



HAL
open science

Simulation de mise en forme de structures minces avec remaillage adaptatif couplé à une méthode d'optimisation

Laurence Giraud-Moreau, Abdelhakim Cherouat, Houman Borouchaki

► To cite this version:

Laurence Giraud-Moreau, Abdelhakim Cherouat, Houman Borouchaki. Simulation de mise en forme de structures minces avec remaillage adaptatif couplé à une méthode d'optimisation. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592806

HAL Id: hal-00592806

<https://hal.science/hal-00592806v1>

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.

Simulation de mise en forme de structure minces avec remaillage adaptatif couplé à une méthode d'optimisation

L. Giraud-Moreau¹, A. Cherouat¹, H. Borouchaki¹

¹ICD, Equipe Gamma3, Université de Technologie de Troyes, France, {laurence.moreau, abel.cherouat, houman.borouchaki}@utt.fr

Résumé — Les simulations numériques d'emboutissage de tôles minces et de composites tissés nécessitent de fréquents remaillages de la pièce. Dans ce papier, une méthode de remaillage adaptatif est présentée. Elle permet de raffiner et déraffiner les éléments triangulaires ou quadrangulaire (cas des tôles) ainsi que les éléments bi-composant (cas des composites) au cours de la simulation de mise en forme. L'identification des paramètres du modèle de comportement des composites est effectuée par approche inverse à l'aide de méthodes d'optimisations.

Mots clefs — remaillage, mise en forme, structure minces.

1 Introduction

Dés qu'il s'agit de modéliser le suivi d'une singularité par éléments finis sur une géométrie évolutive, les difficultés de maillage et remaillage sont souvent mises en avant. En effet, au cours des simulations numériques des procédés de mise en forme, les grandes déformations mises en jeu font que le maillage initial subit de fortes distorsions. Il est alors nécessaire de remailler continuellement la pièce afin de pouvoir capturer les détails géométriques des surfaces en contact, adapter la taille du maillage à la nature de la solution du problème (plasticité, endommagement...) et surtout pouvoir effectuer la simulation jusqu'à la fin du procédé de mise en forme. Cette procédure de remaillage doit être automatique et robuste.

Une méthode de remaillage adaptatif basée sur des critères géométriques et physiques, permettant de raffiner et déraffiner le maillage de la pièce au cours de la simulation numérique du procédé de mise en forme en trois dimensions avait déjà été proposée par les auteurs de ce papier [1-3].

Notre objectif ici est d'utiliser cette technique de remaillage afin de pouvoir effectuer des simulations numériques de mise en forme de tôles minces mais aussi de composites tissés. La modélisation du comportement des composites tissés par mise en forme nécessitant la construction de modèles simplifiés, un modèle permettant de décrire l'évolution des différents constituants du matériau de base avait déjà été proposé afin de réaliser des simulations numériques de formage de pièces composites non développables [4,5]. Des éléments finis bi-composants ont été construits. Ils sont composés d'une association d'éléments finis de barre matérialisant le comportement de fibres chaîne et trame, et d'éléments finis de membrane matérialisant le comportement visqueux de la résine. Afin de pouvoir effectuer le remaillage adaptatif de ces éléments finis bi-composants, une procédure spécifique pour la mise en forme des composites a ici été développée et intégrée au remaillieur existant afin de raffiner les éléments finis de barre et les éléments finis de membrane en tenant compte de l'orientation des fibres.

Ce papier rappelle les différentes étapes de la méthode de remaillage adaptatif. Il présente ensuite la technique de raffinement des éléments bi-composants pour la mise en forme des composites tissés. Afin de déterminer les paramètres du modèle de comportement du matériau composite, une méthode d'identification par approche inverse basée sur des méthodes d'optimisation a enfin été utilisée dans cet article.

La méthode de remaillage adaptatif a été couplée au logiciel ABAQUS/EXPLICIT. Elle a permis d'effectuer plusieurs simulations de mise en forme de tôles minces et de composites tissés. Quelques

exemples d'applications de mise en forme de tôle et tissus imprégnés sont présentés afin de montrer la pertinence de la méthode.

