



HAL
open science

Méthodes de gestion du contact pour l'analyse mécanique des assemblages mécaniques

Fatah Kheris, Alain Rassineux, Benjamin Hagège

► **To cite this version:**

Fatah Kheris, Alain Rassineux, Benjamin Hagège. Méthodes de gestion du contact pour l'analyse mécanique des assemblages mécaniques. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592835

HAL Id: hal-00592835

<https://hal.science/hal-00592835>

Submitted on 3 May 2011

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

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

Méthode de gestion du contact pour l'analyse mécanique des assemblages mécaniques

F. Kheris¹, A. Rassineux¹, B. Hagège¹

¹Laboratoire Roberval, Université de Technologie de Compiègne, France, {fatah.kheris,alain.rassineux}@utc.fr

Résumé — Les travaux que nous proposons concernent le développement d'une technique de remaillage local tridimensionnel permettant la mise en coïncidence des nœuds des surfaces en contact pour améliorer l'efficacité et la robustesse des procédures de contact multi-corps dans le cadre de la simulation numérique des procédés d'assemblage mécanique par éléments finis. Les surfaces de contact sont ensuite représentées par approximation diffuse.

Mots clefs — Contact, remaillage, méthodes sans maillage

1 Introduction

Que ce soit pour la simulation des procédés de mise en forme, d'assemblage, d'usinage ou la simulation du crash, le recours au contact est largement répandu dans les milieux industriels. Les difficultés rencontrées concernent la résolution numérique, la taille des problèmes et le caractère fortement non linéaire des inéquations régissant les phénomènes. [4, 5]. En outre, les conditions aux limites du contact ne sont pas connues à l'avance mais dépendent de la solution des équations d'équilibre de la structure.

La formulation éléments finis la plus utilisée pour le traitement d'un problème de contact, en grandes ou petites déformations, est la stratégie maître/esclave, où les nœuds de la surface esclave sont contraints de ne pas pénétrer les facettes de la surface maître. L'inconvénient majeur de cette méthode est la non-symétrie des rôles attribués au maître et à l'esclave, ajouté à cela qu'il n'est pas possible de passer le contact patch test avec une telle formulation [3, 7]. D'autres méthodes, telle que l'utilisation d'une surface de contact intermédiaire, permet de pallier à ces inconvénients [4, 7]. L'approche que nous proposons apporte des solutions à ces problèmes.

L'objectif des travaux est d'obtenir un maillage 3D qui réalise une mise en coïncidence des nœuds des surfaces en contact. Il s'agit de réaliser une boucle d'adaptation de maillage surfacique et volumique associée à des outils de construction de surface et des outils de projection. Nous utilisons ainsi des techniques de remaillage couramment employées dans le cadre de procédures de calcul adaptatif. Le but est d'accroître la robustesse du traitement géométrique du contact et d'assurer un bon transfert des efforts à travers la surface de contact. En outre, un remaillage suivant un critère de taille permet de mieux représenter la zone de contact.

2 Formulation d'un problème de contact

Deux corps élastiques déformables Ω^1 et Ω^2 entrent en contact, lorsqu'ils tendent à occuper le même espace, le contact est supposé sans frottements, les équations introduites par le contact s'expriment :

$$g_N = (\mathbf{x}^2 - \bar{\mathbf{x}}^1) \cdot \bar{\mathbf{n}}^1 \geq 0 \quad (1)$$

$$p_N < 0 \quad (2)$$

$$p_N g_N = 0 \quad (3)$$

Où g_N dénote le gap entre les points maître et esclave, tandis que p_N représente la pression normale à la surface de contact.

Ces inéquations forment les conditions de HERTZ-SIGNORINI-MOREAU, elles sont aussi appelées les conditions de KUHN-TUCKER-KARUSH par analogie à l'optimisation.

L'inéquation (1) indique qu'il ne peut y avoir que décollement et non pénétration, l'inéquation (2) indique que les efforts normaux correspondent à des efforts répulsifs, tandis que l'équation (3), indique qu'il ne peut y avoir décollement et contact au même temps, cette dernière est appelée condition de complémentarité.

