

Retour élastique de pièce brancard en « U » : étude de l'influence de paramètres géométriques sur le vrillage du fond d'embouti

Springback of a U-draw bending part: study of the geometrical parameters influence on the twisting of the deep-stamped bottom

Oualid Kebdani^{1*}, Bouchaib Radi¹

¹ Hassan First University of Settat, Faculté Sciences et Technique, Laboratoire Ingénierie, Management Industriel et Innovation, Maroc.

RÉSUMÉ. A partir de simulations numériques sur des outils de type « U » courbes inclinés ouverts sur le retour élastique et de l'analyse de celles-ci, il a été démontré que cinq paramètres auraient une influence sur le retour élastique. Ces cinq paramètres sont l'épaisseur de tôle, le rayon d'entrée matrice, rayon de poinçon, le sens de laminage ainsi que la retenue du flan (serrage). Le delta de contraintes sur le long du fond d'embouti impacte directement le vrillage de celui-ci.

ABSTRACT. Based on numerical simulations on open curved U-type tools of springback and analysis of these, it was shown that five parameters would have an influence on springback. These five parameters are sheet thickness, die entry radius, punch radius, rolling direction and blank restraint (clamping). The stress delta along the bottom of the draw has a direct impact on the twisting of the draw.

MOTS-CLÉS. Formage des tôles, Retour élastique, aciers à haute limite d'élasticité, brancard en « U ».

KEYWORDS. Sheet metal forming, Springback, Advanced high-strength steel, U-draw bending.

1. Introduction

L'objet de cette étude est d'étudier l'influence numérique de la conception des outils sur le retour élastique des pièces de structure sur la base d'outils simplifiés [SEO 14].

Ce besoin s'explique par une volonté des constructeurs automobiles de diminuer le taux de pollution dans l'atmosphère, donc de réduire la consommation d'essence. Afin de réduire cette consommation, il faut, en effet, développer des véhicules plus légers. L'allègement de la caisse en blanc passe donc par une diminution des épaisseurs de tôle utilisées. Toutefois, afin de conserver les prestations de la caisse en tenue mécanique (crash, effort maximum, fatigue...), il faut avoir recours à des matériaux plus résistants. Cependant, ces nouveaux matériaux (aciers à haute limite d'élasticité, aluminium) provoquent des retours élastiques importants, c'est-à-dire qu'ils ne conservent pas la géométrie désirée après emboutissage. Il faut donc changer la manière de concevoir les pièces pour réaliser sans risques des pièces avec ces nouveaux matériaux [TRZ 17].

Il va donc falloir réaliser des simulations numériques de retour élastique de pièces embouties [KEB 20] avec des conceptions simplifiées, modélisées en CAO [WUB 16]. A la suite de ces simulations, il faudra comparer qualitativement les résultats du retour élastique, représentés par l'ouverture de la pièce et/ou les écarts par rapport à la pièce théorique.

Nous allons étudier ce phénomène sur des outils de type « U » courbes inclinés ouverts.

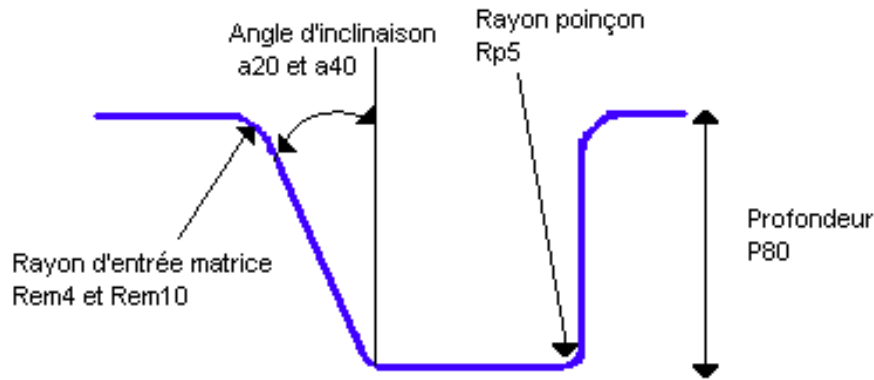


Figure 1. Section de brancard en « U »

Ces essais nous permettront de déterminer, pour les matériaux étudiés, les paramètres d'emboutissage (rayon d'entrée matrice, vitesse de frappe, profondeur d'emboutie, angle de paroi...) [LOU 09, SUN 11] afin de remédier, au mieux, au problème liés au retour élastique des pièces véhicule tel que les traverses d'assise, les semelles de brancard, les doublures montant de baie, les renforts de longeron...

Pour cette étude, il faut, dans un premier temps construire un outil en forme de « U », à section constante, ouvert à ses extrémités et avec une paroi inclinée.

2. Le retour élastique

2.1. Définition

C'est une des difficultés très communes de la mise en forme des tôles métalliques. Le retour élastique (ou springback) est la modification géométrique de la partie formée quand on a retiré la pièce de l'outil de formage. Ce phénomène est dû à la décharge élastique du matériau lorsqu'on a enlevé les outils [XU 05].

Lorsque la pièce est retirée des outils d'emboutissage après mise en forme, le champ de contraintes ne vérifie plus l'état d'équilibre en raison de la suppression des sollicitations (moment de flexion, traction...) imposées par les outils : un réaménagement est nécessaire pour revenir à un état stable. Cette réorganisation des contraintes résiduelles à l'intérieur de la tôle est accompagnée par une modification de la géométrie [KAD 04].

