Le Feuillard technique

Le laminage de l'aluminium

Publié par :

CQRDA Centre québécois de recherche et de développement de l'aluminium

DES IDÉES EN TRANSFORMATION

Le « Feuillard technique » est publié exclusivement sur le site Internet du CQRDA. Pour télécharger cette publication, rendez-vous au http://cqrda.ca/feuillard.php ou au http://cqrda.ca/ar_publications.php. Pour toute demande d'information, n'hésitez pas à nous contacter au 418 545-5520.

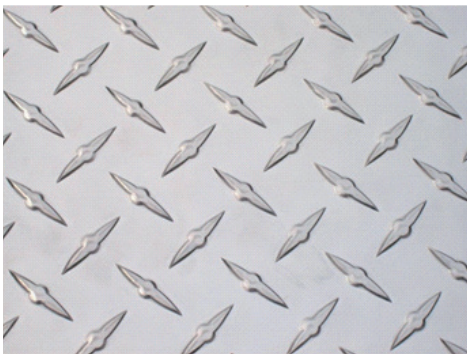
Le laminage de l'aluminium est un procédé de transformation par passage du métal entre deux cylindres lisses ou cannelés, tournant en sens inverse. En raison de ce mouvement de rotation et de la compression générée par les cylindres, il se produit une réduction en continu de l'épaisseur initiale par déformation plastique du métal.

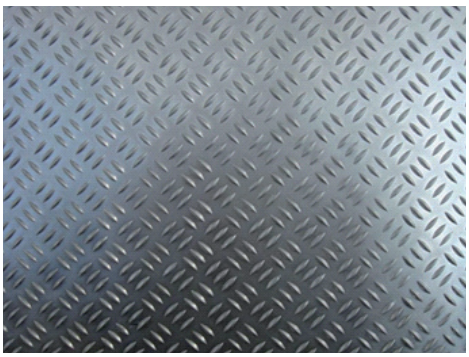
PRODUITS DE LAMINAGE

Les plaques (tôle forte) sont des produits d'épaisseur supérieure à 0.250 pouce (6.3 mm) [réf. 1]. Elles sont normalement fournies en forme plane dont la largeur est imposée par celle des plaques de départ qui elles sont coulées, la longueur étant elle-même limitée par les contraintes de transport.

Les tôles sont définies comme un produit d'épaisseur supérieure à 0.0079 pouce (0.20 mm) et jusqu'à 0.249 pouce (6.3 mm) [réf. 1].

Les feuilles sont définies comme un produit d'épaisseur inférieure ou égale à 0.0079 pouce (0.20 mm) [réf. 1].

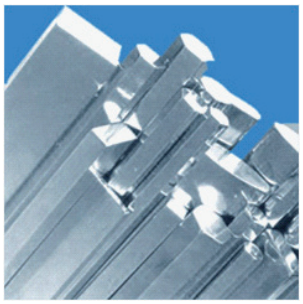




Les tôles relief (checkered tread plate) sont produites dans des épaisseurs comprises entre 0.100 et 0.625 pouce [réf. 2]. Un des cylindres est gravé en creux (1 à 2 mm) pour produire le relief (en divers motifs) par laminage à partir d'une tôle lisse.

Figure 1

On produit les fils, les barres (rondes, carrées, rectangulaires et hexagonales) en diverses sections par laminage entre cylindres cannelés où la compression produit une réduction et une modification de la section.

