sinon
                    a(1) - ∇g_décroissante (Densité)→a(1)
                Fin si
            Fin pour

            f*v(0) + 0.5*dt*(a(0)+a(1)) → v(1)
            V_tot + v(1) →V_tot

            r(1) → r(0)
            v(1) → v(0)
            a(1) → a(0)

            Ec→Ec + 0.5*v(0)*v(0)
        Fin pour

        Pour chaque fibre
                v(0) – Vtot/Nombre_fibre → v(0)
        Fin pour
Fin tant que
```

Figure 95 : Algorithme de Verlet modifié avec ajout (bleu) du potentiel image pour le confinement dans l'enveloppe du fil et pour prendre en compte la carte des densités locales de fibre

L'algorithme de Verlet ainsi modifié (Figure 72) permet d'obtenir une section de fil réaliste au sens de son enveloppe. De plus, si le nombre de fibres et la distribution de leurs diamètres sont en accord avec les résultats extraits sur des données réelles (paragraphe 3.5.2), il est possible d'obtenir un résultat synthétique cohérent (Figure 96). Il est important de noter qu'à ce stade, à l'intérieur de l'enveloppe, les seules forces en présence sont imposées par le potentiel répulsif inter-fibres. Il est donc prévisible que les écarts inter-fibre soient à la fois maximaux et homogènes sur toute la surface de l'enveloppe, ce que l'on constate effectivement sur la Figure 96.

Ce type de résultat de synthèse s'avère déjà intéressant pour simuler des matériaux modèles maximisant l'infiltrabilité d'un fil. Les indicateurs morphologiques qui en résulteront fourniront des valeurs limites des propriétés d'intérêt.

Pour autant, les textures résultantes ne sont pas réalistes. En effet, les opérations de tissage et les diverses contraintes subies par les renforts fibreux conduisent souvent à des répartitions non homogènes des fibres dans le fil comme nous avons pu le montrer au chapitre précédent sur les données tomographiques. Il convient de prendre en compte ce phénomène pour une simulation plus conforme aux véritables matériaux.

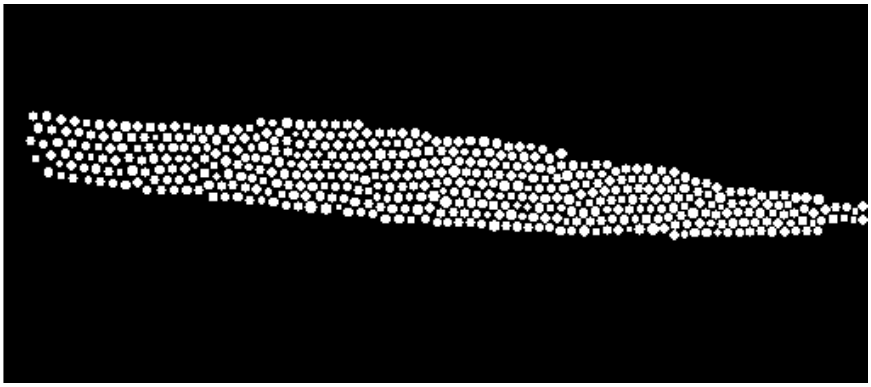


Figure 96 : Résultat de l'algorithme de Verlet avec intégration du potentiel image contenant les fibres dans l'enveloppe de fil

4.3.2.2 Gestion de la densité

Dans le but de rendre le résultat de synthèse bidimensionnelle le plus proche possible d'une section de fil réel, il faut rajouter une contrainte pour avoir une densité non homogène. Pour cela, nous opérons de manière similaire à la contrainte d'enveloppe de fil en rajoutant un potentiel image densité dans l'algorithme de Verlet (Figure 97).Les zones de forte densité doivent attirer les objets, la valeur du potentiel doit donc y être faible. Inversement, les zones de faible densité doivent moins attirer les objets, les potentiels doivent y être élevés. Le potentiel doit donc être une fonction décroissante de la densité, noté $g_{décroissante}$ (Figure 95).Ce potentiel image densité peut être soit généré par simulation numérique, soit être extrait d'une donnée existante comme présenté dans la partie 3.4.3 (voir Figure 72).

Figure 97 : Image du champ potentiel de densité représenté en niveaux de gris : potentiel fort en blanc et faible en noir.

La version de l'algorithme décrite à la Figure 95 permet donc d'obtenir des images bidimensionnelles de sections de fils contraintes par une enveloppe de fil et par une carte de densité. Elle est appliquée (Figure 98) sur des données issues de matériaux réels (enveloppe de fil, carte de densité, distribution de diamètres) .La distribution des diamètres de fil est conforme à celle observée sur un matériau réel. Les fibres ne se superposent pas et restent confinées dans l'enveloppe du fil. La carte de densité obtenue est globalement proche de celle fournie en entrée. Les écarts constatés sont principalement dus au fait que même si les diamètres de fibres sont tirés selon une distribution réaliste, il reste improbable que les diamètres des fibres obtenus en un point donné soient en cohérence avec ceux ayant donné la carte de densité utilisée en entrée.

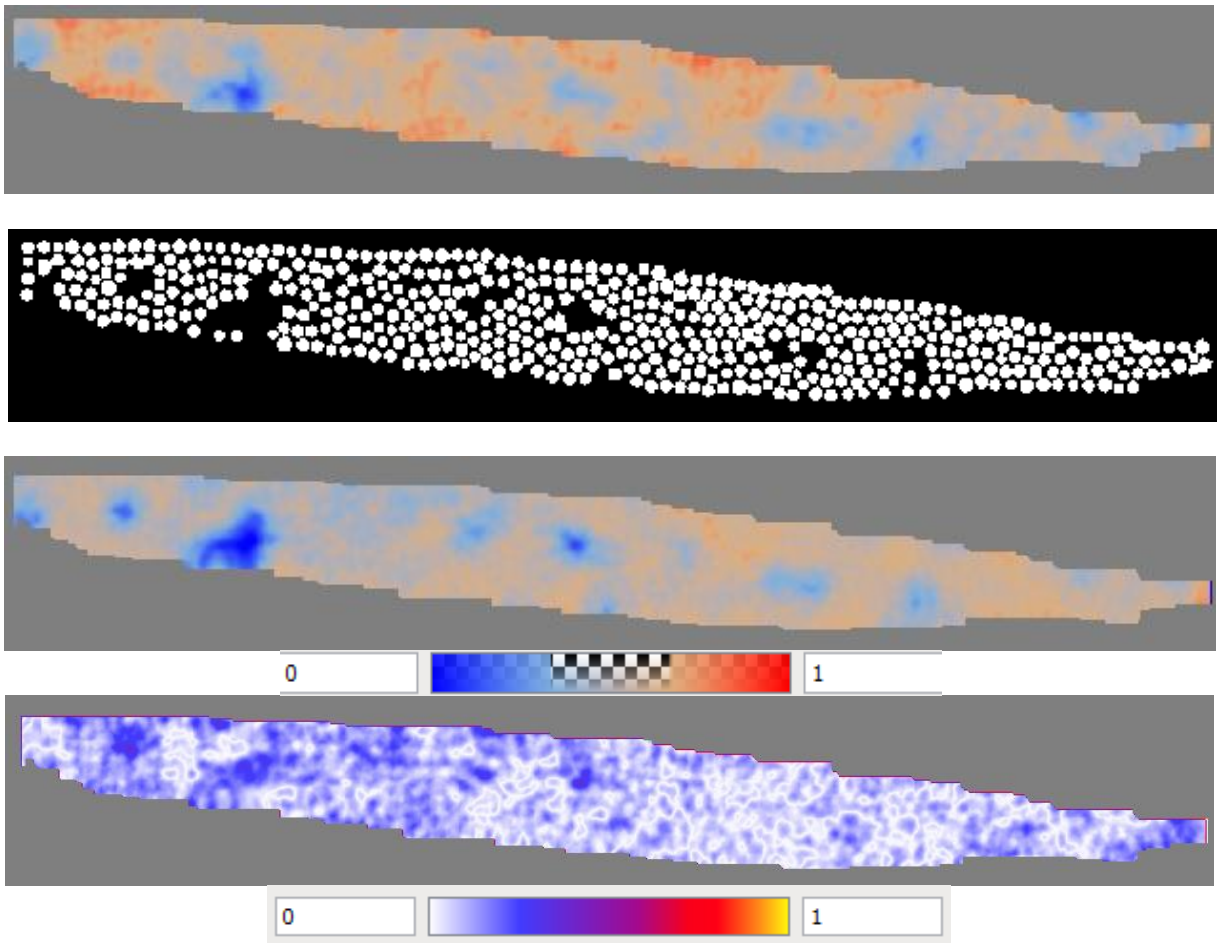


Figure 98 : Carte de densité d'entrée, résultat de synthèse associé, carte de densité du résultat, carte d'erreur de densité (de haut en bas). L'erreur maximale est de 20% (bleu foncé)

4.4 Prolongement au cas tridimensionnel

La version de l'algorithme de Verlet présentée au paragraphe précédent va servir de base à la synthèse tridimensionnelle des fibres en vue de générer un fil virtuel aussi réaliste que possible. Pour cela, il reste à étendre le processus de synthèse pour obtenir un bloc virtuel tridimensionnel. Les fibres synthétisées devront être continues et de diamètre constant. Elles devront rester confinées dans l'enveloppe de fil et respecter la carte de densité locale tout au long du fil.

4.4.1 Présentation de la méthode

La méthode d'extrusion proposée s'inspire largement de celle développée dans la partie 4.2. En effet, l'algorithme de Verlet bidimensionnel modifié précédemment générera une première tranche du bloc tridimensionnel. Cette première tranche servira d'initialisation pour l'extrusion tridimensionnelle, qui quant à elle reposera sur la synthèse de cylindres mis bout à bout pour créer la fibre.

Plus précisément, l'algorithme de synthèse tridimensionnelle (Figure 99) fonctionne de la manière suivante. La synthèse de fibres est réalisée tranche par tranche (pour des tranches orthogonales à la direction du fil) pour une distance inter-tranche fixée en entrée

(noté $pas_{spatial}$). Une première tranche est synthétisée à l'aide de l'algorithme de la partie 4.3.2.2, les positions des disques représentant les fibres étant initialisées aléatoirement dans l'espace de travail.

L'algorithme passe ensuite à la tranche suivante c'est-à-dire la tranche espacée d'un écart $pas_{spatial}$. Les cartes de densité et l'enveloppe utilisées sont alors actualisées pour prendre en compte les nouvelles contraintes locales. Le résultat de synthèse 2D de la tranche précédente est utilisé comme initialisation des positions des disques pour le traitement de la tranche courante. Cela permet à la fois de réduire significativement le temps de calcul mais aussi d'assurer un faible déplacement des disques. En effet, pour un $pas_{spatial}$ faible, les contraintes varient faiblement compte tenu de la continuité et de la rigidité relative des fibres. Ainsi, le positionnement des fibres de synthèse entre deux tranches espacées faiblement est très proche. Le nombre d'itérations nécessaire à l'algorithme de Verlet modifié pour converger est donc faible.

Une fois la deuxième tranche générée, il reste à transformer ces deux résultats bidimensionnels en un bloc tridimensionnel fin. Pour cela, le centre de chaque disque de la première tranche est considéré comme centre de la base d'un cylindre dont la deuxième base est le centre du disque correspondant dans la seconde image de synthèse. Ainsi, toutes les fibres prennent la forme d'un cylindre de faible hauteur. Ces opérations sont réitérées tranche par tranche, jusqu'à extrusion totale du bloc de synthèse désiré.