2 Simulation de la mise en forme des composites : approche mécanique

Les procédés de mise en forme de composites à renforts tissés par emboutissage sont nombreux, souvent récents et souvent complexes. Au cours de la mise en forme, les modes de déformation des composites tissés sont différents de ceux des matériaux métalliques. Pour les métaux, le procédé de mise en forme est régi par des grandes déformations irréversibles élasto-vicoplastiques. Par contre pour les étoffes, c'est le processus de mouvement des fibres ou fils qui intervient de façon prépondérante dans la mécanique de transformation géométrique durant la phase de mise en forme. Bien que les allongements des fibres, précédés d'une phase de redressement par tissage soient faibles, le formalisme du comportement mécanique des matériaux tissés est assimilé à un comportement non linéaire dépendant étroitement du comportement spécifique des différents constituants de base. Les principales sources de difficulté de la modélisation en grandes transformations réside dans la nature fibreuse des mèches, la nature tissée des mailles, la nature du comportement de la résine à l'état non polymérisé. La non-linéarité du comportement en traction des fibres, à l'échelle de la maille, est d'origine géométrique : les mèches qui montrent une courbure initiale assez grande en raison de leur tissage, deviennent rectilignes au fur et à mesure de leur mise en traction et par conséquent leur rigidité en traction remplace progressivement leurs propriétés en flexion. Les frottements jouent un rôle important dans le comportement mécanique global, assurant avec la résine la continuité du matériau en imposant à tout réseau de fibres chaîne et trame initialement superposé par tissage, de rester superposé au cours de la déformation (voir Figure 1). Les énergies de dissipation par frottement, les énergies de flexion et de cisaillement transverses sont négligeables dans le procédé de mise en forme. La loi de comportement des fibres est de type uni axiales (les effets bi-axiaux entre les fibres sont négligeables) et relie la déformation élastique longitudinale dans la direction des fibres à la contrainte correspondante. Par contre, la loi de comportement de la résine est de type membranaire viscoélastique isotrope. Le modèle de comportement des composites à renforts tissés est présenté en détails dans [4, 5, 6]. Des éléments finis bi-composants complémentaires et orientés dans la direction des fibres ont été construits. Ils sont composés d'éléments finis de barre matérialisant le comportement des fibres chaîne et trame et d'éléments finis de membrane 3D modélisant le comportement visqueux de la résine.