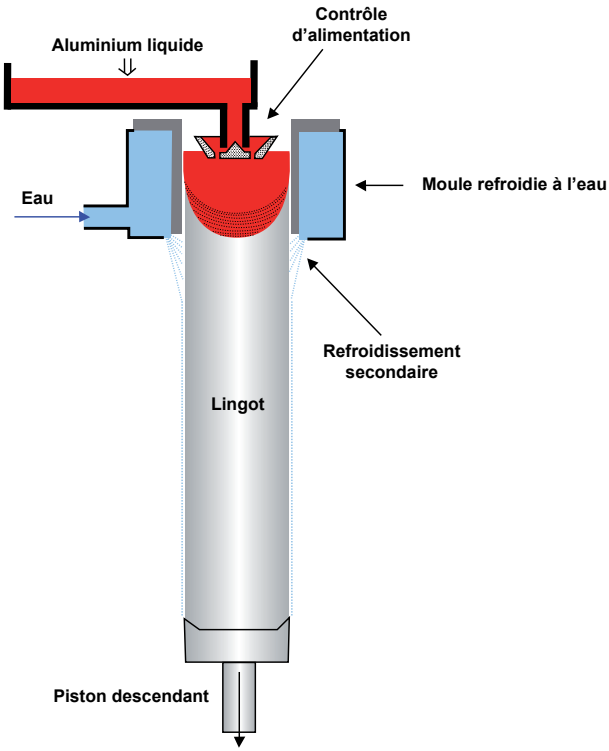


Pour la mise en forme par laminage, on utilise, comme produit de départ, un produit moulé dont la forme respecte les contraintes de fabrication et métallurgiques en moulage et qui se rapproche autant que possible de la forme finale souhaitée en laminage.

Figure 2

PRODUITS DE DÉPART

Lingot de laminage par coulée semi-continue verticale (coulée DC). Ces lingots sont généralement produits en différents alliages dans les centres de coulée des producteurs d'aluminium.



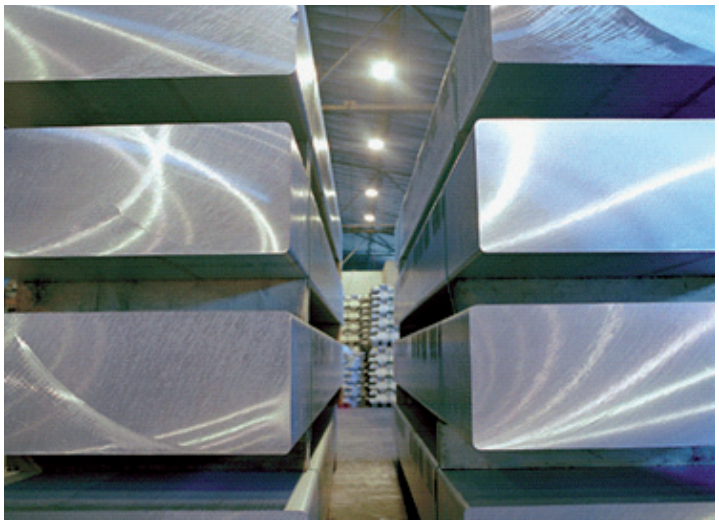
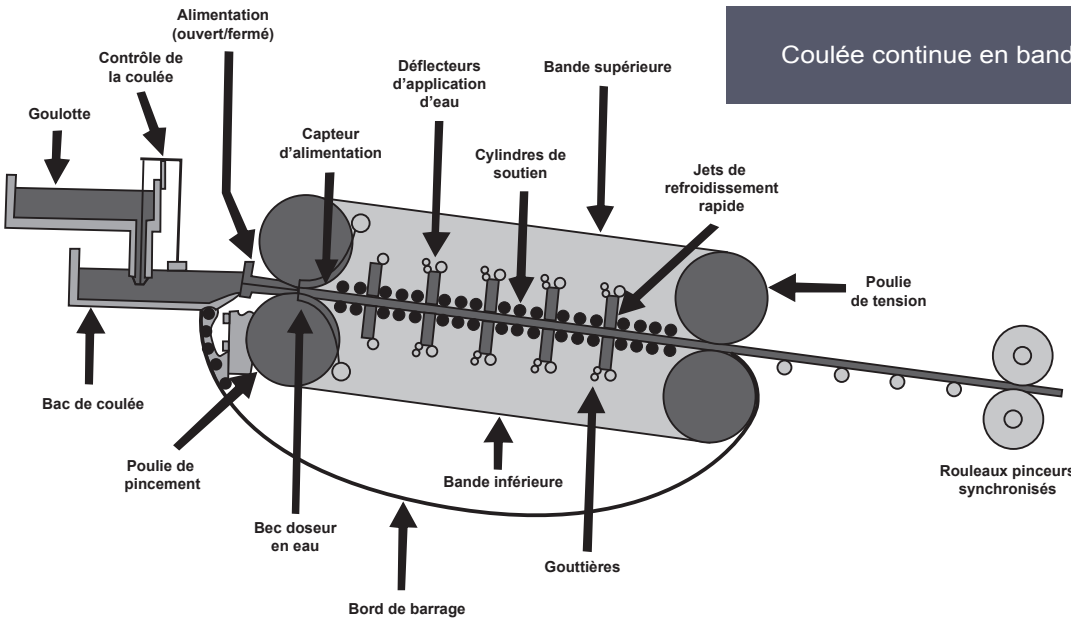