Notons que cet algorithme nécessite un pas de temps assez faible et un pas spatial faible pour obtenir un résultat pertinent. En effet, si l'un des pas est trop grand, les modifications et les déplacements induits par l'algorithme de Verlet seront trop importants et risquent de produire des recouvrements de fibres qui sont, par la nature même des matériaux, irréalistes.

```
1   Appliquer l'algorithme de Verlet2D (version Figure 95) à la section 2D n°0
2
3   Pour chaque pas_spatial
4       Pour chaque fibre de tranche - pas_spatial
5           Initialisation des positions r(0) des fibres de (tranche) par les positions de fibres de
6           (tranche - pas_spatial)
7       Fin pour
8
9       Appliquer l'algorithme de Verlet2D (version Figure 95) à la section 2D n° (tranche)
10
11      Pour chaque fibre
12          Construire en sortie un cylindre
13              diamètre : diamètre de la fibre
14              centre de base n°1 : centre du disque de la fibre dans (tranche)
15              centre de base n°2 : centre du disque de la fibre dans (tranche-pas_spatial)
16      Fin pour
17  Fin pour
18
```

Figure 99 : Algorithme de synthèse

4.4.2 Etude de la courbure des fibres 3D synthétisées

Malgré les contraintes imposées, les fibres obtenues admettent une tortuosité excessive (Figure 100). Dans le but de corriger ce défaut, une première solution consiste à augmenter le

pas spatial. Cette augmentation doit toutefois rester raisonnable afin d'autoriser une courbure compatible avec la souplesse des fibres. Aussi, deux modifications sont apportées à l'algorithme :

- Prendre en compte une notion de masse dans la gestion des objets
- Utiliser la continuité des fibres pour anticiper le placement après convergence

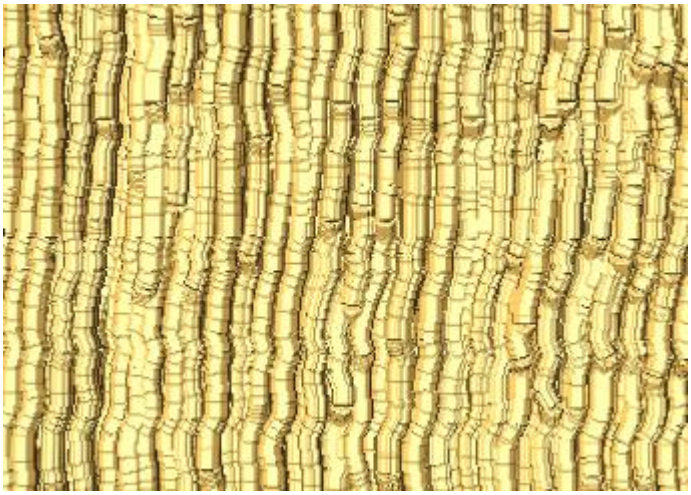


Figure 100 : Résultat de synthèse tridimensionnelle, vu de dessus avec forte tortuosité malgré les contraintes d'enveloppe et de densité

En effet, ce problème de tortuosité est induit par un trop fort déplacement des fibres d'une tranche à l'autre. Les modifications proposées ont donc pour objectif de rendre les fibres plus rigides, en diminuant les déplacements des disques symbolisant les fibres.

Taille des cylindres :

Le pas spatial influe intrinsèquement sur la tortuosité des fibres de sortie. En effet, ce paramètre agit directement sur la taille des éléments cylindriques utilisés pour synthétiser les fibres. Ainsi, plus le pas spatial est grand et plus la fibre est rigide. Mais choisir un pas trop grand conduit à ce que les axes des fibres prennent la forme d'une ligne brisée. Inversement, plus le pas est petit et plus la forme de la fibre est respectée mais plus sa construction est sensible aux variations locales d'orientation et d'enveloppe.

Masse :

La première modification opère au niveau de l'algorithme de synthèse 2D. Dans la partie 4.3.1, nous avons établi des forces de répulsion pour lesquelles les masses mises en jeu sont implicitement unitaires (cf. équation (20)). Pour diminuer le déplacement des fibres, nous faisons explicitement apparaitre le terme de de masse qui va permettre de rendre le système moins élastique. Chaque pixel d'un disque est doté d'une masse notée m_0, proportionnelle à sa surface. Il suffit pour cela d'insérer la ligne suivante après le calcul de l'accélération :

$$a(1) \times m_0 \times Diamètre^2 \times \pi \rightarrow a(1)$$

Cette modification réduit la tortuosité du bloc de synthèse.

Utilisation du barycentre de l'enveloppe :

La seconde modification appliquée à l'algorithme concerne la phase d'initialisation pour chaque tranche. L'algorithme de synthèse 3D originel initialise la position des disques de

la nouvelle tranche sur les positions finales (après convergence) obtenues pour la tranche précédente. Or, d'une tranche à l'autre, la section d'enveloppe utilisée change et les positions d'initialisation doivent être changées en conséquence.

Dans le but de disposer d'une initialisation plus pertinente, nous allons utiliser le déplacement du barycentre de la section d'enveloppe entre deux tranches (noté $V_{Déplacement}$ dans la Figure 101). Cette information permet d'approximer le déplacement global des disques et donc de faciliter la convergence de l'algorithme, et surtout, de rendre le résultat moins tortueux en diminuant les déplacements des disques.

$$\overrightarrow{V_{Déplacement}} = \overrightarrow{B_0B_1}$$

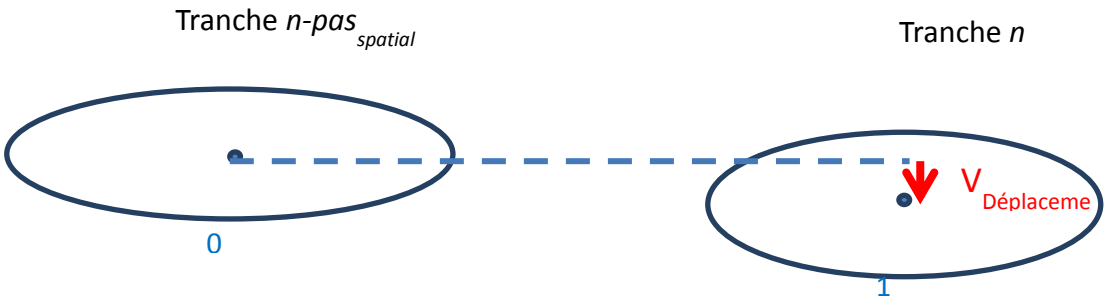


Figure 101 : Schéma de calcul du déplacement du barycentre d'une tranche à la suivante

Suite à ces trois modifications, la tortuosité excessive du matériau de synthèse a été fortement réduite et donc la topologie des fibres obtenues en sortie semble visuellement plus proche de celle d'un matériau réel (Figure 102, Figure 103).

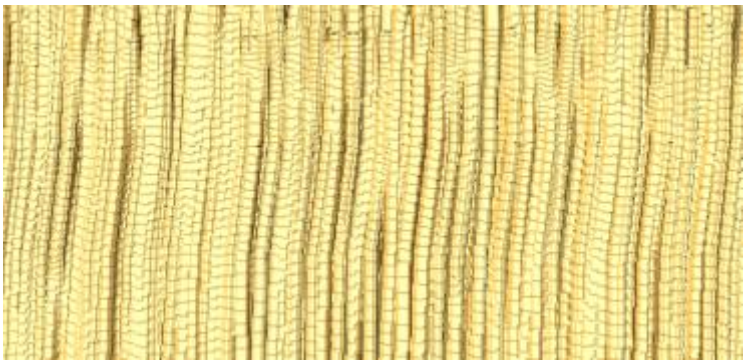


Figure 102 : Résultat de synthèse tridimensionnel en vue de dessus avec contraintes de masse, de barycentre et des éléments cylindriques de l'ordre de 80 pixels de hauteur

Une autre piste aurait pu être étudiée pour réduire les phénomènes d'oscillations, en prenant en compte les cartes d'orientations locales. Cette voie ajouterait plus de réalisme mais demanderait de prendre en compte deux cartes de potentiels supplémentaires et donc d'augmenter fortement la quantité de données d'entrées mais aussi le temps de calcul. Elle constitue pour autant une perspective digne d'intérêt.

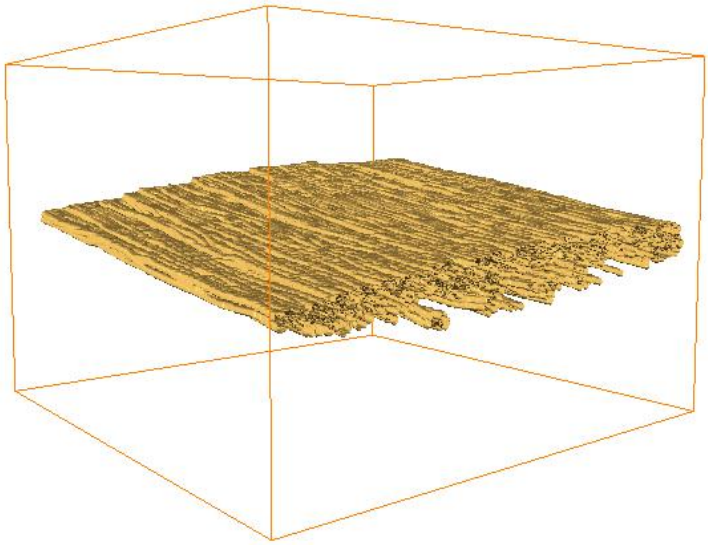


Figure 103 : Résultat de synthèse tridimensionnelle

4.5 Résultats de synthèse

Le but général de la synthèse de renfort de matériaux thermostructuraux dans laquelle s'inscrit ce travail est de permettre la synthèse d'un assemblage de fils et des fibres qui les composent, pour ensuite en simuler l'imprégnation matricielle. Cette synthèse doit se faire sous la contrainte de paramètres fixés par un opérateur (par exemple la simulation d'un nouveau tissage fournissant les enveloppes théoriques de fils) mais aussi de connaissances issues de l'analyse de matériaux réels (par exemple le comportement de fibres en termes de densité et de cisaillement, aux points de contact des fils).

Dans la suite, nous nous concentrons sur la synthèse de fibres, connaissant à priori les enveloppes de fils et différentes informations morphologiques relatives aux fibres, telles que leur densité locale et leur diamètre.

Pour y parvenir, nous allons nous intéresser aux résultats obtenus par l'algorithme de synthèse (parties4.1-4.1) et comparer les effets des différents paramètres : Les résultats de synthèse de fibres sur les enveloppes extraites à basse et à haute résolution vont être présentés. Les distributions de diamètres de fibres ainsi que les cartes de densité précédemment obtenues serviront de contraintes pour réaliser une synthèse réaliste. En ce qui concerne les comparaisons des paramètres, nous allons nous concentrer sur les paramètres suivants:

- Amplitude du potentiel « densité », distance à l'enveloppe (cf. partie 4.3.2)
- Masse (cf. partie 4.4.2)
- Taille de l'élément cylindrique de base (cf. partie 4.4.2)

4.5.1 Evaluation de l'effet des paramètres

Pour commencer, nous allons étudier les effets des différents paramètres sur la qualité et le réalisme du résultat de synthèse.

4.5.1.1 Amplitude du potentiel densité et de la distance à l'enveloppe

Intéressons-nous aux deux potentiels utilisés dans l'algorithme de synthèse. Ces deux potentiels sont liés au potentiel de répulsion inter-fibres et donc la valeur relative de chacun par rapport à l'autre est choisie en fonction de la valeur du potentiel inter-fibre qui reste fixe. Pour les comparaisons qui vont suivre, nous ferons donc varier l'un des potentiels sans faire varier le second.

