

Le pliage et le cintrage de l'aluminium

Quelques définitions

- Pliage :** Opération destinée à donner à une pièce droite une forme de ligne brisée.
- Pliage :** Opération de façonnage des métaux en feuilles, qui a pour but de rabattre une partie de la tôle par rapport à l'autre suivant un angle déterminé. (Le pliage s'effectue soit au marteau, soit sur les machines à plier ou les plieuses).
- Pliage :** Mode de sollicitation de bandes, de tôles ou de fils auxquels on fait subir une déformation relativement localisée autour d'un support de plus ou moins grand rayon, les parties primitivement dans le prolongement l'une de l'autre formant après pliage un certain angle, et au maximum se rabattant l'une contre l'autre.
- Pliage à la presse plieuse :** Pliage entre une matrice de forme (généralement fixe) et un poinçon (de forme correspondante) mobile dans un plan vertical, montés sur une presse-plier, qui peut être mécanique ou commandée à l'huile sous pression.
- Pliage avec correction :** Mode particulier de pliage par lequel on obtient un arc plus grand qu'il ne le faut de façon à compenser le retour élastique.
- Pliage en l'air :** Pliage dans lequel le poinçon ne va pas à fond de matrice, ce qui permet, avec les mêmes outils, de faire des pliages à angles différents.
- Cintrage :** Opération qui consiste à ployer en arc ou à courber une pièce allongée.
- Cintrage :** Méthode de fabrication permettant d'obtenir un produit de forme désirée habituellement au moyen d'une cintreuse ou d'une autre facilité mécanique. Formage cylindrique d'un produit plat par passage entre rouleaux convenablement étagés. Le cintrage est caractérisé par la formation de surfaces cylindriques ou coniques selon des rayons plus ou moins grands.
- Cintrage :** Formage cylindrique d'un produit par passage entre rouleaux convenablement étagés. Le cintrage s'applique aux tubes et aux tôles. Le terme anglais « bending » a un sens plus large que le terme français « cintrage ».
- Cintrage par enroulement-compression (ou par enroulement et compression) :**
Cintrage de tube ou de barre sur galet : une extrémité est retenue dans une mâchoire pendant que le tube ou la barre est enroulé sur un galet de forme à l'aide d'un sabot manœuvré par un levier. L'enroulement autour de la forme est assuré par un galet profilé ou un patin, tous deux profilés.

Cintrage par enroulement-tension (ou par enroulement et étirage) :

Procédé de formage dans lequel le tube à cintrer, ancré sur une forme rotative, passe contre un sabot qui l'oblige à s'enrouler sur la forme.

Sertissage :

Le sertissage est une technique d'assemblage mécanique qui consiste à plier deux tôles de telle sorte qu'elles soient insérées l'une dans l'autre, les bords étant ensuite pliés l'un sur l'autre pour former un joint serré.

Profilage à froid :

Les profilés à froid sont des produits de la première transformation. Ils sont fabriqués à partir de tôles minces ou moyennes laminées à chaud ou à froid. L'opération se fait en continu selon le profil à obtenir. L'avant produit sera un feuillard, une tôle ou une bande cisailée à la longueur et à la largeur voulues, introduit dans une machine à galets dont la conception est la même que celle d'un train de laminoirs. Les couples successifs de galets de formes complémentaires donnent progressivement à la bande le profil souhaité. L'opération achevée, le produit est coupé à longueur convenable. La largeur de la bande est comprise en général entre 10 et 500 mm, l'épaisseur allant de 0,3 à 7 mm. Il est possible d'employer des tôles qui, avant profilage, ont été revêtues (laquées). Le profilage à froid permet d'obtenir des profils courants de formes très variées avec des tolérances relativement étroites (coulisses, omégas, Z, tubes ronds et carrés, ainsi que d'autres profils divers, de chemins de roulement de couverture, palplanches, etc.) plus légers et à caractéristiques mécaniques souvent supérieures à celles des profils extrudés. Ils présentent une très grande souplesse de mise en place et d'assemblage.

Écrouissage :

Augmentation de dureté et de résistance produites par une déformation plastique.

Le pliage et le cintrage de l'aluminium sont des procédés fréquemment utilisés pour la fabrication. On a qu'à penser à des produits tels que des poteaux de lampadaire à extrémité courbée, des raquettes, des fenêtres voutées, des gouttières, des revêtements muraux, toitures en aluminium, boîtes, des canaux de ventilation, des éléments structuraux de remorques et des véhicules récréatifs.

Il s'agit, à première vue, de procédés relativement simples. Cependant, des limites s'appliquent au niveau des courbures et des plis, au risque de voir le métal se déchirer ou plisser. La limite (rayons de courbure minimum) de déformation qui peut être imposée avant qu'une déchirure n'apparaisse dépend de la capacité d'allongement de l'alliage avant rupture. En général, on doit se référer aux normes des produits (tôles, extrusions, tubes, etc.) pour connaître l'allongement maximum (A %) d'un alliage. De plus, la précision dimensionnelle accessible dans les opérations dépend de plusieurs facteurs reliés à la conception des équipements et à la dispersion des propriétés mécaniques pour un même alliage.

Les termes pliage et cintrage sont basés sur l'obtention de la géométrie recherchée dans l'opération.

Le pliage consiste à donner à une pièce droite (tôle, barre, tube, profilé) une forme de ligne brisée. On cherche à obtenir une valeur angulaire précise entre deux sections droites (ou planes) généralement avec une zone de transition minimale. Cette transition est en forme de courbe, même lorsque le résultat s'apparente à un angle vif.

Le cintrage consiste à donner à une pièce allongée une forme courbe ou ployée en arc.

On cherche à obtenir une courbe simple (arc de cercle) ou complexe (ex. : parabole) à l'intérieur de la précision requise par le produit. Cette courbe est souvent prolongée par des sections droites.

Géométries et déformations

La partie courbée d'une pièce métallique initialement droite peut être décomposée en éléments géométriques simples (arcs de cercle interconnectés). En général, on spécifie un arc de cercle connecté ou non à une section droite. L'outillage le plus simple est d'ailleurs conçu pour imposer une courbure de rayon constant (un arc de cercle).

