



HAL
open science

Estimation du champ de contraintes résiduelles de pièces aéronautiques laminées pour réduire les déformations post-usinage

Khayel Chaabani, Mariem Ben Saada, Bruno Lavisce, Mathieu Ritou, Guénaél Germain

► To cite this version:

Khayel Chaabani, Mariem Ben Saada, Bruno Lavisce, Mathieu Ritou, Guénaél Germain. Estimation du champ de contraintes résiduelles de pièces aéronautiques laminées pour réduire les déformations post-usinage. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784359

HAL Id: hal-04784359

<https://hal.science/hal-04784359v1>

Submitted on 15 Nov 2024

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.



Estimation du champ de contraintes résiduelles de pièces aéronautiques laminées pour réduire les déformations post-usinage

Khayel CHAABANI^(a,b,c), Mariem BEN SAADA^(a), Bruno LAVISSE^(a),
Mathieu RITOU^(b), Guénaël GERMAIN^(a)

(a) Arts et Métiers, LAMPA, Angers

(b) Nantes Université, LS2N, Nantes

(c) IRT Jules Verne, Nantes

Mail : khayel.chaabani@ensam.eu

Résumé : Les pièces aéronautiques de géométrie complexe et de grandes dimensions sont généralement réalisées à partir d'une préforme laminée ou forgée, dont 80% à 90% de la masse est éliminée par usinage. La mise en forme par déformation plastique pour la fabrication de la préforme engendre de fortes contraintes résiduelles. L'enlèvement de matière libère une grande partie de ces contraintes ce qui conduit à leur rééquilibrage par déformation de la pièce usinée. Ces déformations, non souhaitées, doivent être corrigées par une étape supplémentaire de chaudronnerie. L'estimation de la déformation post-usinage due à la redistribution des Contraintes Résiduelles (CR) initiales après l'usinage, constitue un défi majeur dans la fabrication de ces pièces. Étant la principale cause de la déformation après usinage des pièces épaisses, il est crucial de connaître l'état initial des CR pour ajuster la stratégie d'usinage afin de réduire la distorsion postopératoire. Ce défi est d'autant plus complexe que le champ des CR varie d'une pièce à l'autre. Un champ de contraintes moyen n'est suffisant que pour les pièces usinées ayant un processus de fabrication maîtrisé et répétable, ce qui est rarement le cas dans le milieu industriel. L'objectif de ce présent travail est de modéliser les différentes étapes de fabrication du brut, obtenu après un traitement thermique et un étirement à froid, pour établir la variabilité du champ des CR en fonction des paramètres opératoires. Les données de simulation et les mesures faites in-process, donneront une estimation du champ de CR de

la pièce au cours d'usinage et permettront d'enrichir un modèle d'Intelligence Artificielle (IA) visant à prédire la déformation post-usinage.

Mots clés : Déformation post-usinage, Contraintes Résiduelles (CR), Usinage, Simulation, Pièces aéronautiques.

1 Introduction

Les propriétés spécifiques remarquables des alliages d'aluminium les rendent très appréciés dans le domaine de l'industrie aéronautique, où ils sont énormément utilisés et généralement usinés à partir de tôles épaisses (Li, 2017; Sim, 2010). Pour obtenir la pièce brute (préforme) avec des propriétés mécaniques fixées, des opérations de mise en forme par déformation plastique telles que le laminage et le roulage, ou du matriçage, et des traitements thermiques sont réalisés. Lors de ce processus, d'importantes charges mécaniques et thermiques sont appliquées sur le matériau, ce qui génère un champ de contraintes résiduelles significatif dans la pièce brute (Akhtar, 2022; Li, 2017). Ces pièces brutes sont ensuite soumises à un processus d'usinage qui redistribue le champ de contraintes initial en générant des CR de compression à la surface et de traction au cœur de la pièce. Le rééquilibrage de ces CR après usinage cause des distorsions indésirables. Les fabricants aéronautiques se trouvent dans l'obligation d'ajouter des opérations supplémentaires de chaudronnerie, qui augmentent le coût et le temps de production, afin de réduire ces déformations et respecter les tolérances exigées par le bureau d'étude. La réduction des distorsions post-usinage des pièces reste un défi majeur pour les fabricants, pour améliorer le temps et le coût de fabrication.

Les profils de CR peuvent être déterminés expérimentalement à l'aide de méthodes destructives ou non-destructives (Jeanmart, 1985; Tandon, 1990; Virkar, 1990). Parmi ces techniques, les plus couramment utilisées sont la diffraction des rayons X, qui est plus adaptée à la surface, et la méthode d'usinage de couches ou par perçage incrémental. Les profils expérimentaux de CR sont ensuite utilisés pour valider des modèles éléments finis (MEF) qui permettent de modéliser le processus d'usinage et de prédire la déformation lors de l'usinage en prenant en considération la redistribution des CR initiales (Wei, 2007). Les outils numériques ont été largement exploités pour simuler le champ de CR dans les pièces aérospatiales, car les méthodes expérimentales sont souvent coûteuses en temps et en argent (Cerutti, 2016; Chabeauti, 2023).

L'approche du présent travail vise à établir une méthodologie hybride pour prédire la variabilité du champ de CR induit dans les tôles laminées de grandes dimensions, en raison de l'historique métallurgique de mise en forme et ainsi permettre de contrôler la stratégie d'usinage pour chaque pièce afin de réduire les déformations post-usinage. Cette approche est détaillée dans la section 2. Le présent article se concentre uniquement sur la première partie de l'approche proposée, qui est la simulation numérique de la variabilité du champ initial de CR.

