

Génération de géométrie et de maillage pour la modélisation du comportement de matériaux composites tissés à l'échelle mesoscopique

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Gaspard LANDRON - avec la relecture de Federica DAGHIA

Édité le
21/10/2022

école
normale
supérieure
paris-saclay

Cette ressource est issue de travaux bibliographiques effectués dans le cadre d'un stage de fin de Master 2. Elle a été réalisée par Gaspard Landron, élève de l'ENS Paris Saclay. Federica Daghia, enseignante chercheuse au sein du Département Génie Mécanique de l'ENS Paris-Saclay et du laboratoire LMT, a participé à la relecture afin de garantir la qualité du contenu.

Les matériaux composites peuvent être architecturés de différentes manières comme indiqué dans la ressource « Matériaux composites et structures composites » [12]. En particulier, les matériaux composites tissés appartiennent à la famille des composites textiles. Cette famille a pour particularité un renfort composite fabriqué à partir de fils de fibres, appelés torons, qui sont tissés ou tressés. Le motif de tissage permet d'obtenir une structure complexe plus résistante qui ralentit la propagation de plusieurs types d'endommagement. Afin d'étudier le comportement de ce type de matériau numériquement, il est nécessaire de générer des modèles géométriques fidèles. Plusieurs méthodes existent et sont recensées dans cette ressource.

Cette ressource a pour but de présenter différentes méthodes appliquées pour la génération de la géométrie et du maillage de cellules élémentaires représentatives de composites tissés à l'échelle du toron pour une modélisation par méthode des éléments finis.

1 – Introduction

Les matériaux composites sont une famille de matériaux qui a pour particularité d'avoir une architecture optimisable en fonction des sollicitations auxquelles une pièce peut être soumise. Ils sont composés de fibres noyées dans une matrice, et peuvent être mis en forme de différentes manières. En particulier, on appelle matériau composite tissé un matériau constitué de fils de fibres noyées dans une matrice, appelés torons, que l'on entremêle à la manière d'un textile pour former un tissé sec. Ce tissé sec est ensuite noyé à son tour dans une matrice. Cela permet de fabriquer un renfort architecturé très versatile car il est possible de changer l'architecture d'un renfort localement dans une pièce pour s'adapter à un chargement. Il est possible de créer des renforts secs dont l'épaisseur correspond à celui de la pièce à fabriquer, ou bien d'empiler les unes sur les autres des couches, ou plis tissés, dans différentes directions pour fabriquer un composite stratifié. L'étape de compactage a pour effet de modifier les contacts entre torons ainsi que la géométrie de leur section.

L'architecture du renfort peut être bidimensionnelle ou tridimensionnelle. Les renforts 2D sont composés de deux réseaux de torons distincts : les torons de trame et les torons de chaîne, comme montré sur la Figure 1a. Lorsque le renfort comporte un troisième réseau dans l'épaisseur, on parle de renfort 3D, comme sur la Figure 1b.

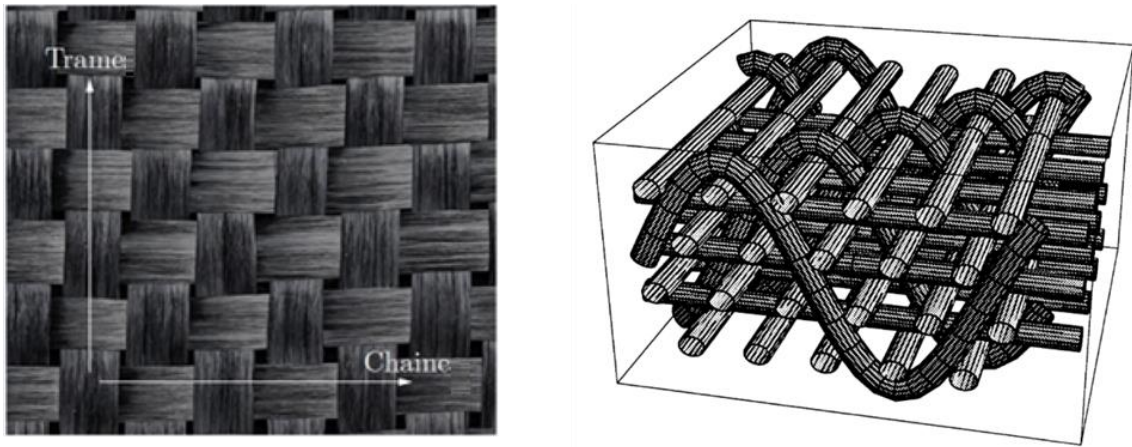


Figure 1 : Comparaison de réseaux 2D et 3D,
image par S. Adanur, 1998 [1]

Comme indiqué dans la ressource « Matériaux composites et structures composites » [12], il existe différentes manières d'agencer les fibres dans ces différents réseaux, ce qui permet d'obtenir une large gamme de comportements mécaniques en fonction des besoins. Les renforts 2D les plus fréquents sont appelés les renforts "armures", parmi lesquels on trouve le taffetas, le sergé et le satin. Ces renforts sont présentés sur la Figure 2.

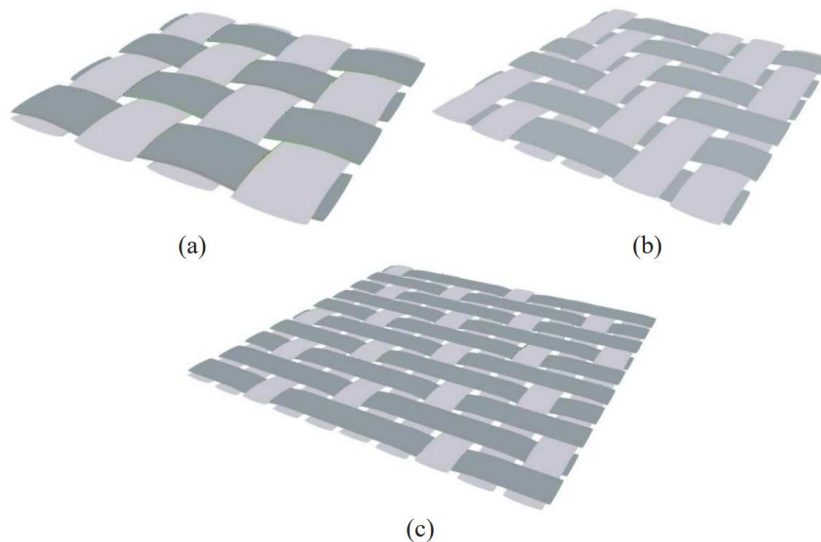


Figure 2 : Architecture des différentes armures de renfort 2D (a) taffetas (b) sergé et (c) satin,
image issue de la thèse de A. Doitrand, 2016 [2]

