

Un aperçu sur l'emboutissage profond

An overview of deep drawing

Mohamed Bouzaffour¹, Mohammed Nassraoui², Otmane Bouksour³

¹ Laboratoire de mécanique productique et de génie industriel (LMPGI), Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan II, Casablanca, Maroc, mohamed.bouzaffou-etu@etu.univh2c.ma

² Laboratoire de mécanique productique et de génie industriel (LMPGI), Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan II, Casablanca, Maroc, mohammed.nassraoui@univh2c.ma

³ Laboratoire de mécanique productique et de génie industriel (LMPGI), Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan II, Casablanca, Maroc, otmane.bouksour@univh2c.ma

RÉSUMÉ. L'emboutissage profond et la technique de réalisation de formes non développable par déformation plastique à froid de la tôle en utilisant généralement des outils doubles effets et qui nécessite un grand effort d'emboutissage, les déformations engendrées par l'emboutissage profond conduisent à des modifications de l'épaisseur de tôle, qui dans certaines zones s'amincissent en entraînant à un amincissement excessif ou une rupture, alors que d'autres soumises à la compression ou au retreint ont tendance à s'épaissir en générant des plis ou des ondulations, ce qui rend ce process plus difficile et pose un grand problème aux industries de fabrication des grandes pièces, notamment l'automobile, d'où l'intérêt d'agir sur les paramètres impactant l'emboutissage profond pour supprimer ces défauts. Dans ce papier, un aperçu sur les différents facteurs impactant la formabilité des pièces issues du procédé d'emboutissage profond et qui engendrent des défauts d'aspects comme les plis, ondulations, casses.

ABSTRACT. Deep drawing and the technique of making forms that cannot be developed by cold plastic deformation of the sheet, generally using double-acting tools and requiring a great effort of drawing, the deformations caused by deep drawing lead to changes in the thickness of the sheet, which in certain areas become thinner, leading to excessive thinning or rupture, while others subjected to compression or shrinkage tend to thicken by generating folds or ripples, which makes this process more difficult and poses a major problem for large parts manufacturing industries, especially the automotive industry, Hence the interest to act on the parameters impacting deep drawing to remove these defects. In this paper, an overview of the various factors impacting the formability of parts from the deep drawing process and which cause defects in aspects such as folds, ripples, breaks.

MOTS-CLÉS. Emboutissage profond, Automobile.

KEYWORDS. Deep drawing, automotive.

1. Introduction

Actuellement les industries de fabrication des pièces notamment l'automobile recherchent à optimiser au mieux les coûts de fabrication, un choix judicieux de la solution d'emboutissage permet d'optimiser le coefficient utilisation matière et par conséquent le prix de revient de fabrication. L'emboutissage profond est une technique très utilisée pour fabriquer une grande partie des pièces automobile (Tunnel, plancher de charge...) , ce processus est rentable puisqu'il permet d'optimiser les chutes et gagner la matière , mais il reste cependant plus difficile d'obtenir une pièce de bonne qualité pendant la phase industrialisation, d'où l'intérêt d'anticiper en améliorant la conception d'outillage pendant la phase développement pour réduire le temps de mise au point faite après la réalisation des outillages et ce qui nécessite également de connaître les paramètres qui affectent le process d'emboutissage profond et jouer sur ses divers paramètres qui contrôlent le déplacement du métal dans l'outil afin d'obtenir des pièces sans défauts de qualité et d'aspect.

2. L'emboutissage Double Effet

L'emboutissage profond est souvent réalisé avec un outil double effet, car il est propice à la grande profondeur

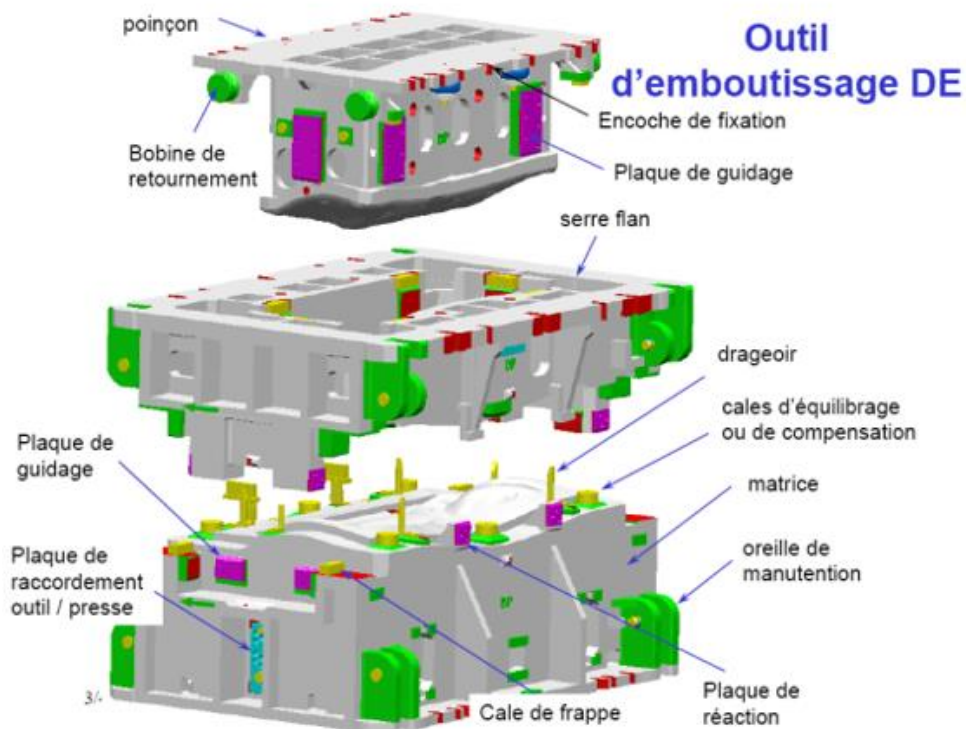


Figure 1. Outil d'emboutissage double effet

Le schéma du cycle de l'emboutissage double effet est présenté comme suit :

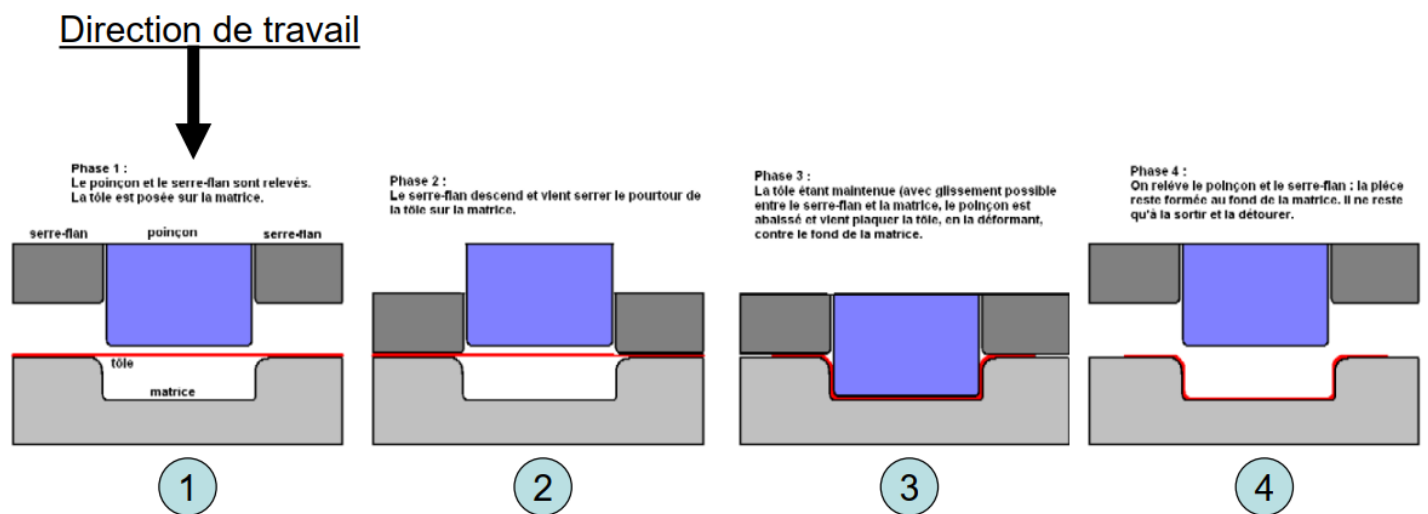


Figure 2. Principe de l'emboutissage double effet

Malgré une cadence instantanée forte, le gain de cycle est perdu lors du **retournement** de l'Embouti vers ses reprises

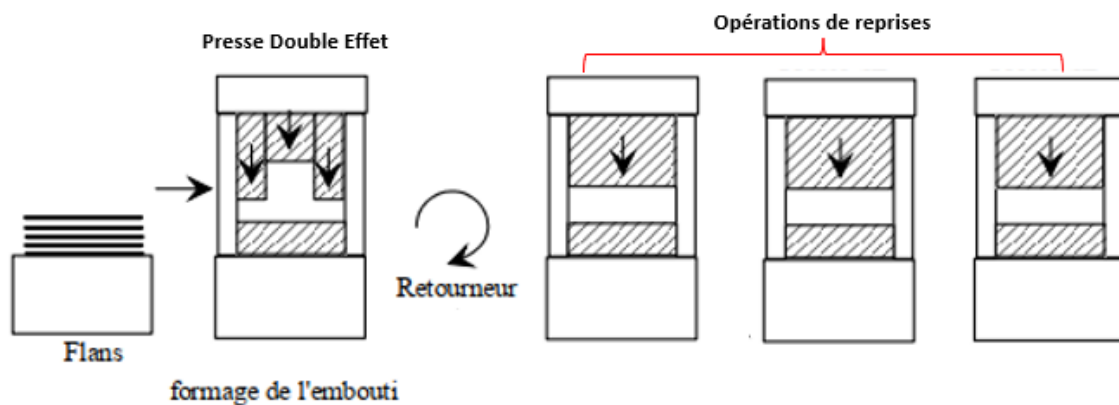


Figure 3. *Retournement de la pièce en emboutissage double effet*

Pour des raisons d'emboutissabilité, il est possible de réaliser la pièce en 2 opérations :

- Un premier embouti qui va créer une réserve de matière tout en limitant l'allongement de la tôle
- Un second embouti réalisé en opération de reprise qui qui forme la gravure définitive.