Aux conditions de HERTZ-SIGNORINI-MOREAU, il faut ajouter l'équation d'équilibre, la loi de comportement et les conditions d'admissibilité. La formulation variationnelle du problème de contact s'exprime alors :

$$G^{\text{int}}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - G^{\text{ext}}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - \sum_{i=1}^2 \int_{\Gamma_c^i} p_N^i(\mathbf{u}^i) (u_N^i - v_N^i) d\Gamma = 0 \quad (4)$$

Où $G^{\text{int}}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ et $G^{\text{ext}}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ forment respectivement les travaux virtuels des efforts internes et externes aux deux corps en contact, \mathbf{v} est un champ cinématiquement admissible vérifiant la condition d'impenétrabilité (équation (1)), Γ_c^1 et Γ_c^2 sont les surfaces de contact maître et esclave respectivement.

L'appariement maître-esclave classique, nous permet de réécrire le troisième terme de (4) sur une seule surface de contact, la surface maître, on obtient alors :

$$G^{\text{int}}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - G^{\text{ext}}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - \int_{\Gamma_c^1} p_N^1 \left((u_N^1 - u_N^2) - (v_N^1 - v_N^2) \right) d\Gamma = 0 \quad (5)$$

Le problème de contact est donc de trouver \mathbf{u}^i et p_N^1 tels que (5) et (1-3) soient vérifiées, ce qui revient à résoudre un problème d'optimisation sous la contrainte d'inégalité introduite dans l'équation (1)[4,5].

De ce fait, la résolution du problème de contact fait appel aux méthodes issus de l'optimisation [2, 4, 5] comme la méthode de pénalisation, les multiplicateurs de Lagrange ou encore la méthode du lagrangien augmenté, chacune de ces méthodes possède ses propres avantages et inconvénients [4,5], ces méthodes impliquent des choix de modélisation des efforts de contact [5].

Il est important de noter à cette étape que la définition du gap nécessite de faire un appariement entre les points appartenant aux faces des deux solides en contact, L'appariement le plus couramment utilisé est celui dit maître/esclave, mais ce dernier n'est pas exempté d'inconvénients, car l'attribution des rôles joués par les solides maître ou esclave n'a pas de sens physique et bien que des règles d'affectation de rôle à tel ou tel solide ont déjà été apportées par la littérature [1], le choix des rôles requiert bien souvent l'intervention d'un opérateur humain.

3 Contact nœud à nœud — motivations

Ces travaux sont motivés entre autre par les résultats présentés dans [7], où est présentée une approche de calcul basée sur le développement d'éléments d'interface à nœud variable, cette approche s'est montré efficace en comparaison aux résultats obtenus par les algorithmes maître/esclave, notamment dans le cadre d'un patch test proposé par Papadepoulos et Taylor en 1991 [3, 7] et montré dans la figure (1).

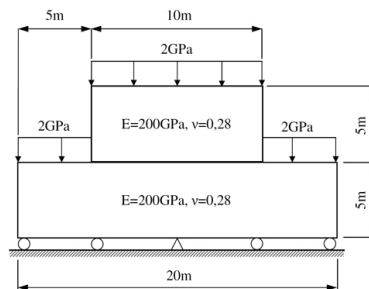


FIG. 1 – Contact patch test

Deux blocs déformables élastiques sont superposés l'un sur l'autre. Ces blocs ont les mêmes propriétés matérielles et sont soumis aux conditions limites montrées dans la figure (1). L'exemple est traité en contraintes planes, nous présentons sur la figure (2) les résultats de la simulation du patch test sur Ansys avec deux maillages sur l'interface de contact.

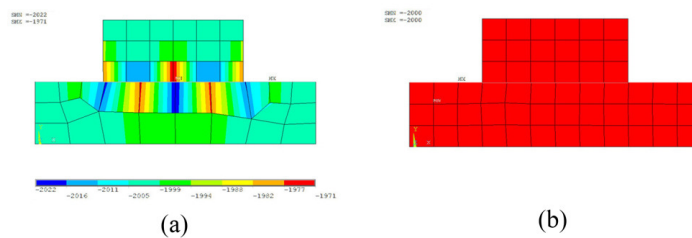


FIG. 2 – Visualisation de la contrainte σ_{22} sur le patch test

Le post-traitement de la contrainte σ_{22} sur les deux exemples du patch test, montre qu'avec une interface nœud à nœud on arrive bien à passer le patch test (figure 2-b), tandis que l'algorithme maître/esclave d'Ansys ne passe pas le patch test (figure 2-a) à cause d'un mauvais transfert des efforts sur l'interface de contact.