Potentiel densité :

Pour rappel, ce potentiel contraint le placement des fibres à l'intérieur de l'enveloppe de fils afin que leur placement respecte une cartographie de la densité locale souhaitée que nous fournissons en entrée. Dans l'algorithme de synthèse que nous utilisons, nous pondérons l'amplitude du potentiel de densité. C'est donc ce paramètre plus précisément que nous allons faire varier.

La Figure 104 met en parallèle les résultats obtenus pour différents ordres de grandeur du potentiel densité. On peut remarquer que pour un potentiel densité trop faible, la répartition des fibres tend à être homogène dans l'enveloppe de fil. Inversement, lorsque le potentiel densité est trop fort, les fibres ont tendance à se superposer dans les zones de faible densité quitte à ne plus respecter la contrainte de non recouvrement (le potentiel densité prend le pas sur la force de répulsion inter-fibres). Un compromis doit donc être effectué afin de garantir le non-recouvrement entre fibres tout en respectant la carte de densité fournie en entrée.

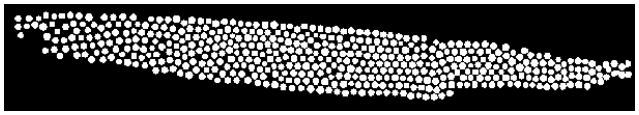
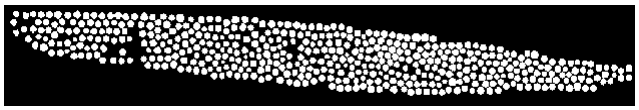
Pondération	Exemple de tranche de synthèse 3D	Temps de calcul
Faible (0.1)		6350s
Moyenne (1)		6450s
Forte (10)		6500s

Figure 104 : Comparaison des effets de la pondération de l'amplitude de la carte de densité (normalisée par rapport à la densité moyenne) sur le résultat de synthèse. Résultat extrait d'une simulation composée de 100 tranches (avec masse à 0.5 et une longueur de cylindre à 14µm)

Pour valider la pondération de l'amplitude de la carte de densité que nous utiliserons avec plus de finesse qu'une validation visuelle, nous gérerons une carte de densité de fibres dans le fil sur le matériau virtuel que nous comparons ensuite avec la carte d'entrée. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 105, la densité obtenue en fin de synthèse est comparée avec la carte de densité fournie en entrée. La carte d'erreur montre que la carte de densité obtenue après synthèse est proche de celle fournie en entrée ce qui valide le choix paramétrique réalisé. Comme remarqué dans un paragraphe précédent, certaines zones montrent des erreurs non nulles, que l'on peu expliquer par le fait qu'il est improbable d'obtenir en sortie une carte de densité parfaitement égale à celle d'entrée. Cela nécessiterait

d'avoir une répartition spatiale des diamètres de fibres exactement identique à la disposition du bloc de données dont la carte de densité d'entrée est extraite ce qui reste peu probable en considérant le tirage aléatoire des diamètres qui est effectué ici.

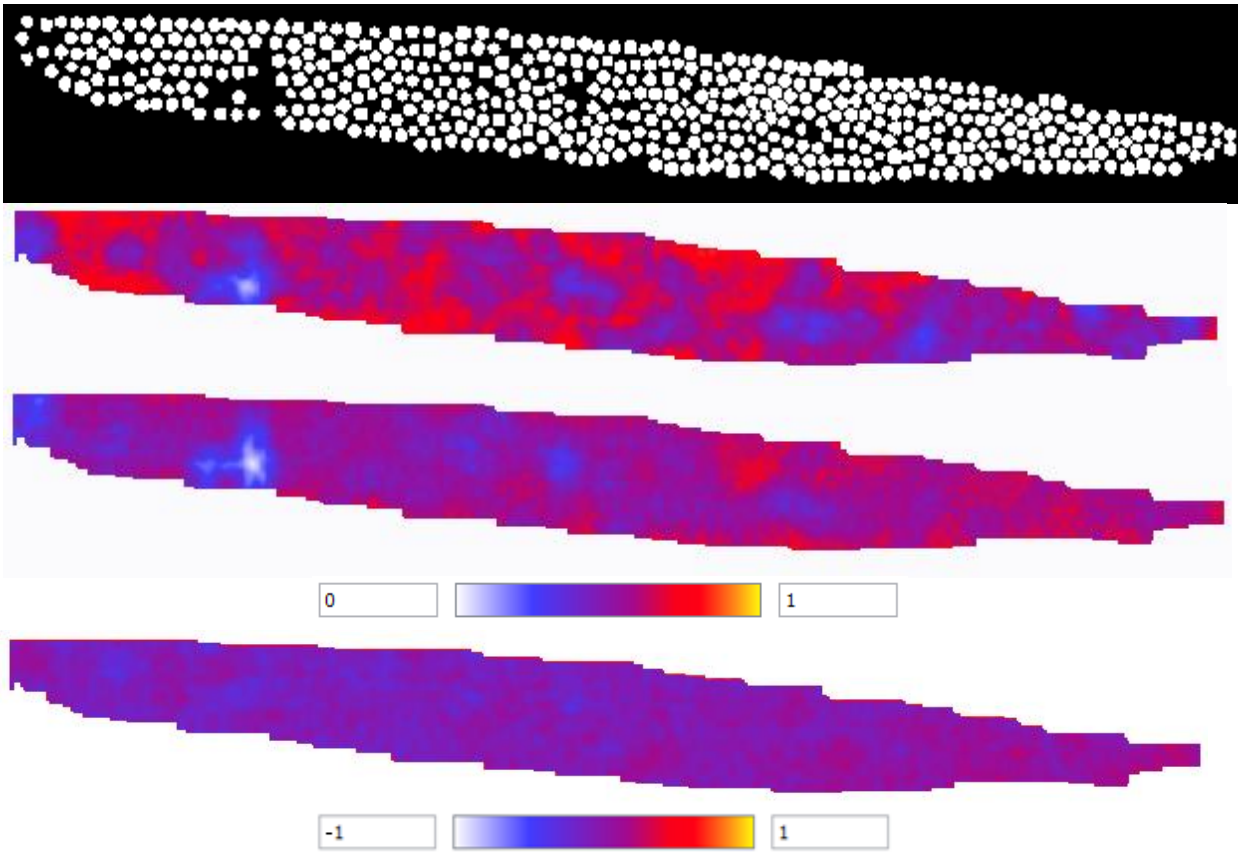


Figure 105 : Résultat de synthèse (première image de haut en bas), densité fournie en entrée (seconde image), densité calculée sur le résultat de synthèse (troisième image) et carte d'erreur entre les deux cartes de densité (quatrième image) - avec masse à 0.5, longueur de cylindre 14µm et pondération densité à 1 -

Potentiel distance:

Nous allons à présent nous intéresser au potentiel de distance à l'enveloppe de fil. En ce qui concerne ce potentiel, nous avons dit dans la partie 4.3.2 que notre contrainte est d'utiliser un potentiel strictement croissant en fonction de la distance à l'enveloppe. Nous allons discuter des différentes formes de potentiel et expliquer sur laquelle a porté notre choix.

Le choix de la forme du potentiel distance est plus simple à gérer que celui du potentiel densité et leur deux effets ne sont absolument pas les mêmes. En effet, le potentiel distance s'illustre par un fonctionnement plus binaire. Soit il est assez fort et dans ce cas les fibres sont confinées dans l'enveloppe, soit il ne l'est pas et les fibres resteront hors de l'enveloppe. Plus précisément, si le potentiel est trop faible, les fibres seront faiblement attirées vers l'intérieur de l'enveloppe de fil et donc l'effet de frottement prendra rapidement le pas sur le déplacement des fibres, autorisant leur présence à l'extérieur de l'enveloppe une fois arrivé à convergence.

Inversement, une fois que le potentiel atteint est assez fort pour contrecarrer les effets du frottement, peu importe sa valeur, les fibres seront toutes à l'intérieur de l'enveloppe à convergence. Et comme le potentiel distance n'agit pas à l'intérieur, il n'aura aucune autre influence sur la configuration finale. Par contre, le pas de temps de calcul dépendant de l'énergie initiale, plus cette énergie sera importante (et donc plus le potentiel distance est fort et plus ce pas de temps sera fort. Or comme nous l'avons précisé dans la partie 4.4.1, si le pas

de temps est trop fort les déplacements entre itérations seront plus grands et les fibres pourraient venir à se superposer. Ce potentiel n'ayant aucun effet sur le temps de calcul, on choisira donc le potentiel le plus bas possible garantissant le confinement dans l'enveloppe.

4.5.1.2 Masse

Pour rappel, le paramètre de masse est un paramètre que nous avons ajouté pour rendre la synthèse plus réaliste en freinant les fibres et donc en les rendant artificiellement plus rigides (cf. partie 4.4.2). Des masses proportionnelles à la surface des sections orthogonales des fibres sont utilisées. Nous allons à présent étudier différentes valeurs de la masse unitaire (masse associé à un pixel) et observer le comportement des fibres.

Figure 106, montre que les valeurs de masse faible, produisent des résultats où les fibres sont bien réparties dans l'enveloppe, laissant apparaitre les zones de fortes et faibles densités attendues. Par contre, les fibres ont une très faible rigidité (effet de zigzag fortement marqué). En effet, sans masse les fibres sont tellement peu contraintes qu'elles ont tendance à suivre les variations de densité locale quitte à emprunter un chemin tortueux.
Inversement, lorsque la masse est trop forte, les fibres ont tendance à ne plus prendre en compte les variations de densité locale et à aller tout droit. De plus, si la masse est assez forte pour compenser la force de répulsion inter-fibre, le caractère non-recouvrant ne sera plus garantit et donc les fibres se superposeront (les limites entre fibres sont indiscernables). En revanche, plus la masse est forte, plus l'énergie globale du système sera faible, accélérant donc la convergence de l'algorithme et diminuant le temps de calcul.