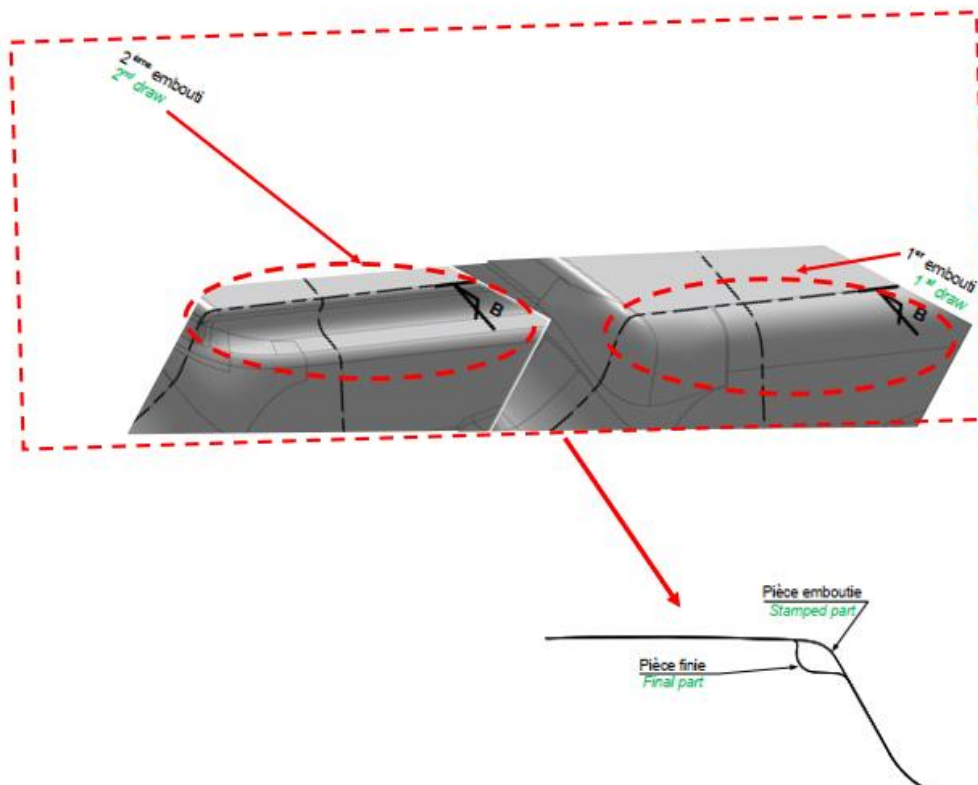


Figure 4. *Ré-emboutissage en opération de reprise*

3. Les paramètres affectant l'emboutissage profond

3.1. Effort du serre Flan

L'effort du serre flan joue un rôle important dans l'emboutissage profond, les études ont montré que la diminution de la force du serre flan entraîne la disparition des fissures sur la pièce, cependant les plis augmentent (voir Figure 5) (Sunanta & Suranuntchai, 2018)

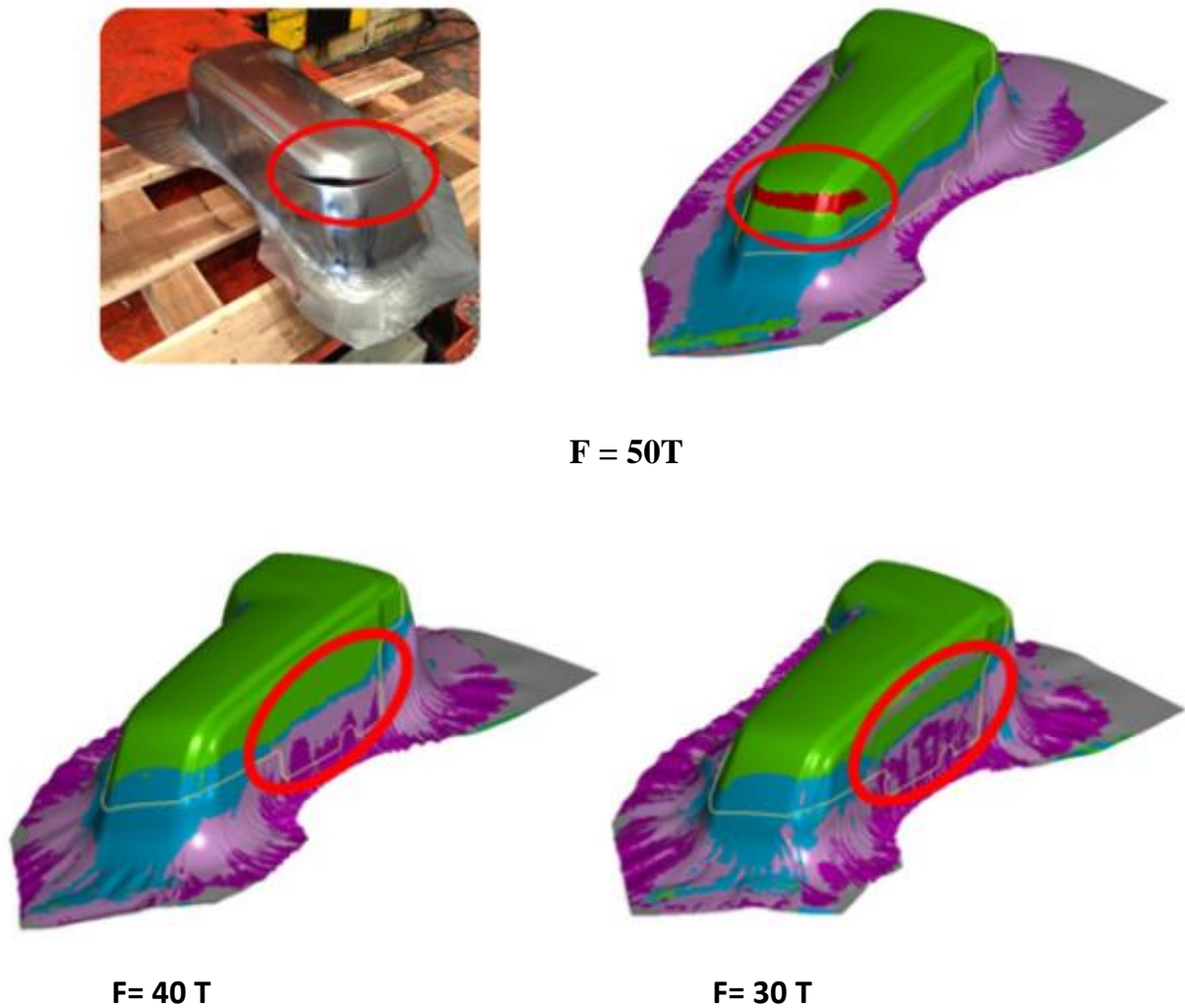


Figure 5. Simulations avec efforts SF [30T, 40T, 50T]

La force du serre flan a un impact sur la distribution d'épaisseur en engendrant un amincissement important. Un essai a été réalisé sur un flan en forme de coupelle en alliage de magnésium AZ31B (Qian, 2022), la figure 6 est une courbe tracée en prenant 8 points sur la pièce lorsque la profondeur d'emboutissage est de 12 mm :

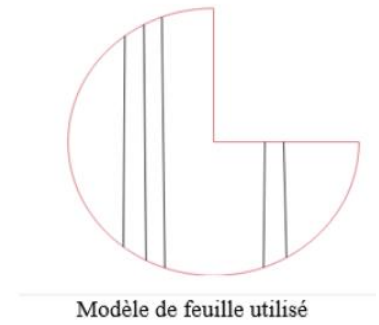
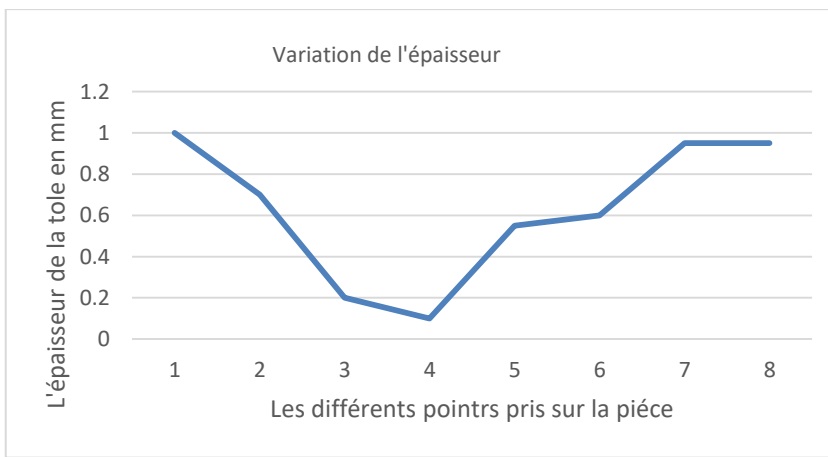


Figure 6. Résultats de la distribution d'épaisseur de la tôle à différents moments de l'emboutissage profond

Par conséquent, l'effort du serre flan est un paramètre important sur lequel il faut jouer pour éliminer les amincissements et ruptures et éviter les plis.