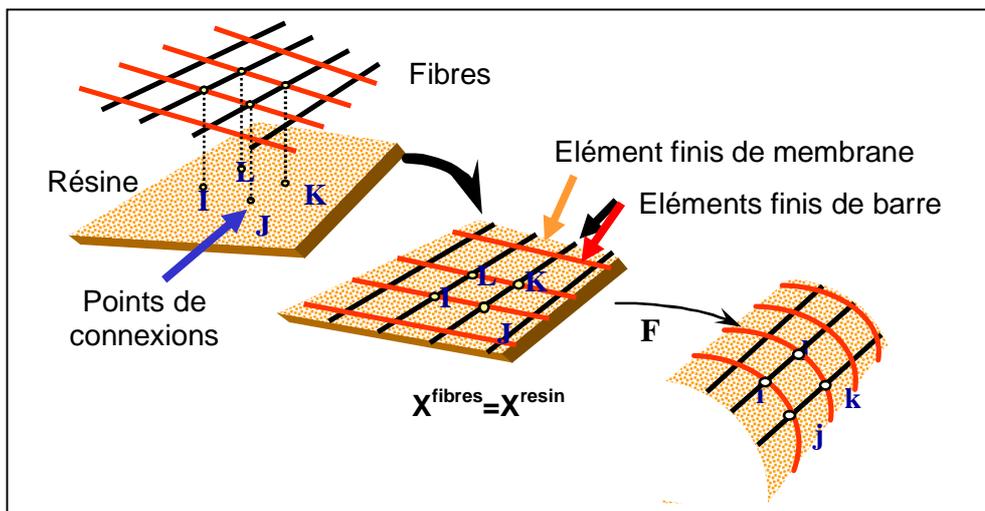


FIG. 1 – Déformation de composites à renforts tissés

3 Remaillage adaptatif

La simulation numérique de mise en forme de tôles minces et de composites tissés est basée sur un processus itératif. Dans un premier temps, un maillage initial grossier de la structure mince est généré avec des éléments triangulaires ou quadrangulaire (cas des tôles) ou des éléments bi-composants (cas des composites). A chaque itération, un calcul Eléments Finis avec ABAQUS est effectué afin de simuler numériquement le procédé de mise en forme pour un petit incrément de déplacement de l'outil. La surface résultante de chaque itération est analysée via des estimateurs d'erreurs géométriques et physiques. Le maillage est alors raffiné et/ou déraffiné en fonction des cartes de taille générées par ces estimateurs d'erreur. Le remaillage s'effectue en trois phases. Dans la première phase, le maillage est déraffiné dans les zones devenues planes au cours de la simulation numérique. Dans la deuxième phase, le maillage est raffiné au voisinage des sommets anguleux, en utilisant l'estimateur d'erreur géométrique. Dans la dernière phase de remaillage, le maillage de la pièce est raffiné en fonction de la carte de taille physique (obtenue grâce à l'estimateur d'erreur physique), l'objectif étant ici d'adapter le maillage à la solution physique. Le critère d'arrêt du processus itératif est associé à la fin du procédé de mise en forme.

3.1 Estimateur d'erreur géométrique et physique

Un estimateur d'erreur géométrique est utilisé afin de pouvoir déraffiner le maillage dans les zones devenues planes au cours de la simulation numérique, puis raffiner ce maillage au voisinage des sommets anguleux. L'estimateur d'erreur géométrique est basé sur l'analyse de la courbure locale sous-jacente à la surface de la pièce au cours de la déformation. Dans le cas du raffinement, un élément est considéré comme « courbé » si l'écart angulaire maximal entre la normale à cet élément et la normale aux sommets de l'élément est plus grand qu'un seuil donné. Tout élément détecté comme « courbé » doit être raffiné. Dans le cas du déraffinement, la zone analysée est constituée de quatre éléments. Pour tester si cette zone est devenue plate, il suffit de considérer l'élément formé par les quatre éléments constituant la zone et de vérifier si celui-ci est courbé. La carte de taille géométrique contient la liste des éléments situés dans des zones courbés et donc qui doivent être raffinés.

Un estimateur d'erreur physique est de plus utilisé afin d'adapter la taille du maillage à la nature de la solution mécanique du problème. Une carte de taille physique est définie à partir des valeurs de un ou plusieurs champs mécaniques. Dans ce papier, la déformation plastique équivalente (définie au point de Gauss de chaque élément par une valeur réelle) a été choisie afin de définir la carte de taille physique. On définit pour chaque élément du maillage une taille physique à atteindre (h_D) en fonction de la valeur de la déformation plastique équivalente :

Si ($\bar{\epsilon}^p < K_{crit}$) alors:

$$h^D = (h_{min} - h_{max}) \left(\frac{\bar{\epsilon}^p}{K_{crit}} \right)^\alpha + h_{max}$$

Sinon

$$h^D = h_{min}$$

h_{min} et h_{max} sont les tailles minimales et maximales d'éléments. K_{crit} représente une valeur critique, à partir de laquelle l'élément doit prendre la taille minimale. α est un paramètre contrôlant la variation non linéaire ou non de la taille.

L'estimateur d'erreur utilisé est alors basé sur le rapport entre la taille moyenne de chaque élément (\bar{h}) et sa taille physique à atteindre (h_D). Si ce rapport est plus grand qu'un critère donné, l'élément doit être raffiné. Le raffinement est alors répété tant que la taille physique n'est pas atteinte

3.2 Techniques de raffinement et déraffinement

La méthode de remaillage adaptatif, basée sur des techniques de raffinement et de déraffinement, a déjà été présentée dans de précédents papiers [1-3]. Elle est ici brièvement rappelée. L'objectif du remaillage est d'adapter le maillage de la pièce à la géométrie courante et à la nature de la solution

mécanique en cours de déformation.

Le remaillage s'effectue en trois phases. Dans la première phase, le maillage est déraffiné dans les zones devenues planes au cours de la simulation numérique. Dans la deuxième phase, le maillage est raffiné au voisinage des sommets anguleux, en utilisant l'estimateur d'erreur géométrique. Dans la dernière phase de remaillage, le maillage de la pièce est raffiné en fonction de la carte de taille physique (obtenue grâce à l'estimateur d'erreur physique).