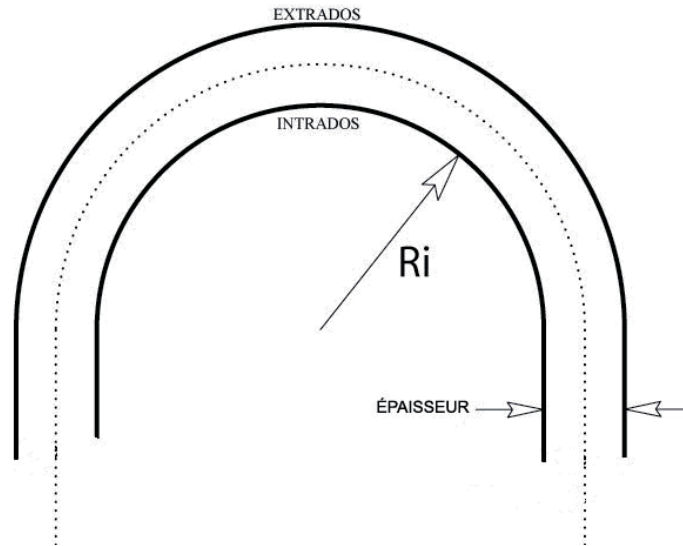


Figure 1

La figure 1 montre un arc de cercle de 180 degrés (en pliage, ce serait un pli à 180 degrés) réalisé à partir d'un produit tel qu'une barre, une tôle ou une plaque. On nommera extrados l'arc de cercle situé à l'extérieur de cette courbure et intrados l'arc de cercle du côté intérieur. L'axe neutre (ligne en pointillé sur la figure) est l'axe qui passe par le centre de l'épaisseur de la tôle. On présume que la longueur du matériau le long de cet axe n'est pas modifiée par les opérations.

Lors du pliage ou du cintrage, les couches à l'extérieur du cercle (extrados) vont devoir s'allonger et celles à l'intérieur (intrados) devront se raccourcir pour épouser la géométrie (rayon de pliage ou cintrage, **Ri**) imposée par l'outillage.

Les équipements sont normalement conçus pour générer un moment de flexion suffisant pour dépasser la limite d'élasticité du métal et créer une déformation permanente des couches externes (déformation en tension à l'extrados et déformation en compression à l'intrados).

Sur la base des seules considérations géométriques, l'allongement sera donné par

$$\text{Allongement} = \frac{\text{Longueur d'arc à l'extrados} - \text{Longueur d'arc à l'axe neutre}}{\text{Longueur d'arc à l'axe neutre}}$$

En déformation par flexion, les rugosités (peau d'orange) et les microfissures qui apparaissent à l'extrados lorsque l'allongement atteint la limite maximale permise par l'alliage entraînent un déchirement de la paroi.

Dans le cas du pliage d'une tôle d'épaisseur **e**, l'allongement est donné par

$$\text{Allongement} = \frac{e}{2Ri + e}$$

On atteint donc des conditions critiques (risque de fissuration) lorsque le rayon est trop faible. En théorie, le rayon critique de pliage serait

$$\text{Rayon critique} = \frac{e}{2} \left(\frac{1 - A\%}{A\%} \right)$$

Bien qu'on se rapproche de cette valeur théorique pour de fortes épaisseurs (~1/2 pouce), les nombreux facteurs qui interviennent lors de l'opération (facteurs métallurgiques, états de contrainte liés à la courbure et à l'épaisseur, type d'équipement) vont en pratique favoriser des rayons plus faibles. On trouve des tables qui suggèrent des rayons de pliage minimums en fonction de l'épaisseur des tôles, du type d'opération et de l'état métallurgique de l'alliage.

Les produits laminés (tôles et plaques) ont des allongements plus élevés dans la direction du laminage (généralement repérable grâce aux lignes fines qui apparaissent sur la surface des tôles). De plus, les plis seront préférablement orientés à 90 degrés ou à 45 degrés par rapport à la direction du laminage. On doit tenir compte de ces facteurs.

Le tableau qui suit (*référence 1*) concerne un pliage en l'air de 90 degrés sur presse plieuse :

Référence 1

Alliage	État	Pour une épaisseur donnée (en pouce), rayon de pliage exprimé en fonction de l'épaisseur "e"							
		1/64	1/32	1/16	1/8	3/16	1/4	3/8	1/2
6061	O	0	0	0	1e	1e	1e	1.5e	2e
	T4	0	0	1e	1.5e	2.5e	3e	3.5e	4e
	T6	1e	1e	1.5e	2.5e	3e	3.5e	4.5e	5e

On peut obtenir une géométrie qui se rapproche d'un arc de cercle (polygone régulier inscrit dans le cercle) en réalisant des plis successifs rapprochés de faible valeur angulaire. La longueur d'arc réalisable est cependant limitée par l'encombrement de l'outillage.

Dans le cas du cintrage d'un tube, la paroi du tube située à l'extrados tend à s'amincir et celle située à l'intrados tend à s'épaissir. La paroi se déchire si l'allongement atteint la limite maximale permise par l'alliage. Ici, l'allongement à l'extrados sera donné par

$$\text{Allongement} = \frac{D}{2Ri + D}$$

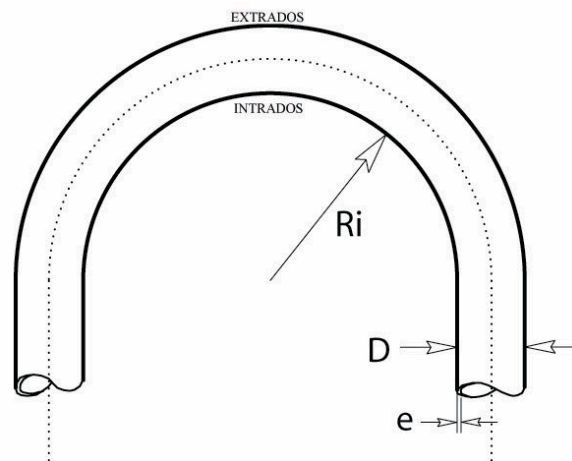


Figure 2

En cintrage sur forme, on détermine facilement le rayon (*Ri*) de l'outillage pour obtenir le rayon souhaité à l'axe neutre. Pendant l'opération, ce rayon deviendra le rayon à l'intrados. Pour un tube, on atteint des conditions critiques (risque de fissuration) lorsque le rayon est trop faible. En ne considérant que l'aspect géométrique, le rayon critique de pliage serait