3.2. Jonc de retenue

La force exercée par le jonc de retenue a une influence significative sur la qualité de la pièce, de sorte que la diminution de son effort élimine les fissures et améliore les plis (voir Figure 8)(Sunanta & Suranuntchai, 2018)), la figure 7 ci-dessous présente la position des trois joncs de retenue :

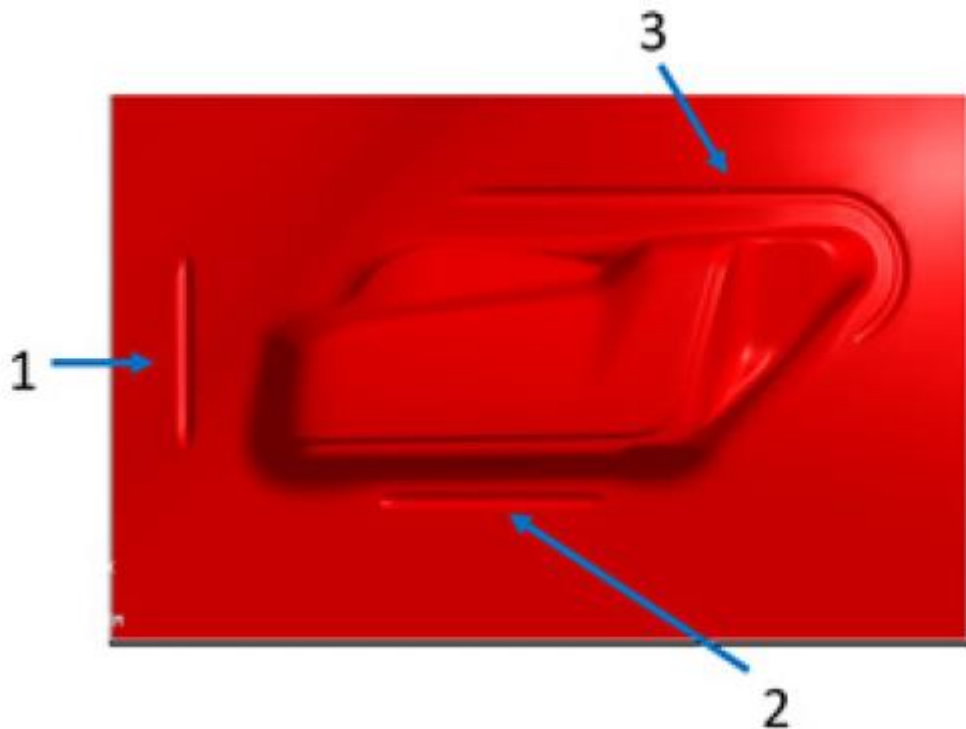
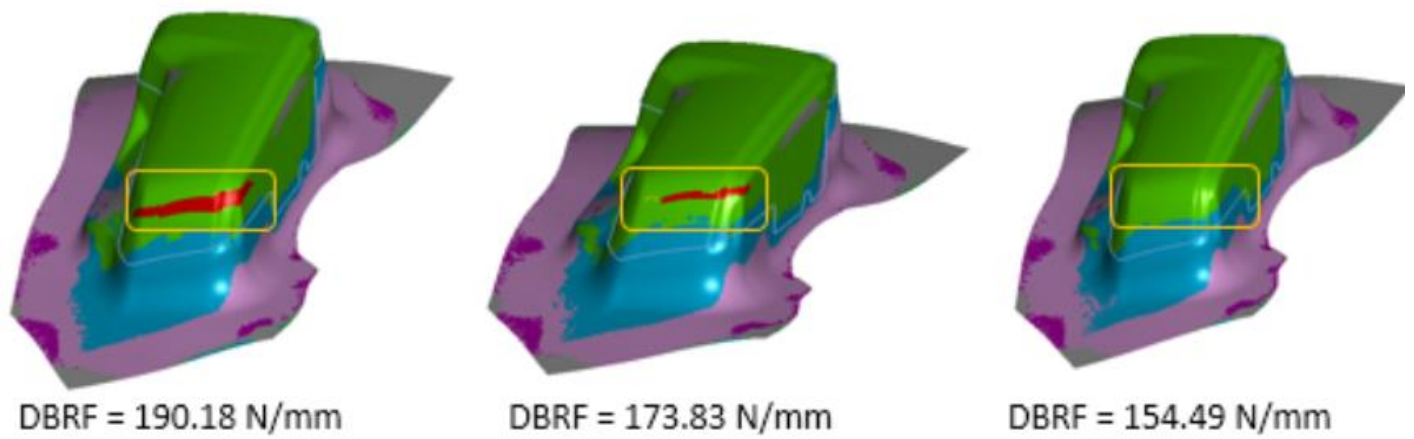
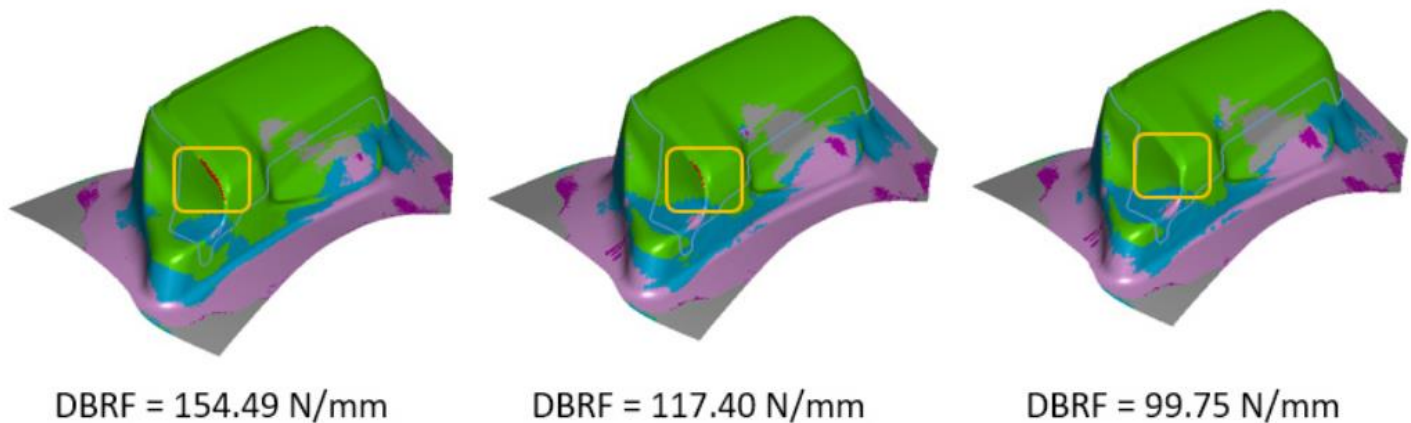


Figure 7. Position des trois joncs de retenue dans la matrice



Résultats de simulation lorsque la force du jonc DBRF 1 a été ajusté à 154,49 N/mm



Résultats de simulation lorsque la force du jonc DBRF 3 a été ajusté à 99,75 N/mm

Figure 8. Résultats de simulation après la diminution de la force du jonc (DBRF) 1 et 3

La force du jonc de retenue a également un effet positif sur le retour élastique en emboutissage, cependant, elle provoque une augmentation des forces de formage et des contraintes dans la pièce. La figure 9 montre que l'utilisation d'un jonc de retenue de 5 mm de hauteur entraîne des angles de retour élastique inférieurs par rapport à celui de 2,2 mm de hauteur, telle que $\alpha_{2.2} = (90.1 \pm 1.5)^\circ$ et $\alpha_5 = (70.6 \pm 1.4)^\circ$, néanmoins la force de frappe augmente telle que $F_{5\max} = (29.4 \pm 0.1) \text{ KN}$ (Rigas et al., 2021).

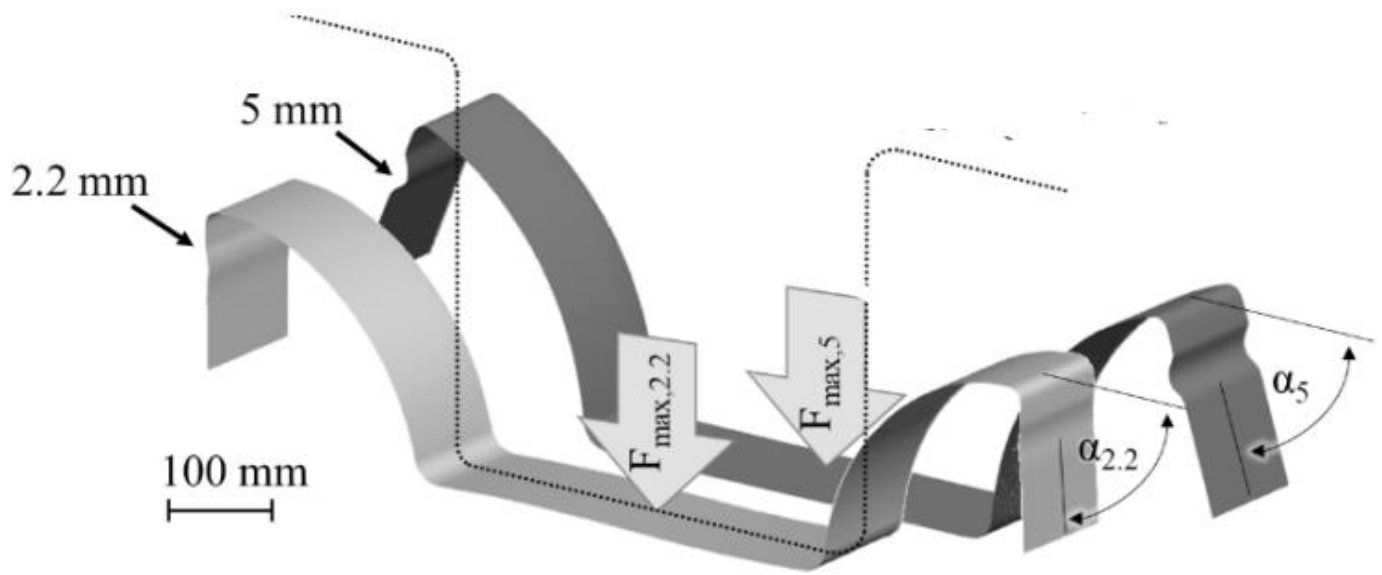


Figure 9. Influence des joncs de retenue sur le comportement de retour élastique en emboutissage