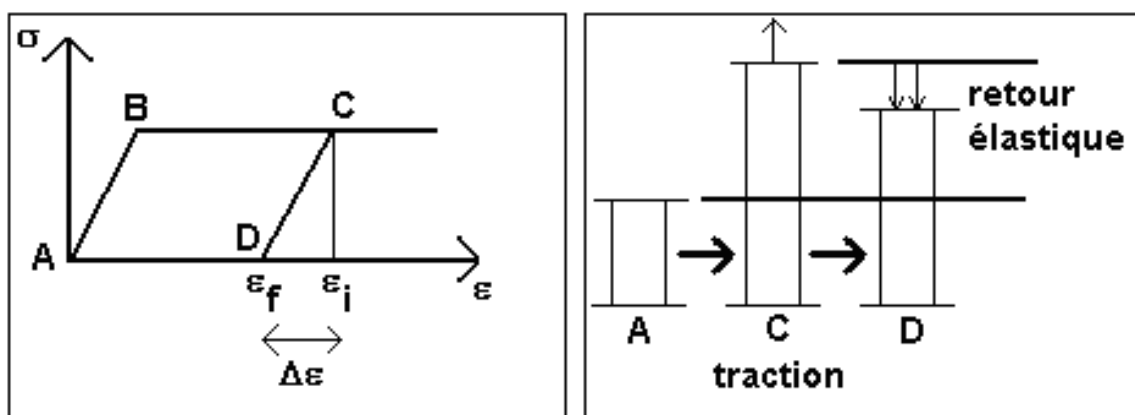


Figure 2. Essai de traction, cas de paroi en traction

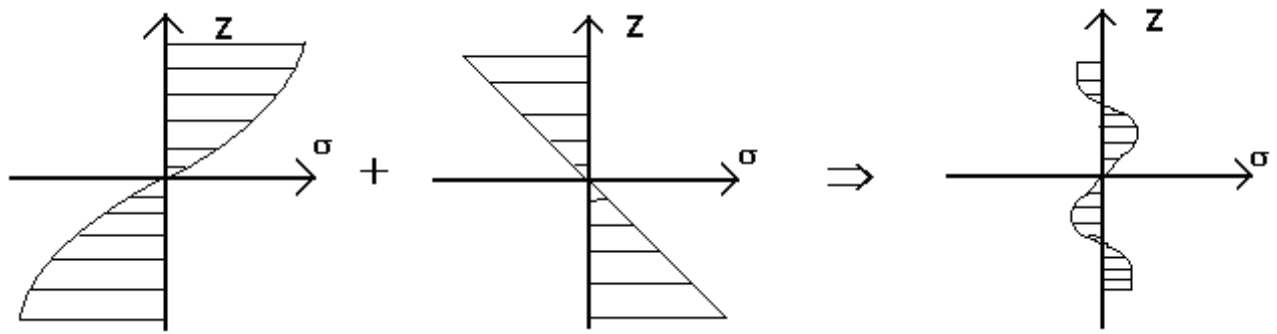


Figure 3a. Contraintes élasto-plastiques générées pendant l'emboutissage

Figure 3b. Contraintes élastiques de déchargement

Figure 3c. Contraintes résiduelles après retour élastique

Figure 3. Répartition de contraintes dans l'épaisseur de la tôle lors de phénomène de flexion (passage sur un rayon notamment)

Chaque élément d'une pièce métallique déformée plastiquement se détend élastiquement lorsque la charge est retirée. Il est libre de se détendre dans toutes les directions.

Un exemple simple consiste à soumettre un élément à une force de traction $+F$. Le modèle étudié est constitué d'une multitude de fibres parallèles, qui sont soumises à la même tension induite par la force de traction. Pendant le chargement, toutes les fibres s'allongent jusqu'à une certaine longueur L . A la détente, toutes les fibres se rétractent d'une petite quantité. Sous une compression, l'effet inverse se produit et les fibres s'allongent lorsque l'on retire la charge. Ces deux phénomènes sont les principaux moteurs du retour élastique [RAD 16].

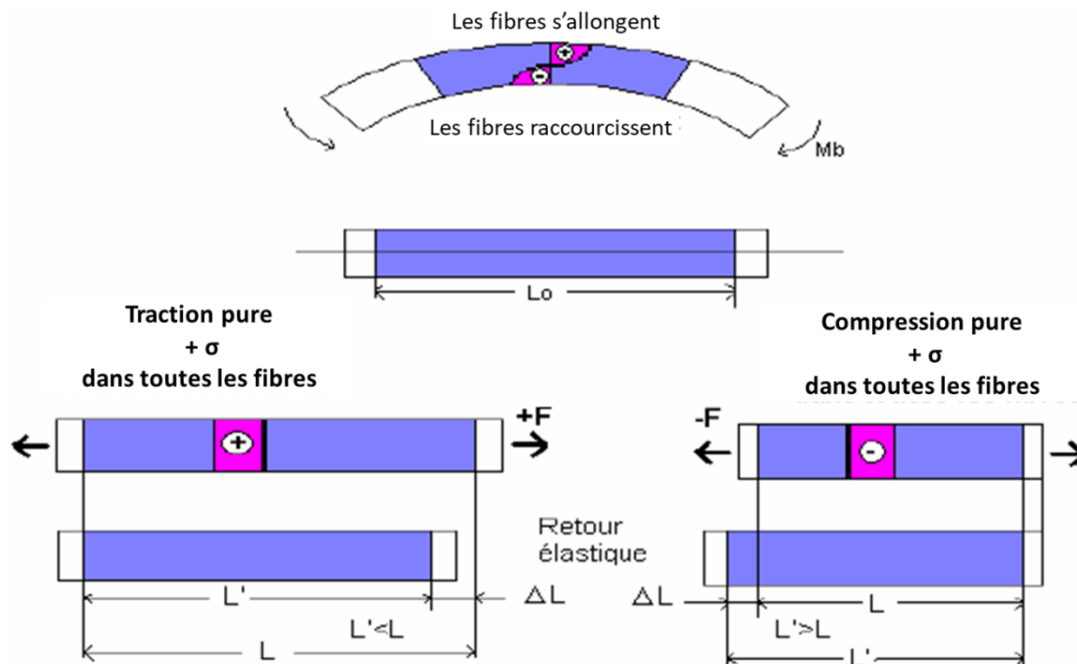


Figure 4. Différentes contributions de la détente élastique aux modifications géométriques

Le pliage implique de la tension et de la compression qui contribuent au RE;

2.2. Caractéristiques géométriques du retour élastique

Dans le cadre des études sur l'emboutissage et le retour élastique, des essais d'emboutissage de brancards en « U » ont été réalisés, sous presse sur des aciers THLE [SIL 16], type X-IP1000 Nu (1 et 1.5 mm) de source. L'outil utilisé est l'outil en « U » modulable. Cette étude rassemble les différents résultats obtenus sur les deux épaisseurs testées [CHAT 11].