$$\text{Rayon critique} = \frac{D}{2} \left(\frac{1 - A\%}{A\%} \right)$$

Exemple

Diamètre extérieur du tube $D = 1,5 po \Rightarrow 3,81cm$

Épaisseur de la paroi $e = 0,125po \Rightarrow 0,3175cm$

Propriété de l'alliage 6061-T6 Source : Aluminum Association Standards 1997

Résistance à la rupture (min) $Ru = 38 \times 10^3 \frac{lb}{po^2} \Rightarrow 261,81 MPa$

Limite d'élasticité (min) $Ys = 35 \times 10^3 \frac{lb}{po^2} \Rightarrow 241,15 MPa$

Allongement à la rupture (min) $A = 8\%$

Cette donnée peut être validée par un essai de traction à partir d'un échantillon prélevé sur le tube.

Note
Dans les équations précédentes, les unités sont des $\frac{lb}{po^2}$ ou livre-force au pouce carré (psi). Cette unité de mesure est encore en usage aux États-Unis, donc dans de nombreux manuels de référence. L'équivalence internationale du psi est le Pascal (1 newton/m²).

$$1 \frac{lb}{po^2} = 1psi \Rightarrow 6890 Pa = 6,89kPa$$

On calcule le rayon de pliage minimum en supposant un pliage libre (c.-à-d. flexion pure avec peu ou pas de frottement dans les outils et sans chauffage de la pièce). Dans ce cas, l'axe neutre, qui ne subit pas de déformation, passe par l'axe du tube. L'intrados du tube se déforme en compression et l'extrados se déforme en traction. De plus, dans ce cas idéal, on suppose un amincissement et un épaississement négligeables de la paroi (respectivement à l'extrados et à l'intrados du pli) sans aplatissement du tube, ni plissement à l'intrados.

Rayon de l'outillage (minimum)

$$Ri_{min} = D \left[\frac{(1-A)}{2A} \right] \quad Ri_{min} = 8,6po \Rightarrow 21,8cm$$

Rayon à l'axe neutre (center line)

$$Rn = Ri_{min} + \frac{D}{2} \quad Rn = 9,4po \Rightarrow 23,9cm$$

En pratique, le rayon de cintrage ou pliage minimal dépend de plusieurs facteurs dont l'alliage et son état métallurgique, l'épaisseur du tube et son diamètre et les équipements qui imposent des sollicitations différentes au produit afin de réaliser l'opération. Les manufacturiers d'équipement donnent en général des tables ou des formules empiriques pour connaître le rayon minimum réalisable. Les paramètres à considérer sont le diamètre du tube, son épaisseur et l'allongement maximal avant la rupture du métal. Pour connaître les limitations, il faut donc se référer aux données fournies pour chaque équipement et procéder éventuellement à des essais. La capacité manufacturière d'une entreprise à réaliser une géométrie donnée avec l'aluminium et ses alliages va donc dépendre des équipements de cintrage ou de pliage dont elle dispose et de son expertise.

Longueur prédécoupée

Le rayon à l'axe neutre est égal à Ri plus le demi-diamètre extérieur du tube ($Ri+D/2$). En principe, on peut calculer la longueur droite requise pour produire un arc d'une longueur donnée en calculant la longueur d'arc à l'axe neutre. En pratique, on doit soustraire un terme correctif (allongement du tube dans la zone pliée) qui tient compte du déplacement de l'axe neutre vers l'intrados. En effet, l'épaississement de la paroi à l'intrados et son amincissement à l'extrados seront naturellement compensés par un durcissement accru de la paroi en tension; ce durcissement est produit par allongement. Puisque l'extrados va se déformer un peu plus que l'intrados, d'un point de vue géométrique cela implique un déplacement de l'axe neutre vers l'intrados.

Le phénomène est similaire pour une tôle où on peut considérer que ce sont les couches qui épaississent ou amincissent. Dans ce cas la longueur d'arc à l'axe neutre sera donnée par

$$L = a \times (Ri + e/2)$$

En pratique, on utilise les formules empiriques ou les tables de correction propres à chaque type de machine pour tenir compte du déplacement de l'axe neutre vers l'intrados.

Outillages et déformations

Le pliage et le cintrage sont normalement produits par flexion. En flexion 3 points (*figure 3a, b, c*), la pièce à plier est en appui sur deux supports distants et on exerce une force au centre des appuis (le point d'appui central va se déplacer vers le bas pour accompagner la déformation de la pièce). On génère ainsi un couple maximum, $(FxL)/4$, au centre des appuis. Lorsque la déflexion est suffisante, on obtient une déformation permanente dans cette section du métal la plus sollicitée (allongement permanent à l'extrados et raccourcissement à l'intrados). Puisque la déformation plastique induit un durcissement du métal, à mesure que la déformation progresse, la zone centrale devient de plus en plus difficile à déformer, ce qui a pour effet d'étendre la déformation vers les zones adjacentes moins sollicitées. Ce mode de sollicitation est prépondérant pour le pliage en l'air sur une presse plieuse (*figure 4*), sur une presse à cintrer simple (*figure 5*) ou sur une machine à cintrer universelle (*figure 6*). En flexion avec encastrement (*figure 3d*), la différence réside dans la position du point central qui est situé très près d'un des appuis. Dans ce cas, la déflexion de la pièce sollicitée est accompagnée par une rotation d'un des points d'appui extérieur autour du point central. Le couple maximal, (FxL) , est localisé à l'encastrement. On retrouve ce mode de sollicitation dans les machines à plier (*figure 7 et lien 5*) et la majorité des machines à cintrer (cintrage par enroulement compression (*figure 8*) et cintrage par enroulement tension (*figure 9*)).