3.3. Frottement

L'influence du coefficient de frottement entre les différents outils est visible sur l'amincissement de la pièce emboutie, avec une amélioration de l'amincissement en augmentant le coefficient de frottement entre le flan et la matrice, et en diminuant le coefficient de frottement entre le flan et le serre flan (voir figure 10) (Bouchaâla et al., 2020)

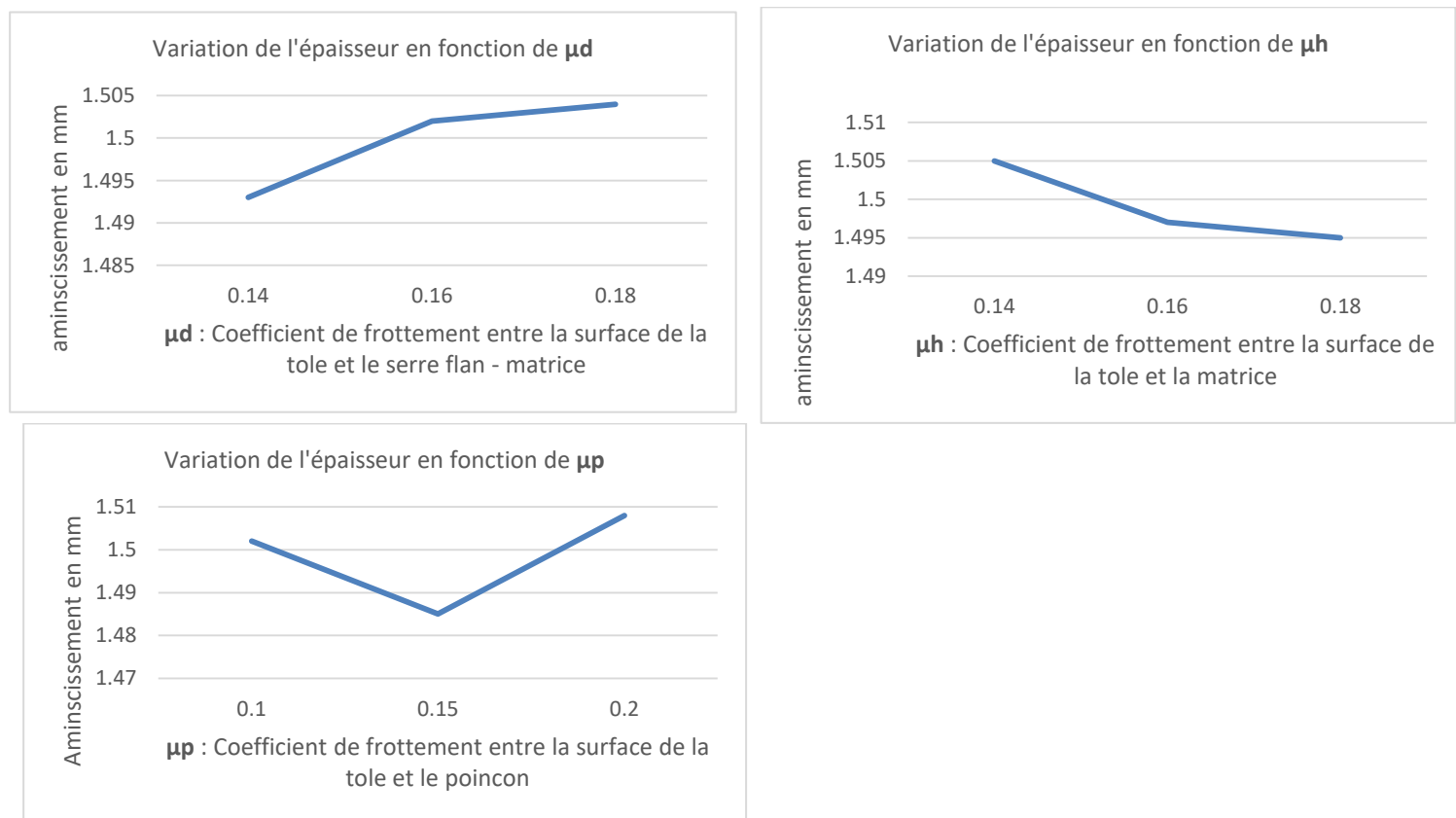


Figure 10. La variation de l'amincissement en fonction du coefficient de frottement

Donc le meilleur choix pour éviter l'amincissement excessif est 0,18 ,0,14 et 0,20 respectivement μd , μh et μp .

Par conséquent, le frottement est l'un des paramètres qui affectent le process d'emboutissage profond et le mauvais choix du coefficient de frottement peut générer l'amincissement.

3.4. Rayon du poinçon

Le rayon du poinçon a un impact sur la formabilité de la pièce, comme présenté dans la figure 11, l'aluminium AA5051 présente une bonne formabilité en utilisant un poinçon de **diamètre 20 mm** par rapport aux diamètres (D50, D100, D75) (Fictorie et al., 2010).

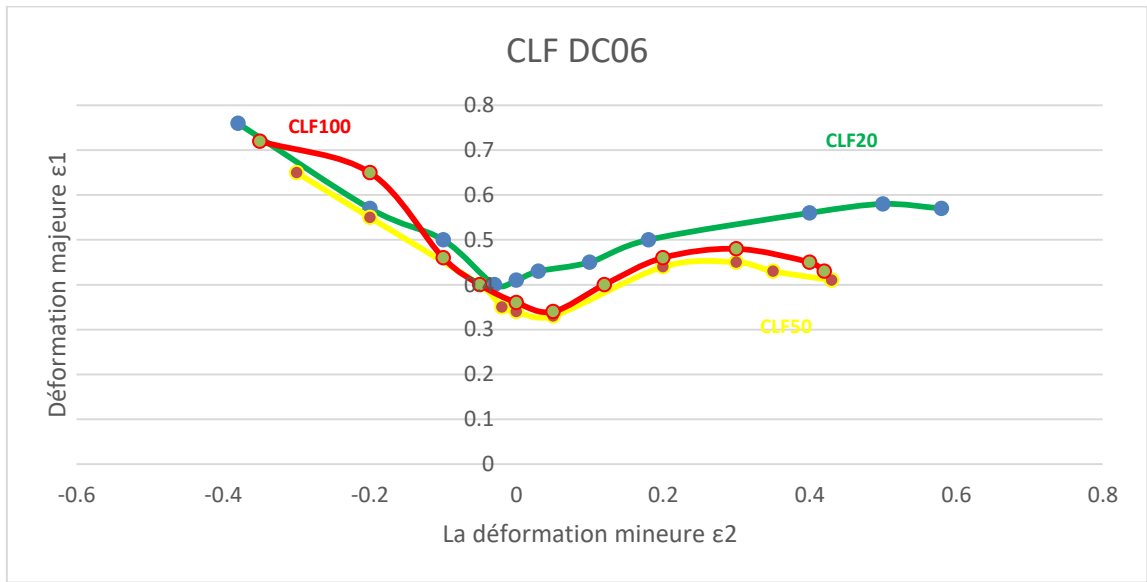


Figure 11. Comparaison des FLC avec différents diamètres poinçons pour l'Aluminium AA5051

L'acier DC60 montre également une certaine amélioration dans la formabilité pour un poinçon de diamètre 20 mm (FLC20), notée sur **la figure 12**.

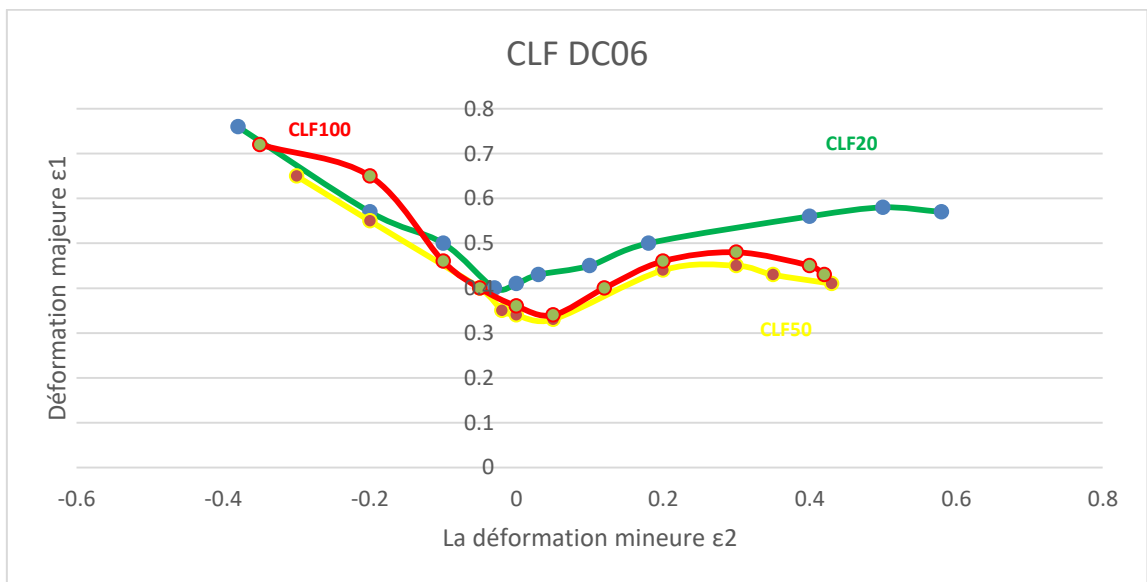


Figure 12. Comparaison des FLC avec différents diamètres poinçons pour l'acier DC60

Ce qui montre qu'il est nécessaire de choisir un bon rayon poinçon (**plus petit**) pour obtenir une meilleure formabilité des pièces

3.5. Rayon de la matrice

Des essais (numériques et expérimentaux) ont été réalisés sur une coupelle cylindrique (Colgan & Monaghan, n.d.), le résultat présenté dans le tableau 1, qui montre que le rayon de la matrice a une grande influence sur la distribution de l'épaisseur avec un pourcentage d'environ 60%.