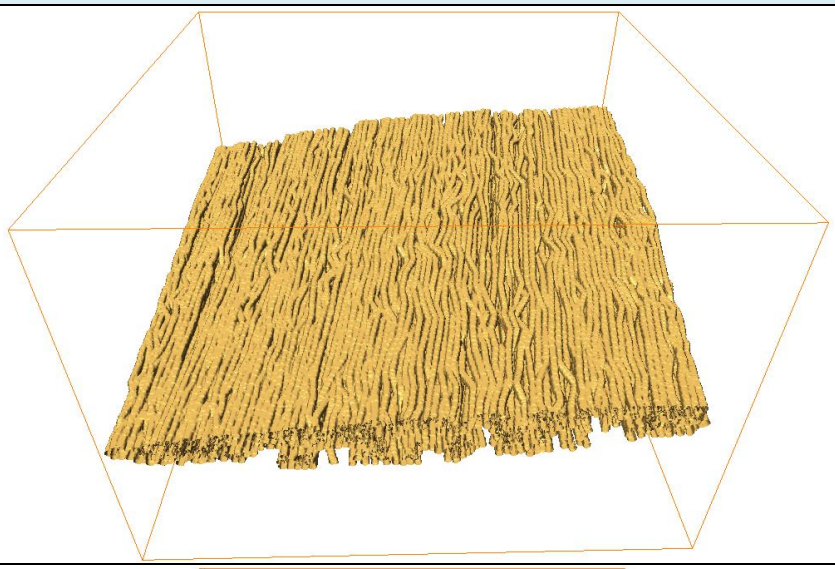
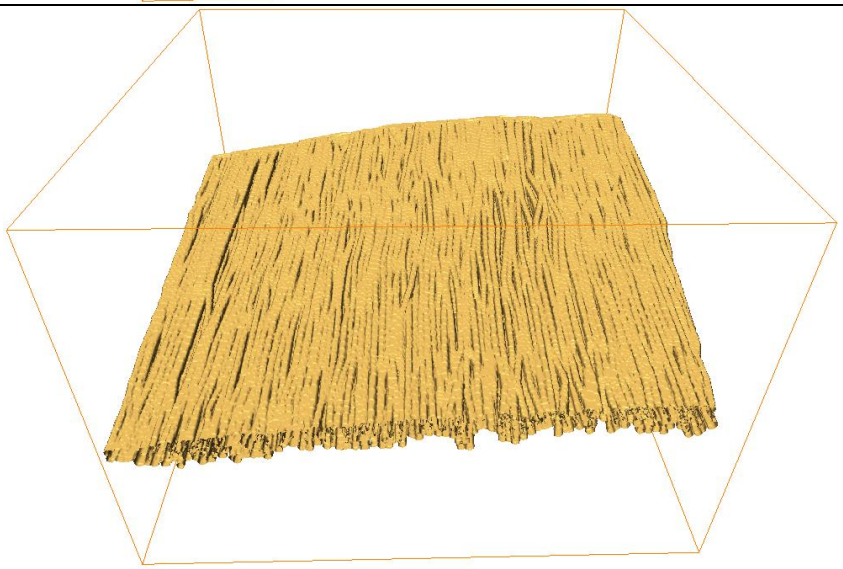
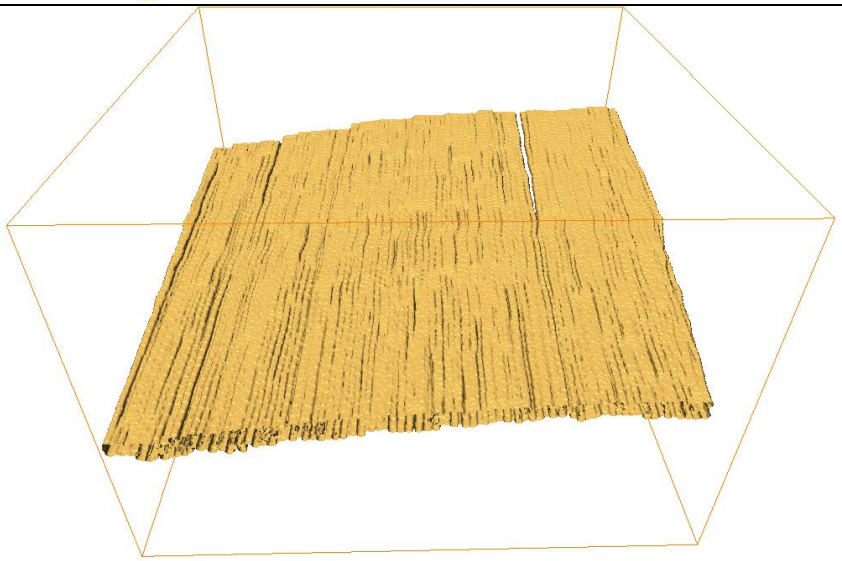
Masse (valeur normalisée)	Synthèse obtenue	Temps de calcul
Faible (0.5)		9100s
Moyenne (1)		5500s
Forte (2.5)		5200s

Figure 106 : Comparaison des effets de l'amplitude du paramètre de masse sur le résultat de synthèse - avec longueur de cylindre 14µm et pondération densité à 1 –

Ainsi, le choix du paramètre de masse est fonction du foisonnement du fil synthétisé mais aussi des valeurs des amplitudes de densité et de force de répulsion inter-fibre. Le choix de la valeur du paramètre de masse se réalise en effectuant un compromis entre la rigidité locale de la fibre (et donc l'erreur sur le suivi de la densité locale), le respect des contraintes de non-recouvrement, voire le temps de calcul.

4.5.1.3 Taille de l'élément cylindrique de base

Ce paramètre agit à la fois sur la rigidité de la fibre mais aussi sur le temps de calcul de l'algorithme et son coût en mémoire. En effet, nous travaillons à taille et nombre de fibres fixés. Aussi, plus l'élément cylindrique sera grand et moins il faudra de tronçons pour modéliser une fibre, ou de tranches successives pour modéliser le fil, ce qui va forcément réduire le temps de calcul ainsi que son coût en mémoire. De plus, le cylindre étant rigide, plus il sera grand et plus il aura tendance à réduire les petites irrégularités locales de densité et donc à rendre la fibre plus rigide.

Nous allons donc comparer les résultats de synthèse et les temps de calculs pour différentes tailles de cylindres. Notons tout de même que le diamètre moyen d'une fibre est d'environ 14µm, soit 10 voxels à l'échelle à laquelle nous réalisons la synthèse. Il est donc inutile de descendre en dessous des 10 voxels de hauteur pour les cylindres car pour une très faible longueur (typiquement la taille d'un diamètre) les fibres peuvent être considérées comme rectilignes.

Comme on peut le voir sur la Figure 107, la modification de la taille de l'élément cylindrique utilisé pour la synthèse de fibre va modifier directement à la fois la rigidité des fibres de synthèses mais aussi le temps de calcul nécessaire à la génération.

Pour un élément structurant de taille faible, la moindre modification de la densité locale va influencer l'orientation des cylindres et donc faire apparaitre de nombreuses variations sous forme de zigzag sur la fibre de synthèse. Inversement, si l'élément cylindrique est trop grand, les variations locales de densité seront moins suivies ce qui permet de réduire ce phénomène de contorsion, quitte à négliger certains changements de densités importants. De plus, les déplacements des extrémités de cylindres pouvant être forts, ce qui accroît le risque de recouvrement. Le choix de la taille de l'élément cylindrique sera donc un compromis à réaliser entre la rigidité de fibre que l'on souhaite et le respect des contraintes fixées en entrée.

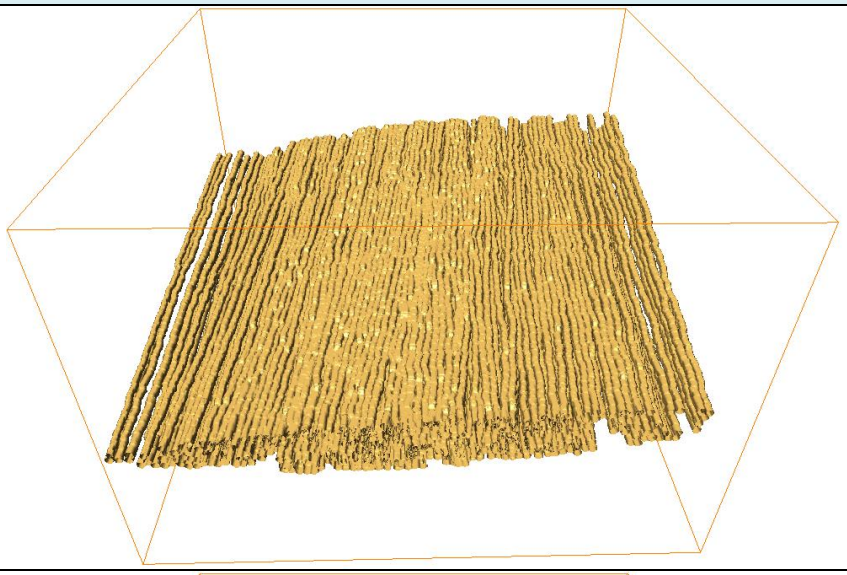
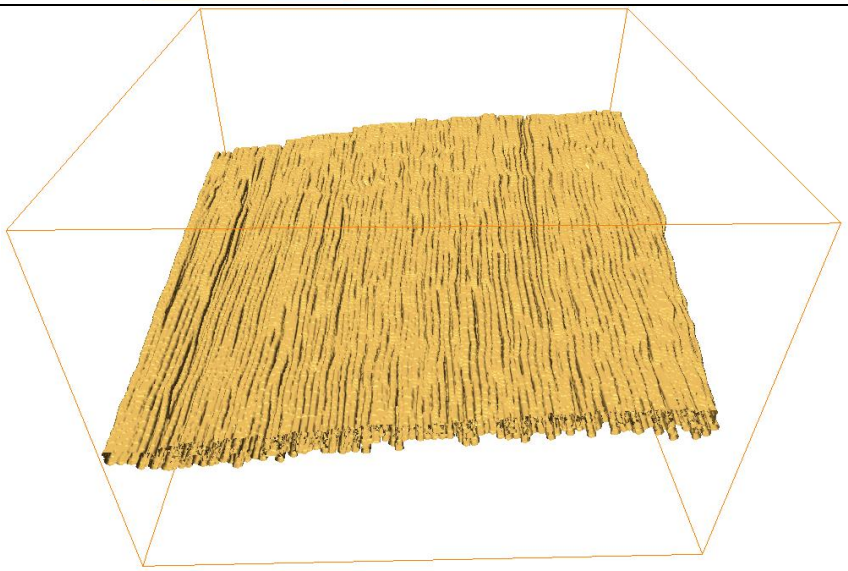
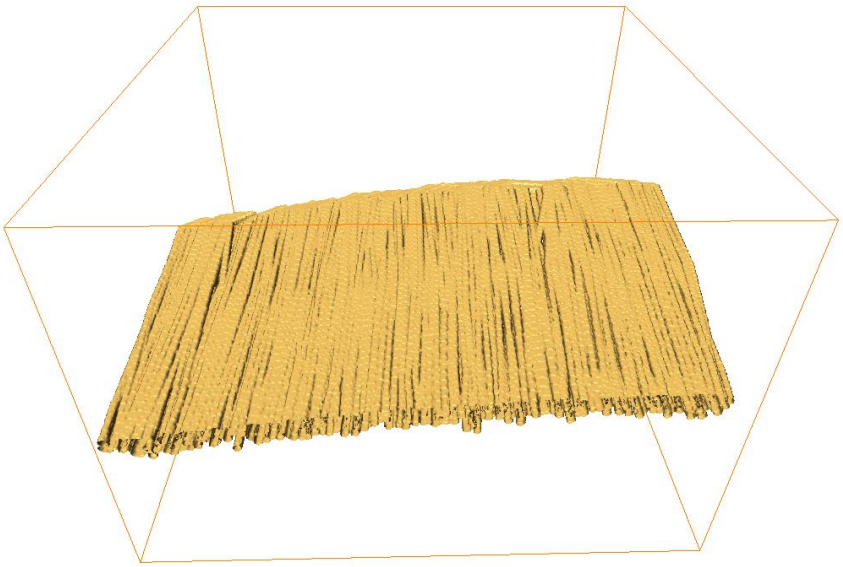
Taille de cylindre	Synthèse obtenue	Temps de calcul
Petit cylindre (1.4µm)		6500s
Cylindre Moyen (14µm)		6150s
Long cylindre (35µm)		5650s

Figure 107 : Comparaison des effets de la taille de l'élément cylindrique sur le résultat de synthèse - avec masse à 0.5 et pondération densité à 1 -

4.5.2 Matériaux virtuels synthétisés

L'influence des paramètres évaluée, les paramètres ont été choisis de la façon suivante :

- Une masse à 1 (cf. Figure 106).
- Une longueur de cylindre à 14µm (presque égale au diamètre moyen) (cf. Figure 107) afin de diminuer les oscillations des fibres.
- Une pondération des densités de 1 (cf. Figure 105) pour être le plus proche possible de la densité fournie en entrée.

Nous pouvons détailler différents résultats de synthèses obtenus. Certaines réalisations exploitent les cartes de densités de fibres dans le fil ainsi que les enveloppes de fils obtenues à basse et haute résolution. Les diamètres de fibres sont issus des données de tomographie à haute résolution.