Figure 3

Les plus gros lingots de laminage font normalement 75 pouces (1905 mm) en largeur, 48 pouces (1219 mm) en épaisseur et ont une longueur de 144 pouces (3658 mm).

Afin de mieux répondre à la demande (dimensions, quantités et délais de livraison) l'entreprise PCP Canada offre des blocs et des plaques (alliage 5083-O3) découpés dans des lingots de laminage aussi grands que 96 pouces (2438 mm) en largeur, 48 pouces (1219 mm) en épaisseur et d'une longueur de 288 pouces (7315 mm). http://www.pcp-canada.com/

Tôles produites par coulée continue en bande. Cette technique permet d'obtenir un produit moulé initial de plus faible épaisseur et qui se rapproche du produit de laminage (économie importante dans les opérations de réduction d'épaisseur à chaud pour la production des tôles et des feuilles).



À la sortie de la machine de coulée, la « tôle » coulée en continu est enroulée pour expédition aux entreprises de laminage.

Figure 4

PROCÉDÉ

La figure 5 illustre le procédé de laminage où une tôle est engagée entre les deux cylindres tournant en sens inverse. La tôle d'épaisseur ***e1*** doit pouvoir s'engager entre les cylindres où elle sera déformée en compression pour ressortir à une épaisseur ***e2*** correspondant à l'ajustement du jeu entre les cylindres.

Pour que la tôle puisse être « avalée », il faut que la composante selon l'axe des **x** de la force de friction ***Fu*** (tangentielle au cylindre) soit supérieure à la composante ***x*** de la force de contact ***Fc*** perpendiculaire à la surface du cylindre (fig. 5a). Nous savons que $Fu = \mu \times Fc$ où μ est le coefficient de friction entre le cylindre et la tôle. La force ***Fcx*** qui est égale à $Fc \times \sin(\alpha)$ tend à repousser la tôle et la force ***Fux*** qui égale à $\mu \times Fc \times \cos(\alpha)$ tend à l'entrainer entre les cylindres. Puisque $\mu \times Fc \times \cos(\alpha) \geq Fc \times \sin(\alpha)$ on obtient $\mu \geq \tan(\alpha)$ en simplifiant. L'angle α est fonction du rayon R des cylindres et de la différence entre l'épaisseur ***e1*** et l'épaisseur ***e2*** égale à l'écart entres les cylindres. À partir de ces considérations géométriques, on trouve les conditions d'engagement de la tôle, soit $e1 - e2 \leq \mu^2 \times R$. Cette condition d'engagement de la tôle entre les cylindres va donc limiter la capacité de réduction d'épaisseur à chaque passe. On ne peut augmenter de façon significative le coefficient de frottement, mais, par ailleurs, on va privilégier l'utilisation d'un gros cylindre (100mm à