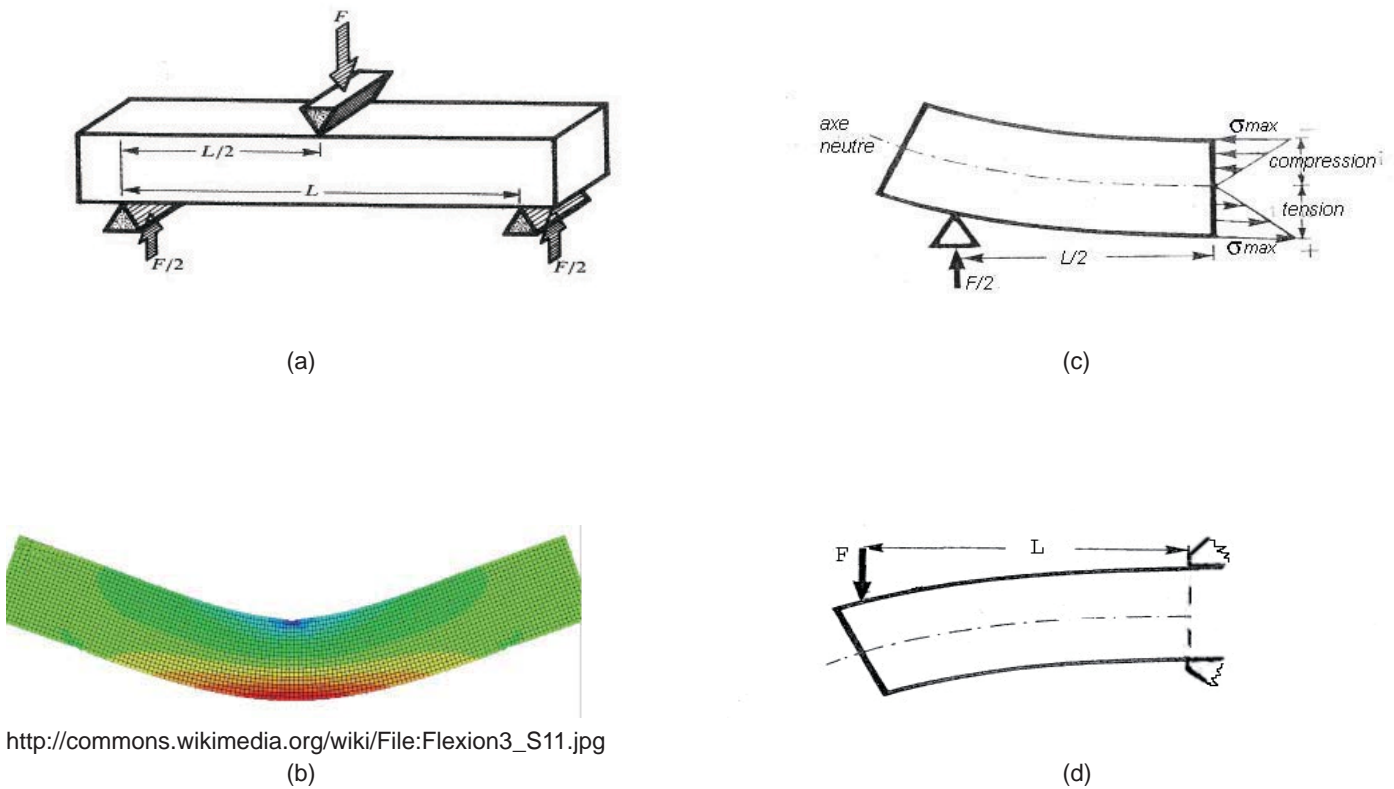
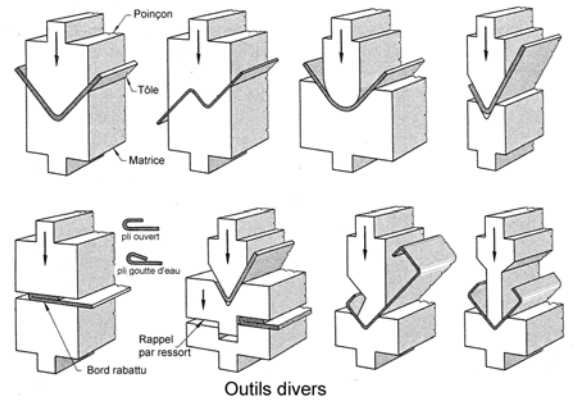
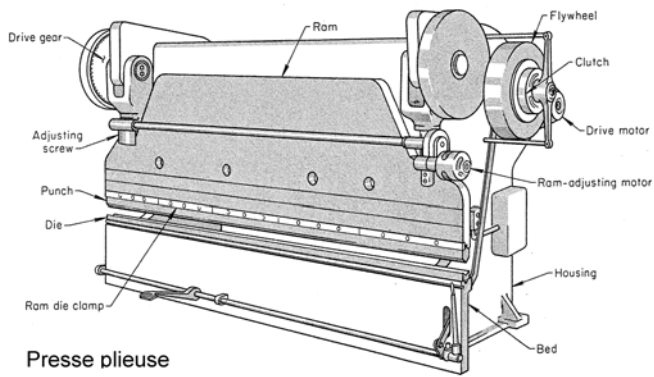