Paramètres	Pourcentage d'influence %
Rayon poinçon	18,265
Rayon matrice	59,977

Tableau 1. Le pourcentage d'influence du rayon de la matrice sur la distribution d'épaisseur

Un deuxième essai numérique a été fait sur une autre coupelle circulaire (Padmanabhan et al., 2007), le résultat montre également que le rayon de la matrice a un grand impact sur la variation de l'épaisseur dans la tôle avec un pourcentage 89,2% (Tableau 2).

Paramètre de processus	Pourcentage d'influence %
Coefficient de frottement	6,3
Rayon matrice	89,2
Force du serre flan	4,5

Tableau 2. Le pourcentage d'influence du rayon de la matrice sur la distribution d'épaisseur

Le rayon de la matrice a également une influence sur la force de frappe du poinçon avec un pourcentage d'environ 54% (Tableau 3).

Paramètre de processus	Pourcentage d'influence % sur la force de frappe
Coefficient de frottement	9,812
Rayon matrice	53,495

Tableau 3. Le pourcentage d'influence des différents paramètres sur la force de frappe

Par conséquent, si le rayon de la matrice est réduit, la quantité de force de frappe nécessaire pour attirer le matériau dans la matrice augmente, ce qui provoque **l'amincissement global** de la paroi latérale de la coupelle.

3.6. La force de frappe

Des expériences ont été réalisées en prenant en compte trois paramètres principaux (force de serrage, coefficient de frottement, et le rayon matrice), une combinaison de trois valeurs pour chaque paramètre a donné neuf expériences, le but c'est d'étudier l'évolution de la force de frappe en fonction du déplacement du poinçon, le résultat est montré dans la figure 13 et la figure 14(Padmanabhan et al., 2007) :

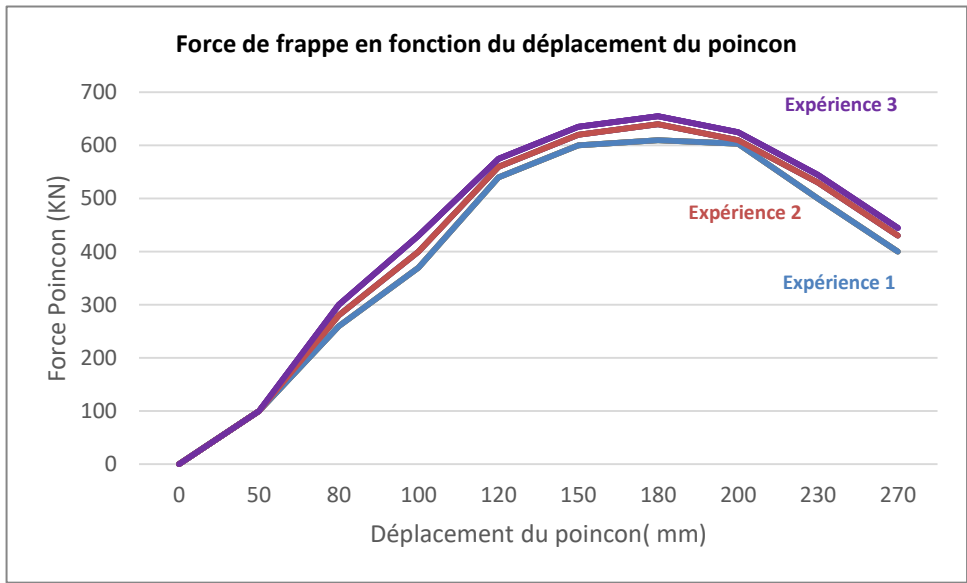


Figure 13. L'évolution de la force de frappe en fonction du déplacement

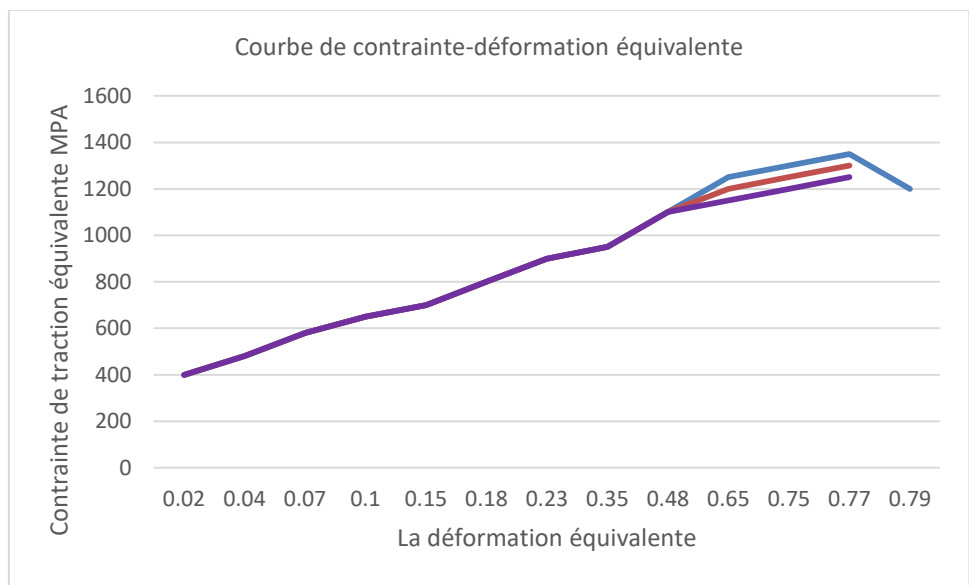


Figure 14. La courbe de contrainte-déformation équivalente

Le résultat montre que la force de frappe est plus élevée dans les trois premières expériences avec un rayon matrice plus petit, par conséquent, la tôle est soumise à des contraintes très élevées en conduisant à un arrachement de la matière à environ un déplacement de 240 mm

3.7. La Température

La température a en outre un paramètre important pour la formabilité de la pièce, la figure 15 montre que la formabilité de la pièce est meilleure à haute température (480 °C), suite à un essai qui a été fait sur une pièce en forme de coupe en alliage 2060 Al-Li en variant la température de 400 °C à 480 °C, à une vitesse poinçon de 25 mm/s et une profondeur d'emboutissage de 16 mm(Yang et al., 2020).

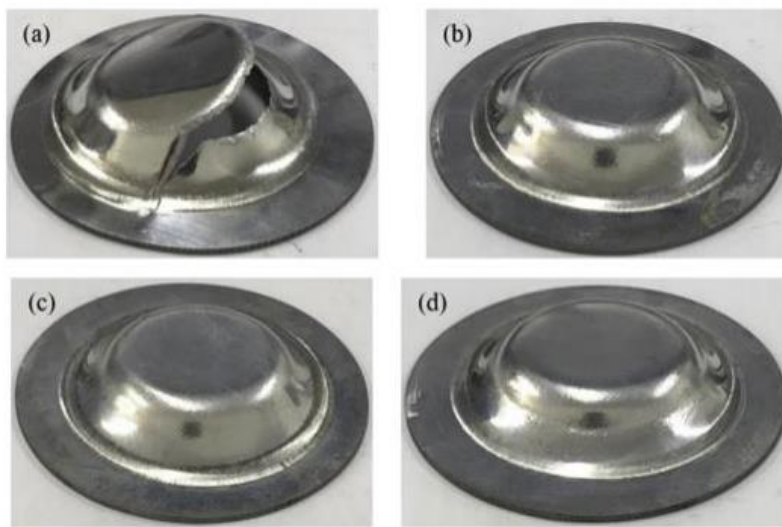


Figure 15. Résultats d'essais sur les pièces en forme de coupe
Température ambiante, b) Essai à 400°C, c) Essai à 450°C, c) Essai à 480°C

3.8. Le coussin

Des essais numériques ont été réalisés sur un Capot (Jadhav, n.d.) afin d'étudier l'impact du coussin sur la force du serre flan, en se basant sur deux cas (avec et sans Coussins), la figure 16 présente le modèle étudié avec coussins.