2 Méthodologie proposée

La méthodologie a été mise en place, en développant des simulations des différentes étapes du processus de fabrication du brut laminé à l'aide de modèles éléments finis. Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel Abaqus. Elles permettent de déterminer la variabilité du champ CR après chaque étape, et ainsi connaître la variabilité

du champ de CR initial dans la pièce brute. Cette phase du travail ne sera réalisée qu'une seule fois, étant donné que le processus de fabrication appliqué reste inchangé.

Une fois quantifié, le champ de CR initial sera ultérieurement intégré dans un modèle d'intelligence artificielle (IA). Ce modèle d'IA sera employé pour prédire le champ de CR de chaque pièce au cours de l'usinage. Les estimations du champ CR ainsi obtenues nous permettront de contrôler la stratégie d'usinage afin de réduire les distorsions de la pièce. En effet, pendant l'étape d'usinage, des mesures de déformation seront effectuées (après débridage) et intégrées dans le modèle IA, permettant ainsi d'estimer de manière pertinente le champ de contraintes de la pièce en cours d'usinage et de pouvoir ajuster de manière proactive la fin de l'étape d'usinage.

Durant le processus de mise en forme, les tôles laminées subissent, avant la trempe, une mise en solution (un cycle thermique d'homogénéisation), comme illustré dans la figure 1, afin d'éliminer les CR induites par les déformations plastiques au cours des étapes de laminage. On suppose que le champ de CR est nul après ce traitement thermique.

Pour la trempe, les pièces brutes en alliage d'aluminium 7010 sont maintenues à 470°C puis immergées rapidement dans un bain d'eau à 20 °C, qui est un milieu de trempe classique pour les alliages d'aluminium. Une nouvelle distribution de CR sera obtenue. Les propriétés mécaniques de l'Al7010-T7451 telles que le comportement élastique, l'expansion thermique, la conductivité thermique et la chaleur spécifique sont thermo-dépendantes. Dans cette modélisation, le comportement du matériau est régi par une loi identifiée par Airbus de type puissance qui dépend de la température, mais qui ne prend pas en compte explicitement la transformation de phase. Tous les paramètres sont confidentiels.

Après la trempe, un étirage à froid (ou détensionnement par traction) est ensuite effectué avec un allongement entre 1,5 % et 3 %.

La trempe et l'étirage à froid ont été simulés par un calcul thermomécanique non couplé. L'étape de revenu n'a pas été simulée en raison de l'énorme temps de calcul nécessaire pour une simulation thermomécanique couplée. L'influence de l'étape de revenu sur le champ de CR est très faible, car l'augmentation de la température est lente, ce qui n'entraîne pas de gradient thermique significatif. Il n'y a donc pas de gradient de contrainte dû à la dilatation dans cette étape de mise en forme.

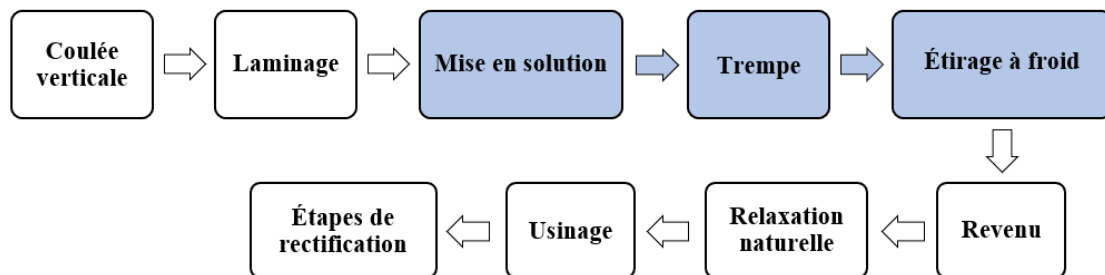


Figure 1. Étapes de mise en forme et de traitement thermique de brut

3 Simulation numérique

La pièce brute mesure environ 3 m de long, 1 m de large et 120 mm d'épaisseur. Au vu du temps de calcul pour une pièce de telles dimensions, même en tenant compte de la symétrie de pièce, nous avons opté pour travailler sur une partie seulement de la pièce brute, pour avoir les effets de bords et le champ stabilisé dans le cœur de la pièce brute. Les dimensions retenues sont 800 mm de long, 800 mm de large et 120 mm d'épaisseur. Les symétries de la pièce ont été prises en compte. La figure 2 montre que ces dimensions sont plus que suffisantes pour éviter les effets de bord. En effet, les résultats présentés sur

la figure 2 (a) montrent clairement l'effet de bord et le champ de contrainte qui devient stable au cœur de la pièce, ce qui permet de valider ces dimensions. La pièce a été maillée de 76800 éléments hexaédriques de 5mm. Le type de maillage est "DC3D8" pour le calcul thermique et "C3D8R" pour le calcul mécanique.