Le même constat peut être fait en 3D. Nous avons repris le contact patch test, avec les mêmes conditions limites et les mêmes propriétés matérielles, auquel on a ajouté la troisième direction. Les résultats du post-traitement de la contrainte σ_{33} sont montrés dans la figure 3. On voit bien que l'algorithme maître/esclave (figure 3-a) n'assure pas un bon transfert des efforts via l'interface de contact.

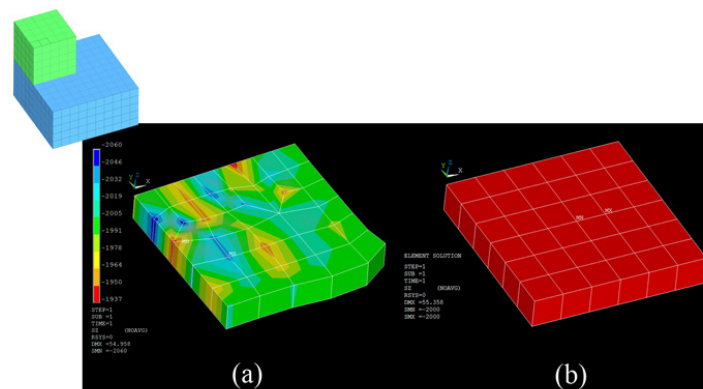


FIG. 3 – Visualisation de la contrainte σ_{33} sur le patch test

4 Méthodologie

La préparation au contact nœud à nœud passe par les étapes suivantes : la détection adaptative de la zone de contact, le remaillage pour satisfaire un critère de taille permettant de mieux représenter la zone de contact, la représentation de la zone de contact sous la forme d'une forme quadratique calculée par approximation diffuse.

Le remaillage illustré figure 4 fait appel aux étapes suivantes :

1. On détecte la zone de contact : on obtient des zones maillées avec des maillages incompatibles en vis-à-vis.
2. La frontière de l'intersection est située sur une bande d'éléments qui délimite la zone de contact qu'il convient de remailler en utilisant un espace de projection convenablement choisi.
3. On remaillie localement chaque surface avec des nœuds disposés en vis-à-vis.
4. On détruit les éléments volumiques reliés aux éléments surfaciques modifiés.
5. La cavité constituée par les éléments volumiques modifiés est remaillée.

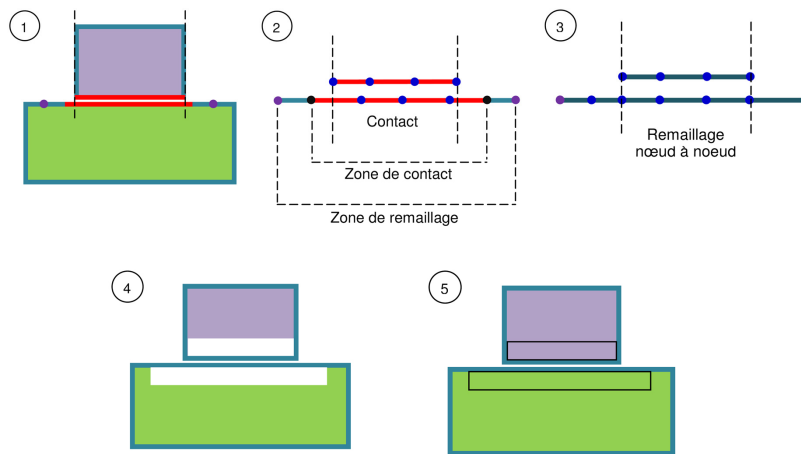


FIG. 4 – Procédure de remaillage

4.1 Algorithme de recherche

Une détection efficace des noeuds potentiellement en contact nécessite l'utilisation de structures de données performantes permettant d'éviter pour un parcours exhaustif et coûteux de l'ensemble des éléments. Les procédures présentées ici en contexte de petites déformations se généralisent à un contexte de grandes déformations en mettant à jour les structures de repérage à chaque incrément de chargement.