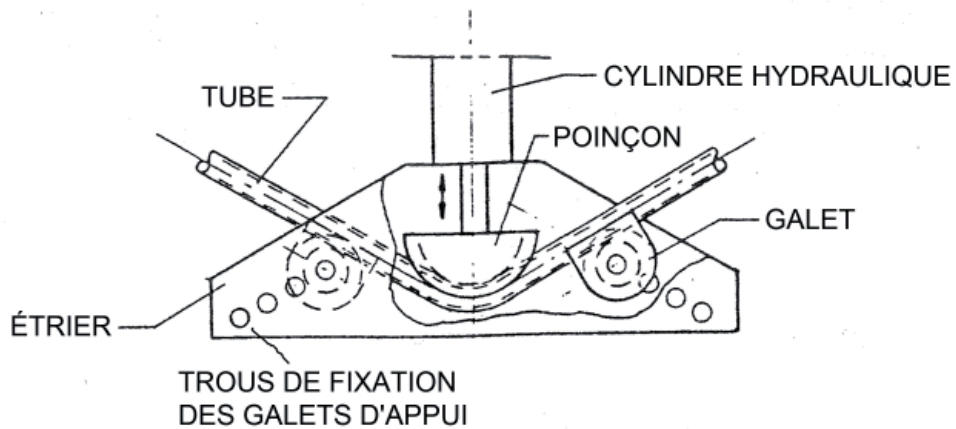
Figure 3

Contrairement à certaines perceptions, l'angle de pliage (ou cintrage) ne joue pas un rôle limitatif. On rapporte (*référence 2*) que la déformation maximale est atteinte en compression et en tension dès que l'angle de pliage dépasse 20 à 30 degrés. Si le rayon de cintrage respecte la capacité de déformation de l'alliage, on peut cintrer un arc de 1 degré ou l'enrouler comme un serpent. Si la capacité d'allongement est dépassée, le tube se déchire à l'extrados du pli. Par contre, en pliage en l'air (plaque sur presse plieuse et tube sur presse à cintres), le moment maximum est généré au centre du pli et la déformation peut rester localisée à cet endroit et conduire à la rupture si le rayon de poinçon est plus petit que le rayon critique. Vu la faible dureté de l'aluminium par rapport à l'acier, les points d'appui, les glissements entre les outils (matrices et poinçon) et tout type de débris produisent des marques sur la surface. Il faut donc s'assurer d'une propreté adéquate sur les surfaces et préférer des surfaces d'outils moins dures que l'aluminium (utiliser au besoin un film intercalaire de protection). Certains équipements sont également conçus pour éviter le glissement des outils en contact avec le matériau.



LYMAN T. Forming volume 4; 8th edition; Metals Park, Ohio; American Society for Metals; 1977; 527 p. (ASM Metals Handbook)

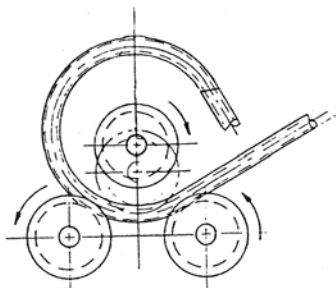
Figure 4



Presse à cintres

GILLANDERS J., Pipe and Tube Bending Manual. Second edition; Fabricators & Manufacturers Association, 1994

Figure 5

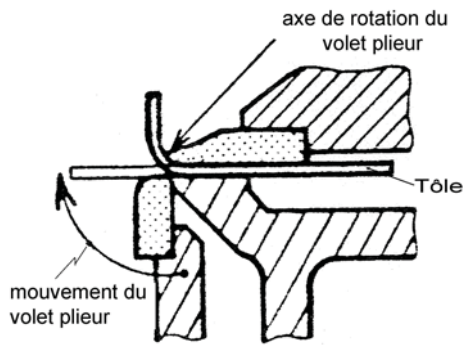


Cintreuse universelle à trois galets (Three roll bender)



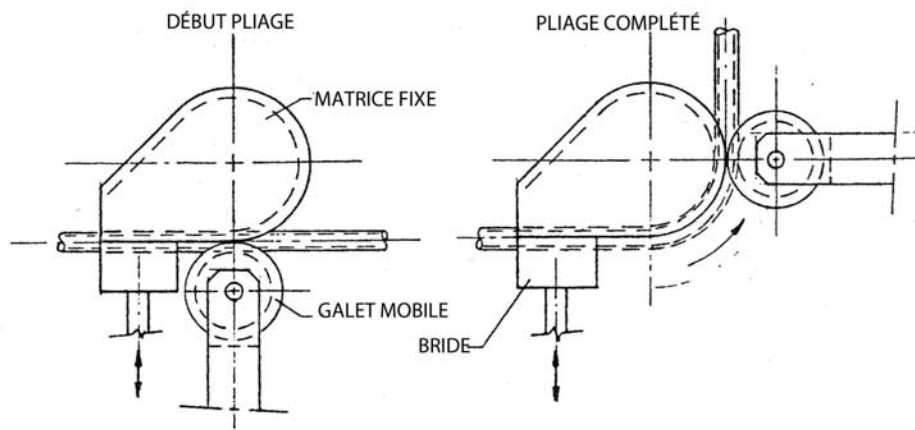
Machine EURING

Figure 6



Machine à plier

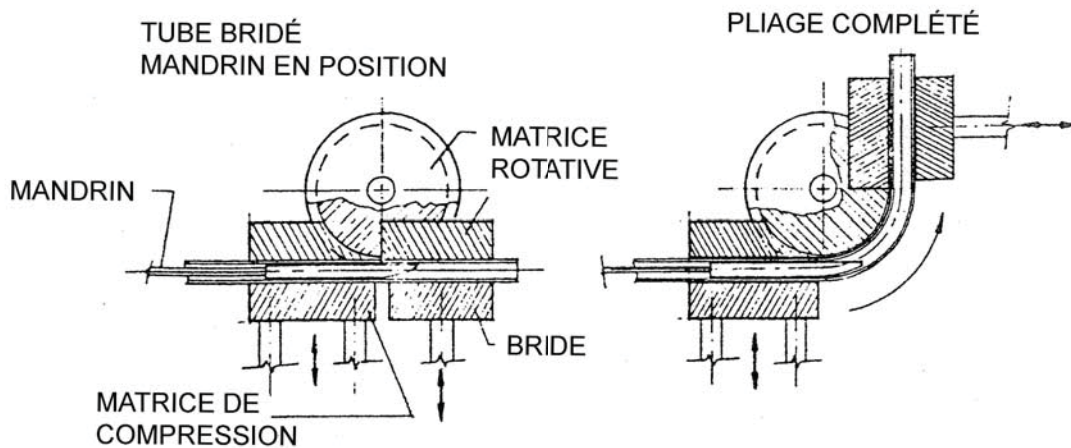
Figure 7



Cintrage par enroulement compression

GILLANDERS J., Pipe and Tube Bending Manual. Second edition; Fabricators & Manufacturers Association, 1994