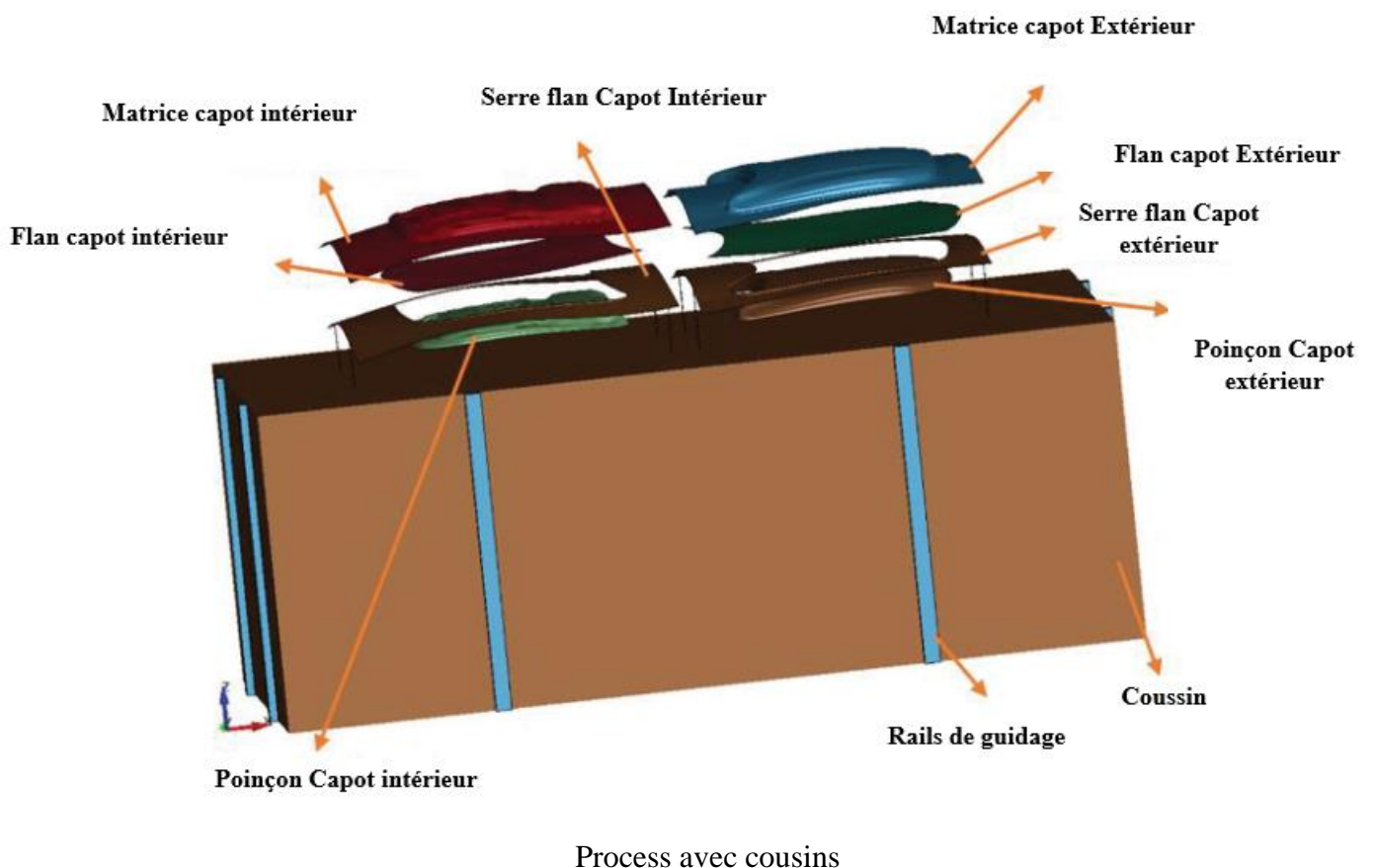


Figure 16. Le modèle du process avec coussins

Quatre modèles ont été étudiés comme suit :

Dans **le modèle 1**, le coussin n'est pas utilisé et les deux serre-flan Capot intérieur et extérieur étaient différents, tout en attribuant à chaque serre flan une force de 1,2 MN

Dans **le modèle 2**, les paramètres requis ont été conservés comme ceux du modèle précédent, cependant la force du serre flan a été augmentée à 2,4 MN

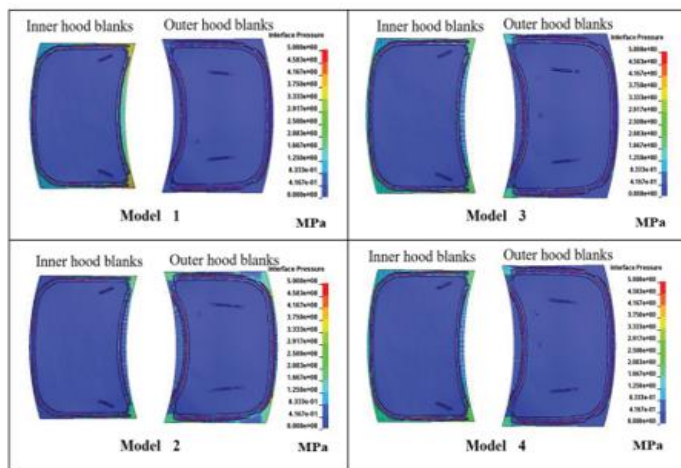
Dans **le modèle 4**, le coussin est utilisé comme **le modèle 3**(avec coussin), cependant, Pour la réduction du mouvement du coussin pendant les simulations d'emboutissage, le jeu entre le coussin et les rails de guidage a été réduit de 0,5 mm à 0,2 mm, Pour ce faire, le modèle 3 a été utilisé, mais la position des rails de guidage a été modifiée.

Pour analyser les effets du mouvement du coussin sur la force du serre-flan, un essai approfondi a été réalisé sur les 4 modèles en fonction du déplacement de la matrice, notée dans le tableau 4.

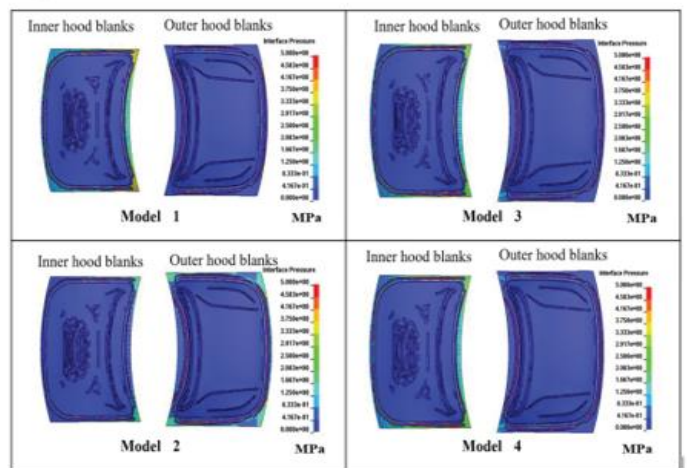
Stages	Déplacement de la matrice (mm)	Spécifications
Stage 1	173	Déplacement de la matrice initial
Stage 2	222	Déplacement de la matrice pendant la course du poinçon
Stage 3	244	Déplacement de la matrice pendant la course du poinçon
Stage 4	282	Déplacement de la matrice à la fin de course du poinçon

Tableau 4. *Différents essais en fonction du déplacement de la matrice*

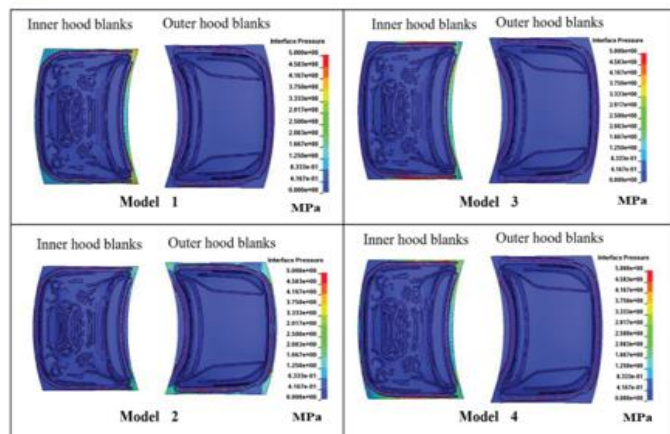
Stage 1



Stage 2



Stage 3



Stage 4

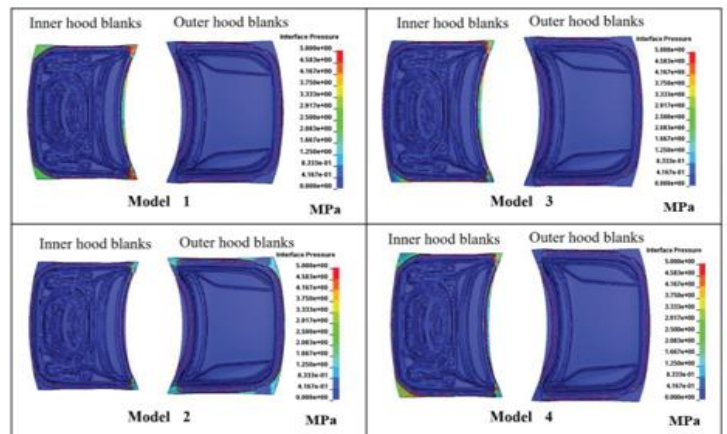


Figure 17. Résultats des essais numériques

Les résultats du modèle 1 montrent que la distribution de la pression de contact sur le flan capot extérieur est supérieure à celle du flan capot intérieur, cela implique que le contact entre le flan capot intérieur et le serre-flan capot intérieur n'est pas établi uniformément. Ce qui montre la mauvaise répartition du serrage sur le flan.

Les résultats du modèle 3 (avec coussins) montrent que la répartition de la pression de contact est largement affectée par le mouvement du coussin.

Les résultats du modèle 4 dont le jeu entre le coussin et les rails de guidage est de 0,2 mm montrent que la distribution de la pression de contact sur le flan est identique aux résultats du modèle 3 au niveau du stage 1 et 2, cependant Le stage 3 montre que les pressions de contact sur l'extrémité supérieure et inférieure de la pièce intérieure sont réduites par rapport au modèle 3, néanmoins le stage 4 montre que les pressions de contact sur la partie intérieure sont plus élevées.