Après emboutissage d'un flan initial rectangulaire de 900x350 mm, sens de laminage dans la largeur, les pièces sont mesurées sur une machine TRI-D-AXE, d'où on retire deux paramètres permettant de caractériser le retour élastique de ces pièces :

- ✓ L'angle de la paroi α ,
- ✓ L'angle de feuillure β , pour le calcul de θ ($\theta = \beta - \alpha$) : angle d'ouverture intrinsèque de la feuillure.

Si la feuillure ne subit pas de retour élastique, alors $\alpha = \beta$. La différence entre l'angle de la paroi α de la pièce et l'angle d'ouverture de la feuillure β , représente le retour élastique intrinsèque de la feuillure, qui est en fait un retour élastique de pliage. Celui-ci peut être signifié par la valeur θ ($\beta - \alpha$) [HAM 08].

Ces variables sont définies comme sur la figure 5.

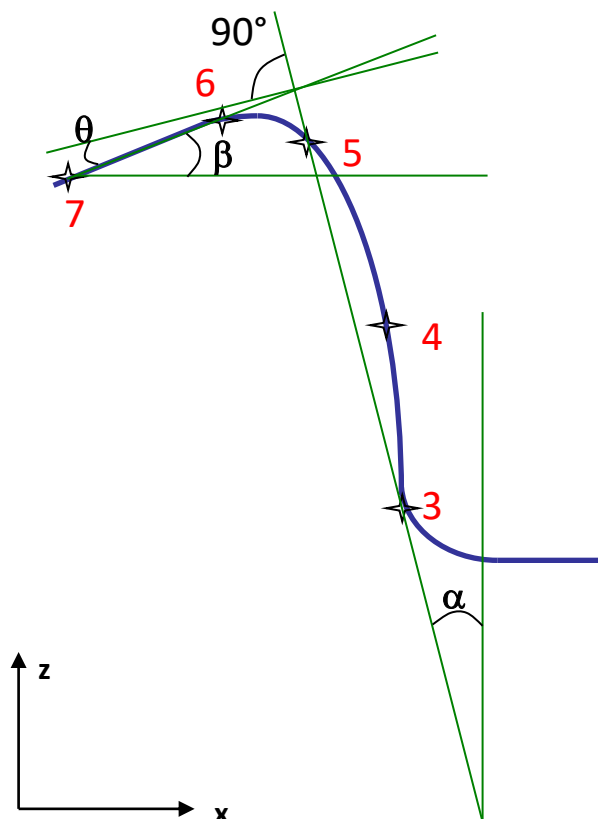


Figure 5. Caractéristiques géométriques du retour élastique sur une demi-section de brancard en « U ».

2.3. Propriétés du matériau testé

Dans les tableaux ci-dessous, on peut observer les caractéristiques mécaniques des lots reçus en X-IP1000 en épaisseur 1 et 1.5 mm avec : n à 4-12% ≥ 0.20 et r à 12% ≥ 0.70 .

| | Sens de laminage | |
|----------------------------------|------------------|------|
| | 90° | 0° |
| R_{p0.2} (en MPa) | 587 | 567 |
| R_m (en MPa) | 1165 | 1150 |
| A % | 55 | 47 |

Table 1. Propriétés mécaniques du X-IP1000 en épaisseur 1 mm

| | Sens de laminage | |
|----------------------------------|------------------|------|
| | 90° | 0° |
| Rp_{0.2} (en MPa) | 633 | 565 |
| Rm (en MPa) | 1171 | 1133 |
| A % | 60 | 53 |

Table 2. Propriétés mécaniques du X-IP1000 en épaisseur 1.5 mm

2.4. Plan d'essais

Les essais ont été réalisés en deux campagnes, suivant les tableaux 3 et 4 :

| Nuance | Ep. | Effort SF (tonnes) | Rayon poinçon (mm) | SL (en °) | Cales comp. | Prof. (mm) | Nombre de pièces |
|-----------|-----|--------------------|--------------------|-----------|-------------|------------|------------------|
| X-IP 1000 | 1,5 | 80 | 4 | 0 | Oui | 40 | 2 |
| | | | | 90 | | 40 | 1 |
| | | | | 0 | | 80 | 2 |
| | | | | 90 | | 80 | 1 |
| | | | | 0 | | 120 | 2 |
| | | | | 90 | | 120 | 1 |
| | | | | 0 | Non | 40 | 3 |
| | | | | 80 | | 3 | |
| | | | | 120 | | 3 | |
| X-IP 1000 | 1,5 | 80 | 4 | 0 | Oui | 40 | 2 |
| | | | | 90 | | 40 | 1 |
| | | | | 0 | | 80 | 2 |
| | | | | 90 | | 80 | 1 |
| | | | | 0 | | 120 | 2 |
| | | | | 90 | | 120 | 1 |
| | | | | 0 | Non | 40 | 3 |
| | | | 80 | 1 | | | |
| | | | 120 | 1 | | | |
| | | | 10 | Oui | 0 | 80 | 2 |
| | | | | | 90 | 80 | 1 |
| | | | | | 0 | 120 | 2 |
| | | | | | 90 | 120 | 1 |

Table 3. Plan d'essais d'emboutissage des brancards en « U » en X-IP1000, ép. 1.5 mm.

| Nuance | Ep. | Effort SF (tonnes) | Rayon poinçon (mm) | SL (en °) | Cales comp. | Prof. (mm) | Nombre de pièces |
|-----------|-----|--------------------|--------------------|-----------|-------------|------------|------------------|
| X-IP 1000 | 1 | 80 | 4 | 0 | Oui | 40 | 2 |
| | | | | 90 | | 40 | 1 |
| | | | | 0 | | 80 | 2 |
| | | | | 90 | | 80 | 1 |
| | | | | 0 | | 120 | 2 |
| | | | | 90 | | 120 | 1 |
| | | | | 0 | Non | 40 | 1 |