La méthode de raffinement utilisée consiste à subdiviser certains éléments du maillage, précisément ceux qui se trouvent dans des zones courbes (estimateur géométrique) ou ceux dont la taille moyenne est supérieure à la taille physique à atteindre (estimateur physique). Il existe une seule subdivision d'éléments qui préserve la qualité en forme d'éléments, il s'agit du découpage uniforme. Dans le cas des tôles minces, tout triangle ou quadrilatère du maillage devant être raffiné est subdivisé en quatre éléments. Un nœud est alors ajouté au milieu de chaque arête de cet élément. Le raffinement ainsi appliqué influence les éléments adjacents aux éléments raffinés et le maillage de la pièce peut ne plus être conforme. Une procédure de raffinement itératif consistant à subdiviser les éléments adjacents en 2 ou 3 permet de rendre le maillage à nouveau conforme.

Dans le cas des composites tissés, le maillage est constitué d'éléments finis bi-composants. Une procédure spécifique pour la mise en forme des composites a ici été développée. Elle consiste à subdiviser en quatre les éléments quadrangulaires (éléments de membrane pour la résine) et à subdiviser en deux les éléments linéaires de barre (associés aux fibres chaîne et trame) des éléments bi-composants à raffiner (voir figure 2). La technique de raffinement développée permet de conserver l'information sur l'orientation des fibres (chaîne ou trame) au cours du remaillage.

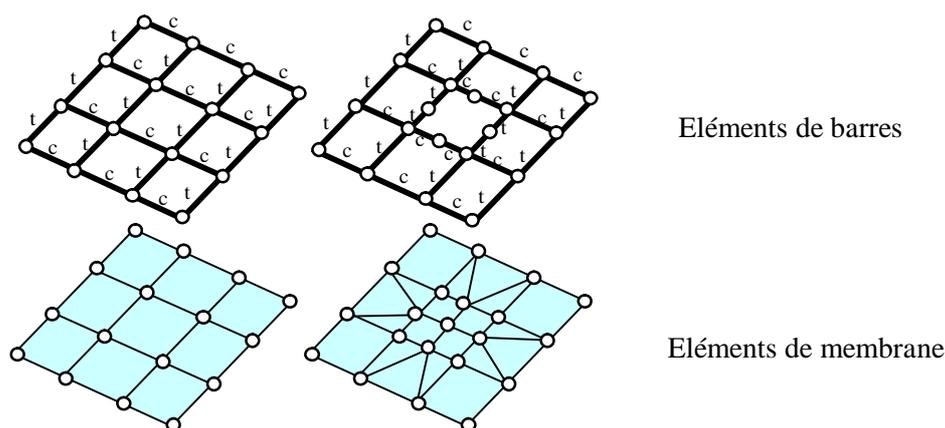


FIG. 2 – Raffinement des éléments bi-composants (membrane et barres associées)

La méthode de déraffinement représente l'opération inverse du découpage d'éléments en quatre. Il ne peut être appliqué qu'à un groupement de quatre éléments, préalablement obtenus par une opération de raffinement. Le déraffinement consiste à restaurer l'élément initial dans la mesure où la zone couverte par ces quatre éléments est devenue plate.

4 Identification des paramètres du modèle de comportement par approche inverse

Les structures souples tricotées et tissées se distinguent souvent par une grande discontinuité de la matière et par une hétérogénéité en raison de leur composition avec plusieurs types de matériau. Pour modéliser le comportement mécanique d'une telle structure, nous nous sommes basés sur une approche macroscopique à l'échelle de la structure globale. L'avantage de cette approche est qu'elle peut être adaptée à des structures avec des liages différents (taffetas, jersey, ...) et avec des matériaux différents. Le modèle de comportement est établi sur la base d'un essai de traction uni-axiale. À partir de la courbe force-déplacement, on déduit la contrainte réelle uni-axiale σ_L et la déformation ϵ_L par :

$$\sigma_L = (1 + \varepsilon_L) \frac{F}{S_0} \text{ et } \varepsilon_L = \frac{\Delta l}{l_0}$$

avec S_0 est la section initiale de l'éprouvette, l_0 sa longueur initiale et Δl l'allongement de l'éprouvette.