2 – Architecture des composites aux différentes échelles

Dans le cadre de la modélisation de ce type de matériaux, plusieurs échelles peuvent être considérées en fonction des phénomènes que l'on souhaite mettre en évidence, comme expliqué dans la ressource « Les dégradations des matériaux composites : les phénomènes physiques » [13] :

- L'échelle microscopique porte sur l'étude du comportement à l'échelle du micromètre, c'est-à-dire des fibres individuelles (environ 10 micromètres de diamètre) et de la matrice, de leur interface et sur les mécanismes primaires d'endommagement avec les premières décohésions, la fissuration de la matrice et les premières fissures formées par coalescence.
- L'échelle mésoscopique concerne l'étude du comportement des torons liés par la matrice, la section d'un toron mesurant quelques millimètres. La distribution des fibres n'est plus considérée, on attribue un comportement homogène mais anisotrope du toron, les caractéristiques homogénéisées ayant pu être déterminées par une étude de l'échelle

microscopique. Cette échelle permet la prise en compte de l'architecture du tissé pour l'identification d'un matériau homogène équivalent ainsi qu'une meilleure compréhension des mécanismes d'endommagement.

- L'échelle macroscopique correspond à l'échelle de la pièce, on considère des tailles de l'ordre du mètre. L'architecture du tissé n'est pas prise en compte. Le matériau a un comportement homogénéisé établi grâce à des études expérimentales ou à l'aide d'observations faites aux échelles inférieures.

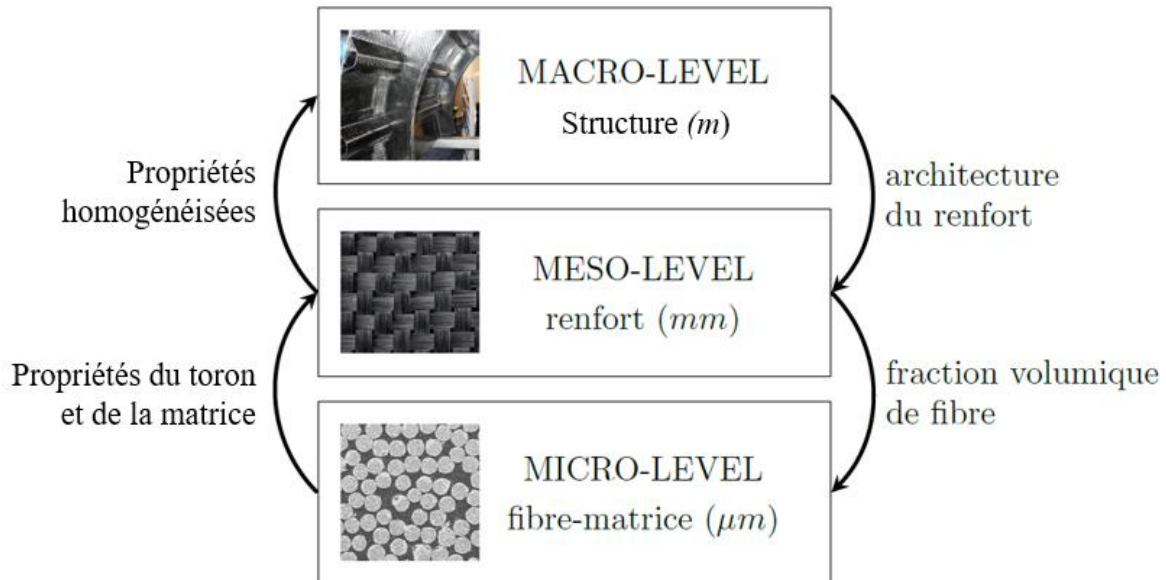


Figure 3 : Echelles de description des composites tissés, image issue de la thèse de A. Doitrand, 2016 [2]

Lorsque l'on veut déterminer si une pièce est adaptée aux sollicitations pour lesquelles elle est conçue, on peut utiliser deux types d'approche : les modèles phénoménologiques, et les modèles prédictifs. Les modèles phénoménologiques sont appliqués à l'échelle macroscopique. Ils permettent de reproduire un comportement qui a été observé expérimentalement, sans en décrire les causes. Ils nécessitent une campagne d'identification expérimentale importante pour tous les paramètres du matériau. Lorsque l'on change certains paramètres, comme l'architecture ou le matériau de la matrice ou des fibres, une nouvelle identification est nécessaire pour pouvoir appliquer ces modèles, ce qui les rend peu prédictifs. Les modèles prédictifs, quant à eux, permettent précisément de prendre en compte les causes d'un comportement pour en obtenir les conséquences. Ainsi, si un comportement de matériau a été validé pour l'étude d'une architecture de composite tissé, il sera possible d'appliquer le même comportement pour une architecture différente. L'échelle mésoscopique a donc un intérêt tout particulier pour l'étude du comportement des matériaux composites tissés à cause de leur architecture très particulière : la compréhension du comportement induit par l'entrelacement des torons permet une meilleure maîtrise des caractéristiques mécaniques d'une pièce étudiée à l'échelle macroscopique.

On se sert de l'échelle mésoscopique pour différents cas :

- La détermination d'un matériau homogène aux propriétés mécaniques équivalentes ;
- L'étude des modes de rupture des différentes architectures en fonction des sollicitations et l'impact de l'endommagement sur le comportement du renfort ;
- L'étude de l'impact de certains défauts, comme les porosités et la désorientation des torons, sur le comportement du renfort dans les deux cas précédents.

Ces études sont généralement effectuées sur une cellule représentative de l'architecture générale par la méthode des éléments finis afin d'en récupérer les propriétés générales dans les différentes directions.

Comme expliqué dans la ressource « Introduction à la simulation par éléments finis » [14], cette méthode s'appuie sur la discrétisation d'une représentation géométrique de l'architecture du matériau, appelée maillage, qui permet de transformer le problème continu et complexe d'origine en un système d'équations algébriques simples que l'on sait résoudre.