| Ep. | Effort SF (tonnes) | Rp (en mm) | Cales comp. | SL (en°) | Prof. (mm) | Repère pièce | Moyenne (en °) | | | | | | | |
|-----------|--------------------|------------|-------------|----------|------------|--------------|----------------|-----------|-----------|--------|-----|--------|-----|----|
| | | | | | | | Alpha moy. | Beta moy. | Téta moy. | | | | | |
| X-IP 1000 | 1 | 80 | 4 | 0 | 40 | R4-V01 | 80 | 1 | | | | | | |
| | | | | | | | 90 | 40 | R4-V03 | 120 | 1 | | | |
| | | | | | | | | | | 0 | 80 | R4-V04 | 40 | 2 |
| | | | | | | | | | | | | | 90 | 80 |
| | | | | 0 | 120 | R4-V07 | | | | 80 | 2 | | | |
| | | | | | | | 90 | 120 | R4-V09 | 80 | 1 | | | |
| | | | | 10 | 0 | 40 | | | | R4-V10 | 120 | 2 | | |
| | | | | | | | 90 | 80 | R4-V13 | | 80 | 1 | | |
| | | | 0 | | | | | | | | 120 | R4-V16 | 120 | 2 |
| | | | | | | | 90 | 120 | R4-V19 | | | | 120 | 1 |
| | | | 0 | 80 | R4-V21 | 80 | | | | 2 | | | | |
| | | | | | | 90 | 80 | R4-V22/23 | 80 | 1 | | | | |
| | | | 0 | 120 | R4-V24 | | | | 120 | 2 | | | | |
| | | | | | | 90 | 120 | R4-V24 | 120 | 1 | | | | |
| | | | 20 | 4 | 0 | | | | | | | 120 | 1 | |

Table 4. Plan d'essais d'emboutissage des brancards en « U » en X-IP1000, ép. 1 mm.

3. Présentations des résultats

Tous les essais du X-IP 1000 sont récapitulés dans le tableau 5.

Les influences suivantes, pour l'angle de paroi, de feuillure et l'angle intrinsèque de feuillure, seront étudiées, sur le domaine considéré lors des essais :

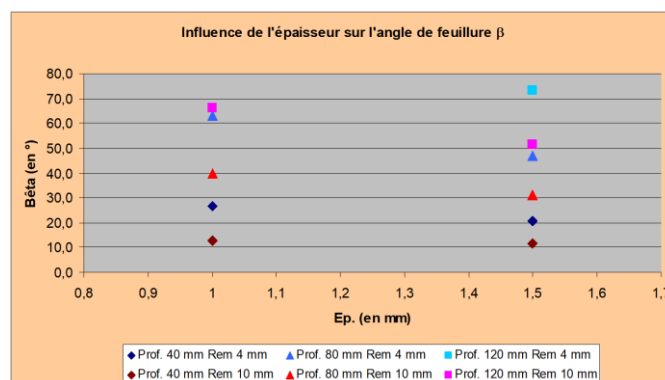
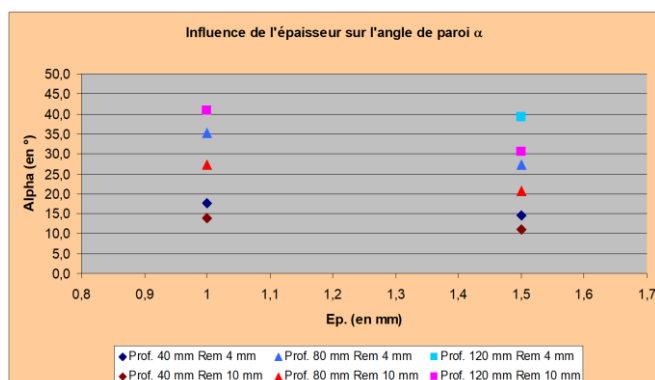
- ✓ Influence de l'épaisseur de tôle sur le retour élastique du brancard,
- ✓ Influence du rayon d'entrée matrice sur le retour élastique du brancard,
- ✓ Influence du rayon de poinçon sur le retour élastique du brancard,
- ✓ Influence du sens de laminage (flan positionné à 0° et 90° du sens de laminage),
- ✓ Influence de la retenue du flan (serrage) sur le retour élastique du brancard.

| Ep. | Effort SF (tonnes) | Rp (en mm) | Cales comp. | SL (en°) | Prof. (mm) | Repère pièce | Moyenne (en °) | | | | |
|-----------------|--------------------|------------|-------------|----------|------------|--------------|----------------|-----------|-----------|------|------|
| | | | | | | | Alpha moy. | Beta moy. | Téta moy. | | |
| Rem 4 mm | | | | | | | | | | | |
| 1,5 | 80 | 4 | Oui | 0 | 40 | R4-V01 | 14,7 | 20,7 | 6,1 | | |
| | | | | 90 | 40 | R4-V03 | 15,3 | 22 | 6,7 | | |
| | | | | 0 | 80 | R4-V04 | 27,2 | 47 | 19,7 | | |
| | | | | 90 | 80 | R4-V06 | 28,4 | 49,2 | 20,8 | | |
| | | | 0 | 120 | R4-V07 | 39,1 | 73,3 | 34,1 | | | |
| | | | 90 | 120 | R4-V09 | 40,3 | 76,5 | 36,3 | | | |
| | | | Non | 0 | 40 | R4-V10 | 14,8 | 20,4 | 5,6 | | |
| | | | | 0 | 80 | R4-V13 | 26,7 | 47 | 20,2 | | |
| | | 0 | | 120 | R4-V16 | 37,6 | 73,2 | 35,6 | | | |
| | | 0 | | 80 | R4-V19 | 26,1 | 44,4 | 18,3 | | | |
| | | 10 | Oui | 90 | 80 | R4-V21 | 27,6 | 46,8 | 19,2 | | |
| | | | | 0 | 120 | R4-V22/23 | 37,4 | 70,1 | 32,7 | | |
| | | | | 90 | 120 | R4-V24 | 39,7 | 73,4 | 33,7 | | |
| | | | | 0 | 80 | R4-V24 | 37,2 | 66,2 | 29 | | |
| | | 1 | 80 | 4 | Oui | 0 | 40 | R4-W01 | 17,5 | 26,7 | 9,2 |
| | | | | | | 90 | 40 | R4-W03 | 17,5 | 27,8 | 10,4 |
| 0 | 80 | | | | | R4-W04 | 35,2 | 63,1 | 28 | | |
| 90 | 80 | | | | | R4-W06 | 37,2 | 66,2 | 29 | | |