Figure 8



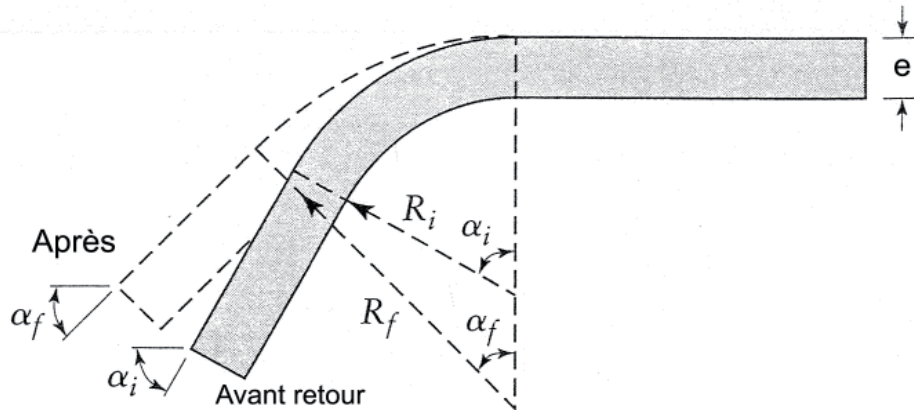
Cintrage par enroulement tension

GILLANDERS J., Pipe and Tube Bending Manual. Second edition; Fabricators & Manufacturers Association, 1994

Figure 9

Le retour élastique

Si en pliant un fil métallique (bout de trombone ou de cintre en métal) sur le coin d'une table rectangulaire, on maintient les deux branches plaquées contre la surface de la table, le fil épouse l'angle de 90 degrés du coin de la table. Dès qu'on relâche une des branches, celle-ci va s'éloigner de la surface; c'est le retour élastique (springback ou effet ressort). En plaquant le fil contre la surface de l'outil (ici la table), les forces que nous appliquons produisent une déformation permanente qui s'ajoute à la déformation élastique dans le métal. En relâchant les forces, la déformation élastique est relâchée (le métal à l'extrados se raccourcit et celui à l'intrados se rallonge). On peut voir à la *figure 10* que l'angle de pliage α est plus petit et que le rayon de cintrage R est plus grand après retour élastique.



KALPAKJIAN S. & SCHMID S. R., Manufacturing Process for Engineering Materials, 4th edition, Prentice Hall

Figure 10

Le retour élastique est d'autant plus important lorsque la limite élastique du métal ou le rayon R sont grands. Une épaisseur e plus grande, un plus grand diamètre de tube ou une plus grande hauteur de profilé favorisent un faible retour élastique.

Diverses techniques sont utilisées par les fabricants d'outillage afin d'obtenir la géométrie souhaitée malgré le retour élastique. Pour compenser l'effet du retour élastique, on peut plier à un angle plus grand que celui prévu. Dans le cas du cintrage, on va cintrer sur un rayon plus petit que celui spécifié sur les dessins. Afin d'obtenir les corrections à apporter sur le pliage, on réalise quelques essais sur le matériau pour tracer le graphique de α_f en fonction de α_i ou, pour le cintrage, le graphique de R_i en fonction de R_f . Ces données seront utiles pour apporter les corrections aux outils qui donneront les angles ou les courbures souhaités. Ces essais préalables seront également requis avant une production pour ajuster les paramètres des cintreuses universelles programmables.

Une autre façon pour supprimer le retour élastique sur les tôles est de déformer la zone pliée en compression. On obtient ce résultat avec une presse plieuse lorsque le V du poinçon est configuré pour produire un léger encastrement de son extrémité dans l'épaisseur du métal déjà plié lorsqu'il vient frapper le fond de la matrice. Cette opération produit un amincissement local de la tôle qui doit être acceptable pour le produit.

Pour le cintrage, on peut procéder par étirage sur forme. Dans ce procédé, on pousse un outil de forme (nécessairement convexe) contre une tôle ou un tube tenu par ses deux extrémités. On produit ainsi un allongement permanent du métal de part et d'autre de l'axe neutre, ce qui élimine le retour élastique. Ce procédé bien que précis est limité au niveau des formes. De plus, il a pour effet d'augmenter l'allongement requis à l'extrados, d'où une augmentation du rayon critique.

Le retour élastique peut être problématique en production s'il n'est pas constant. C'est le cas avec les alliages qui n'ont pas toujours atteint un état métallurgique stable (état métallurgique T4) ou qui montrent une trop grande dispersion des propriétés mécaniques d'un lot à un autre. Ce problème d'alliage se présente aussi pour la fissuration lorsqu'on est trop près de la limite permise pour les opérations (rayon de pliage ou cintrage minimum).

Le plissement

Lorsqu'on comprime une paroi mince dans le sens de sa longueur, celle-ci va se voiler (plissements). Ce phénomène se produit à l'intrados lorsqu'on veut cintrer un tube (ou une extrusion) à paroi mince. Pour contrer le plissement, on peut produire une traction dans l'axe du tube de façon à diminuer la compression à l'intrados. De même que pour l'étirage sur forme, cette traction va affecter le rayon minimum accessible pour un alliage donné.

Avec les machines à cintrer par enroulement-tension, le plissement est empêché en confinant la paroi du tube entre un mandrin intérieur et une matrice de rabattage ou de lissage (wiper die). Une matrice de compression contribue au confinement (voir *figure 9*). Le mandrin doit être bien positionné à l'intérieur du tube et le frottement entre le tube et les outils doit être minimisé et contrôlé grâce à une lubrification suffisante.