Le choix d'étudier seulement une cellule est justifié par le fait que les variations géométriques légères dues aux différentes étapes du procédé de fabrication telles que les variations de sections des torons, la dispersion des torons ou leur ondulation, n'ont que très peu d'effets sur les propriétés macroscopiques, ce qui permet d'utiliser une hypothèse de périodicité parfaite afin de réduire les coûts de calcul en ne considérant qu'une cellule élémentaire représentative (CER).

Cependant, pour que l'identification des propriétés soit correcte, il est nécessaire que la géométrie de la cellule ainsi que son maillage respectent les caractéristiques de la pièce réelle. Dans le cas d'un matériau composite tissé, il va s'agir des chemins et des sections des torons, ainsi que du taux de fibres.

3 – Génération de la géométrie d'une cellule élémentaire représentative

La géométrie peut être obtenue de différentes manières, en fonction du besoin, et celles-ci sont présentées dans cette section. Elles peuvent reposer sur différents principes, le modélisateur pouvant choisir de générer sa cellule représentative avec un générateur automatique, à partir d'un modèle numérique prenant en compte les variabilités mécaniques comme la déformation des sections ou bien à partir d'imagerie numérique.

Si les étapes d'obtention de la géométrie et du maillage sont indépendantes pour la génération automatique, ce n'est pas le cas des deux autres méthodes pour lesquelles ces deux étapes sont simultanées. Cette section ne s'intéresse qu'aux possibilités disponibles pour obtenir les bonnes caractéristiques géométriques, les méthodes de maillage sont explorées dans la section suivante.

3.1 - Génération automatique de motif

Il existe des logiciels de génération automatique de tissés, tels que WiseTex [4] et TexGen [5], permettant de créer une large gamme de motifs 2D et 3D à partir des dimensions estimées ou mesurées des sections et avec les trajectoires nominales des torons. Il peut cependant y avoir des soucis d'interpénétration des torons au cours de la génération, qui empêchent le maillage de la géométrie sans corrections. Ces générateurs de géométries ne prennent pas en compte l'étape de compaction du tissé, les torons ont une section constante idéalisée le long de la ligne moyenne du toron, ce qui fait que le taux de toron est sous-estimé et les zones de matrice peuvent être beaucoup plus importantes que dans la réalité après compaction, on est donc loin d'une représentation précise du matériau réel.

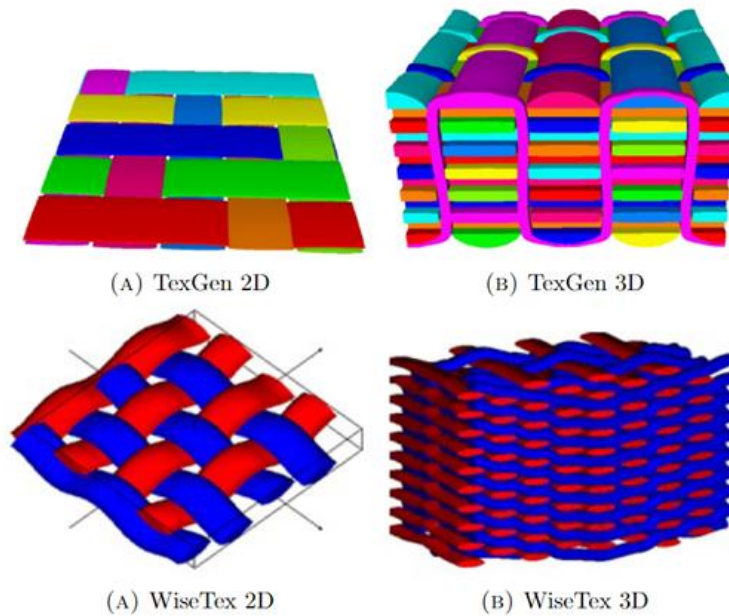


Figure 4 : Cellules obtenues avec des générateurs automatiques, images issues des sites de WiseTex [4] et TexGen [5]

Elles permettent également d'obtenir une représentation d'un grand nombre de motifs, ce qui permet d'étudier la pertinence de la périodicité supposée de la structure.

3.2 - Génération avec un modèle mécanique

Face aux limites des géométries générées automatiquement, c'est-à-dire des sections constantes de torons et la non prise en compte de la compaction, des stratégies basées sur des considérations mécaniques ont été développées. Elles se basent sur les géométries introduites précédemment que l'on va mailler afin de simuler l'application d'un chargement.

On distingue deux philosophies : par réduction des sections puis gonflement avec conditions de contact ou par compaction d'une géométrie analytique corrigée. On évite ainsi les interpénétrations. Dans le premier cas, on considère une géométrie de torons plus fins passant par le chemin nominal pour éviter les interpénétrations. Une étape de gonflement est ensuite effectuée avec un chargement interne, qui peut être une dilatation thermique ou une pressurisation. Une condition de contact est appliquée entre les surfaces des torons pour éviter l'interpénétration, et le gonflement s'arrête lorsque le taux de fibre a atteint une valeur cible, comme montré sur la Figure 5.

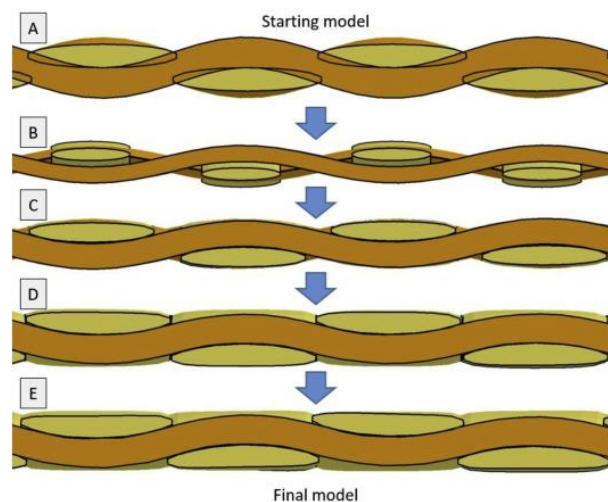


Figure 5 : : Procédé d'obtention d'une géométrie réaliste avec un chargement thermique, image par G. Nilakantan 2017 [6]

La deuxième catégorie repose sur la prise en compte des propriétés en compression des torons. Après maillage d'une géométrie générée automatiquement et corrigée, on simule le compactage de plusieurs couches de tissu numériquement, comme montré sur la Figure 6. Cela permet d'avoir une géométrie prenant en compte la déformation des torons et le décalage entre couches. Une étape de détection des zones de contact au cours du compactage est cependant nécessaire afin d'éviter les interpénétrations, ce qui peut s'avérer être complexe.