On réalise un pavage sous forme d'une grille uniforme (auss appelé bucket search) de l'espace de simulation, dans le but de constituer les couples d'intersection arête-face et par conséquent les points correspondant de l'intersection. Le but est de balayer les cellules qui contiennent l'arête, à la recherche d'une cellule partagée entre l'arête actuelle et une éventuelle face du corps maître.

La détection du contact ne se fait pas à partir du maillage en tétraèdre initial mais à partir du seul maillage surfacique. L'utilisation d'un maillage volumique permet de détecter plus facilement les intersections du maillage mais alourdit considérablement le volume de données à traiter et réduit les performances du calcul.

Si l'on utilise les seules frontières de domaines constituées de maillage en triangles, les intersections détectées sur le maillage sont de 2 natures comme l'illustrent la figure ci-dessous. On distingue les intersections arête-face non planes (figure 5b) et les intersections dans le plan (figure 5a).

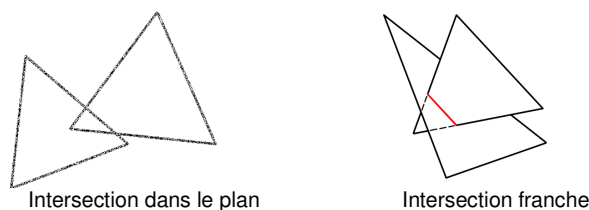


FIG. 5 – Types d'intersections

Dans le cas d'intersection dans le plan, le produit vectoriel des normales aux deux faces doit être nul et ces faces situées dans un même plan à une tolérance près. En d'autres termes, les faces sont parallèles et distantes d'une valeur maximale que l'on appelle gap.

Dès lors que la distance entre les deux faces dépasse cette valeur, le contact n'est plus détecté, la figure (6) illustre ce cas de figure/ Il s'agit d'un contact entre deux sphères où seules les faces intersectées ont été détectées comme appartenant à la zone de contact. Les faces contenues dans l'espace délimité par les faces d'intersections n'ont pas été détectées parce qu'elles sont à une distance qui dépasse le gap. Une détection du contact à l'aide d'éléments volumiques permet de détecter toute

la zone de contact dans ce cas. La solution consiste à incrémenter le déplacement des nœuds de 0 à 100% et à chaque incrément de repérer les nœuds en contact. Ainsi la zone non délimitée située à l'extérieur du gap est bien identifiée.

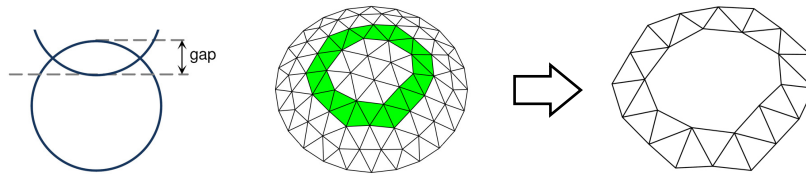


FIG. 6 – Intersection plane, importance du gap

4.2 Procédure de remaillage

Après détection des faces de contact, nous obtenons des zones de contact avec des maillages incompatibles qu'il convient de remailler avec des nœuds disposés en vis-à-vis (remaillage en nœud à nœud).

Afin de remailler la zone de contact, il est impératif de trouver un espace paramétrique (u, v) dans lequel on pourra utiliser un algorithme usuel de maillage dans le plan. On fait l'hypothèse que la zone de contact est localement développable ce qui correspond à la majorité des cas les couramment rencontrés. Nous présentons une technique permettant de mettre à plat cette zone de contact.

L'idée consiste à procéder à un dépliage élément par élément, en reprenant les lignes guides d'une méthode de maillage frontale.

On commence par mettre à plat un premier élément. Le repère de projection choisi est le plan du premier élément, les arêtes de cet élément nous permettent d'accéder aux éléments voisins.

On choisit une arête AB (figure 7), on projette l'élément adjacent en préservant la distance h entre le point C du triangle n'appartenant pas à l'arête AB et sa projection orthogonale comme montré sur la figure 7.4.