Un essai de traction est réalisé sur une éprouvette en étoffe de dimension 100mm x 50mm avec un dynamomètre supportant jusqu'à 500KN et une vitesse de chargement égale à 4mm/s. Cette étoffe est composée de 70% de polyamide et 30% d'élasthanne. La courbe de la réponse locale (contrainte-déformation) peut être caractérisée par un polynôme qui dépend de l'allure de la réponse. Pour l'exemple étudié, le modèle de comportement uni-axial est caractérisé par $\sigma_L = f(\varepsilon_L)$, avec f une fonction non linéaire de degré 5 représenté par l'équation suivante.

$$\sigma_L = E_0 + E_1 \cdot \varepsilon_L + E_2 \cdot \varepsilon_L^2 + E_3 \cdot \varepsilon_L^3 + E_4 \cdot \varepsilon_L^4 + E_5 \cdot \varepsilon_L^5$$

Où $E_{i(i=0,5)}$ sont les paramètres caractéristiques de l'étoffe.

L'identification de ces paramètres de l'étoffe a été effectuée par une méthode inverse, basée sur un algorithme d'optimisation. Cette approche consiste à trouver les valeurs des paramètres du modèle de comportement qui permettent de minimiser les distances entre les points des deux courbes obtenues expérimentalement et numériquement. Les contraintes de ce problème d'optimisation sont les intervalles de variation des paramètres du modèle. Ce problème d'optimisation sous contrainte est établi en fonction des variables ($E_0, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$). La minimisation de l'écart entre les courbes analytique et expérimentale est assurée par la fonction objectif qui s'écrit selon la formulation suivante :

$$\text{Minimiser}_{(E_0, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5)} \left\{ \text{erreur} = \int_0^{x_{\max}} (F_{\text{sim}} - F_{\text{exp}})^2 dx \right\}$$

Où F_{sim} est la force calculée sur le bord de l'éprouvette après la simulation et F_{exp} est la force expérimentale mesurée lors de l'essai de traction. Le paramètre x correspond au déplacement enregistré au cours de l'essai alors que x_{\max} correspond au déplacement maximal. L'erreur est calculée par la méthode des trapèzes. En effet, une interpolation linéaire permet de trouver pour chaque déplacement enregistré la valeur correspondante sur la courbe expérimentale. Ceci permet de calculer facilement l'intégrale de $(F_{\text{sim}} - F_{\text{exp}})^2$ par la méthode des trapèzes.

Les contraintes sont définies par les intervalles de variation des variables tel que :

$$E_{i, \min} \leq E_i \leq E_{i, \max} \quad i \in [0, \dots, 5]$$

Pour résoudre ce problème d'optimisation, deux approches sont appliquées : une approche globale assurée par l'algorithme génétique qui est basé sur les méthodes stochastiques et une approche locale assurée par la méthode de Levenberg-Marquardt.

L'algorithme génétique est basé sur l'évolution vers l'optimum d'une population de paramètres par générations successives. Chaque génération est caractérisée par un nombre d'enfants et de parents, par une probabilité de mutation et de croisement. Un grand nombre de générations permet d'affiner le résultat et un grand nombre de parents et d'enfants permet d'élargir le domaine de recherche de l'optimum [7-9]. Chaque population est composée d'un nombre d'individus qui représentent les valeurs des paramètres à optimiser. Ces paramètres sont de type continu et ils sont codés en binaire. Le critère d'arrêt du calcul d'optimisation est défini par le nombre d'exécution. Une fois le nombre d'exécutions atteint, le calcul s'arrête même si on n'atteint pas une valeur d'erreur minimale. Le jeu de variables optimales est obtenu automatiquement à la fin de l'exécution du code. Afin de calculer pour chaque jeu de variables l'erreur entre expérience et simulation, un couplage est réalisé entre le solveur de calcul par éléments finis (ABAQUS) et l'algorithme génétique selon l'organigramme présenté sur la Figure 3. La deuxième méthode qui est celle de Levenberg_Marquardt a été intégrée dans le code de ZEBULON. Cette méthode dite locale est basée sur un calcul approximatif du gradient et du Hessien

de la fonction objectif. Cette fonctionnelle est décrite par l'équation suivante :

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N w_i (F_{\text{sim},i}(x) - F_{\text{exp},i})^2$$

F_{sim} et F_{exp} sont respectivement la force numérique et expérimentale et w_i sont les poids associés.