4.5.2.1 Synthèse à partir des données à haute résolution

Nous présentons le résultat de synthèse obtenu à partir des données extraites sur le bloc tomographique à haute résolution. Nous conservons la même résolution de sortie que celle du bloc initial, c'est-à-dire 1,4µm/voxel. Le fil synthétisé aura donc une taille d'environ 1,4mm de longueur (soit 1024 voxels). Les contraintes données à l'algorithme sont les suivantes :

- Enveloppe de fil (issue de la partie 3.2)
- Carte de densité (issue de la partie 3.5.4)
- Distribution de diamètres (issue de la partie 3.5.2)

La Figure 108 présente une tranche de la donnée initiale contenant la carte des distances à l'enveloppe superposée à la carte des densités qui sera exploitée par l'algorithme de synthèse. Sur la Figure 109 on peut voir le résultat de synthèse obtenu avec cette carte extraite à haute résolution. Nous pouvons remarquer que la direction moyenne du fil reste constante sur sa longueur. Notons que sur la longueur considérée (1mm), les fibres paraissent rigides et n'admettent pas d'oscillations locales ce qui est souhaité compte tenu de la rigidité réelle des fibres à cette échelle. De plus, la carte de densité est bien prise en compte comme montré en détail dans la Figure 105.

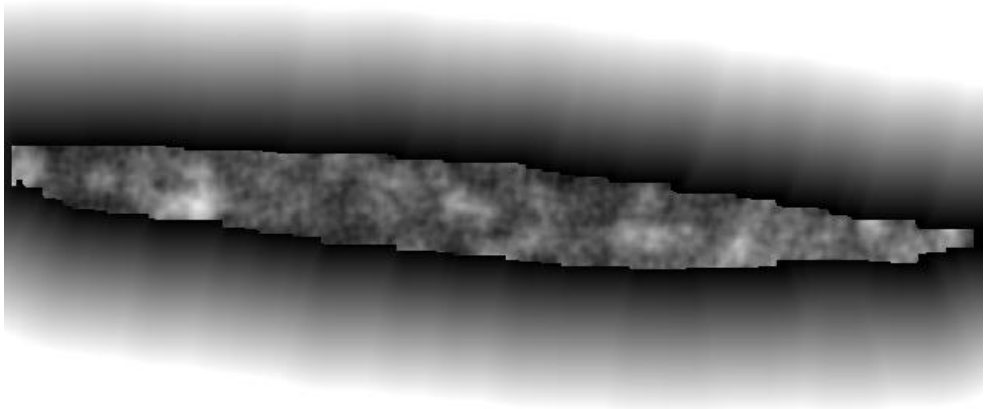


Figure 108 :Tranche du bloc d'entrée à haute résolution avec carte de distance à l'enveloppe (allant de 0 à 458 pour une échelle respectivement allant de noir à blanc) et densité (la densité a été artificiellement augmentée pour être visible dans cette figure, son échelle va de 0 à 1 pour respectivement s'étaler du noir au blanc)

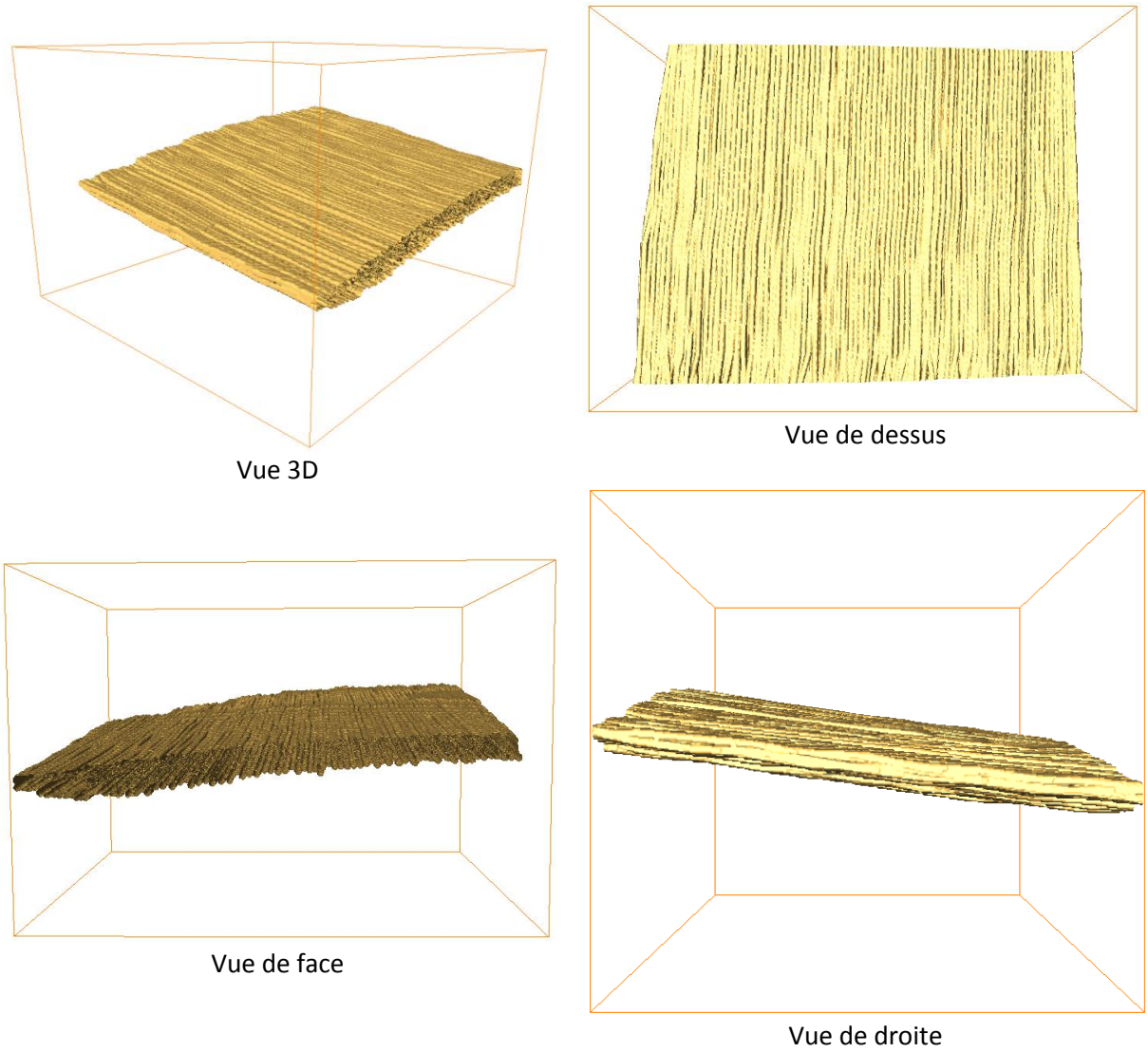


Figure 109 : Résultat de synthèse 3D sur une enveloppe de fil extraite à haute résolution (fil de 1mm de long)

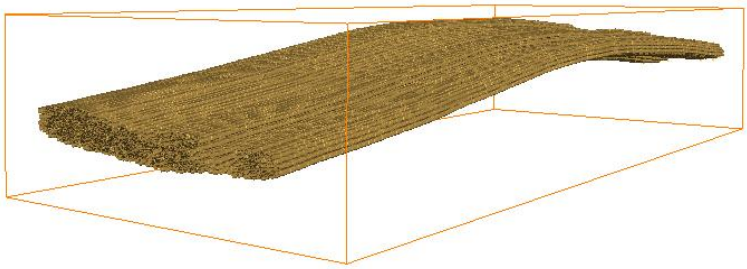
4.5.2.2 Synthèse à partir des données à basse résolution

Dans un second temps, nous réalisons une synthèse de fibre en combinant les données obtenues par analyse à haute et basse résolution. Ce type de synthèse présente un grand intérêt. En effet, à basse résolution il nous est impossible de discerner les fibres sur la donnée tridimensionnelle extraite par tomographie. En revanche, il est possible d'extraire l'enveloppe de fil et la carte de densité à basse résolution (Figure 110) pour une plus grande longueur de fil, capturant ainsi les phénomènes liés au tissage. Ainsi, en combinant les paramètres extraits sur les blocs à basse résolution et les connaissances a priori que nous possédons via les blocs à haute résolution (typiquement les distributions et évolutions de diamètres de fibres) il devient possible de synthétiser un fil de plus grande longueur en y intégrant des fibres ayant un comportement réaliste (Figure 110Figure 111).

Dans l'expérience qui suit, nous utilisons en entrée de l'algorithme la carte de densité tridimensionnelle extraite dans le paragraphe 3.5.4.1 ainsi que l'une des enveloppes de fils extraites dans le paragraphe 3.5.1. Les paramètres de contrainte de l'algorithme sont ceux évalué dans la partie 4.5.1.

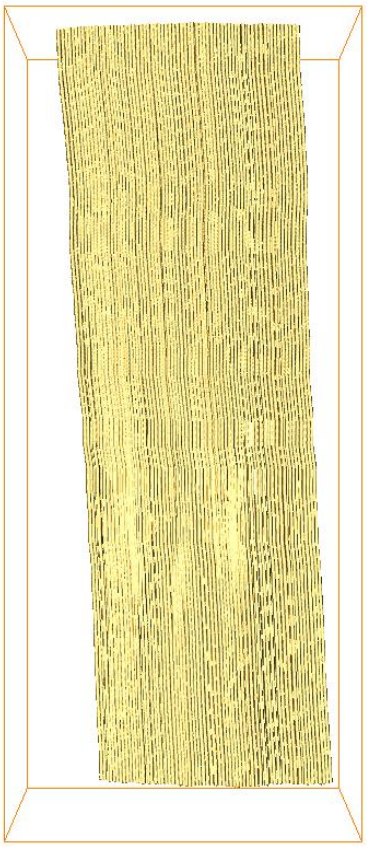
Figure 110 : Tranche du bloc d'entrée à basse résolution avec carte de distance à l'enveloppe (allant de 0 à 458 pour une échelle respectivement allant de noir à blanc) et densité (la densité a été artificiellement augmentée pour être visible dans cette figure, son échelle va de 0 à 1 pour respectivement s'étaler du noir au blanc)

La Figure 111 montre le résultat de synthèse obtenu sur le fil extrait à basse résolution. Nous pouvons voir que la forme d'enveloppe du fil sélectionnée est plus intéressante que celle étudiée issue du bloc à haute résolution. En effet, comme nous pouvons le voir le fil a été sélectionné pour sa courbure forte, qui s'explique par la forme du tissage. On peut noter que les fibres synthétisées dans l'enveloppe sont rigides et respectent à la fois la densité fournie en entrée et le confinement dans l'enveloppe de fil vu le paramétrage de l'algorithme utilisé (cf. paragraphe 4.5.1). Aucune oscillation n'est à noter, ce qui prouve que le paramétrage de la masse, de la taille d'élément cylindrique ou encore des potentiels a été bien calibré



Vue 3D

Vue de face



Vue de dessus

Figure 111 : Résultat de synthèse 3D sur une enveloppe de fil extraite à basse résolution (fil de 3mm de long)

4.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de développer l'aspect synthèse de matériau virtuel en exploitant une partie des paramètres extraits dans le chapitre précédent. Nous avons présenté une approche basée sur la synthèse de fibre par utilisation des processus de points. Cette méthode réutilise les distributions statistiques obtenues par analyse de matériau en vue de générer des fibres virtuelles réalistes. Cette méthode souffre toutefois d'un défaut en termes de convergence. En effet, si le placement de fibres par processus de points s'avère a priori séduisant l'étape d'extrusion de fibre est trop rigide et celles-ci ne peuvent plus se déplacer conduisant à des configurations non-extrudables qui bloquent la progression de plus en plus de fibres. Une perspective pour réduire ce défaut serait de disposer à chaque étape d'un processus itératif permettant de faire bouger modérément l'ensemble des fibres, tout en veillant à conserver les statistiques visées.