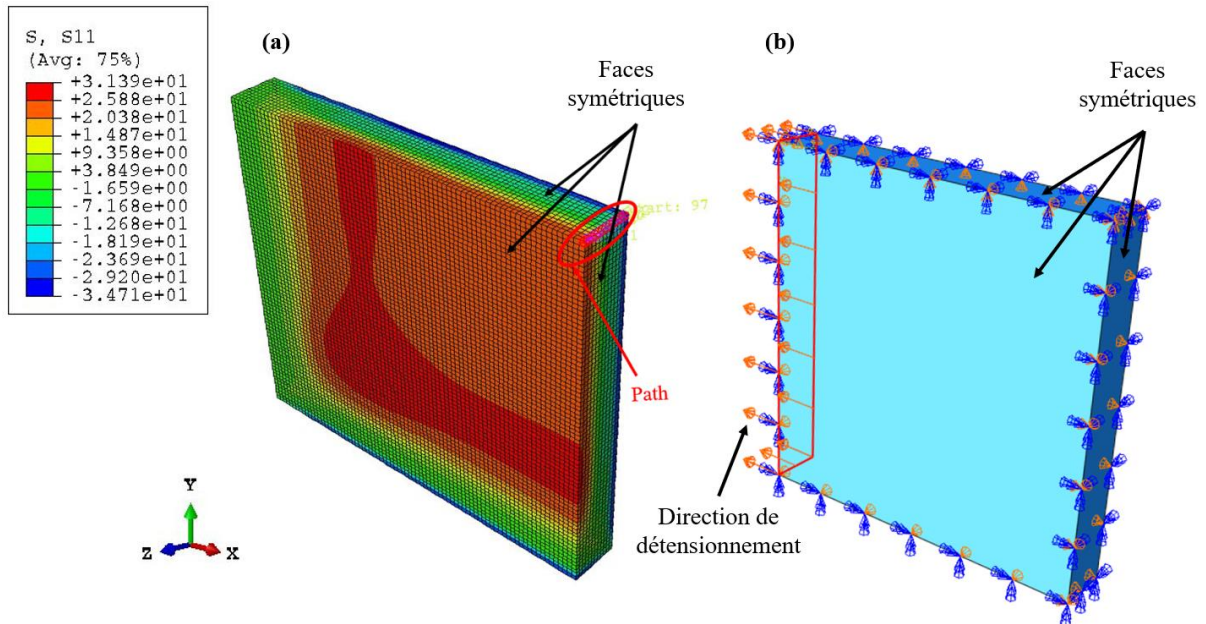


Figure 2. (a) Exemple du champ de CR (S11, direction de laminage) après la trempe et d'étirement à froid avec les paramètres nominaux – (b) Conditions aux limites

La modélisation numérique de la trempe est généralement réalisée en découplant l'analyse thermique et mécanique afin de limiter les ressources nécessaires et de gagner en temps de calcul (Jeanmart, 1985; Lamba, 2012). En supposant que les problèmes thermiques et mécaniques sont non-couplés, un calcul thermique puis mécanique ont été effectués de manière séquentielle et consécutive. Les étapes de la simulation peuvent être résumées en quatre étapes principales, comme le montre la figure 1 : une analyse non linéaire est effectuée en premier lieu, en tenant compte des paramètres physiques thermo-dépendants. Ensuite, une analyse élastoplastique utilise les gradients de température prédites, pour prédire les contraintes résiduelles post trempe, en supposant un comportement isotrope du matériau et en considérant la dépendance de ses propriétés mécaniques en fonction de la température.

Le calcul thermique consiste à calculer le champ de température à partir de la température initiale de la pièce (470°C). Pendant le refroidissement, les surfaces externes de la pièce sont soumises à une condition limite de type convection, avec un coefficient d'échange h dépendant de la température de la pièce (Louhichi, 2022) et une température de bain constante (voir tableau 1). Les autres surfaces sont soumises à des conditions limites de symétrie, ce qui implique qu'il n'y a pas d'échange de chaleur sur ces surfaces.

Une modélisation de l'étape de détensionnement aussi appelé étirement à froid est ensuite effectuée avec un taux de déformation de 1,5% à 3%. Lors de cette étape, les conditions de symétrie sont maintenues (Fig. 2b). Sur la surface d'extrémité, un déplacement

homogène a été imposé pour obtenir l'allongement souhaité (voir tableau 1). La figure 2a montre un exemple du champ de CR obtenu après l'étirement.

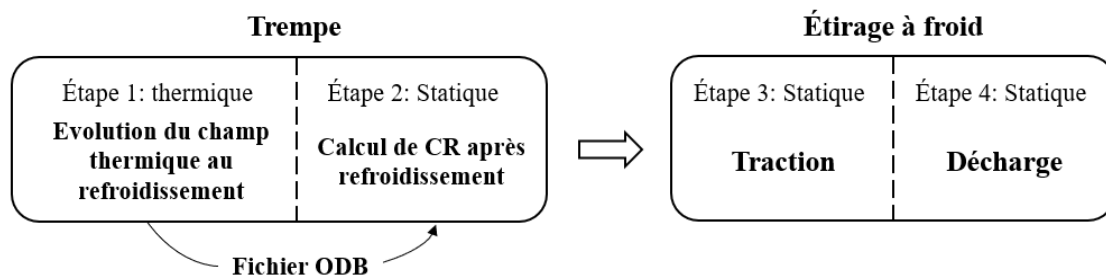


Figure 3. Étapes suivies dans le modèle d'éléments finis

La variabilité des paramètres du processus de mise en forme de la pièce brute conduit à une variabilité du champ de CR initial. Trois paramètres sont étudiés pour connaître l'effet de la variabilité des paramètres procédés sur le champ de contrainte final :

- La température du bain de trempe qui varie entre 18°C et 30°C
- Le coefficient de convection thermique avec l'eau h : plusieurs paramètres affectent le coefficient de convection thermique comme la turbulence du bain, son débit, etc. Ce paramètre peut donc varier assez fortement, il variera entre h et $3 \times h$.
- Le taux d'étirement à froid : en général, la tôle est étirée entre 1,5 et 3%.