Pour la résolution du problème, une simulation d'un essai de traction est réalisée avec le code ABAQUS couplé avec le module d'optimisation de ZEBULON suivant l'organigramme de la Figure 3. L'application de ces deux méthodologies d'identification a abouti quasiment au même résultat (voir Figure 4) mais avec une large différence au niveau du temps de calcul (45 min pour la méthode de Levenberg-Marquardt et environ 3h pour l'algorithme génétique).

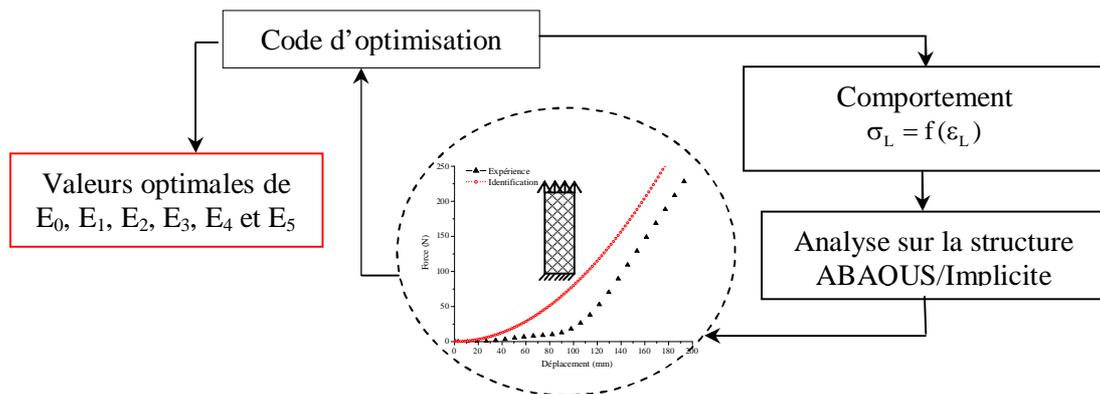


FIG. 3 – Organigramme d'identification par méthode inverse

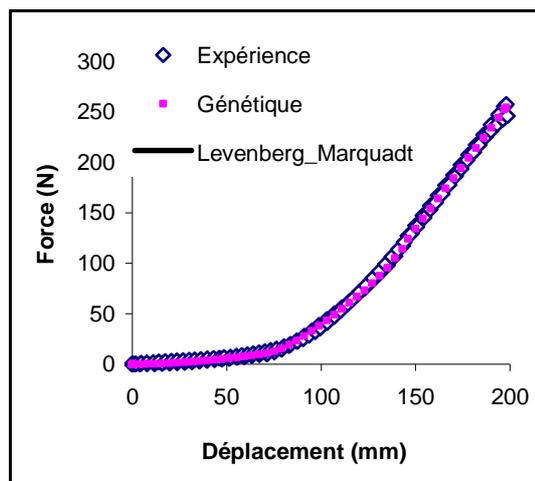


FIG. 4 – Réponse globale : Génétique - Levenberg_Marquardt

TAB. 1 : Valeurs de l'erreur et des paramètres du modèle au cours des itérations

Itération	Erreur(N ² .mm)	E ₀	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅
1	3280	-0.119	3.15	-6.46	1.01	10.1	-3.35
6	3350	-0.119	3.15	-6.46	1.01	10.1	-3.35
10	708	-0.119	-13.0	-17.7	1.20	21.9	-7.93
12	15.7	-0.119	-13.0	-17.7	1.20	21.9	-7.93

En effet, l'algorithme génétique est assez lent pour converger vers les optimums ce qui constitue un inconvénient de cette méthodologie. En revanche cet algorithme garantie une convergence vers l'optimum global ce qui n'est pas le cas de la méthode de Levenberg-Marquardt. Le Tableau 1

représente l'évolution des erreurs au cours des itérations ainsi que les valeurs des paramètres matériau pour la méthode de Levenberg-Marquardt.