L'aplatissement

Au cours du pliage d'une section creuse, dès qu'une certaine courbure apparaît, la tension T à l'extrados et la compression C à l'intrados génèrent des forces radiales (Tr et Cr) sur les parois qui tendent à les pousser vers l'axe neutre. En l'absence de matériaux intercalaires incompressibles pour s'opposer à ces forces radiales, il en résulte un aplatissement plus ou moins important de la géométrie dans la zone pliée.

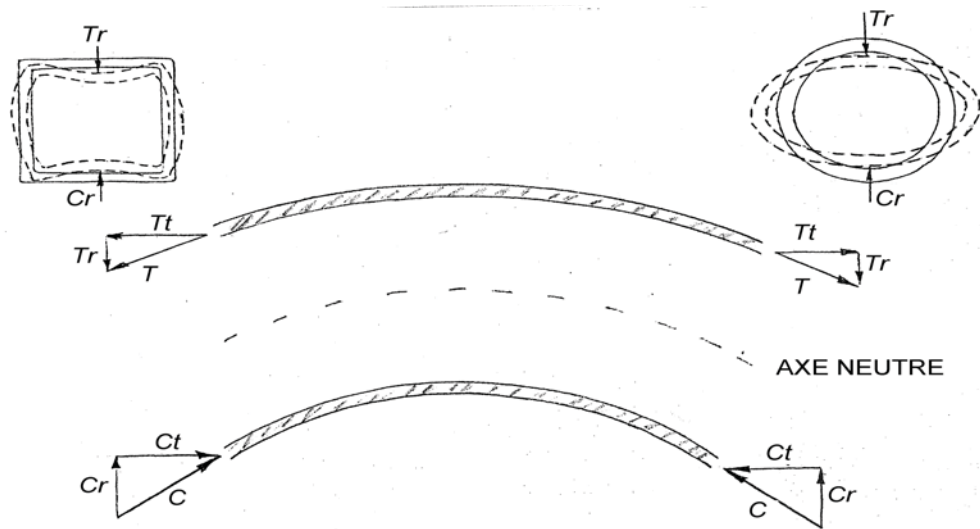


Figure 11

Plusieurs moyens sont utilisés pour contrôler la géométrie. Sur les machines de pliage comme celles de la *figure 9*, l'utilisation d'un mandrin va empêcher l'aplatissement. On peut voir, à la *figure 11*, que l'aplatissement d'un tube rond va entraîner un élargissement de la géométrie. Si on empêche cet élargissement en utilisant une matrice qui épouse le demi-diamètre du tube, l'effet de voute de la forme ronde va prévenir l'aplatissement dans la majorité des cas.

Lorsque cela est nécessaire (diamètre du tube trop grand par rapport à l'épaisseur, section rectangulaire, etc.), on remplit le tube de sable bien compacté (cette méthode ne prévient pas le plissement à l'intrados). Il faudra s'assurer qu'aucun grain de sable ne puisse se placer entre les matrices et les surfaces d'aluminium pendant l'opération, sinon ces grains vont s'enchâsser dans la surface de la pièce d'aluminium.

Dans le développement de l'équipement ou dans les opérations courantes, il est important de connaître les conditions et comprendre les mécanismes qui permettent de repousser les limites rencontrées en pliage et en cintrage. Par exemple, si on veut obtenir un faible rayon de cintrage, on a les conditions favorables ou défavorables suivantes :

Conditions favorables

1. Lubrifier les surfaces de contact avec l'outillage pour diminuer la traction provoquée sur le tube par le frottement pendant l'opération.
2. Accepter un certain plissement à l'intrados ou le provoquer par l'outillage.
3. Accepter un certain aplatissement du tube.
4. Plier en provoquant une compression dans l'axe du tube (favorisé par une paroi épaisse). Certaines machines de pliage spécialisées (avec mandrin intérieur) permettent de réaliser cette condition afin de réduire le rayon de pliage minimal. Dans ce cas, la limitation est davantage reliée à la difficulté d'éviter le plissement de la paroi en compression.

5. Plier à chaud afin d'augmenter la ductilité du métal. À éviter si on ne veut pas voir diminuer la résistance mécanique des alliages écrouis ou traités thermiquement. Ce chauffage peut aussi affecter la résistance à la corrosion.
6. Choisir un alliage possédant un allongement plus élevé.

Conditions défavorables

1. Pas de lubrification ou lubrification insuffisante.
2. Toutes méthodes pour empêcher l'aplatissement.
3. Traction parallèle à l'axe du tube pour empêcher le plissement de l'intrados.
4. Alliage possédant un faible allongement à la rupture.
5. Alliage possédant un faible taux de consolidation (faible différence entre Y_s et R_u).

Au cours des dernières décennies, les fabricants d'équipement se sont évertués à trouver des moyens pour augmenter la précision et la productivité et élargir les limites imposées par le matériau. On retrouve donc une foule de brevets, dont certains sont encore actifs, et un grand nombre d'équipements disponibles sur le marché. Certaines machines ont été développées spécifiquement pour le produit à réaliser. On retrouve sur le lien 3 (machine CRIPPA, CA LINEAR) une machine programmable à cintrer/plier très aboutie et sur le lien 4 une machine plieuse programmable quasi autonome (voir les vidéos).