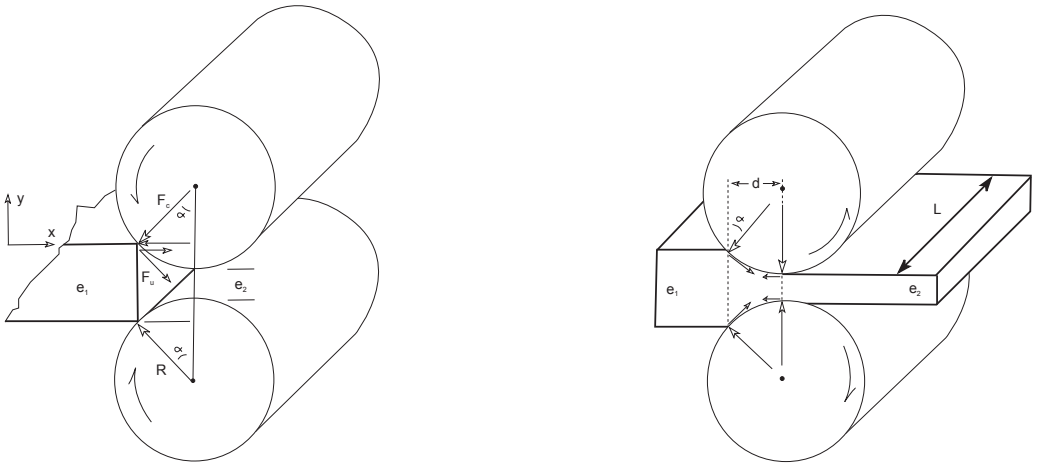
500mm) pour favoriser une plus forte réduction à chaque passe. La réduction d'épaisseur en pourcentage est donnée par

$\frac{e1-e2}{e1}\times 100$, alors que la longueur va augmenter dans la même proportion que le rapport ***e1/e2***. Pour réduire le métal à l'épaisseur souhaitée, il faudra généralement procéder en plusieurs passes successives.

Une fois la tôle engagée (fig. 5b), la force de compression que le cylindre exerce sur la tôle sera égale à la somme des composantes selon l'axe ***y*** de la force de contact ***Fc*** et de la force de frottement ***Fu***; en fait, les forces de contact et de frottement sont réparties sur la distance ***d*** entre les plans d'entrée et de sortie de la tôle (fig. 5b). La force de compression ***Fn*** doit être suffisante pour vaincre la limite élastique ***Ys*** en compression sur une surface correspondant à la distance ***d*** multipliée par la largeur ***L*** de la tôle, ce qui va générer la réduction d'épaisseur. Puisque $d \cong \sqrt{R\times(e1-e2)}$ on a $Fn = Ys\times L\times\sqrt{R\times(e1-e2)}$. Pour diminuer ***Fn,*** on peut utiliser des cylindres de plus faible rayon, mais ce sera au détriment de la capacité de réduction à chaque passe. En laminage à chaud (480°C-580°C), la recristallisation en continu empêche le durcissement produit par la déformation et produit un effet bénéfique aux propriétés mécaniques (affinage de la taille de grain et soudage des micro-porosités). À température élevée, la limite élastique ***Ys*** de l'alliage est beaucoup plus faible (quelques MPa pour le 5052), ce qui réduit d'autant ***Fn***. Par exemple, avec une limite élastique de 3 MPa à 500°C et pour un coefficient de friction de 0.3, si on veut procéder à une réduction d'épaisseur maximale $\mu^2\times R = 45\ \text{mm}$ pour une tôle de 2000 mm de largeur, la force de compression sur la tôle sera d'environ 100 tonnes (***Ys*** x ***L*** x ***d***) si on utilise des cylindres de 1000 mm de diamètre. En laminage à froid (température ambiante), la limite élastique est beaucoup plus élevée (>90 MPa) et augmente à chaque passe de réduction d'épaisseur. Le couple moteur pour entrainer chaque cylindre est ***R x Fu*** . Dans l'exemple qui précède, ce couple serait de l'ordre de 140 000 newtons-mètres. Les puissances nominales des moteurs d'entrainement en laminage à chaud sont de l'ordre de 6000 kW. Pour des raisons techniques, économiques et métallurgiques, on peut comprendre que le dégrossissage (objectif d'amincissement) se fera à chaud.