5 Applications

5.1 Emboutissage d'un pot d'échappement

Ce premier exemple concerne la simulation de mise en forme d'une tôle mince. Il traite l'emboutissage d'un pot d'échappement. Le matériau utilisé est de l'acier avec un comportement élastoplastique isotrope. La Figure 5 présente le maillage initial du flan. La Figure 6 présente le maillage de la pièce à mi-parcours du poinçon et à la fin de la simulation. La méthode de remaillage proposée a permis d'effectuer la simulation d'emboutissage correctement. La pièce a été raffinée dans les zones de forte courbure et dans les zones où les champs mécaniques étaient importants.

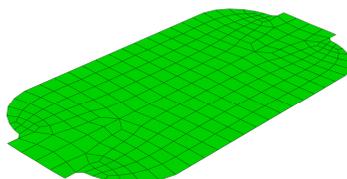


FIG. 5: Maillage initial du flan

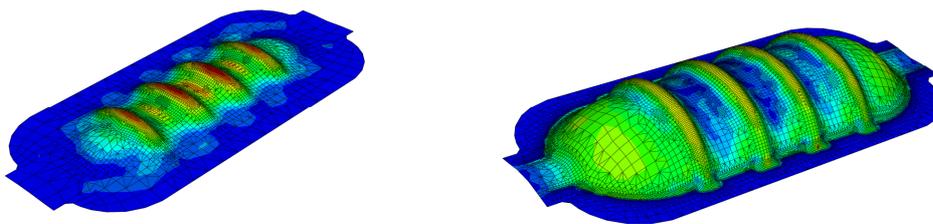


FIG. 6: Maillage de la pièce à mi-parcours du poinçon et à la fin du procédé de mise en forme

5.1 Emboutissage par poinçon conique d'une structure tissée

Cet exemple traite l'emboutissage avec un outil conique d'une structure tissée composée de fibres chaîne et trame initialement orthogonales. Les paramètres des deux matériaux utilisés (tissus pré-imprégnés en fibres d'aramide) ont été déterminés par identification par approche inverse. Le dispositif d'emboutissage est formé d'une matrice fixe, d'un serre-flan qui permet de maintenir la structure sans application d'effort extérieur et d'un poinçon de forme conique (voir Figure 7). Les outils rigides d'emboutissage pour la simulation numérique sont présentés sur la Figure 7.

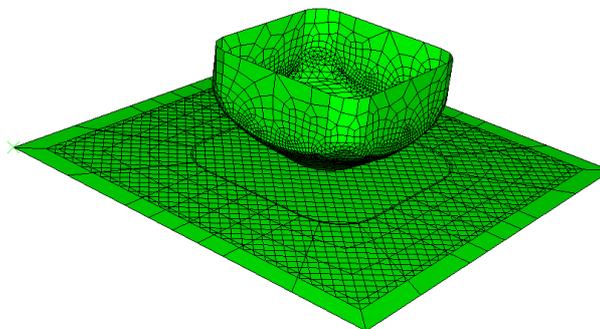
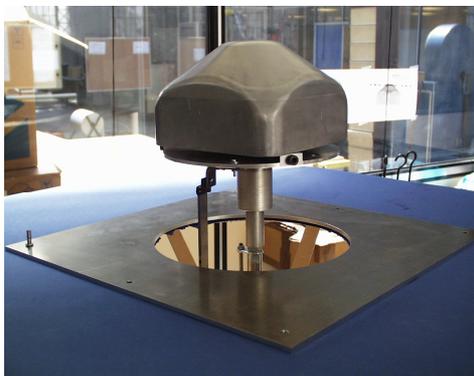


FIG. 7 – Dispositif expérimental et outils pour la simulation numérique d'emboutissage

La Figure 8 présente le résultat expérimental et le résultat numérique obtenu avec la méthode de remaillage. Cette figure montre une bonne concordance entre ces résultats.