Afin de représenter cette variabilité, nous avons effectué plusieurs simulations numériques en combinant les différents paramètres. Les résultats de ces simulations seront discutés dans la section suivante.

Table 1. Plan de simulation de la variabilité du processus de fabrication

Paramètres	Variabilité				
Température de la trempe	18°C	20°C	25°C	30°C	----
Coefficient de convection thermique	h	$1.5 * h$	$2 * h$	$2.5 * h$	$3 * h$
Taux de l'étirage à froid	1.5%	2%	2.5%	3%	3.5%

4 Résultats et discussion

Lors de la trempe, la vitesse de refroidissement n'est pas homogène de la surface vers le cœur de la pièce ce qui crée un gradient thermique. La contraction du noyau de la pièce lors du refroidissement va donc comprimer la surface de la pièce, et mettre le cœur en traction, comme le montre la figure 4.

La variabilité du coefficient de convection thermique a un impact significatif sur le champ de CR. Cette variabilité affecte à la fois la surface et le cœur de la pièce, comme le montre la figure 5.

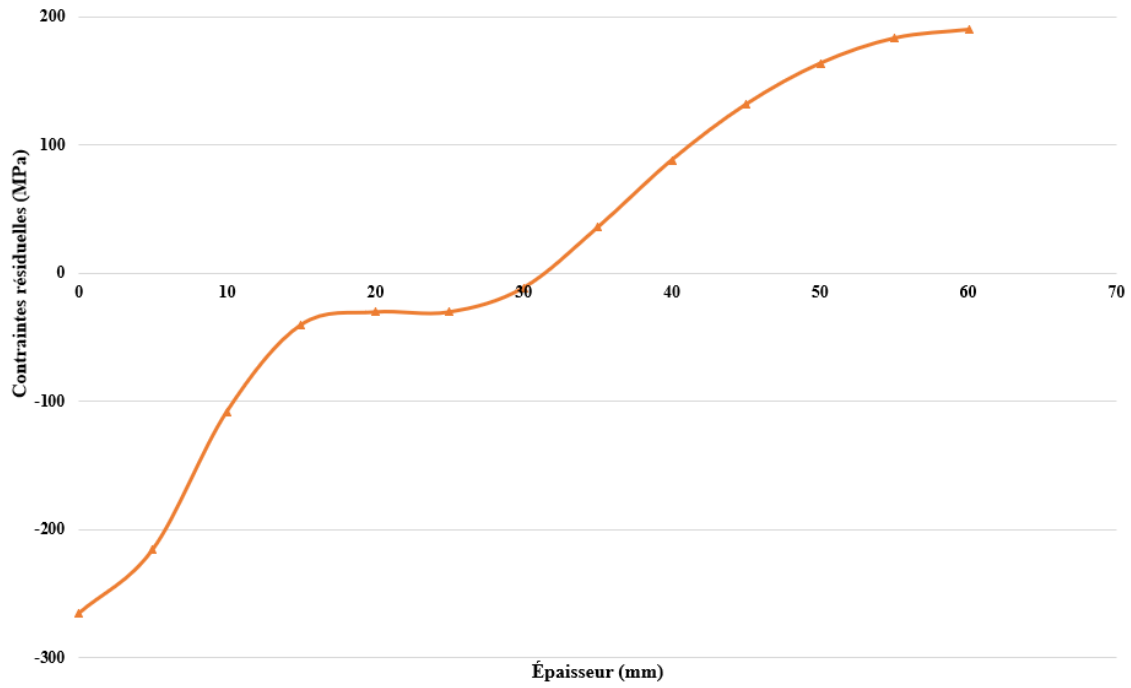


Figure 4. Forme du champ de CR le long de la moitié de l'épaisseur de la tôle laminée