En comparant les quatre modèles, on peut dire que le mouvement du coussin affecte largement l'évolution de la distribution de la pression de contact sur le flan.

Un autre essai expérimental a été fait sur un panneau de porte avec trois matériaux et épaisseurs différentes en utilisant une presse hydraulique (figure 20)(Altan & Penter, n.d.)

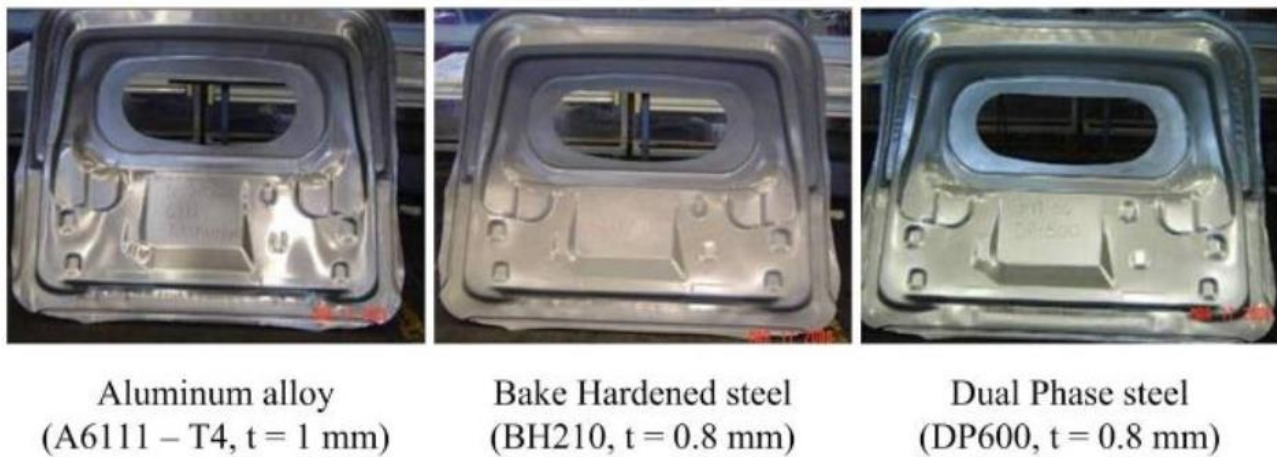


Figure 18. *Panneau de porte avec différents matériaux et efforts coussins différents*

La qualité des pièces est conforme en appliquant une force différente pour chaque coussin. Ce qui prouve qu'il est nécessaire de jouer sur les efforts du coussin afin d'obtenir une pièce sans plis et casses.

3.9. L'épaisseur

Une étude a été faite sur une feuille métallique pour étudier l'influence de l'épaisseur de la tôle sur la force du serre flan (Marumo et al., n.d.)

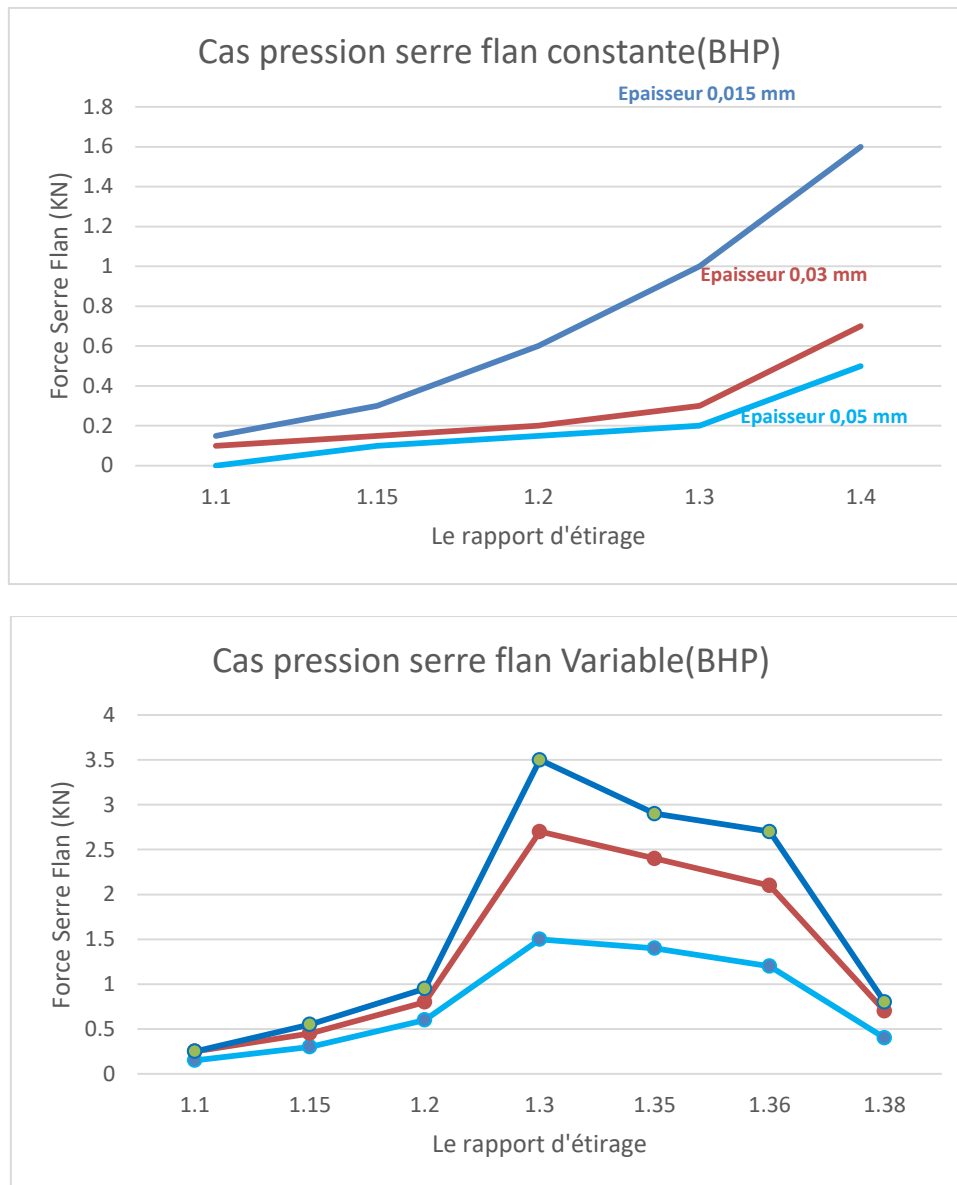


Figure 19. La variation de la force du serre flan en fonction du rapport d'emboutissage

Dans les deux cas (figure 19), la force du serre flan augmente avec la diminution de l'épaisseur du flan, ce qui prouve que le BHF (force du serre flan) est fortement influencé par l'épaisseur de la feuille.

L'épaisseur a également une influence sur la contrainte effective (Chandini & Reddy, 2015), la figure 20 montre que la contrainte effective des coupelles cylindriques en aluminium 1070A fabriqués en emboutissage profond en utilisant une presse hydraulique passe de 105,37 à 78,87 MPa avec une épaisseur de tôle croissante.

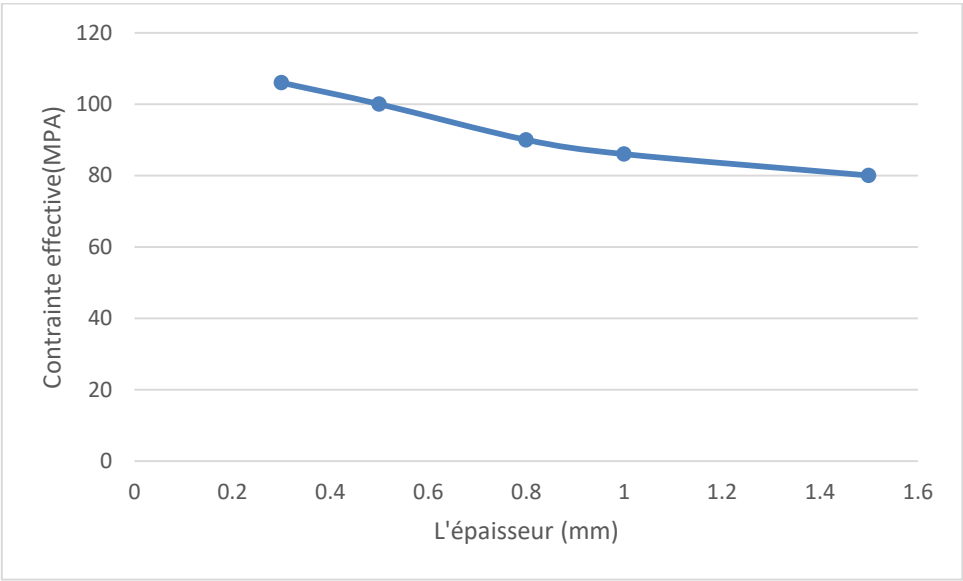


Figure 20. L'influence de l'épaisseur sur la contrainte effective

3.10. Diamètre du flan

Un essai a été fait sur des flans circulaires de diamètres différents, la figure 21 montre que l'augmentation du diamètre entraîne une augmentation de la contrainte induite (Brathikan et al., 2022)