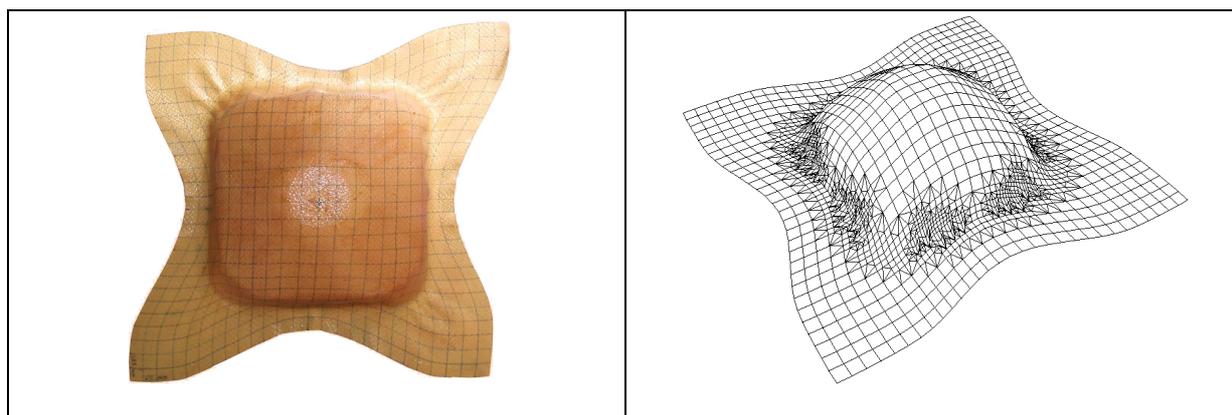


FIG. 8 – Comparaison du résultat expérimental et du résultat numérique

6 Conclusion

Une méthode de remaillage adaptatif, permettant de raffiner et déraffiner le maillage au cours de simulation numérique de mise en forme de tôles minces ainsi que de composites tissés a été présentée dans cet article. La modélisation du comportement des tissus pré-imprégnés est basée sur l'utilisation d'éléments finis bi-composants, composés d'une association d'éléments finis de barre matérialisant le comportement des fibres chaîne et trame, et d'éléments finis de membrane matérialisant le comportement de la résine. Une procédure spécifique a été développée afin de raffiner ces éléments bi-composants tout en conservant l'orientation des fibres lors du remaillage. L'identification des paramètres du modèle de comportement du matériau composite a été effectuée par une méthode inverse utilisant des algorithmes d'optimisations. Des simulations numériques de mise en forme de tôle mince et de composite tissé montrent l'efficacité de la méthode. Il serait maintenant intéressant de coupler la méthode présentée pour la simulation numérique de mise en forme avec une méthode d'optimisation afin de d'optimiser les paramètres géométriques décrivant la tôle ou les outils.

Références

- [1] L. Giraud-Moreau, H. Borouchaki et A. Cherouat. *Adaptive remeshing method based on refinement and coarsening techniques*, Proc. 10th ESAFORM Conference on Material Forming , Espagne, 2007.
- [2] L. Giraud-Moreau, H. Borouchaki et A. Cherouat. *Sheet metal forming using adaptive remeshing*, Proc. of NUMIFORM'04, Etats Unis, 2004.
- [3] L. Giraud-Moreau, H. Borouchaki et A. Cherouat. *Adaptive remeshing for sheet metal forming in large plastic deformations with damage*, International Journal of Material Forming, 1960-6206, vol.1, page129-page132, 2008.
- [4] A. Cherouat, J.L. Billoët. *Finite element model for the simulation of pre-impregnated woven fabric by deep-drawing and laying-up processes*, J. Advanced Material, 32, page42-page53, 2000.
- [5] A. Cherouat, J.L. Billoët. *Mechanical and numerical modelling of composite manufacturing processes deep-drawing and laying-up of thin pre-impregnated woven fabrics*, J. of Materials Processing Technology, vol. 118, page 460-page471, 2001.
- [6] L. Giraud-Moreau, H. Borouchaki et A. Cherouat. *Adaptive remeshing of composite fabrics during the forming process*, International Journal of Material Forming, Volume 3,supp 1, 1960-6206, DOI 10.1007/s12289-010-0856-3, page659-page662, 2010.
- [7] J-H. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems*, The University of Michigan Press, Ann. Arbor, MI, 1975.
- [8] D-E. Goldberg. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison Wesley publishing compagny, 1989.
- [9] Z. Michalewicz. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer, Berlin, 1996.