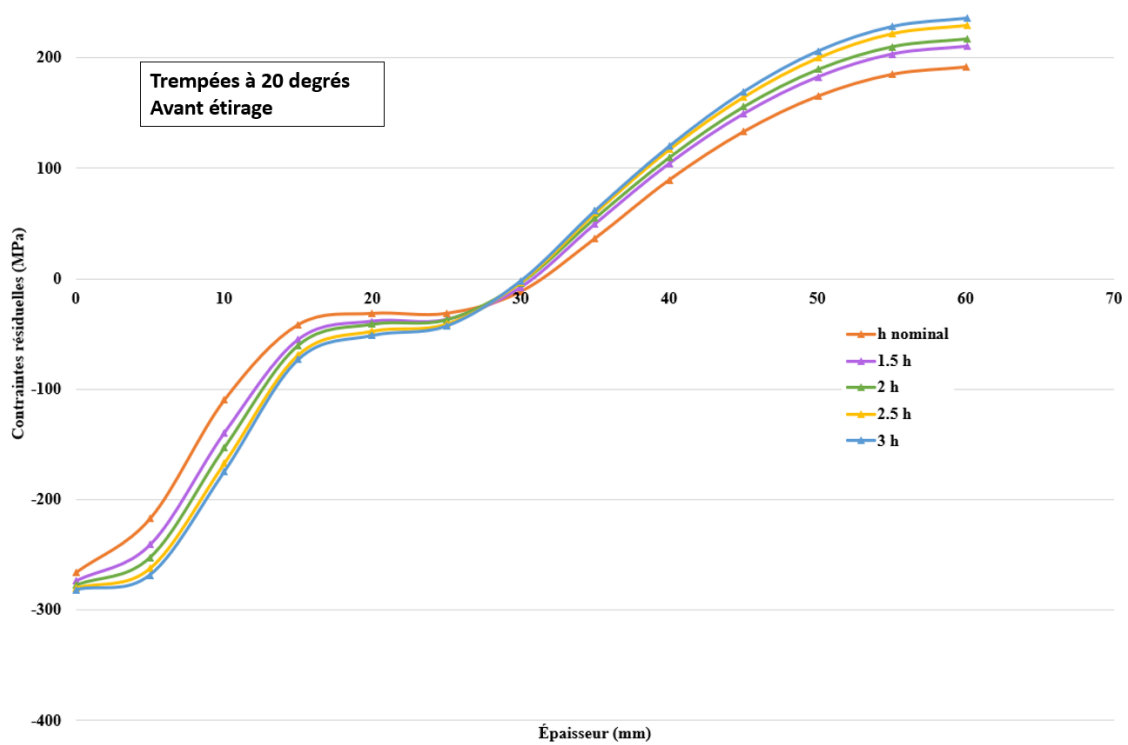


Figure 5. Influence du coefficient de convection thermique sur le champ de CR

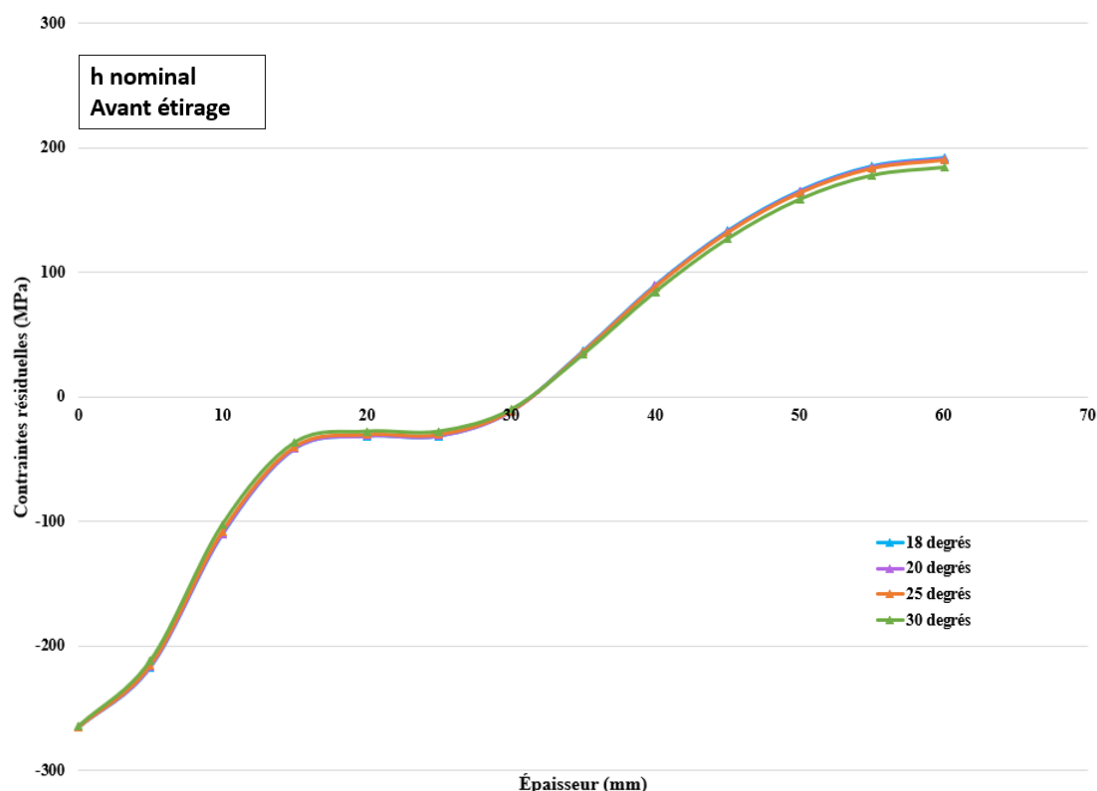


Figure 6. Influence de la température du bain de trempage sur le champ de CR

La température du bain de la trempage a un impact faible au niveau de la surface de la pièce, qui se traduit par une augmentation en compression de quelques MPa quand la température du bain diminue, passant de 192 MPa à 18 degrés à 184 MPa à 30 degrés. Cette influence reste limitée au cœur de la pièce et n'affecte pas de manière significative les contraintes à la surface, comme le montre la figure 6.

En revanche, lors de l'étirage, le taux d'allongement a une influence importante sur la distribution du champ de contraintes, comme le montre la figure 8. En effet, l'étirage fait chuter les contraintes en surface après trempage de 191 MPa à 20 MPa. De même, à la surface, les contraintes de compression passent de -265 MPa avant étirement à -31 MPa après un étirement de 3 %.