| | | | | | | | | | | |
|------------------|----|---|-----|-----|-----|-----------|--------|-------|-------|------|
| | | | | 0 | 120 | R4-W07/08 | 50,5 | 101,5 | 50,9 | |
| | | | | 90 | 120 | R4-W09 | 55,2 | 108,7 | 53,5 | |
| | | | | Non | 0 | 40 | R4-W10 | 16,2 | 26,5 | 10,3 |
| | | | | | 0 | 80 | R4-W11 | 33,1 | 59,5 | 26,4 |
| | | | | | 0 | 120 | R4-W12 | 48,1 | 95,8 | 47,7 |
| | | | 10 | Oui | 0 | 80 | R4-W13 | 37,7 | 62,8 | 25,2 |
| | | | | | 90 | 80 | R4-W15 | 38,8 | 65,9 | 27 |
| | | | | | 0 | 120 | R4-W16 | 58 | 107,7 | 49,7 |
| | | | | | 90 | 120 | R4-W18 | 55,2 | 101,1 | 45,9 |
| | | | | | 0 | 120 | R4-W19 | 55 | 103,8 | 48,8 |
| 20 | 4 | | | | | | | | | |
| Rem 10 mm | | | | | | | | | | |
| 1,5 | 80 | 4 | Oui | 0 | 40 | R10-V01 | 11,1 | 11,6 | 0,4 | |
| | | | | 90 | 40 | R10-V03 | 12,1 | 12,7 | 0,6 | |
| | | | | 0 | 80 | R10-V04 | 20,7 | 31,1 | 10,4 | |
| | | | | 90 | 80 | R10-V06 | 21,7 | 33,5 | 11,8 | |
| | | | | 0 | 120 | R10-V07 | 30,5 | 51,5 | 21,1 | |
| | | | | 90 | 120 | R10-V09 | 32,8 | 59,9 | 27,1 | |
| | | | Non | 0 | 40 | R10-V10 | 10,7 | 10,6 | -0,1 | |
| | | | | 0 | 80 | R10-V13 | 19,5 | 30,1 | 10,6 | |
| | | | | 0 | 120 | R10-V16 | 27,9 | 54,2 | 26,31 | |
| 1 | 80 | 4 | Oui | 0 | 40 | R10-W01 | 13,9 | 12,7 | -1,2 | |
| | | | | 90 | 40 | R10-W03 | 15 | 14 | -1 | |
| | | | | 0 | 80 | R10-W04 | 27,2 | 40 | 12,7 | |
| | | | | 90 | 80 | R10-W06 | 30,1 | 41,8 | 11,7 | |
| | | | | 0 | 120 | R10-W07 | 40,8 | 66,1 | 25,3 | |
| | | | | 90 | 120 | R10-W09 | 43,7 | 69,2 | 25,5 | |
| | | | Non | 0 | 40 | R10-W10 | 14,4 | 12,7 | -1,7 | |
| | | | | 0 | 80 | R10-W11 | 28,2 | 39 | 10,8 | |
| | | | | 0 | 120 | R10-W12 | 40,37 | 65,1 | 24,8 | |

Table 5. Essais du X-IP 1000 pour l'angle de paroi, de feuillure et l'angle intrinsèque de feuillure

3.1. Influence de l'épaisseur



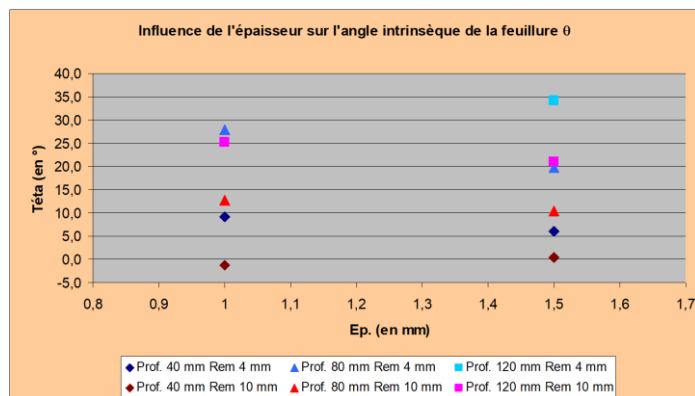


Figure 6. Influence de l'épaisseur

Comme déjà observé sur de multiples matériaux, l'augmentation de l'épaisseur réduit le retour élastique [ADN 17].