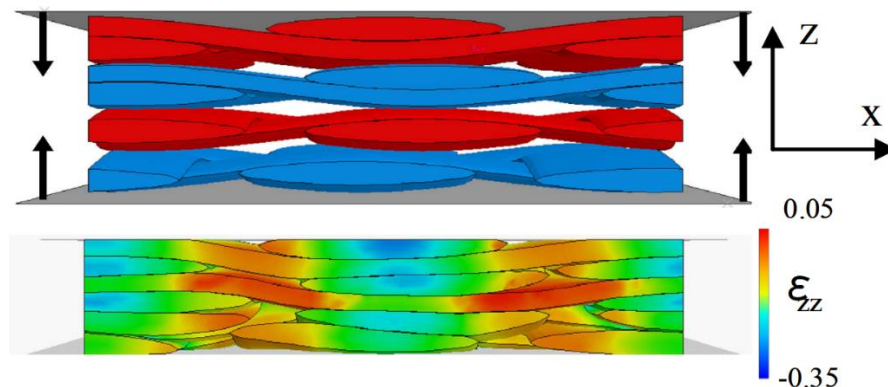


Figure 6 : Compactage de 3 couches de satin de 5, image issue de la thèse de A. Doitrand, 2016 [2]

Cette étape de compactage numérique permet d'augmenter la proportion de toron dans la cellule, comparativement à la cellule idéale initiale. Cela permet d'augmenter la fraction volumique de fibres dans la cellule étudiée et de se rapprocher des proportions mesurées expérimentalement.

Ces méthodes de génération permettent d'obtenir des cellules dont la géométrie interne est proche de celle observée expérimentalement, comme le chemin des torons et les formes de sections. Cependant, la gestion des zones de contact représente une difficulté importante. De plus, il peut être délicat d'obtenir par simulation des désorientations de torons qui peuvent apparaître au cours de la fabrication à cause d'un outillage inadapté. Pourtant, ces défauts peuvent modifier le comportement du matériau ainsi que sa manière de s'endommager, il est donc important de pouvoir les prendre en compte si on étudie la rupture du matériau.

3.3 - Génération à partir d'imagerie numérique

Il est possible de construire une géométrie numérique à partir de mesures effectuées sur une pièce fabriquée avec le matériau d'intérêt, grâce à une tomographie par exemple.

La tomographie est une technique de reconstruction d'un objet 3D à partir d'une série de mesures effectuées depuis l'extérieur, comme expliqué dans la ressource « La tomographie en sciences et mécanique des matériaux : voyage au centre de la matière » [15]. L'objet est découpé numériquement en tranches, stockées sous la forme d'images, à partir desquelles on peut reconstituer la géométrie initiale et les différents volumes qui la composent de manière non destructive, en opposition à des méthodes basées sur des images prises à différents niveaux de polissage d'une tranche d'éprouvette par exemple.

L'imagerie numérique par tomographie permet d'obtenir un modèle qui décrit les détails de la structure interne des composites tissés, et donc d'inclure certains défauts dans le modèle comme la présence de porosité là où la matrice n'a pas bien imprégné, la déformation des torons ainsi que leur désorientation. Ces méthodes peuvent également être utilisées pour obtenir la distribution des fibres à l'intérieur des torons si la résolution d'image est suffisante.

Les procédures de modélisation à partir d'une reconstruction numérique comportent généralement quatre étapes après l'obtention de l'image : (I) traitement d'image pour améliorer la qualité et les contrastes, (II) segmentation afin d'identifier les différents torons de la cellule pour l'attribution de caractéristiques mécaniques et définition des interfaces, (III) création du modèle géométrique et (IV) modélisation par éléments finis pour la prédiction des performances de la cellule. L'étape de traitement d'images est nécessaire car la qualité des mesures va grandement dépendre de la résolution du tomographe, mais aussi du matériau utilisé. En effet, tous les matériaux ne présentent pas les mêmes niveaux de contrastes qui sont nécessaires à la séparation des différents volumes. Les contrastes sont dus aux écarts de densité entre les différents matériaux. Par exemple, la matrice a généralement une densité autour de 1200 kg/m^3 , tandis que la fibre de carbone a une densité de 1800 kg/m^3 . La Figure 7 montre la reconstitution d'un tissé sec 3D, donc sans matrice, seulement les torons, et son maillage. L'image numérique 3D est composée de voxels (équivalent 3D du pixel en 2D) qu'il est possible d'utiliser afin de construire un maillage pour la simulation par la méthode des éléments finis. Cette méthode est décrite dans la section suivante.

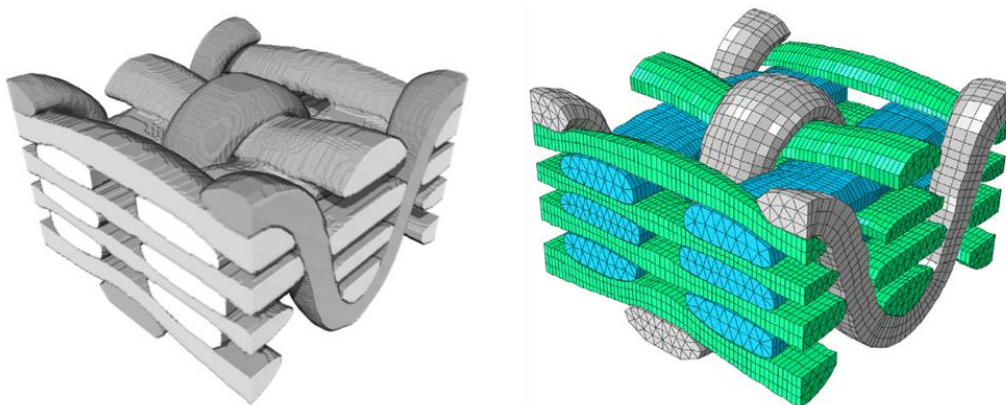


Figure 7 : Tissé sec 3D obtenu à partir d'une tomographie, image issue des travaux de N. Naouar 2015 [7]

La construction d'une géométrie numérique à partir de tomographie nécessite généralement des tomographes avec une résolution très fine, sous $10 \mu\text{m}/\text{voxel}$. Ces appareils sont malheureusement très coûteux.