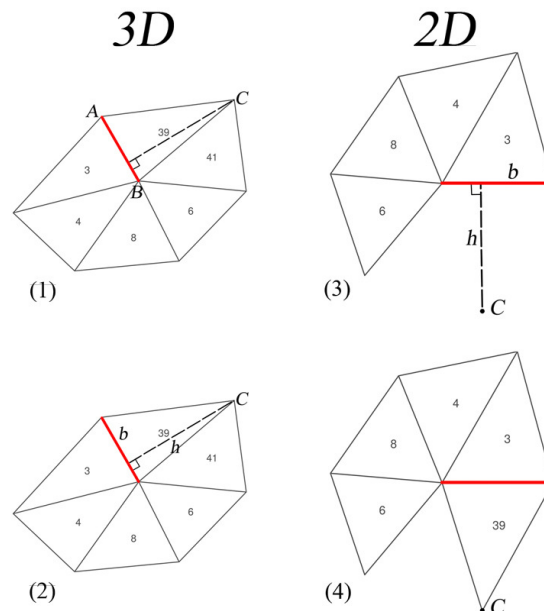


FIG. 7 – procédure de dépliage

Le maillage est déplié avec une déformation inévitable si la surface de contact n'est pas développable, comme dans le cas de la sphère par exemple. On peut raisonnablement admettre que cette déformation est négligeable dans la majorité des cas et que la surface de contact est développable pour qu'il y ait contact. L'approche s'arrête quand la structure est entièrement pavée.

Il convient aussi de gérer le caractère périodique du paramétrage (cylindre) ou en d'autres termes veiller à ce qu'un nœud (de par ses connectivités) soit représenté par un couple de valeurs (u, v) unique dans l'espace des paramètres. Dans le cas du fretage, la surface de contact cylindrique possède un

caractère périodique (cf. figure 8) qui doit être pris en compte.

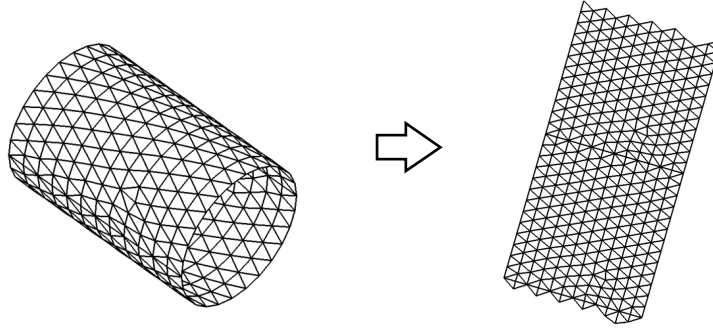


FIG. 8 – Mise à plat d'un cylindre

Une fois que le maillage a été mis à plat, on remaille l'interface avec des nœuds qui sont disposés en vis-à-vis, le remaillage se fait dans l'espace des paramètres (u,v) et le passage à la 3D se fait en utilisant les coordonnées barycentriques des nouveaux nœuds par rapport à l'ancien maillage voué à être détruit. Cette procédure est illustrée dans la figure 9.