Les forces de frottement au contact des cylindres s'opposent à l'écoulement du métal vers l'extérieur de la zone en déformation par compression (figure 5b). Lorsque la longueur de contact devient grande devant l'épaisseur comprimée, l'écoulement va être bloqué par le frottement (état de contrainte comparable à celle d'un métal sous contrainte hydrostatique). Le frottement favorise l'allongement dans la direction où la longueur de contact est faible (longueur de contact ***d*** faible par rapport à la longueur ***L*** où l'écoulement est bloqué). Ainsi, la tôle s'allonge avec très peu d'élargissement.

Par ailleurs, le frottement entraine une augmentation de la force de compression pour produire la déformation et limite l'épaisseur que l'on peut réduire avec des cylindres d'un diamètre donné. Pour pallier à l'effet du frottement sur l'écoulement du métal et pour protéger les cylindres contre l'usure, on utilise des lubrifiants (émulsions 1 à 10% d'huile dans l'eau), quitte à réduire quelque peu la capacité de réduction par passe (conditions d'engagement de la tôle). Ainsi, dans le laminage à froid de feuilles minces, on va utiliser des laminoirs Sendzimir (fig. 7) avec de petits cylindres de travail et même laminer 2 couches superposées pour augmenter l'épaisseur initiale du métal entre les cylindres (cas du papier d'aluminium, le côté brillant est celui au contact des cylindres).



a) b)

Figure 5

La grande force de compression requise en laminage est répartie le long du cylindre. Elle engendre une flexion qui va produire un jeu plus grand au centre qu'aux extrémités qui sont en appui sur une cage rigide (fig. 6a). La réduction d'épaisseur sera donc plus faible au centre qu'au bord de la tôle. Puisque l'allongement est directement proportionnel à la réduction d'épaisseur, la partie centrale va s'allonger un peu moins que les bords. Les bords de la tôle retenus par une partie centrale plus courte vont se voiler (fig. 6b) et rendre le produit inacceptable. Pour pallier à cette déflexion, en particulier avec des cylindres plus longs et de petit diamètre, on va utiliser des cylindres d'appui pour supporter les cylindres de travail (figure 7a et 7b). Les laminoirs à 6 cylindres ou plus vont de plus empêcher les déflexions des petits cylindres de travail dans le plan parallèle à celui de la tôle. Cette déflexion se produirait en réaction aux forces ***Fcx*** et ***Fux***.

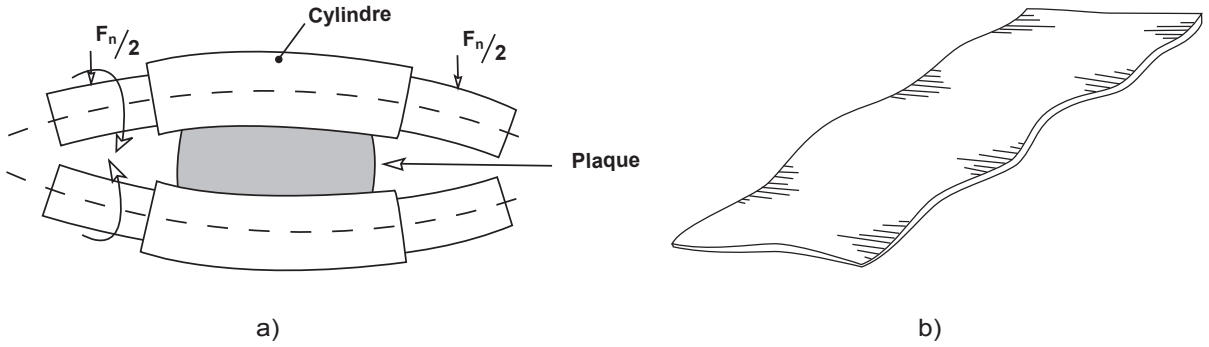
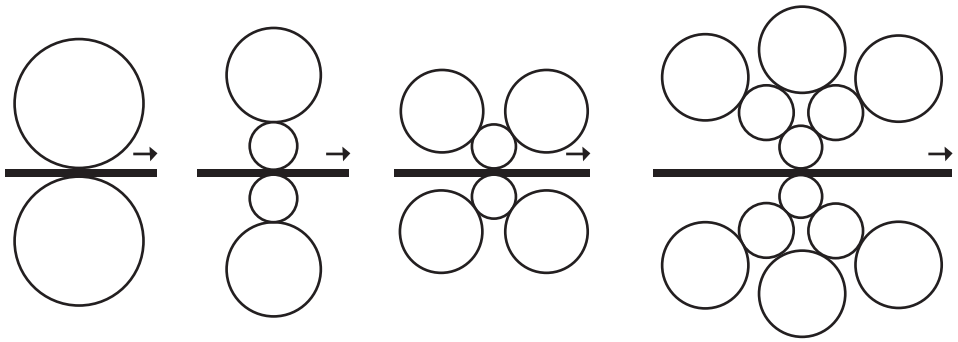