Des travaux existent aussi avec des tomographes moins précis mais qui adoptent une philosophie différente. Cette dernière consiste à recalcrer une géométrie analytique sur des mesures de tomographie de manière itérative, à l'aide d'un critère de corrélation, comme montré sur la Figure 8. Cette méthode est utilisable pour des tomographies ayant une résolution entre $10\mu\text{m}/\text{voxel}$ et $25 \mu\text{m}/\text{voxel}$.

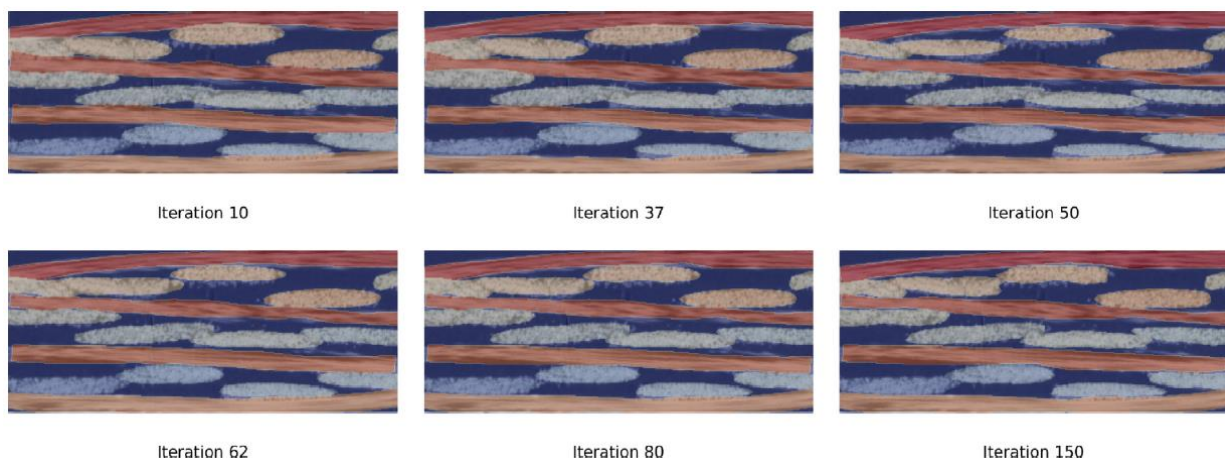


Figure 8 : Construction itérative d'un modèle géométrique à partir d'une tomographie, image issue des travaux de J. Benezech, 2019 [8]

Ces méthodes nécessitent cependant l'intervention de l'utilisateur à différentes étapes, par exemple lors de la segmentation qui se fait généralement manuellement sur chaque image de la tomographie, ce qui peut rendre le traitement de motifs complexes laborieux, notamment pour la prise en compte de défauts géométriques. De plus, leur utilisation suppose l'existence du matériau dont on souhaite simuler le comportement, ce qui les rend inadaptées pour une étude d'optimisation d'un choix de motif adapté aux sollicitations locales d'une pièce.

3.4 - Bilan sur la génération de cellule représentative

Plusieurs méthodes existent donc pour générer des géométries plus ou moins réalistes. Les géométries les plus réalistes sont celles issues de l'imagerie numérique, cependant elles demandent un outillage adapté et également des opérations de traitements d'image dont la difficulté peut varier avec la qualité de la prise d'images et avec les caractéristiques optiques du matériau, comme le contraste. Néanmoins, ce coût devient nécessaire pour modéliser précisément les variations de comportement, mais aussi les mécanismes de rupture associés à des défauts. Il reste important de se rappeler que l'imagerie numérique nécessite l'existence de la pièce et de ce fait, elle se trouve limitée dans le cadre d'une optimisation locale d'un matériau. Elles restent cependant intéressantes pour établir la qualité des modèles obtenus à partir de la prise en compte du comportement mécanique des torons.

4 – Méthodes de maillage d'une cellule élémentaire

En parallèle de l'obtention de la géométrie, il est nécessaire de réfléchir à la méthode de maillage que l'on veut utiliser, et donc à la fidélité de la discrétisation à la géométrie initiale. Il s'agit d'une problématique très complexe à cause des spécificités de l'architecture et des moyens d'obtention du modèle : les zones de contact entre torons sont compliquées à mailler à cause de la finesse nécessaire et des maillages basés sur les voxels de l'imagerie numérique nécessitent une étape de lissage pour éviter les concentrations de contraintes au niveau des interfaces entre torons et matrice.

4.1 - Maillage voxel

Les maillages voxels sont très répandus dans la littérature. Le principe de la méthode repose sur la discrétisation du modèle dans une grille 3D, et sur l'assignation à chaque élément de la grille des propriétés en fonction de sa position. Une des difficultés de ce type de discrétisation est la gestion des éléments d'interface contenant à la fois de la matrice et du toron. Cela nécessite la mise en place d'un critère permettant d'assigner un matériau à l'élément. Plusieurs choix sont possibles, comme assigner le matériau majoritaire ou un matériau mixte. Une idée pourrait être d'assigner un matériau homogénéisé, soit moyenné, ayant des caractéristiques qui correspondent aux proportions de chaque matériau dans l'élément. Cependant, cette stratégie nécessite de calculer possiblement autant de comportements homogénéisés qu'il n'y a d'éléments d'interface dans le maillage, ce qui peut représenter un fort coût si on a une discrétisation très fine de la géométrie. Ainsi, il est souvent préféré de n'attribuer qu'un seul des matériaux composant la structure.

Une stratégie de construction du maillage utilisée consiste par exemple à assigner le matériau toron aux éléments par lesquels passent les lignes moyennes des torons. Le reste des voxels se voient assigner leur matériau de proche en proche jusqu'à ce qu'il y ait contact entre les torons où jusqu'à ce qu'un volume donné soit atteint, comme montré sur la Figure 9.