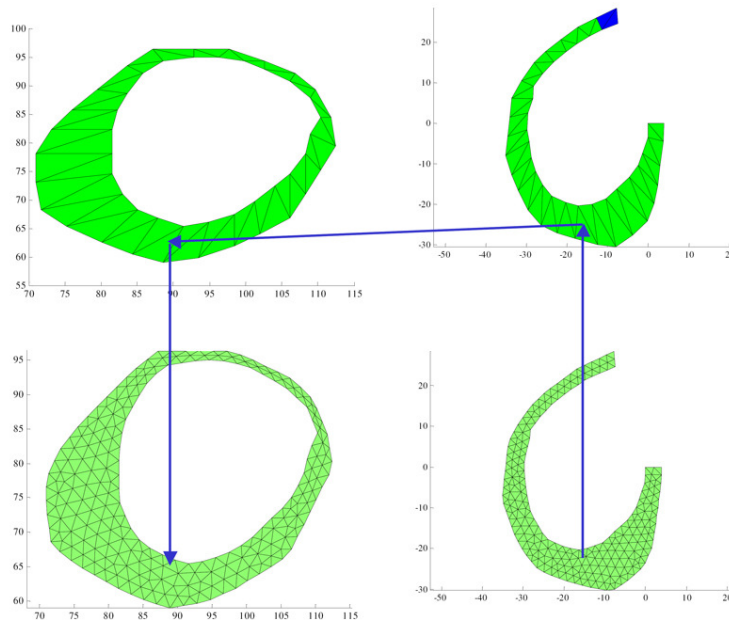


FIG. 9 – Remaillage et passage d'un maillage 2D à un maillage 3D

5 Validation des procédures de contact et de remaillage

Afin d'illustrer la robustesse de l'algorithme de remaillage nous nous proposons de reprendre le contact patch test présenté précédemment, en partant du même exemple nous déplaçons le bloc supérieur suivant un mouvement de translation comme le montre la figure 10. Seul le remaillage de la boîte inférieur est représenté (figure 11).

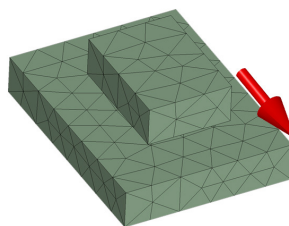


FIG. 10 – Exemple de contact plan avec mouvement

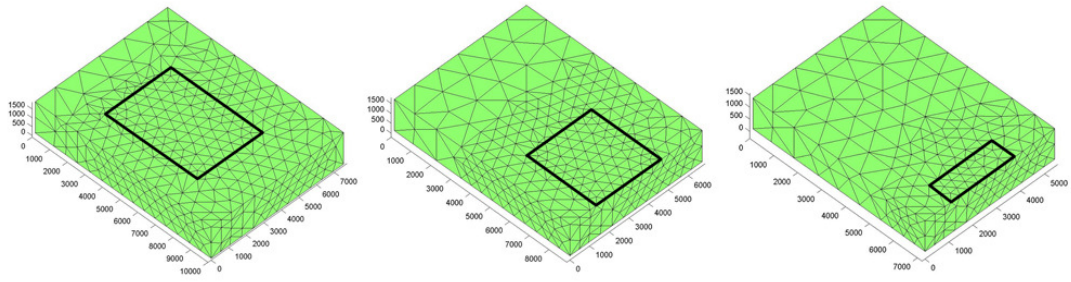


FIG. 11 – Remaillage en tétraèdres nœud à nœud pour 3 configurations

Dans cet exemple la surface de contact est plane, on pourrait aussi considérer un deuxième exemple de contact entre deux sphères où la surface de contact est assimilable à un plan, dans ce cas on remaille le plan moyen. La figure 12 illustre le cas de deux sphères en contact.

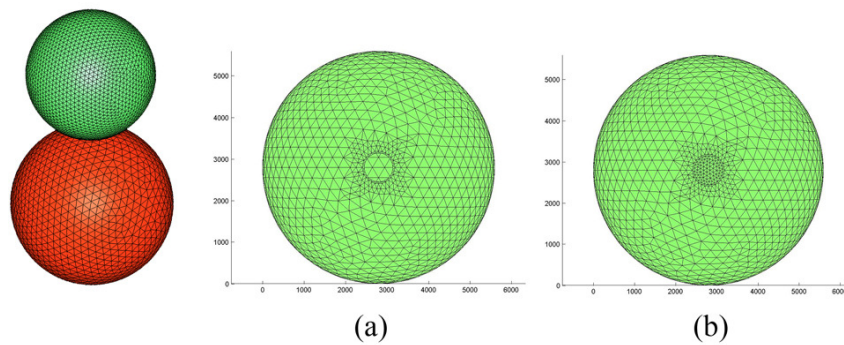


FIG. 12 – Remaillage nœud à nœud pour un contact entre deux sphères

La figure 12-a montre une vue du remaillage de la sphère inférieure sans surface de contact, la figure 12-b montre un remaillage en tétraèdres de la sphère inférieure.

Afin de valider l'efficacité de notre approche nœud à nœud, nous proposons de réaliser le maillage d'une architecture d'un composite interlock à renforcement tridimensionnel. La géométrie de ces architectures où se croisent mèches et fibres dans la résine peut se décrire à l'aide d'un réseau de courbes entrelacées le long desquels se déplace un contour paramétré. Le maillage du modèle CAO d'une telle architecture est difficilement réalisable.