3.2. Influence du rayon d'entrée matrice

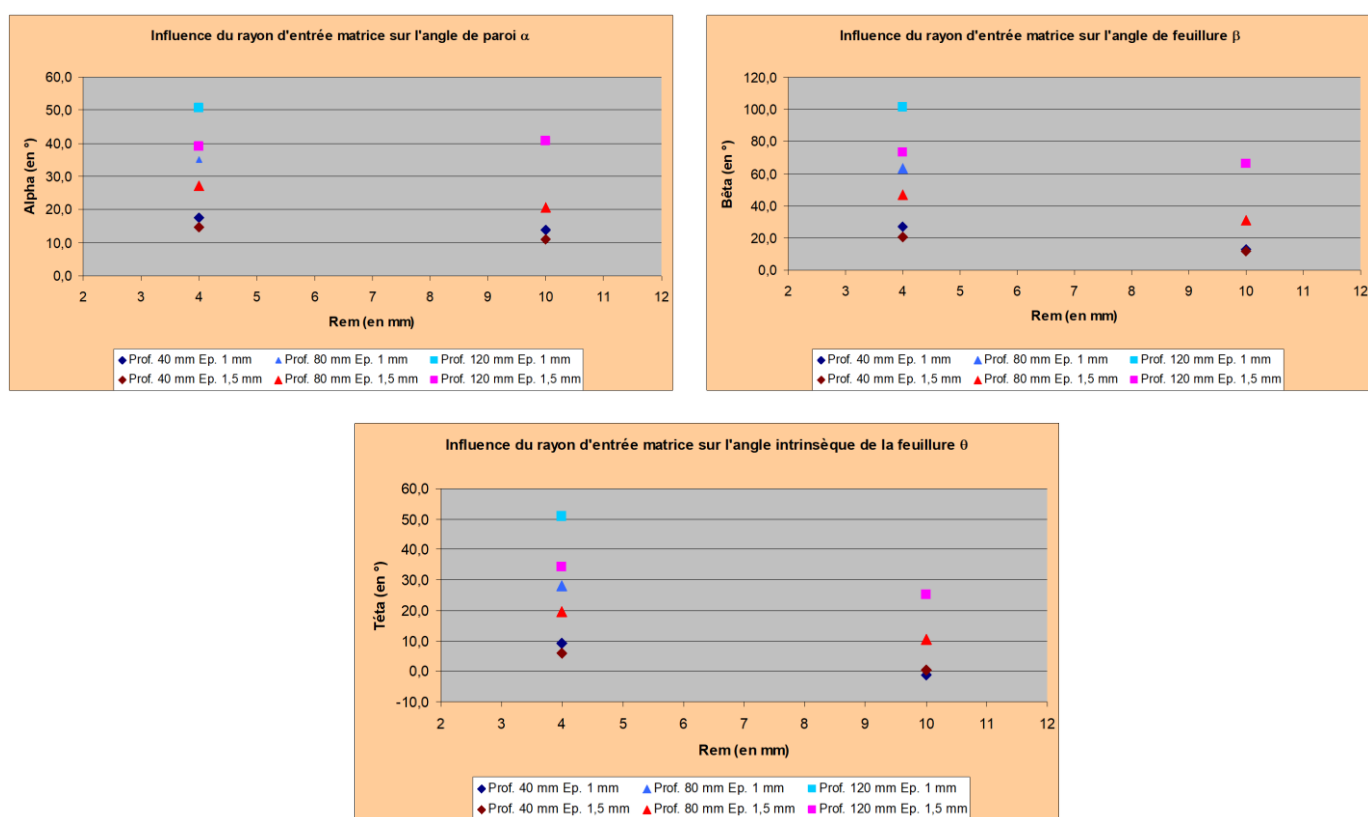


Figure 7. Influence du rayon d'entrée matrice

Dans tous les cas, on s'aperçoit que plus le rayon d'entrée matrice est grand, moins il y aura de retour élastique sur cette plage de rayons. On rappelle que le profil théorique est le suivant (défini avec tous les autres matériaux) : une très forte augmentation du retour élastique jusqu'à des rayons d'entrée matrice de l'ordre de 4mm à 6mm, puis une stabilisation, voire une baisse du retour élastique au-delà. Il sera nécessaire de confirmer cette tendance en testant d'autres rayons d'entrée matrice

3.3. Influence du rayon poinçon

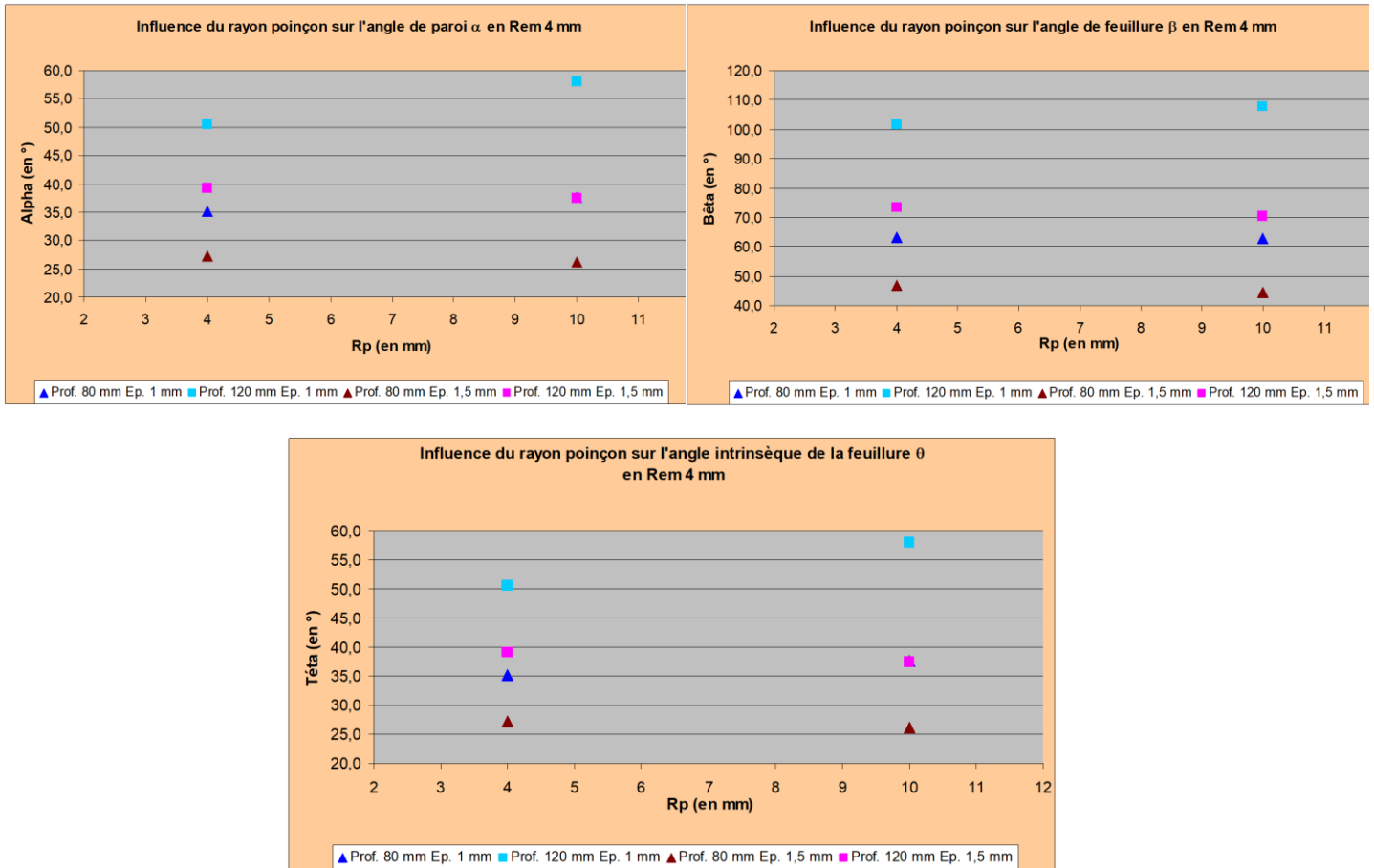
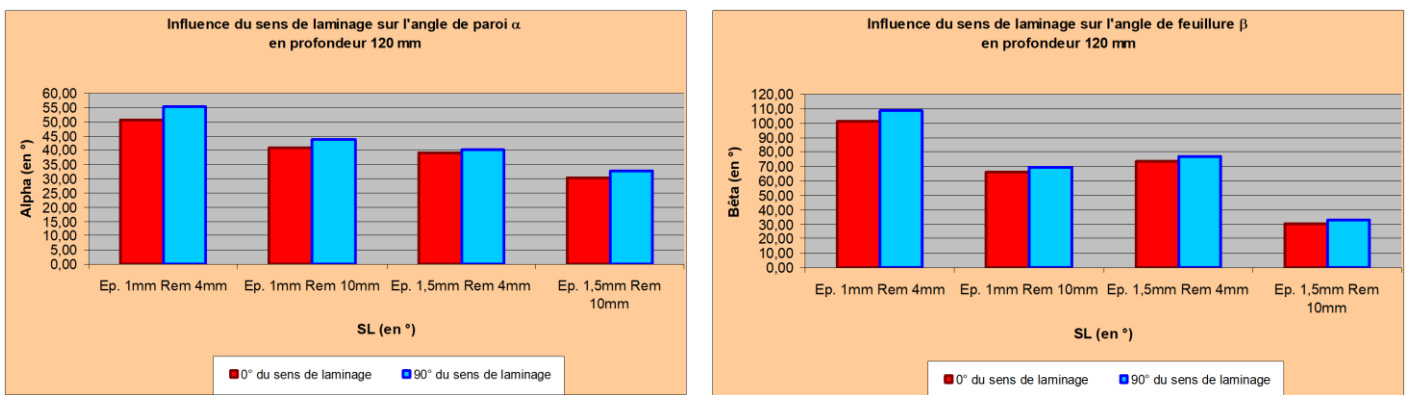