Les gradients de contraintes après étirage sont donc moins importants, ce qui va limiter fortement la déformation de la pièce après usinage. Cela met en évidence la nécessité d'un contrôle méticuleux de ce paramètre pour minimiser les variations non souhaitées du champ de contrainte. Les simulations mettent aussi en évidence que les CR sont sensibles au taux d'allongement imposé. Une variation de l'allongement de 1,5% à 3,5 % fait varier la contrainte en surface de -120 MPa à -20 MPa, soit une diminution de 100 MPa, comme montré sur la figure 7.

La figure 8 met en évidence la réduction du champ de contrainte après étirage pour les paramètres standard utilisés.

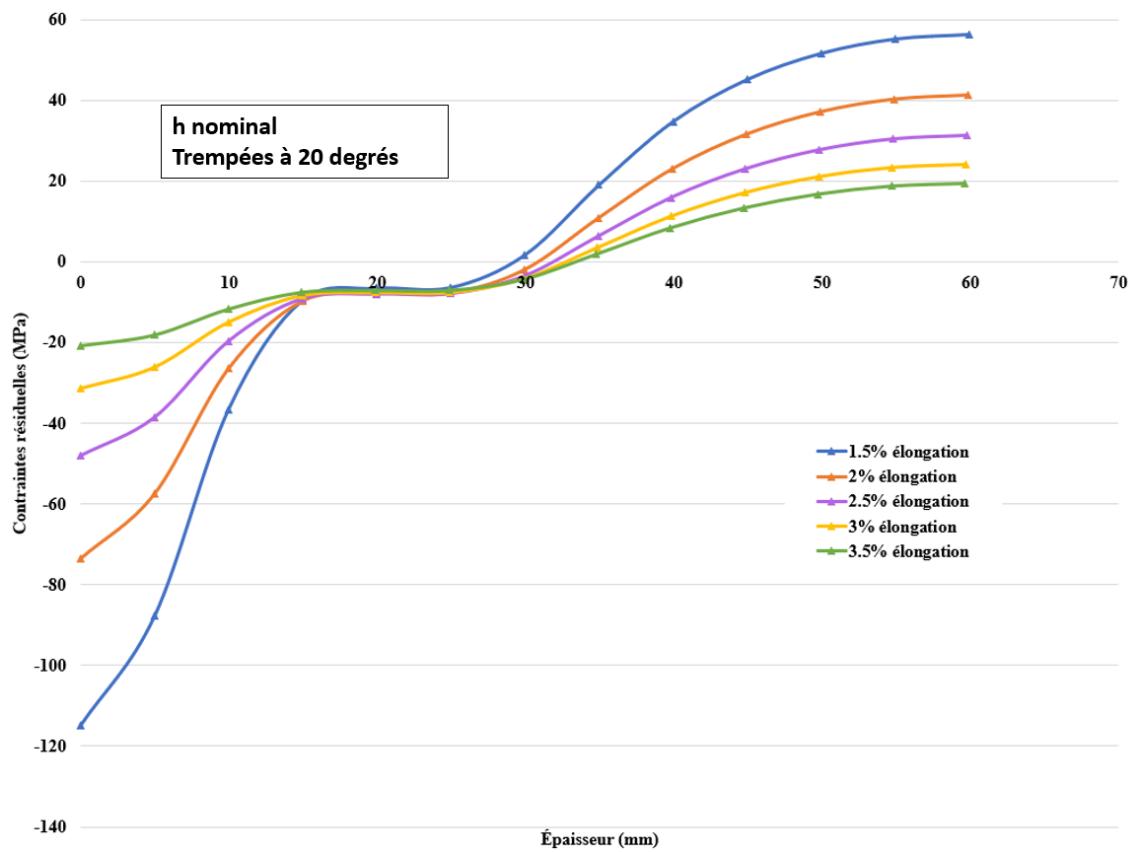


Figure 7. Influence du coefficient de convection thermique sur le champ de CR

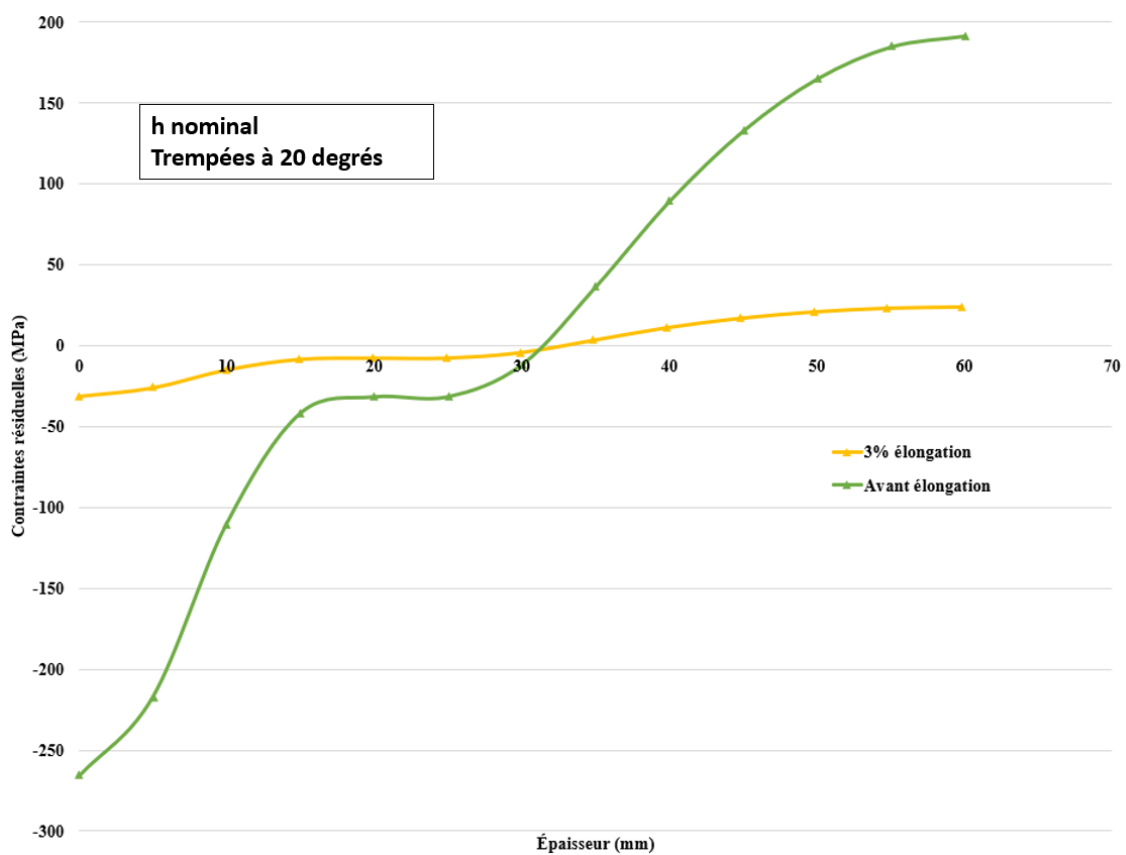


Figure 8. Champ de CR avant et après étirage

5 Étude de sensibilité

À partir de notre modèle éléments finis, la sensibilité des CR aux paramètres procédés de mise en forme et de traitement thermique des pièces brutes a été évalué. Cette sensibilité des paramètres est présentée dans la figure 9.