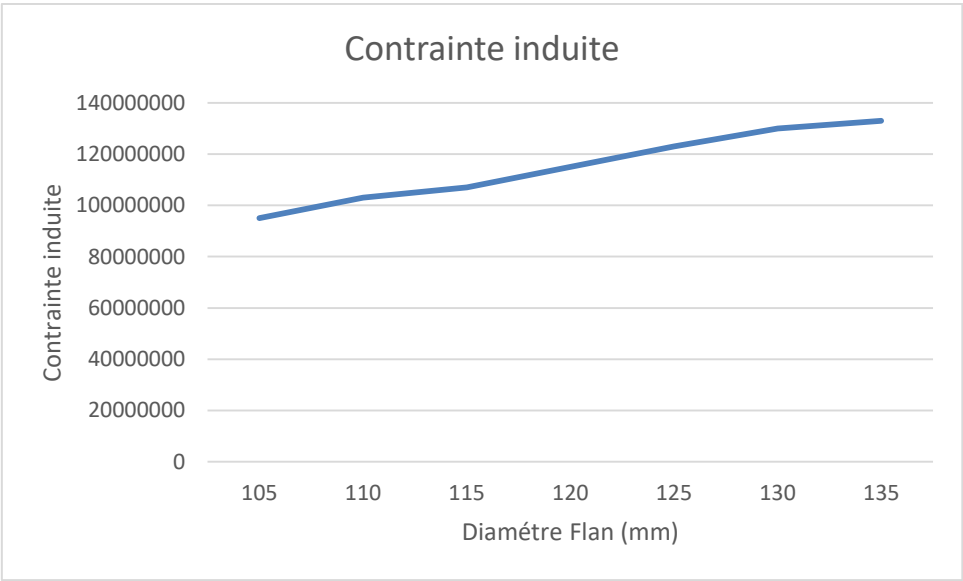


Figure 21. L'influence du diamètre du flan sur la contrainte induite

Le diamètre du flan a également un impact sur la force de frappe, de telle sorte que la force de frappe augmente lorsque l'on augmente le diamètre du flan (figure 22), par conséquent la contrainte induite augmente également.

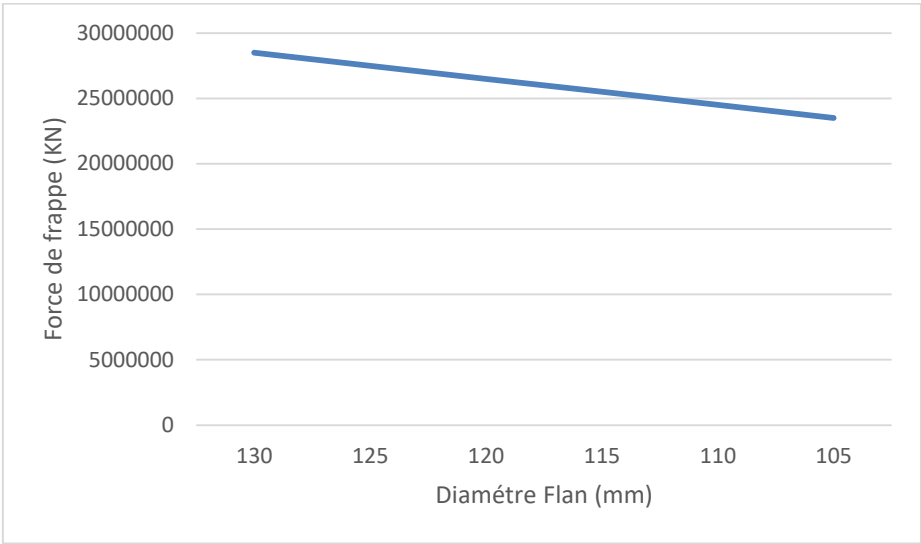


Figure 22. L'influence du diamètre du flan sur la force de frappe

3.11. Forme du flan

Afin d'étudier l'impact de la forme du flan sur la qualité de la pièce, une pièce automobile renfort a été étudiée, le flan est un flan rectangulaire en acier doux et d'épaisseur 1,15 mm.

Nous avons fait un essai numérique en changeant la forme du flan en un flan Sinus, le résultat de la simulation sur Autoform (figure 23) montre une bonne formabilité, néanmoins un retour élastique est apparu sur la pièce.

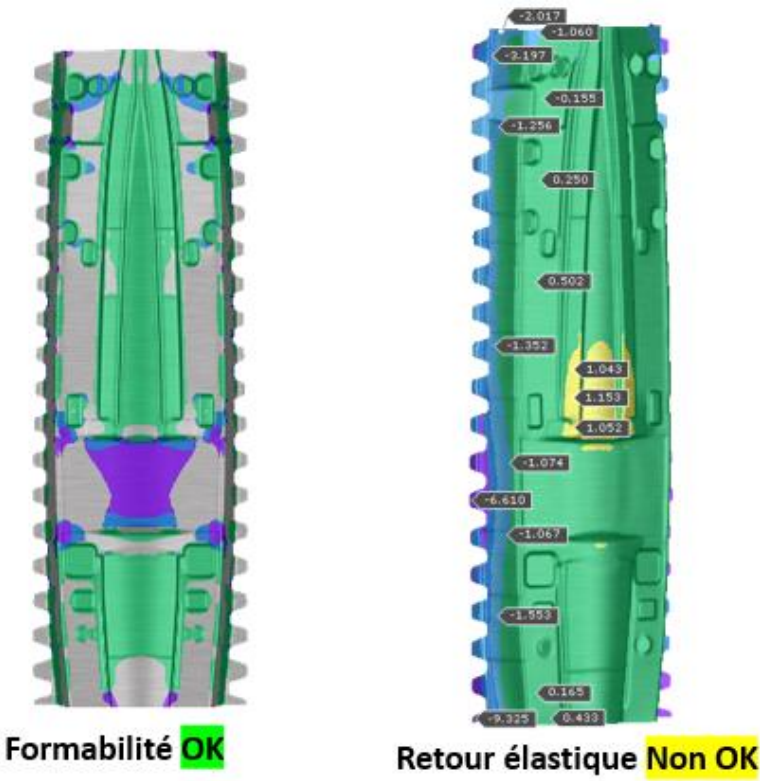


Figure 23. Simulation du renfort avec AutoForm

Par conséquent, le choix de la forme du flan peut optimiser la matière et diminuer le prix de revient de fabrication, cependant, il peut avoir un impact sur la qualité de la pièce.

4. Conclusion

Ces dernières années, de nombreux travaux ont été effectuées et méthodes développées pour prédire les paramètres qui pourront impacter la qualité des pièces afin d'optimiser le processus d'emboutissage profond, les travaux expérimentales et numériques ont permis de relever les paramètres les plus importants qui influence davantage sur l'emboutissage profond, notamment la force du serre flan. Les simulations numériques sur Autoform et d'autres logiciels sont devenus un outil primordial dans la conception des gammes d'emboutissage et la résolution des problèmes et défauts en phase développement afin d'anticiper avant la réalisation des outillages. Ce qui permet de détecter les défauts et jouer sur les paramètres qui impactent la qualité de la pièce en mode virtuelle (Force serre flan, changement de conception du jonc de retenue...). Dans cet article, un aperçu sur les paramètres qui impactent l'emboutissage profond, de plus, nous avons rajouté également un essai numérique fait sur un renfort automobile en utilisant le logiciel AutoForm pour voir l'impact de la forme du flan sur la qualité de la pièce.

Bibliographie

- Altan, T., & Penter, L. (n.d.). Application of Modern Cushion Systems to Improve Quality and Productivity in Sheet Metal Forming.
- Bouchaâla, K., Ghanameh, M. F., Faqir, M., Mada, M., & Essadiqi, E. (2020). Evaluation of the effect of contact and friction on deep drawing formability analysis for lightweight aluminum lithium alloy using cylindrical cup. *Procedia Manufacturing*, 46, 623–629. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.089>
- Brathikan, V. M., Sangeetha, N., Sangeethkumar, B., & Scidarth, K. (2022). Influence of various blank diameter in deep drawing. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.281>
- Chandini, K., & Reddy, A. C. (2015). Parametric Importance of Warm Deep Drawing Process for 1070A Aluminium Alloy: Validation through FEA. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(4). <http://www.ijser.org>
- Colgan, M., & Monaghan, J. (n.d.). Deep drawing process: analysis and experiment.
- Fictorie, E., van den Boogaard, A. H., & Atzema, E. H. (2010). Influence of punch radius in a Nakazima test for mild steel and aluminium. *International Journal of Material Forming*, 3(SUPPL. 1), 1179–1182. <https://doi.org/10.1007/s12289-010-0983-x>
- Jadhav, J. (n.d.). FE Modeling of Cushion 3D Motion for Sheet Metal Forming Simulation.
- Marumo, Y., Saiki, H., & Ruan, L. (n.d.). Effect of sheet thickness on deep drawing of metal foils Manufacturing and processing.
- Padmanabhan, R., Oliveira, M. C., Alves, J. L., & Menezes, L. F. (2007). Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel. *Finite Elements in Analysis and Design*, 43(14), 1062–1067. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2007.06.011>
- Qian, F. (2022). Numerical Simulation of Hot Stamping Forming of AZ Series Magnesium Alloys and Optimization of Die Process. *Journal of Chemistry*, 2022, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2022/6484242>
- Rigas, N., Schmid, H., & Merklein, M. (2021). Comparison of different forming methods on deep drawing and springback behavior of high-strength aluminum alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1157(1), 012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1157/1/012048>
- Sunanta, A., & Suranuntchai, S. (2018). Finite Element Simulation of Deep Drawing Processes for Shell Bar RR Impact RH/LH. *Applied Mechanics and Materials*, 875, 24–29. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.875.24>
- Yang, X., Wang, B., Zhou, J., Dang, L., Xiao, W., & Wang, Y. (2020). Influence of process parameters on deep drawing of 2060 Al–Li alloy under hot stamping process. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3(1), 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.09.009>