Figure 8. Influence du rayon poinçon

Pour l'épaisseur 1mm, le retour élastique augmente avec l'agrandissement du rayon poinçon. Pour l'épaisseur 1,5mm, on assiste plutôt à une stabilisation, voire une baisse du retour élastique avec l'augmentation du rayon de poinçon dans la plage considérée. Ceci confirme le profil théorique envisagé en fonction du rayon de poinçon.

Donc, dans le cas des épaisseurs faibles, on diminue le retour élastique en mettant des rayons poinçons PLUS FAIBLES.

3.4. Influence du sens de laminage



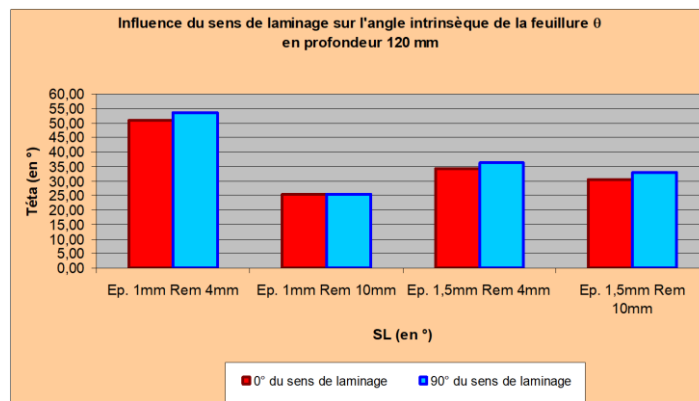


Figure 9. Influence du sens de laminage

L'influence de sens de laminage sur le retour élastique est significative mais reste faible (de l'ordre de 5° dans le plupart des cas) avec une tendance à l'augmentation du retour élastique en passant de 0° (sens long) à 90° (sens travers).

3.5. Influence du serrage

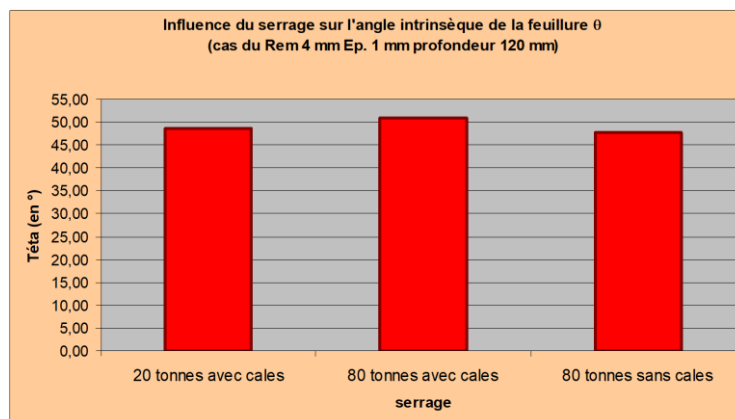
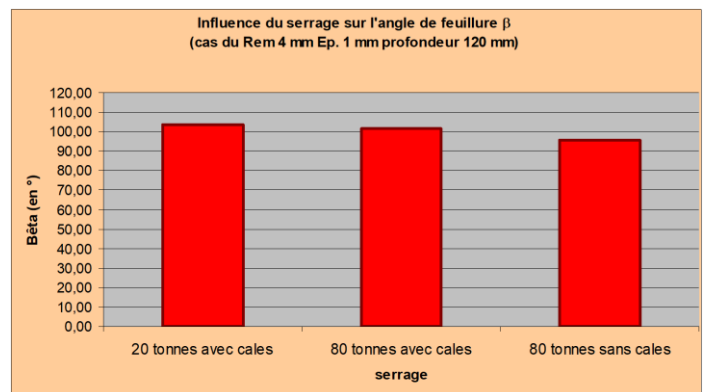
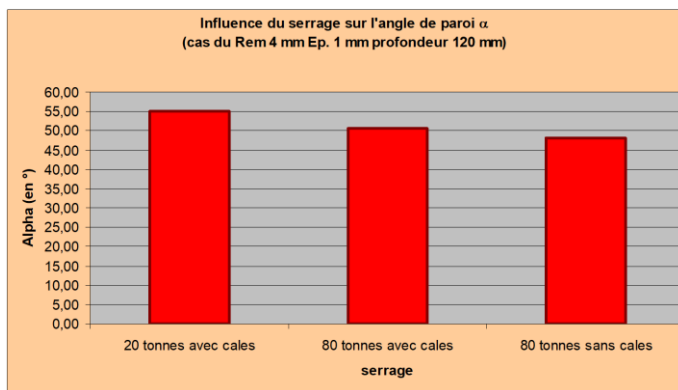


Figure 10. Influence du serrage

L'influence du serrage est visible sur l'angle de paroi et l'angle de feuillure, avec une diminution du retour élastique avec l'augmentation de l'effort de serrage [CHE 07, ANG 11]. Concernant l'angle d'ouverture intrinsèque de la feuillure, l'influence ne peut être défini car les écarts entre les valeurs sont dans l'erreur de mesure.