Une seconde méthode de synthèse a été présentée, celle-ci basée sur un algorithme de résolution de modèle dynamique : l'algorithme de Verlet. Cette méthode génère le système fibreux par utilisations successives de l'algorithme de Verlet dans un contexte bidimensionnel. Un jeu de contraintes a été établi pour garantir la synthèse réaliste du matériau:

- Potentiel répulsif inter-fibres pour garantir l'absence de superposition
- Confinement dans l'enveloppe du fil
- Suivi d'une carte de densité locale
- Respect d'une distribution des diamètres de fibres

La version tridimensionnelle de l'algorithme de synthèse exploite tranche par tranche l'algorithme bidimensionnel et relie les objets des tranches par des tronçons cylindriques. La formulation du problème de Verlet prend en compte des contraintes supplémentaires visant à rendre le matériau le plus réaliste possible.

La version la plus aboutie de l'algorithme de synthèse de fibres est ensuite exploitée en s'appuyant sur des données d'analyse d'images tomographique de matériaux réels à basse et haute résolution. De manière préliminaire, nous étudions les influences des valeurs des paramètres suivant sur la qualité du résultat de synthèse:

- Potentiel distance à l'enveloppe
- Potentiel densité
- Masse des fibres
- Taille de l'élément cylindrique

Cette étude permet de choisir les paramètres de réglage appropriés pour ensuite réaliser deux exemples de synthèses de fibres. Le premier exploite une enveloppe extraite d'un bloc à haute résolution. Cette synthèse montre le fonctionnement de l'algorithme sur un cas simple où l'enveloppe ne subit que peu de variation sur sa longueur. La seconde synthèse

utilise une partie d'une enveloppe obtenue à basse résolution ainsi que la carte des densités associée mais conserve la distribution de diamètres de fibres obtenues à haute résolution. Cet exemple met en évidence la capacité de notre méthode à générer un faisceau fibreux réaliste que les moyens actuels de mesure ne pourraient pas acquérir.

Les résultats de synthèse obtenus suggèrent plusieurs perspectives. Tout d'abord, ils demandent à être exploités dans un contexte plus large et sur un plus grand nombre de réalisations, afin d'en éprouver la robustesse. Par ailleurs la méthode proposée pourrait utilement profiter d'une amélioration de sa précision en termes de respect de la carte de densité fournie en entrée et de rigidité des fibres. Enfin, il serait utile de prendre en compte les orientations locales par l'introduction d'une carte de potentiel adaptée, permettant de reproduire des situations de cisaillement ou de torsion des fibres dans le fil par exemple.

Chapitre 5

Conclusion et perspectives

Sommaire

5.1 CONCLUSION 112
5.2 PERSPECTIVES 113

5.1 Conclusion

Dans le contexte des matériaux virtuels à renfort fibreux, les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit visaient d'une part l'analyse et d'autre part la simulation des arrangements de fibres à l'intérieur des fils du renfort.

Pour l'analyse des renforts fibreux, observés par micro-tomographie, nous avons proposé une méthode innovante de labellisation, fonctionnant à deux échelles : celle du fil et celle de la fibre.

Cette méthode opère sur des images tridimensionnelles en niveaux de gris et est basée sur diverses opérations de traitement d'image qui relèvent de la morphologie mathématique et de la géométrie différentielle.

Le procédé débute par la segmentation de l'enveloppe des fils, puis par celle des fibres elles-mêmes. Ensuite, les fils et les fibres, de chaîne et de trame, sont distingués en fonction de leur direction privilégiée via l'étude des orientations locales. L'étape de labellisation proprement dite peut alors être réalisée. Nous proposons un « algorithme de poursuite » innovant qui permet, à partir de tronçons initiaux labellisés, de propager les labels en suivant les orientations locales. De plus, cet algorithme harmonise les labels afin de n'en conserver qu'un seul par fil ou par fibre.

Ce procédé a été appliqué sur plusieurs données tomographiques à basse résolution et à haute résolution à notre disposition permettant alors d'extraire différentes informations caractéristiques du renfort.

A basse résolution, la chaine de traitement proposée a montré sa capacité à extraire correctement les enveloppes de fils tout en séparant les fils de chaine et les fils de trame. Nous avons ensuite pu estimer une carte de la densité de fibres dans le fil et une carte de l'orientation locale.

A haute résolution. Les enveloppes de fils ainsi que chacune des fibres ont été identifiées avec une très bonne précision sur les données disponibles. Cela a permis l'estimation des paramètres suivants:

- distribution des diamètres des fibres dans un bloc de données ou dans un fil,
- évolution du diamètre le long des fibres,
- cartes de la densité de fibres dans le fil,
- distribution des orientations locales de fibres (par rapport à l'orientation du fil,
- cartes des orientations locales de fibres.

L'étude de la carte des orientations locales obtenue à haute résolution a permis de détecter à plusieurs reprises des phénomènes de compaction, de cisaillement, voire de torsion, révélateurs des contraintes subies par les fibres dans les zones de contact entre deux fils causées par le tissage.

Enfin, certains paramètres issus de l'analyse des renforts fibreux ont été exploités pour le second volet, à savoir la simulation des arrangements de fibres à l'intérieur des fils.

Pour la simulation des arrangements de fibres à l'intérieur des fils, un algorithme de synthèse de matériau a été proposé. Il dérive de l'algorithme de Verlet et repose sur la résolution d'un modèle dynamique. En effet la méthode proposée génère l'ensemble du réseau fibreux par appels successifs à l'algorithme de Verlet sur des tranches bidimensionnelles et relie les objets générés dans les tranches successives par des tronçons cylindriques. Afin d'accentuer le réalisme du résultat de la synthèse, plusieurs contraintes sont prises en compte :

- absence de superposition,
- confinement dans l'enveloppe du fil,

- respect d'une carte de densité locale,
- respect d'une distribution des diamètres de fibres.

L'algorithme de synthèse résultant a été exploité en utilisant des paramètres issus de l'analyse de blocs tomographiques à haute résolution (à l'échelle de la fibre) et à basse résolution (à l'échelle du fil). Deux expériences ont pu être menées.

La première utilisant exclusivement des données obtenues à haute résolution (enveloppe d'un fil, densité locale, distribution des diamètres des fibres), la synthèse a permis de montrer la pertinence de la méthode sur un cas simple où l'enveloppe ne subit que peu de variation sur sa courte longueur.

La seconde utilise une carte de densité et un tronçon d'enveloppe beaucoup plus long, obtenus à basse résolution ainsi que la distribution de diamètres de fibres obtenues à haute résolution. Cette simulation met en évidence la capacité de notre méthode à générer un faisceau fibreux assez réaliste que les tomographes actuels ne pourraient pas acquérir.

5.2 Perspectives

A court terme, il serait nécessaire de rendre l'algorithme de synthèse plus réaliste. Une voix de travail serait d'injecter certaines contraintes lors de la synthèse telles que les densités et les orientations de fibres. Préalablement, une phase d'apprentissage pourra être conduite à partir d'un large panel d'acquisitions d'images de matériaux. L'objectif sera d'analyser le comportement des fils et des fibres selon le type de tissage, l'emplacement dans le tissage et les configurations des fils et fibres dans le voisinage. Cette perspective permettra donc de s'affranchir de la carte de densité que nous fournissons actuellement et surtout permettra de gérer les cas complexes tels que les cisaillements et les torsions que nous ne prenons pas en compte à l'heure actuelle.

La seconde perspective concerne l'utilisation des résultats de synthèse pour des simulations de densification, avant le test du matériau virtuel dans des simulations thermiques et mécaniques. Ceci permettra de valider la chaine de traitement tout entière sur la base d'un matériau virtuel sans passer par le matériau réel. Quelques résultats de densification ont d'ores et déjà été obtenus grâce à l'algorithme exposé dans la thèse de W. Ros [ROS 11] [VIG 11]. La Figure 112 et la Figure 113 illustrent différentes étapes de la densification réalisée à partir d'un renfort virtuel.

La méthodologie d'analyse et de virtualisation développée dans cette thèse s'intégrera dans un cycle de matériau virtuel plus large tel que celui développé par [COU 12] (Figure 4 et Figure 5). Ainsi, à partir du résultat brut de matériau virtuel que nous générons et de la simulation de dépôt matriciel présenté ci-dessus de nombreuses simulations pourront être exploitées. En effet, il sera possible de réaliser sur ce matériau virtuel des calculs mécanique basés sur les modèles à éléments finis afin d'évaluer le comportement du matériau et sa résistance aux sollicitations mécaniques et donc en déduire sa robustesse. Des simulations thermiques pourront aussi être réalisées afin de qualifier plus précisément le matériau virtuel généré. Si celui-ci ne répond pas aux exigences recherchées, tester un nouveau matériau sera un processus simple et peu couteux puisqu'il reviendra à générer un nouveau matériau virtuel en changeant les paramètres d'entrée tels que le tissage utilisé, les caractéristiques des fibres (diamètres, densité, etc…) jusqu'à converger vers le matériau répondant à toute les caractéristiques attendues.

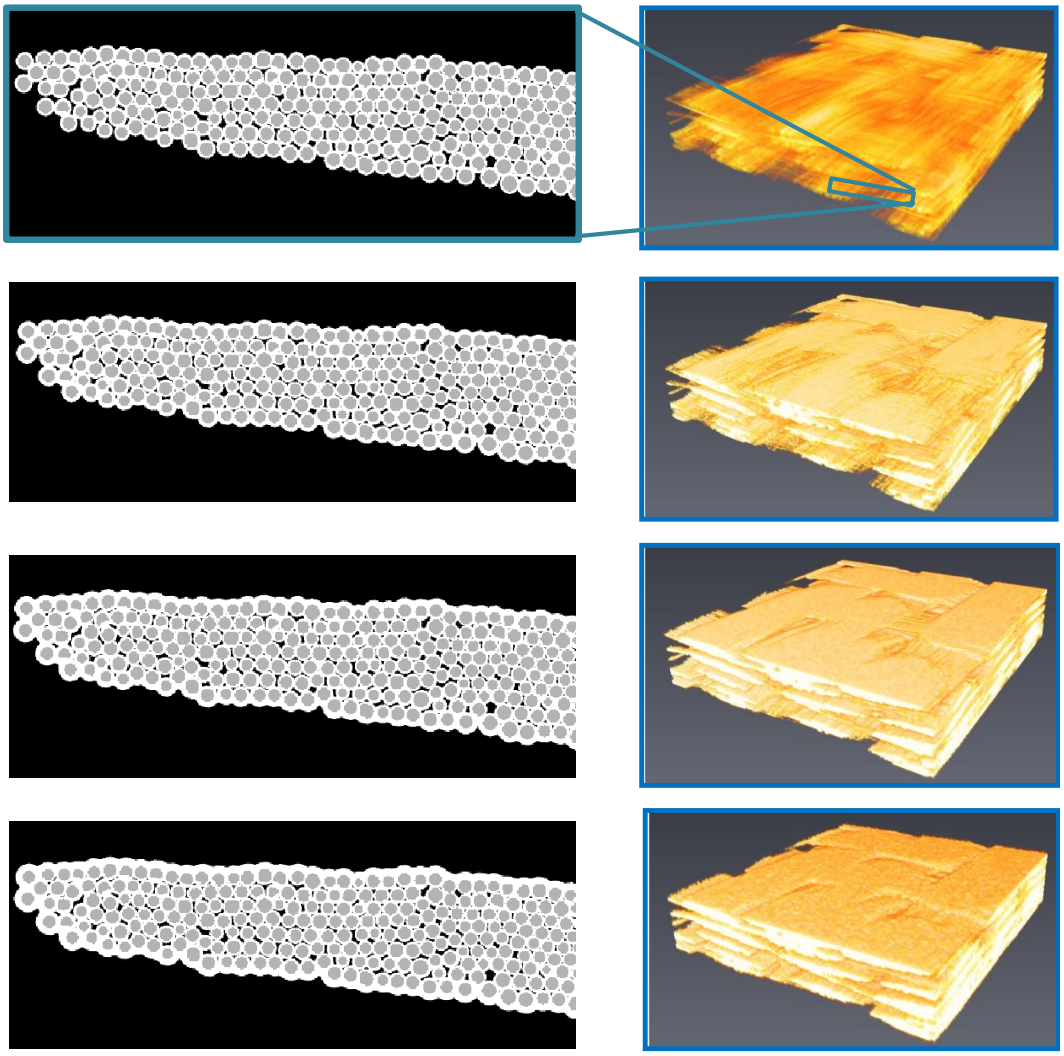


Figure 112 : Dépôt matriciel vu étape par étape (chronologiquement de haut en bas), coupe bidimensionnelle à gauche et vue globale tridimensionnelle à droite.