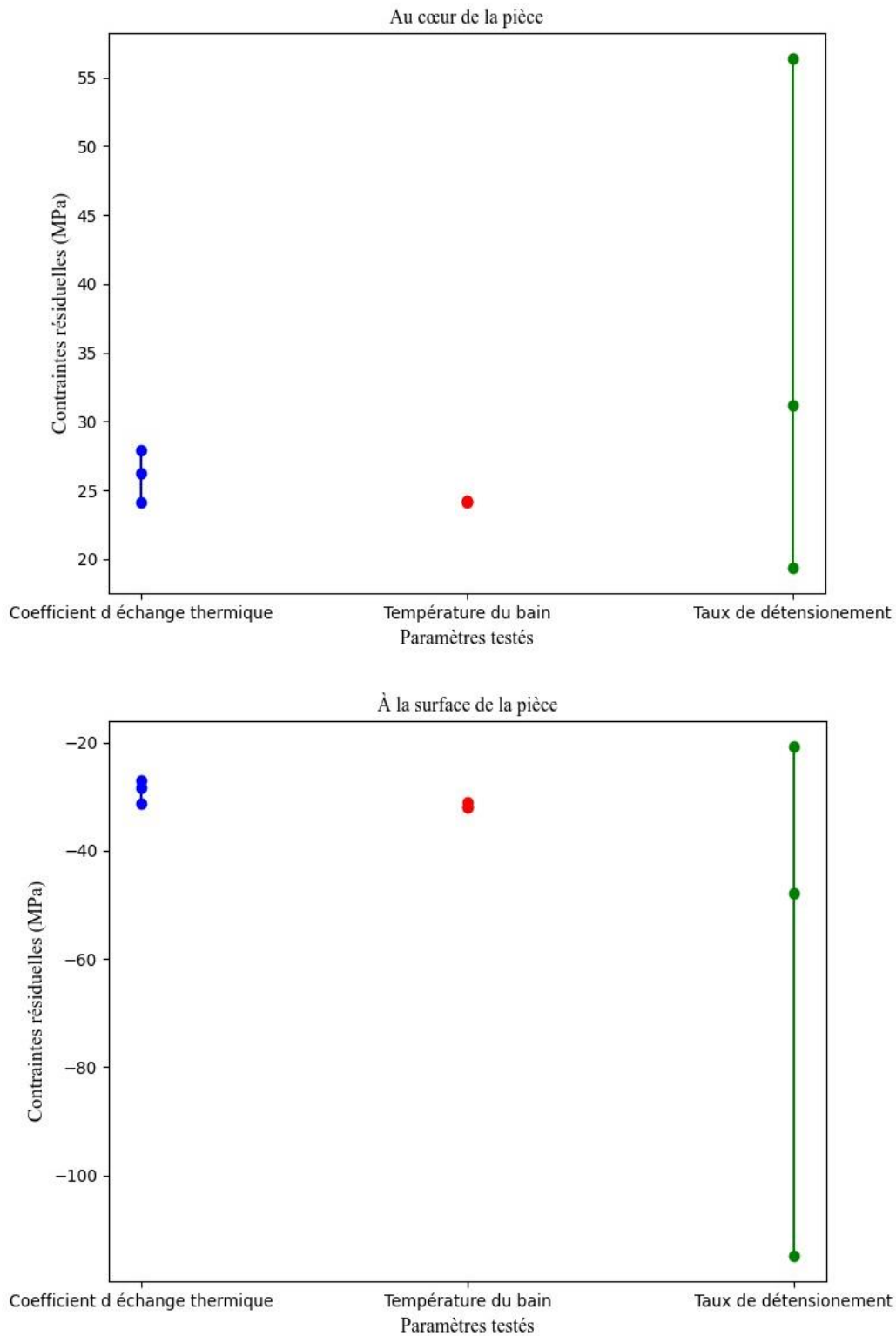


Figure 9. Résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres

Il apparaît que le champ de contrainte initiale de la pièce avant usinage (autant en surface qu'à cœur) dépend exclusivement du taux d'allongement appliqué lors de l'étape de étirage à froid et du coefficient de convection thermique du milieu de la trempe.

En fonction de la déformée de la pièce obtenue en début d'usinage, après une première étape d'ébauche dans notre cas, qui élimine 80% environ de la matière brute, il sera possible d'estimer le taux d'allongement appliqué à la pièce et ainsi d'estimer, avec le modèle IA, le champ de contrainte de la pièce en cours de fabrication. Ainsi, il sera possible de modifier la stratégie sur la fin de l'étape d'usinage pour minimiser la déformée finale de la pièce. Un bridage adaptatif qui permet de relâcher la pièce pendant l'usinage pourrait être une meilleure solution. Cela permet de libérer les contraintes résiduelles et donc continuer l'usinage avec une pièce ayant des contraintes plus faibles. Tout un processus de validation doit être fait pour confirmer l'efficacité de l'idée.

6 Conclusions

Dans ce travail, un modèle thermomécanique a été développé pour simuler le processus de fabrication des ébauches de pièce laminée d'alliage d'aluminium sur le logiciel Abaqus. Plusieurs simulations numériques, combinant différents paramètres du processus, ont été réalisées pour déterminer la variabilité du champ RS initial.

Les résultats montrent que la variabilité de l'étape de trempe n'influence pas significativement le champ de contraintes final. En revanche, l'étape de l'étirage à froid joue un rôle crucial dans la distribution des contraintes. Le coefficient de convection thermique a également un impact sur le champ de contrainte, bien que dans une mesure beaucoup moins significative. Cela met en évidence la nécessité d'un contrôle méticuleux de ces paramètres pour réduire les variations indésirables des contraintes.

Sur la base de ces résultats, les variations du champ de CR sont maintenant connues en fonction des paramètres opératoires. Ainsi, cela permettra de prédire la distribution du champ de CR pour chaque pièce lors de l'usinage et ainsi éviter leur distorsion.

Remerciements

Les auteurs remercient le programme PERFORM de l'IRT Jules Verne pour son support financier.

Références

- Akhtar, W., Lazoglu, I., & Liang, S. Y. (2022). "Prediction and control of residual stress-based distortions in the machining of aerospace parts: A review." *Journal of Manufacturing Processes*, 76, 106–122. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.005>