Le profilage à froid sur machine à galets est un cas particulier de pliage progressif où un feuillard est plié lors de sa progression entre des galets (*figure 12*). Ces machines peuvent posséder plus d'une dizaine de cages. Ce procédé est avantageux pour de grandes productions et pour l'obtention de profilés longs. Les installateurs de gouttières ont de petites unités mobiles qui leur permettent de réaliser de longues pièces (non transportables) sans joint. Afin de prévenir une déformation permanente le long du profilé, la hauteur du profil ne doit pas être augmentée d'une valeur supérieure à $0,025 d$ à chaque étape (d est la distance entre deux cages successives). On déduit le nombre N de cages requises pour un profilé de hauteur h par la relation

$$N = \frac{h}{0,025 d}$$

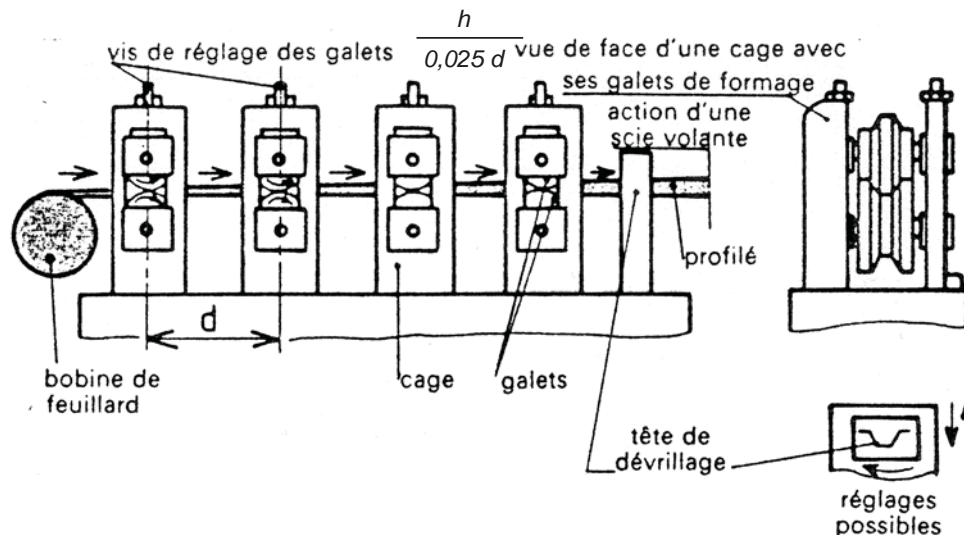


Schéma de principe d'un banc à profiler à 4 cages

Figure 12

Ceci permet de dessiner le profil des galets à chaque passe (« fleur », *figure 13*). Les limites pour les rayons de pliages vont dépendre de l'épaisseur des tôles et de l'alliage comme pour les autres procédés.

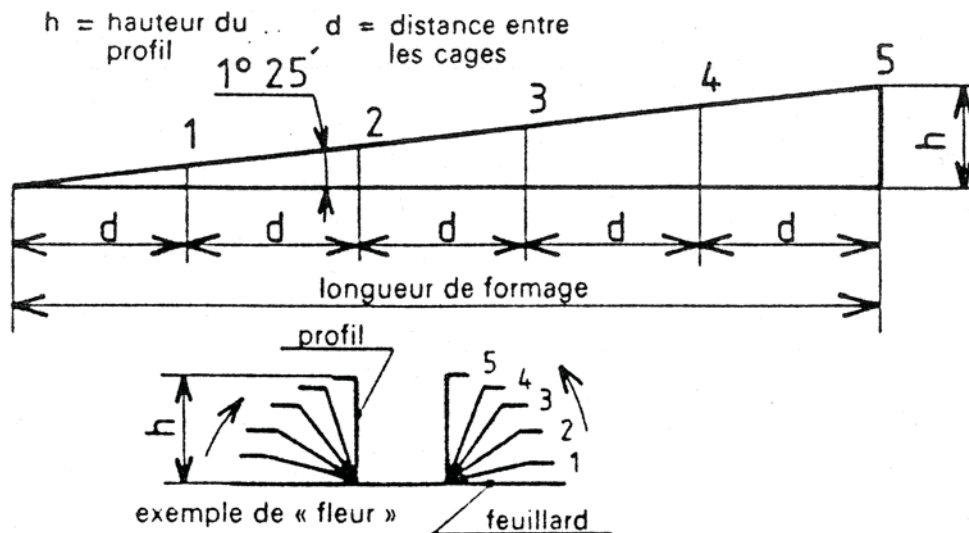


Figure 13

Fournisseurs

Cette liste n'a pas la prétention d'être exhaustive, compte tenu du fait que certaines firmes peuvent concevoir des plieuses et d'autres entreprises peuvent en fabriquer. Les entreprises suivantes sont celles mentionnées dans le répertoire en ligne du CRIQ comme étant spécialisées dans la distribution ou la fabrication de machines à pliage de tubes.

<p>JSA Machineries</p> <p>www.jsapvcmachineries.com Téléphone : 450-658-9668 Sans frais : 1-877-575-8665</p>	<p>Garant Machinerie</p> <p>www.garantmachinerie.com Téléphone : 418-837-5832</p>
<p>Scies ACME inc.</p> <p>www.acmesaw.com Téléphone : 514-875-1990 Sans frais : 1-800-361-3736.</p>	

Pour une liste d'entreprises qui offrent des services de cintrage ou de dépliage, visiter le répertoire ICRIQ.COM-aluminium à l'adresse suivante : www.cqrda.ca/icriq.php

Bibliographie

1. THE ALUMINUM ASSOCIATION. *Aluminum standards and data 1997*; Washington DC; Aluminum Association, 1996
2. GILLANDERS J., *Pipe and Tube Bendin Manual*, 2nd edition, Fabricators & Manufacturers Association, International, 1994
3. LYMAN T. *Forming volume 4*; 8th edition; Metals Park, Ohio; American Society for Metals; 1977 (ASM Metals Handbook)
4. KALPAKJIAN S. et SCHMID S. R., *Manufacturing Process for Engineering Materials*, 4th edition, Prentice Hall
5. DEMARGO E.P., BLACK J.T., KOHSER R.A., *Materials and processes in manufacturing*, 9 th edition, Wiley

Liens intéressants

1. <http://www.mingori.fr/hier.htm>
2. <http://video.google.com/videoplay?docid=294141192227435315#>
3. http://www.dailymotion.com/video/xjdy0_calinear632
4. <http://www.ras-online.de/RAS/en/produkte/biegen/XXL-Center/beschreibung.php>
5. http://www.schaeffer-freres.com/?p=videos&cat=Tolerie&id_video=7615465500711703917

Description des opérations de pliage pour le sertissage

6. <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/FRE/default.asp?catid=190&pageid=2144416759>

Profilage

7. <http://www.euro-profilage.com/profilage-c-est-quoi.php>