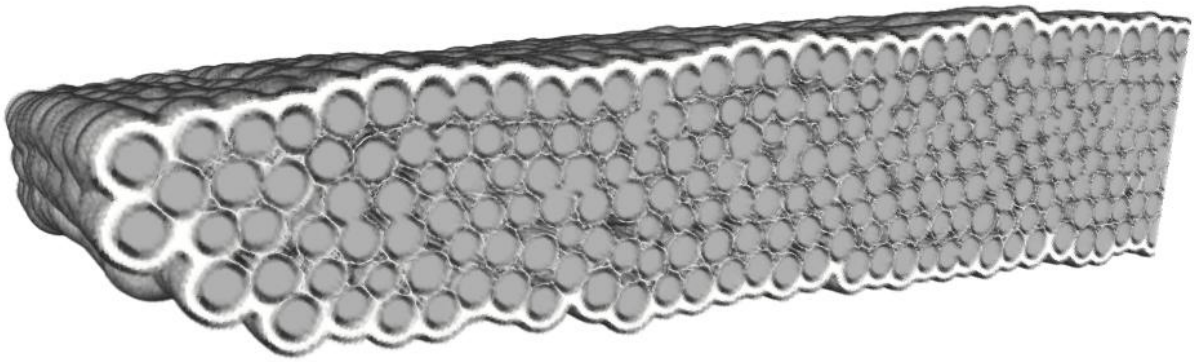


Figure 113 : Zoom sur un fil de synthèse virtuellement densifié. Fibres en gris et matrice en blanc.

Bibliographie

[ALT 09] H. Altendorf, D. Jeulin, 3D Directional mathematical morphology for analysis of fiber orientations, *Image Anal Stereol* **28**, 143–153 (2009).

[ALT 11] H. Altendorf, D. Jeulin, Random-walk-based stochastic modeling of three-dimensional fiber systems, *Physical Review* E**83**, 041804 (2011).

[ATT 99] David Attwood, *Soft X-ray and extreme ultraviolet radiation*, Cambrige University Press (1999)

[BAD 09] P. Badel, E. Vidal-Sallé, E.Maire, L. Bigorgne, P. Boisse, Simulation and tomography analyses of textile composite reinforcement, *Procs. 17th Intl. Conf. on Composite Materials*, 27-31 July 2009, Edinburgh, Scotland, W. M. Banks & M. R. Wisnom editors, C1.2, 10 pp. (2009)

[BAL 12] H. Bale, M. Blacklock, M. R. Begley, D. B. Marshall, B. N. Cox, R. O. Ritchie, Characterizing Three-Dimensional Textile Ceramic Composites Using Synchrotron X-Ray Micro-Computed-Tomography. *J. Amer. Ceram. Soc.***95**(1), 392–402 (2012)

[BAN 08] J. Banhart, Advanced Tomographic Methods in Materials Research and Engineering. Oxford University Press. (2008)

[BEZ 06] A. Bezrukov, D.Stoyan, Simulation and statistical analysis of random packings of ellipsoids. *Part Part Syst Char 2006*;23:388e98

[BLA 06] R. Blanc, Ch. Germain, J.-P. Da Costa, P. Baylou, M. Cataldi, Fiber orientation measurements in composite materials, *Composites: Part A*, **37**(2), 197–206 (2006).

[BM3 14] University of Nebraska-Lincoln, BM^3 page : http://bm3.unl.edu/scanning-electron-microscope#gallery

[CED 05] G. Ceder, N. Marzari, Atomistic Computer Modeling of Materials, *MIT Open Course Ware SMA 5107* (Spring 2005)

[CHA13] C. Chapoullié, C. Germain, J-P. Da Costa, G. L. Vignoles, M. Cataldi,Multiscale extraction of morphological features in woven CMCs, *Ceram. Eng. Sci. Procs.***34**(10) 272-281 (2013)

[CHO 95] G. Chollon, Fibres céramiques à base de carbure de silicium et à faible taux d'oxygène, Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux I n°1280, (1995).

[CHR 02] F. Christin, Design, fabrication and application of thermostructural composites (TSC) like C/C, C/SiC and SiC/SiC composites, *Adv. Eng. Mater.***4**, 903–912, (2002).

[CHR 05] F. Christin, A global approach to fiber *n*D architectures and self-sealing matrices: from research to production, *Int. J. of Appl. Ceram. Technol.***2**, 97-104(2005).

[COC 95] J.-P. Cocquerez, S. Philipp. *Analyse d'Images et Segmentation*. Masson, Paris(1995)

[COI 05] O. Coindreau, G. L. Vignoles. Assessment of structural and transport properties in fibrous C/C composite preforms as digitized by X-ray CMT. Part I : Image acquisition and geometrical properties, *J. Mater. Res.***20**(9), 2328–2339 (2005)

[COS 01] M. Coster, J.-L. Chermant, Image analysis and mathematical morphology for civil engineering materials, *Cement & Concrete Composites* **23**(2), 133–151 (2001).

[COU 08] G. Couégnat. *Approche multiéchelle du comportement mécanique de matériaux composites à renfort tissé*. 2008. Thèse de doctorat. Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.

[COU 12] G. Couégnat, W. Ros, T. Haurat, C. Germain, E. Martin, G.L. Vignoles, An Integrated Virtual MaterialApproach for Ceramic Matrix Composites, *Ceramics Engineering and Science Proceedings***33**(10), 83–91 (2012).

[COX 55] Cox D. R.. "Some Statistical Methods Connected with Series of Events". *Journal of the Royal Statistical Society* **17** (2): 129–164(1955)

[DAV 97] N.C. Davidson, A.R. Clarke, G. Archenhold, Large-area, high-resolution image analysis of composite materials, *J. Microsc.* **185**(2), 233–242 (1997).

[DON 99] M. Donias, Caractérisation de champs d'orientation par analyse en composantes principales et estimation de la courbure Application aux images sismiques. 1999. *Thèse de doctorat*.

[DON 02] S.M. Dong, Y. Katoh, A. Koyhama, S.T. Schwab, L.L. Snead, Microstructural evolution and mechanical performances of SiC/SiC composites by polymer impregnation/microwave pyrolysis (PIMP process), *Ceram. Int.***28**, 899-905(2002).

[DUR 09] D. Durville, A Finite Element Approach of the Behaviour of Woven Materials at Microscopic Scale, in Mechanics of Microstructured Solids, *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics***46**, 39–46 (2009)

[EBE 06] D. Eberly, "Eigensystems for 3x3 Symmetric Matrices", 2006

[ERC 97] Furio Ercolessi ; A Molecular Dynamics Primer; *Spring College in Computational Physics, ICTP, Trieste*, June 1997

[ESR 13] ESRF ID19 line homepage, http://www.esrf.eu/UsersAndScience/Experiments/Imaging/ID19/id19-industrial-activity (consulted 11 June 2013)

[GAI 13] G.Gaiselmann, D. Froning, C.Tötzke, C. Quick, I. Manke, W. Lehnert, V. Schmidt, Stochastic 3D modeling of non-woven materials with wet-proofing agent, *International Journal of Hydrogen Energy*. **38**(20) 8448–8460 (2013)

[GAU 06] Gauthier, W., J. Lamon, R. Pailler, *Rev Compos Matér Avancés* **16**(2), 221–241(2006).

[GEO 88] P.J. Geoghegan, DuPont ceramics for structural applications – the SEP Novoltex

technology, in *Procs. 3rd Textile Structural Composites Symp.*, Philadelphia, PA (1988).

[GOU 90] S. Goujard, Protection contre l'oxydation de matériaux composites C/C et SiC/SiC par des revêtements réalisés par CVD à base des éléments silicium, bore et carbone, Thèse de doctorat de l'université d'Orléans, (1990).

[GRA 98] R.L. Graham, B.D. Lubachevsky, K.J. Nurmela, P.R.J. Osterggard, Dense packings of congruent circles in a circle, *Discrete Mathematics* **181** 139—154(1998)

[GUO 99] S. Guo, Z. Liu, Relationship between oxidation resistance and structure of B_4C – SiC/C composites with self-healing properties, *Carbon* **37**, 33-40 (1999).

[GUS 98] Gusakov, A.V. and S.V. Lomov, Parametric studies of the internal structure of 3D woven fabrics. Fibres & Textiles in Eastern Europe. 6(2) pp. 60-63, 1998

[HIL 69] C.J. Hilditch, Linear skeletons from square cupboards. *Machine Intelligence* **4**, 403–420(1969).

[HIV 10] G. Hivet, A. Wendling, E. Vidal-Sallé, B. Laine, P. Boisse, Modeling strategies for fabrics unit cell geometry - Application to permeability simulations, *Int. J. Mater. Forming***3**(1), 727–730 (2010)

[ICH 00] H. Ichikawa, Recent advances in Nicalon ceramic fibers including Hi-Nicalon type S, *Ann. Chim. Sci. Mat.***25**, 523-528(2000).

[ICH 02] J.C. Ichard, Composites à matrice céramique à conductivité thermique améliorée, Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux I, n°2625, (2002).

[JEH 06] D.Jehl, M.-A.Dourges, G.Couégnat, R. Pailler, A.Guette, Development of hybrid processing routes for ceramic matrix composites: PIP / CVI combinations ESA Conf. Procs. **SP-616**(2006)

[JOA 00] J.L. Grenestedt, F. Bassinet, Influence of cell wall thickness variations on elastic stiffness of closed-cell cellular solids, *International Journal of Mechanical Sciences***42,**1327 – 1338(2000)

[KIM 97] J. Kim, P. K. Liaw, D. K. Hsu, D. J. McGuire, Non destructive evaluation of Nicalon/SiC composites by ultrasonics and X-ray computed tomography, *Ceram. Eng. Sci. Procs.* **18**(4), 287- 296 (1997).

[KIN 89] J. H. Kinney et al X-ray microtomography on beamline X at SSRL,*Rev. Sci. Instrum.* **60,** 2471–2474 (1989)

[KIN 94] Kinney, J. H., Haupt, D. L., Nichols, M. C., *et al.* The X-ray tomographic microscope: three-dimensional perspectives of evolving microstructures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 347, no 1, p. 480-486 (1994).

[KNU 89] H. Knutsson, Representing local structure using tensors, in *Proc.s 6thScand. Conf. on Im. Anal.*, Oulu, Finland, June 1989, J. Roening and M. Pietikainen, editors, pp. 244–251 (1989).