Figure 6



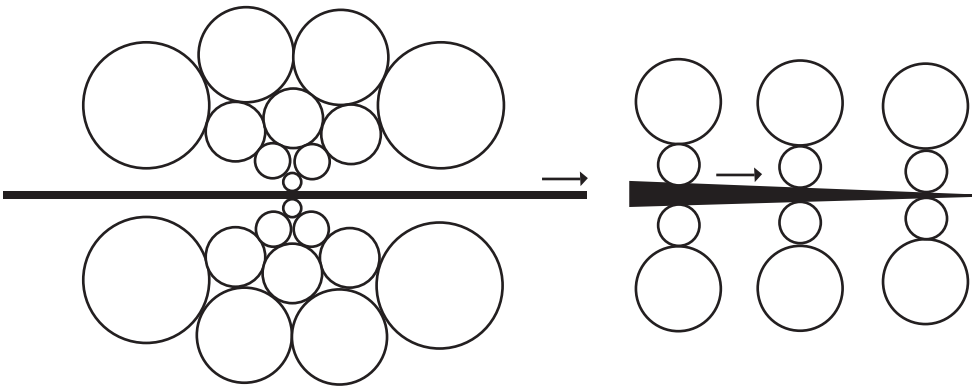
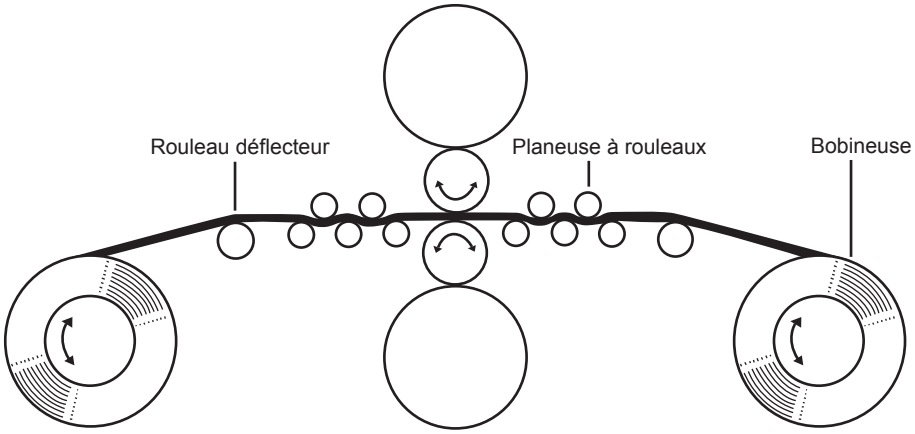


Figure 7a



Quarto réversible à bandes

Figure 7b

Comme la régulation d'épaisseur est la clé du succès dans le procédé de laminage, des systèmes de contrôle complexe font parties des installations de laminage. L'épaisseur est mesurée en continu à l'entrée et à la sortie afin de pouvoir rétroagir adéquatement sur les divers systèmes de commande (jeu et force de contact, traction sur la bande, variation de vitesse, etc.). En effet, de nombreux facteurs sont susceptibles d'influer sur l'épaisseur produite en cours de procédé, dont les variations de température des cylindres et de la tôle, l'excentricité des cylindres et la lubrification. Lorsqu'on réalise le laminage sur plusieurs laminoirs quarto montés en série (fig. 7a), la vitesse de la tôle à la sortie du tandem peut dépasser 1000 mètres par minute en laminage à froid.