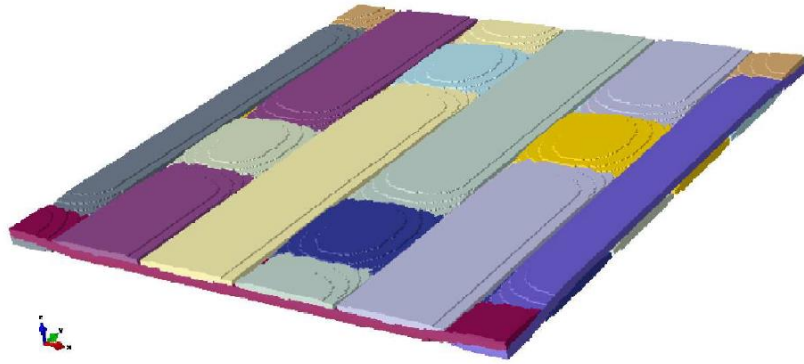


Figure 9 : Maillage voxel d'un satin de 5,
image par G. Hello, 2014 [9]

Les voxels permettent de mailler des géométries complexes et de prendre en compte les désalignements des torons et les variations de section. Ce type de maillage permet également d'obtenir des taux de fibres proches de la réalité, ce qui les rend tout à fait utilisables pour prédire des propriétés élastiques dans le cadre d'une homogénéisation. Cependant cette méthode pêche dans la représentation des surfaces courbes, car celles-ci ne peuvent pas être représentées par les surfaces planes des voxels cubiques. Cela crée des contacts artificiels entre torons, ce qui peut poser des problèmes dans certains cas d'étude, comme l'étude de la propagation de l'endommagement. Cette méthode de maillage présente tout de même l'immense avantage d'être facile à mettre en place, ce qui explique son utilisation.

4.2 - Maillage conforme

Un maillage conforme est un maillage qui respecte rigoureusement les formes des volumes maillés. La difficulté majeure dans le maillage des matériaux composites à renfort tissé est la gestion des interfaces entre torons, leur maillage et leurs contacts. Une solution consiste à ajouter une fine couche de matrice entre les torons afin de ne plus avoir de contrainte pour le maillage des torons comme montré sur la Figure 10. Seulement, l'ajout de cette couche de matrice va nécessiter de mailler finement la zone de contact si elle est mince, mais elle peut aussi altérer des caractéristiques telles que le taux de fibres si elle est trop épaisse. Afin de compenser cette imprécision, le modélisateur peut choisir de modifier artificiellement le taux de fibres dans les torons, en attribuant des taux de fibres largement supérieurs à ceux observés expérimentalement.

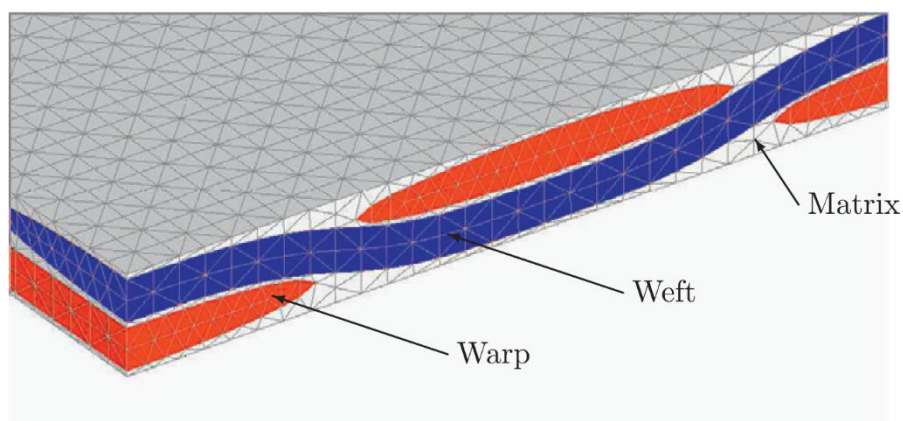


Figure 10 : Insertion d'une couche de matrice entre les torons pour éviter les contacts,
image par A. Melro, 2012 [10]

La problématique du maillage conforme a été explorée de différentes manières. Il est possible par exemple d'utiliser une description d'une géométrie de renfort par un nuage de points pour définir un critère de distance entre torons. Si deux surfaces ne respectent pas ce critère, c'est-à-dire s'il y

a interpénétration ou contact, alors la géométrie du nuage de points est modifiée pour décrire une position moyenne qui forme la zone de contact. Un maillage correspondant à cette zone est ensuite généré. D'autres travaux ont choisi de lisser les maillages voxels, comme présenté sur la Figure 7 précédemment.

Utiliser un maillage conforme représente une difficulté majeure à cause de la gestion du nombre très important de zones de contact qui peut exister au sein de la cellule. Si des méthodes existent pour générer ces maillages, cela reste un problème complexe très contraignant. Les maillages conformes permettent de représenter correctement l'état de contraintes local dans la cellule, ce qui les rend plus adaptés pour la prédiction de l'amorce et de la propagation de l'endommagement, comme discuté dans la section suivante.

4.3 - Comparaison entre modèles voxelisés et modèles conformes

En 2015, Doitrand et al. [10] ont étudié la différence entre les maillages voxels et les maillages conformes d'une cellule de taffetas, montrés sur la Figure 11. Cette comparaison avait pour but de choisir un maillage pour l'étude des mécanismes de la rupture d'un composite tissé. En parallèle des problèmes de concentrations de contraintes en bordure de torons, une étude de convergence du taux de fibres a été menée. La comparaison a été étendue aux caractéristiques mécaniques à l'échelle macroscopique, aux champs de contraintes locaux, et à la prédiction du premier endommagement.

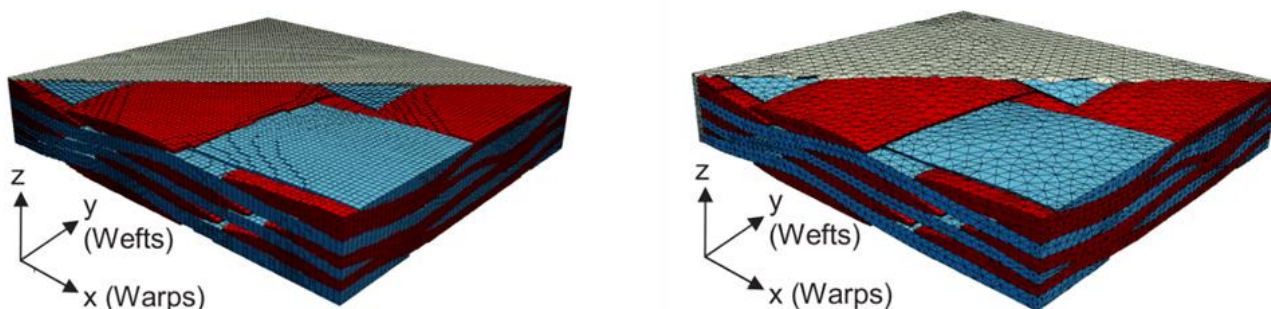


Figure 11 : Comparaison d'un maillage voxel et d'un maillage conforme, image par A. Doitrand [11]

Comme dit précédemment, l'assignation d'un matériau est problématique au niveau des interfaces pour les maillages voxels. Pour cette étude, le choix a été fait de considérer que la position du centre du voxel déterminait son matériau. La discrétisation est un paramètre très important, le taux de fibres pouvant varier entre 48% et 58% pour un matériau à 57% comme le montre la Figure 12.