[KRE 08] W. Krenkel, *Ceramic Matrix Composites*, Wiley-VCH, Weinheim(2008).

[LAF 09] A. Laforet, Rupture différée en fatigue statique aux très hautes températures (800°C – 1300°C) des fils Hi-Nicalon, des composites Hi-Nicalon/type PyC/SiC et des composites Hi-Nicalon/type PyC/B_4C, Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux I, n° 3783(2009).

[LAN 12] M. Langer, A. Pacureanu, H. Suhonen, Q. Grimal, P. Cloetens, F. Peyrin,X-Ray Phase Nanotomography Resolves the 3D Human Bone Ultrastructure, *PLoS ONE*, **7**,e35691 (2012).

[LEM 74] R. A. Lemons, C. F. Quate, Acoustic microscope–scanning version. *Appl. Phys. Lett.*, **24**, 163–165(1974).

[LEY 09] J. M. Leyssale, J. P. Da Costa, C. Germain, P. Weisbecker, G. L. Vignoles, An Image Guided Atomistic Reconstruction of pyrolytic carbons, *App Phys Lett.***95**, 231912(2009).

[LOM 02] S. Lomov, I. Verpoest, Modelling of the internal structure and deformability of textile reinforcements: WiseTex software. *Proceedings of the ECCM-10 conference*. (2002).

[LOM 10] S. Lomov, WiseTex software suit, http://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Composites/software/downloads/wisetex-presentation.pdf (2010)

[MAR 89] D. Marshall, A.G. Evans, The mechanical behaviour of ceramic matrix composites, *Acta Metall.***37**, 2567-2583(1989).

[MAR 07] J. Martín-Herrero, Hybrid object labelling in digital image,*Mach. Vis. Appl.*, **18**(1), 1–15(2007)

[MAR 07 bis] J. Martín-Herrero, C. Germain, Microstructure reconstruction of fibrous C/C composites from X-ray microtomography, *Carbon***45**(5), 1242-1253 (2007)

[MAT 60] B. Matérn. Spatial variation. Stochastic models and their application to some problems in forest surveys and other sampling investigations. *Medd. Statens Skogsforskningsinst.***49**(5)1–144(1960).

[MAT 86] B. Matérn. Spatial Variation. *Lecture Notes in Statistics***36**, Springer, New York (1986).

[MAT 07] K. Matous, H.M. Inglis, X. Gu, D. Rypl, T.L. Jackson, P.H. Geubelle, Multiscale modeling of solid propellants: From particle packing to failure, *Composites Science and Technology***67,** 1694–1708(2007).

[MUL 08] C. Mulat, M. Donias, P. Baylou, G. Vignoles, Ch. Germain, Optimal orientation estimators for detection of cylindrical objects, *Signal, Image & Video Processing***2**(1), 51–58 (2008).

[MUL 08 bis] C. Mulat, M. Donias, P. Baylou, G. Vignoles, C. Germain, Axis detection of cylindrical objects in 3-D images, *J. of Electr. Imaging* **17**(3), 0311081–0311089 (2008).

[MUL 08 ter] C. Mulat. *Détection, caractérisation d'objets 3D et simulation d'évolution*

morphologique appliquée à l'infiltrabilité de préformes fibreuses. 2008. Thèse de doctorat. Bordeaux 1.

[MUN 82] Munshi, V. G., Pai, S. D., et Ukidve, A. V. Studies on abrasion of sewing threads with scanning electron microscopy. *Textile research journal*, 1982, vol. 52, no 12, p. 776-779.

[NAS 09] R. Naslain, F. Langlais, Fundamental and practical aspects of the chemical vapor infiltration of porous substrates, *High Temp. Sci.***27**, 221-235(1990).

[NAN 14] Nanospec product page: http://www.nanospec.com.au/page/3d_visualisation_analysis_and_measurement_software.html

[NTE 11] R.Ntenga, A.Beakou, Structure, morphology and mechanical properties of Rhectophyllum camerunense (RC) plant-fiber. Part I: Statistical description and image-based reconstruction of the cross-section, *Computational Materials Science***50,**1442–1449(2011)

[OAT 72] Charles William Oatley, The Scanning electron microscope: Part 1:The instrument, Cambridge University Press, London (1972)

[PEA 97] William B. Peatman, Gratings, Mirrors and Slits, Gordon Breach (1997)

[PIE 09] B. Piezel, L. Laiarinandrasana, A. Thionnet, A multilevel finite element analysis of a textile composite, *Procs. 17th Intl. Conf. on Composite Materials*, 27-31 July 2009, Edinburgh, Scotland, W. M. Banks & M. R. Wisnom editors, ID11.1, 8 pp. (2009).

[PRE 70] J.M.S. Prewitt, Object Enhancement and Extraction in *Picture processing and Psychopictorics*, Academic Press (1970)

[QIN 09] H. Qing, L. Mishnaevsky, Unidirectional high fiber content composites: Automatic 3D FE model generation and damage simulation, *Comput Mater Sci* **47**(2) 548–555 (2009)

[ROS 11] W. Ros, William. *Modélisation Multi-échelle de l'infiltration chimique à partir de la phase vapeur de composites à renforts fibreux*. 2011. Thèse de doctorat. Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.

[RIE 09] S. Rief, E. Glatt and A. Wiegmann. Microstructure Simulation of Virtual Woven Filter Media. In *Procs. Filtech 2009*, Wiesbaden, Deutschland, **1**, 231-238(2009)

[SER 82] J.Serra,Image analysis and mathematical morphology, Academic Press, London (1982)

[SOB 68] I. Sobel, G.Feldman, A 3 × 3 isotropic gradient operator for image processing. Presented at a talk at the Stanford Artificial Project.(2009)

[SPI 80] E. Spiller, Recent developments towards high resolution X-ray imaging. *Nuclear Instruments and Methods*, **177**, 187–192(1980).

[STO 95] D. Stoyan, W.S. Kendall, J. Mecke – Stochastic Geometry and its Applications, 2nd Edition.John Wiley & Sons(1995).

[STO 08] S. R. Stock, *MicroComputed Tomography: Methodology and Applications*, CRC Press, New York (2008).

[TAN 06] J.C. Tan, I.A. Elliott, W. Clyne, Analysis of tomography images of bounded fiber networks to measure distributions of fiber segment length and fiber orientation, *Adv. Eng. Mater.***8**(6), 495–500 (2006).

[VER 67] L. Verlet, Computer "Experiments" on Classical Fluids. I. Thermodynamical Properties of Lennard−Jones Molecules, *Physical Review***159**, 98–103(1967).

[VER 05] I. Verpoest, S. Lomov, Virtual textile composites software WiseTex: Integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis. *Composites Science and Technology*, ***65***(15), 2563-2574 (2005).

[VIG 01] G.L. Vignoles, Image segmentation for phase-contrast hard X-ray CMT of C/C composites, *Carbon***39**(2), 167–173 (2001)

[VIG 06] G.L. Vignoles,Modelling of CVI Processes,*Adv. Sci. Technol.***50**, 97-106 (2006).

[VIG 07] G.L. Vignoles, O. Coindreau, A. Ahmadi, D. Bernard. Assessment of geometrical and transport properties of a fibrous C/C composite preform as digitized by x-ray computerized microtomography: Part II. Heat and gas transport properties, *J. Mater. Res.***22**, 1537-1550 (2007).

[VIG 11] G.L. Vignoles, W. Ros, C. Mulat, *et al.* Pearson random walk algorithms for fiber-scale modeling of Chemical Vapor Infiltration. *Computational Materials Science*, 2011, vol. 50, no 3, p. 1157-1168.

[VIG 13] G. L. Vignoles, R. Pailler, F. Teyssandier, The control of interphases in carbon and ceramic matrix composites *Ceramics Engineering and Science Proceedings***33**(8), 11-23 (2013)

[VIG 13bis] G. L. Vignoles, W. Ros, C. Germain,Numerical estimation of the infiltrability of woven CMC preforms, *Ceram. Eng. Sci. Procs.***34**(10), 267-271 (2013)

[VIG 14] G. L. Vignoles, C. Chapoullié, W. Ros, C. Mulat, G. Couégnat, C. Germain, J.-P. Da Costa, M. Cataldi, C. Descamps, Contribution of image processing techniques to the simulation of ChemicalVapor Infiltration of SiC in CMCs», G. L. VIGNOLES, *Procs. HT-CMC8*, Xi'An, Chine, 22-26 Septembre 2013, LT Zhang and DL Jiang eds., à paraître dans *Ceram. Trans.* (2014)

[VOI 07] C. Voivret, F. Radjaï, J.-Y. Delenne, M. S. El Youssoufi, Space-filling properties of polydisperse granular media, *Physical Review* E **76**, 021301 (2007)

[VOR 08] G. Voronoï, Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques, deuxième mémoire, recherche sur les parallelloèdres primitifs. *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik***134**, 198–287 (1908).

[YAN 97] S. Yang, A. Tewari, A.M. Gokhale, Modeling of non-uniform spatial arrangement of fibers in a ceramic matrix composite, *Acta Mater.***45**(7), 3059–3069 (1997).

Liste de publications de l'auteur

Liste des publications

"Multiscale extraction of morphologicalfeatures in wovenCMCs", C. CHAPOULLIÉ, C. GERMAIN, J-P. DA COSTA, G. L. VIGNOLES, M. CATALDI, in "Developments in StrategicMaterials and Computational Design IV", Waltraud M. Kriven, Andrew L. Gyekenyesi, Yanchun Zhou, and Jingyang Wang, Editors; SoshuKirihara and SujantoWidjaja, Volume Editors, *Ceram. Eng. Sci. Procs.* Vol. **34**(10), pp. 272-281 (2013)

« Contribution of image processing techniques to the simulation of Chemical Vapor Infiltration of SiC in CMCs», G. L. VIGNOLES, C. CHAPOULLIÉ, W. ROS, C. MULAT, G. COUÉGNAT, C. GERMAIN, J.-P. DA COSTA, M. CATALDI, C. DESCAMPS, *Procs. HT-CMC8*, Xi'An, Chine, 22-26 Septembre 2013, LT Zhang and DL Jiang eds., *Ceram. Trans.* vol. **248**, pp. 26-35 (2014).

Liste des communications

"Multiscale extraction of morphological features in woven CMCs", C. CHAPOULLIÉ, C. GERMAIN, J-P.DA COSTA, G. L. VIGNOLES, M. CATALDI, *ICACC 2013*, Daytona Beach, FL, Janvier 2013 (avec article)

« Contribution of image processing techniques to the simulation of Chemical Vapor Infiltration of SiC in CMCs», G. L. VIGNOLES, C. CHAPOULLIÉ, W. ROS, C. MULAT, G. COUÉGNAT, C. GERMAIN, J.-P. DA COSTA, M. CATALDI, C. DESCAMPS,. *HT-CMC8*, Xi'An, Chine, 22-26 Septembre 2013 (avec article)

« Traitement d'images et simulation d'infiltration chimique de milieux fibreux par des gaz », G. L. VIGNOLES, C. CHAPOULLIE, W. ROS, C. MULAT, G. COUEGNAT, J.-P. DA COSTA, C. GERMAIN, M. CATALDI, C. DESCAMPS, *Journées du GdRMicroMécanique des Milieux Fibreux*, Nancy, 26-27 Novembre 2013

« Synthèse contrainte de faisceaux de fibres dans un composite tissé », C. CHAPOULLIE, J.-P. DA COSTA, C. GERMAIN, M. CATALDI, G. L. VIGNOLES, *Journées Matériaux Numériques*, Loches, 12-14 Février 2013