En effet, le peu d'espace entre mèches et fibres rend difficile voire impossible le remplissage en tétraèdres de qualité acceptable, la solution consiste donc à réaliser un maillage nœud à nœud à l'interface. Dans ce cas de figure l'usage de l'approche nœud à nœud se trouve parfaitement justifié.

On peut imaginer une approche permettant de créer automatiquement le maillage d'un VER donné par un réseau de courbes 3D. La méthode utilisée consiste à faire accroître la taille des fibres et des mèches en gérant le contact et donc les interpénétrations. Dès qu'un contact est détecté la position du nœud de contact est inchangée.

La structure à remailler est illustrée figure 13-a, on peut voir clairement que le nombre de surfaces de contact est très important (de l'ordre de la centaine).

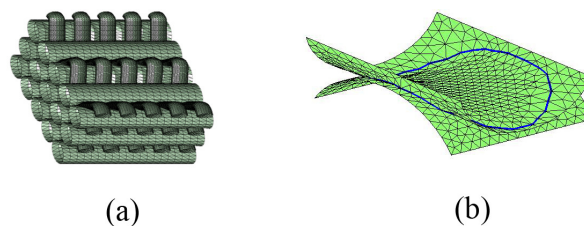


FIG. 13 – Remaillage nœud à nœud d'un VER

La figure 13-b illustre le maillage local surfacique en nœud à nœud sur une interface de contact

entre fibre et mèche, la détection du contact s'avère robuste. Le remaillage en nœud à nœud se fait en 2D sur l'ancien maillage déplié. Le passage à la 3D se fait grâce aux coordonnées barycentriques des nœuds de contact dans l'ancien maillage surfacique

6 Conclusion

Dans un remaillage en nœud à nœud, de nouveaux nœuds sont créés sur la zone de contact. De nombreuses approches projettent ces nœuds sur le maillage initial sans tenir compte de la courbure du modèle. Nous pouvons proposer une approche reposant sur une projection des nouveaux nœuds sur une surface construite par approximation diffuse, cette surface ($z=f(x,y)$) prend en compte la courbure du modèle initial.

La surface d'approximation est donnée sous la forme générale du système d'équations (6)

$$\begin{cases} x(u, v) = P(u, v) \{\alpha_x\} \\ y(u, v) = P(u, v) \{\alpha_y\} \\ z(u, v) = P(u, v) \{\alpha_z\} \end{cases} \quad (6)$$

avec $P(u, v) = \left\langle 1, u, v, \frac{u^2}{2}, uv, \frac{v^2}{2} \right\rangle$ et $\{\alpha_x\}, \{\alpha_y\}, \{\alpha_z\}$ à déterminer

Où (u, v) désignent les coordonnées locales de la surface de contact construite en développant localement le maillage à l'image de la technique de mise à plat que nous avons présentée précédemment. Ainsi la technique basée sur le dépliage permet de remailler la zone de contact, les frontières de la zone de contact et est utilisée pour construire le paramétrage de modèle diffus.

Nous pensons rendre ce modèle encore plus performant en proposant une surface minima diffuse comme interface de contact.

Références

- [1] A. M. Habraken, S. Cescotto, *Contact between deformable solids : the fully coupled approach*, Math. Comput. Modelling., 153-169, 1998.
- [2] D. Chamoret, A. Rassineux, J. M. Bergheau. *Régularisation du contact par une méthode meshless*, La méthode des éléments finis, Lavoisier, 271-307, 2006.
- [3] M. A. Crisfield. *Non-linear finite element analysis of solid and structures volume 2 : Advanced topics*, Wiley, 2003.
- [4] N. Kikuchi, J. T. Oden. *Contact Problems in Elasticity: A Study of Variational Inequalities and Finite Element Methods*, Siam, 1988.
- [5] P. Wriggers. *Computational contact mechanics*, Springer, 2006.
- [6] V. Padmanabhan, T. A. Laursen. *A framework for development of surface smoothing procedures in large deformation frictional contact analysis*, Finite Elements in analysis and design, Elsevier, 173-198, 2001.
- [7] J. H. Kim, J. H. Lim, J. H. Lee, S. Im. *A new computational approach to contact mechanics using variable-node finite elements*, IJNME, Wiley, 1966-1988, 2008.



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne.
L'Europe s'engage en Picardie avec le Fond européen de développement régional.