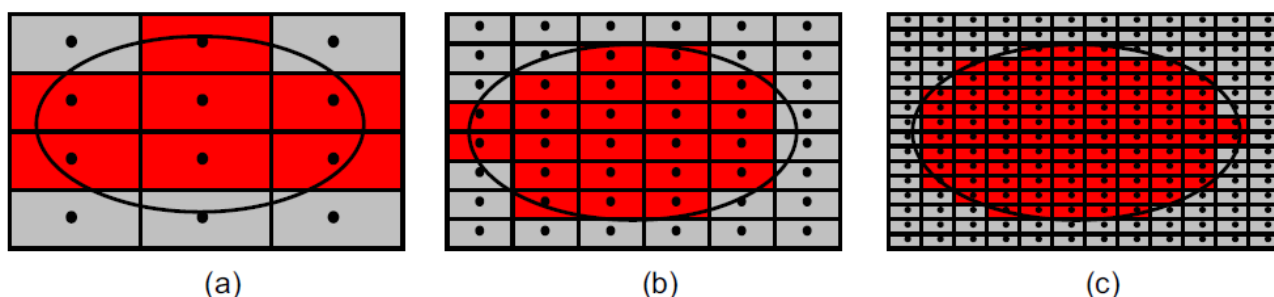


Figure 12 : Choix du matériau et influence sur le taux de fibres : 58%, 48% et 49%, image par A. Doitrand [11]

Il est donc nécessaire de mener une étude de convergence du taux de torons en fonction de la taille du voxel. L'utilisation de voxels impose au maillage d'avoir une seule taille d'élément pour toute

la structure. Ainsi, il faut beaucoup plus de voxels dans un maillage voxel que de tétraèdres dans un maillage conforme pour obtenir le bon taux de fibre.

Avec des voxels cubiques, 2 millions de nœuds sont nécessaires pour un obtenir un taux de fibres avec un écart inférieur à 0.4% par rapport à celui obtenu avec un maillage conforme convergé. Pour le maillage conforme, en imposant une taille maximale d'élément de 0.25 mm, 34100 nœuds suffisent pour un maillage tétraédrique.

Le maillage conforme est donc plus intéressant en termes de nombre de nœuds et donc en termes de temps de calcul. Cependant, le maillage voxel est plus facile à générer à partir de l'imagerie, ce qui les rend encore plus compétitifs pour des calculs en élasticité linéaire.

Hormis le nombre de nœuds, la principale différence entre ces méthodes de maillage va être les concentrations de contraintes induites par la forme des éléments. En effet, la mécanique n'aime pas les angles comme décrit dans la ressource « Attention aux singularités ! » [16].

Il a été montré que ces concentrations de contraintes ont peu d'impact lorsque l'on cherche les propriétés d'un matériau homogène équivalent à un matériau composite, dans le cadre d'une homogénéisation en élasticité linéaire. Cela est dû au fait que l'homogénéisation moyenne ces concentrations dans le comportement global. Les maillages voxels sont donc parfaitement adaptés à l'étude du comportement en élasticité. En revanche, ce n'est pas le cas pour l'étude de phénomènes dépendant de la contrainte locale comme les premiers endommagements. Un écart de 30% a été observé localement dans les zones critiques entre le maillage conforme et le maillage voxel, ce qui a un pour effet d'initier plus d'endommagements que voulu, comme le montre la Figure 13.

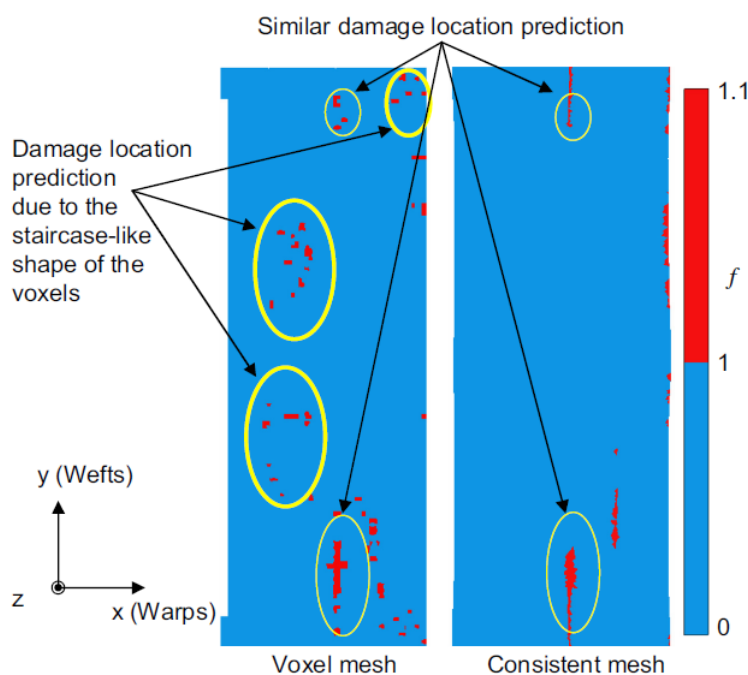


Figure 13 : Localisation des concentrations de contraintes sur un toron et prédiction des endommagements pour différents maillages, image par A. Doitrand [11]

Enfin, une opération de lissage des contraintes, i.e. une opération au cours de laquelle on moyenne la contrainte en un point avec les contraintes aux points voisins, n'est pas suffisante pour améliorer la détection de premiers endommagements, car si les contraintes censées créer une fissure sont diminuées par lissage, alors elles peuvent ne plus être suffisantes pour amorcer l'endommagement, comme le montre la Figure 14.