Ceci confirme l'intérêt de bien retenir cette matière lors de l'emboutissage, car :

- ✓ grâce à ses bonnes capacités d'allongement, elle se supporte bien,
- ✓ cela permet de diminuer les plis, qu'il serait impossible d'écraser,
- ✓ cela permet de réduire le retour élastique.

4. Conclusion

Suite aux essais d'emboutissage de brancards en « U » en X-IP 1000 nu, en épaisseur 1mm et 1.5 mm, on peut faire les observations suivantes :

En observant les influences de quelques paramètres sur le retour élastique de notre brancard, on peut en déduire les points importants suivants [JWA 16, PEN 08]:

- ✓ On retrouve les profils théoriques de retour élastique pour les paramètres
 - Epaisseur : si elle diminue, le RE augmente
 - Rayon d'entrée matrice : il augmente le RE jusqu'au seuil 4mm à 6mm, puis stabilisation
 - Rayon de poinçon : il est nécessaire de réduire le rayon de poinçon si on veut réduire l'épaisseur de tôle, afin de rester à même retour élastique.
 - Le retour élastique diminue avec l'augmentation de la retenue de la tôle, et en plaçant la tôle dans le sens de laminage.

Bibliographie

- [SEO 14] Y. H. SEO, J. W. PARK, W. J. SONG, B. S. KANG, AND J. KIM, «Flexible die design and springback compensation based on modified displacement adjustment method», *Adv. Mech. Eng.*, vol. 2014, 2014.
- [TRZ 17] T. TRZEPIECINSKI AND H. G. LEMU, «Effect of computational parameters on springback prediction by numerical simulation», *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 9, Sep. 2017.
- [KEB 20] O. KEBDANI AND B. RADI, «Simulation et prédiction de la formabilité de la tôle via le simulateur emboutissage AutoForm», *Incert. Fiabilité des systèmes multiphysiques*, vol. 4, no. 2, 2020.
- [WUB 16] A. WUBE DAMETEW, B. ALIE WUBE DAMETEW, T. GEBRESENBET, A. WUBE DAMETEW A, AND T. GEBRESENBET, «Numerical Investigation of Spring Back on Sheet Metal Bending Process», *Glob. J. Res. Eng. A Mech. Mech. Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 33–54, 2016.
- [LOU 09] YANSHAN LOU, JIN SUNG KIM, AND HOON HUH, «Effects of forming speed on the springback using finite element methods», 2009.
- [SUN 11] H. LI, G. SUN, G. LI, Z. GONG, D. LIU, AND Q. LI, «On twist springback in advanced high-strength steels», *Mater. Des.*, vol. 32, no. 6, pp. 3272–3279, Jun. 2011.
- [XU 05] S. XU, K. ZHAO, T. LANKER, J. ZHANG, AND C. T. WANG, «Springback prediction, compensation and correlation for automotive stamping», in *AIP Conference Proceedings*, vol. 778 A, pp. 345–352, Aug. 2005.
- [KAD 04] M. KADKHODAYAN, «Numerical prediction of springback and side-wall curl in U-bending of anisotropic sheet metals», *Key Eng. Mater.*, vol. 274–276, no. 1, pp. 583–588, 2004.
- [RAD 16] B. RADI AND A. EL HAMI, *Material Forming Processes: Simulation, Drawing, Hydroforming and Additive Manufacturing*, ISTE Editions, Londres, 2017.
- [SIL 16] E. A. DA SILVA, L. F. V. MALERBA FERNANDES, J. W. DE JESUS SILVA, R. B. RIBEIRO, M. DOS SANTOS PEREIRA, AND J. ALEXIS, «A Comparison between an Advanced High-Strength Steel and a High-Strength Steel Due to the Spring back Effect», *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 13, no. 05, pp. 21–27, May 2016.
- [CHAT 11] S. CHATTI AND N. HERMI, «The effect of non-linear recovery on springback prediction», *Comput. Struct.*, vol. 89, no. 13–14, pp. 1367–1377, Jul. 2011.
- [HAM 08] T. HAMA, T. NAGATA, C. TEODOSIU, A. MAKINOCHI, AND H. TAKUDA, «Finite-element simulation of springback in sheet metal forming using local interpolation for tool surfaces», *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 50, no. 2, pp. 175–192, Feb. 2008.
- [ADN 17] A. F. ADNAN, A. B. ABDULLAH, AND Z. SAMAD, «Study of springback pattern of non-uniform thickness section based on V-bending experiment», *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 11, no. 3, pp. 2845–2855, Sep. 2017.
- [CHE 07] P. CHEN AND M. KOÇ, «Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 190, no. 1–3, pp. 189–198, Jul. 2007.
- [ANG 11] A. D. ANGGONO, W. A. SISWANTO, AND B. OMAR, «Finite Element Simulation for Springback Prediction Compensation», *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 1, no. 5, p. 564, 2011.

[JWA 16] M. JWEEG, A. HUSSEIN, AND M. ALHILLI ALHELLI, «Springback and side wall curl of metal sheet in plain strain deep drawing», *Res. J. Appl. Sci.*, vol. 4, no. 5, pp. 192–201, 2016.

[PEN 08] C. PENG, M. KOÇ, AND M. L. WENNER, «Experimental investigation of springback variation in forming of high strength steels», *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 130, no. 4, pp. 0410061–0410069, Aug. 2008.