- Cerutti, X., Arsene, S., & Mocellin, K. (2016). "Prediction of machining quality due to the initial residual stress redistribution of aerospace structural parts made of low-density aluminium alloy rolled plates." *International Journal of Material Forming*, 9(5), 677–690. <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1254-7>

- Chabeauti, H., Ritou, M., Lavisse, B., Germain, G., & Charbonnier, V. (2023). "Digital twin of forged part to reduce distortion in machining." *CIRP Annals*, S0007850623000677. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2023.04.021>
- Jeanmart, P., & Bouvaist, J. (1985). "Finite element calculation and measurement of thermal stresses in quenched plates of high-strength 7075 aluminium alloy." *Materials Science and Technology*, 1(10), 765–769. <https://doi.org/10.1179/mst.1985.1.10.765>
- Lamba, N. K., & Khobragade, N. W. (2012). "Uncoupled thermoelastic analysis for a thick cylinder with radiation." *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2(2), 021005. <https://doi.org/10.1063/2.1202105>
- Li, J., & Wang, S. (2017). "Distortion caused by residual stresses in machining aeronautical aluminum alloy parts: recent advances." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(1), 997–1012. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9066-6>
- Louhichi, M. A., Poulachon, G., Lorong, P., Outeiro, J., & Monteiro, E. (2022). "Experimental and simulative determination of residual stress during heat treatment of 7075-T6 aluminum." *Procedia CIRP*, 108, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.018>
- Sim, W.-M. (2010). "Challenges of residual stress and part distortion in the civil airframe industry." *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 5(4–5), 446–455. <https://doi.org/10.1504/IJMMP.2010.037621>
- Tandon, R., & Green, D. J. (1990, September). "Residual Stress Determination Using Strain Gage Measurements - Tandon - 1990 - Journal of the American Ceramic Society - Wiley Online Library." Retrieved February 5, 2024, from <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06738.x>
- Virkar, A. V. (1990). "Determination of Residual Stress Profile Using a Strain Gage Technique." *Journal of the American Ceramic Society*, 73(7), 2100–2102. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05276.x>
- Wei, Y., & Wang, X. W. (2007). "Computer simulation and experimental study of machining deflection due to original residual stress of aerospace thin-walled parts." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(3), 260–265. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0470-1>