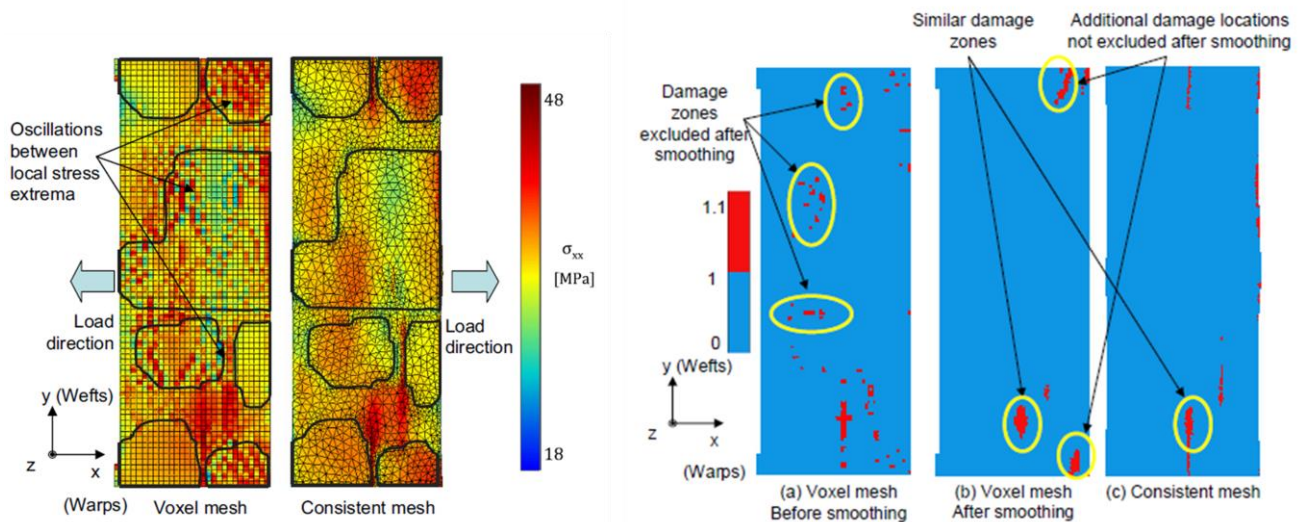


Figure 14 : Comparaison des zones d'endommagement avec et sans lissage, image par A. Doitrand [11]

5 – Bilan

Dans cette ressource, nous avons présenté et illustré les différentes manières de générer un maillage adapté à la modélisation du comportement de cellules de composites tissés. Il en est ressorti que :

1. Les géométries purement analytiques ne sont pas suffisantes pour obtenir une cellule avec des taux de toron et de fibre réalistes.
2. Les géométries obtenues à partir d'une prise en compte d'un comportement mécanique et d'une gestion des zones de contact peuvent correctement représenter le matériau, mais peuvent être complexes à mettre en place.
3. L'imagerie numérique est la méthode permettant d'obtenir la meilleure représentation de l'architecture du matériau, prenant en compte les défauts géométriques comme les désorientations, et les défauts de fabrication comme la présence de porosités dans la matrice. Cette méthode peut servir de vérification pour une cellule générée avec une autre méthode. Elle ne peut cependant pas être utilisée pour générer un motif optimisé car la pièce doit être fabriquée pour pouvoir être récupérée.

Nous avons également exploré les méthodes de maillage existantes et les avons comparées. Il en ressort que le maillage voxel est plus facile à mettre en place. Néanmoins, cette méthode devient beaucoup plus coûteuse qu'un maillage conforme lorsqu'il s'agit de modéliser des phénomènes locaux comme l'amorçage et la propagation de l'endommagement.

Références :

[1]: S. Adanur and T. Liao. "3D modeling of textile composite preforms." Composites Part B : Engineering, 29(6) :787-793, November 1998.

[2]: A. Doitrand, Endommagement à l'échelle mésoscopique et son influence sur la tenue mécanique des matériaux composites tissés, 2016

[3]: G. Grail, M. Hirsekorn, A. Wendling, G. Hivet, and R. Hambli. "Consistent Finite Element mesh generation for meso-scale modeling of textile composites with preformed and compacted

reinforcements.” Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, 55 :143-151, December 2013.

[4]: WiseTex, <https://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Composites/software/wisetex>.

[5]: TexGen, <http://texgen.sourceforge.net/>.

[6]: Q.T. Nguyen, E. Vidal-Sallé, P. Boisse, C.H. Park, A. Saouab, J. Bréard, and G. Hivet. “Mesoscopic scale analyses of textile composite reinforcement compaction.” Composites Part B: Engineering, 44(1) :231-241, January 2013.

[7]: N. Naouar, E. Vidal-Salle, J. Schneider, E. Maire, and P. Boisse. 3D composite reinforcement meso F.E. analyses based on X-ray computed tomography. Composite Structures, 132 :1094-1104, November 2015.

[8]: J. Bénézech and G. Couégnat. “Variational segmentation of textile composite preforms from X-ray computed tomography.” Composite Structures, 230 :111496, December 2019.

[9]: G. Hello, J. Schneider, and Z. Aboura. Numerical simulations of woven composite materials with voxel-fe models, European Conference on Composite Materials (ECCM) 16, Seville, Espagne, 22-26 June 2014.

[10]: A.R. Melro, P.P. Camanho, F.M. Andrade Pires, and S.T. Pinho. “Numerical simulation of the non-linear deformation of 5-harness satin weaves.” Computational Materials Science, 61 :116-126, August 2012.

[11]: A. Doitrand, C. Fagiano, F.-X. Irisarri, and M. Hirsekorn. Comparison between voxel and consistent meso-scale models of woven composites. Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, 73 :143-154, June 2015.

[12]: Matériaux composites et structures composites, L. Gendre, novembre 2015, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/materiaux-composites-et-structures-composites

[13]: Les dégradations des matériaux composites : les phénomènes physiques, F. Daghia, L. Gendre, D. Violeau, janvier 2016, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/les-degradations-des-materiaux-composites-les-phenomenes-physiques

[14]: Introduction à la simulation par éléments finis, L. Gendre, novembre 2016, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/introduction-a-la-simulation-par-elements-finis

[15]: La tomographie en sciences et mécanique des matériaux : voyage au centre de la matière, F. Hild, H. Horsin Molinaro, S. Roux, février 2015, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/la-tomographie-en-sciences-et-mecanique-des-materiaux

[16]: Attention aux singularités ! L. Champaney, L. Gendre, mars 2017, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/attention-aux-singularites

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>