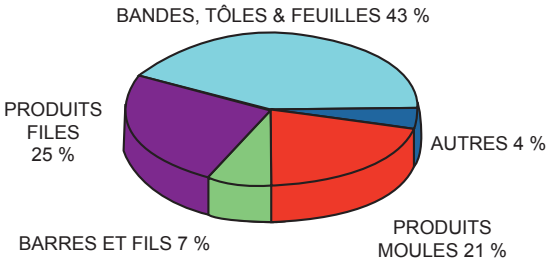
Les planeuses à rouleaux (fig. 7b), grâce à un processus de pliage-dépliage, vont corriger les légers défauts de planéité (gondolage) que l'ont retrouve sur les tôles de faible épaisseur à la sortie des laminoirs; elles vont aussi redresser les tôles préalablement bobinées.

ALLIAGES

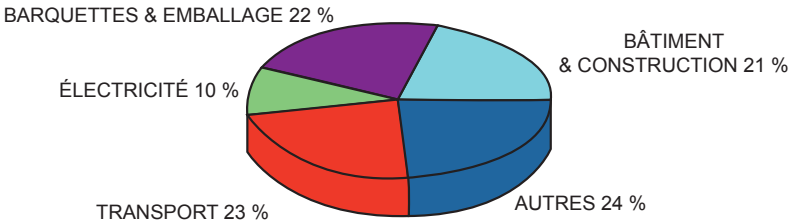
Les propriétés mécaniques des alliages à durcissement par écrouissage (séries 1000, 3000 et 5000) sont obtenues par le contrôle du taux de réduction de l'épaisseur par laminage à froid d'une tôle recuite. Dans ce cas, l'épaisseur initiale du métal recuit doit être choisie en fonction de l'épaisseur finale et des propriétés désirées (voir le feuillard technique « Les alliages à durcissement par écrouissage »). On peut aussi ajuster les propriétés grâce à un adoucissement partiel par un recuit contrôlé sur une tôle durcie par laminage à froid.

Pour les alliages traitables thermiquement (séries 2000, 6000, 7000 et 8000), les tôles d'épaisseur calibrée par laminage à froid sont traitées thermiquement (voir le feuillard technique « Les traitements thermiques des alliages d'aluminium »). On corrige les distorsions à la planéité qui sont causées par la trempe à l'eau, soit par étirage ou par passage dans une planeuse à rouleaux (figure 7b). La planéité pourra aussi être obtenue par laminage à froid, ce qui apporte un durcissement qui s'ajoute à celui du traitement thermique (état métallurgique T3).

Utilisation et marché : exemples
Dans la figure 8a, on retrouve le pourcentage d'aluminium produit qui est transformé en produits laminés. La figure 8b montre la répartition des produits laminés dans les principaux secteurs d'utilisation.



a)



b)

Figure 8 (TALAT, 1991)

Voici des exemples d'utilisation pour chaque série d'alliage :
Série 1000 : Emballages, feuilles minces, plats pour plats cuisinés, barquettes, condensateurs, disques culinaires, réflecteurs, construction mécanique, bâtiment, agriculture.
Série 2000 : Transport, aéronautique, armement, sport.
Série 3000 : Disques culinaires, emballage, transport, canette.
Série 4000 : Alliages de brasage, disques culinaires.
Série 5000 : Bennes, carrosseries, navires, coques, superstructures, revêtements architecturaux, boîtes alimentaires.
Série 6000 : Carrosseries, usage général en fabrication.
Série 7000 : Cuves, citernes, réservoir, structures aéronautiques, armements, équipements sportifs.

APPROVISIONNEMENT

L'approvisionnement en produits laminés se fait habituellement par l'intermédiaire de distributeurs. Ces derniers offrent également certains services de découpe, de traitements de surface, d'usinage ou de rembobinage. Voici les liens des sites de quelques distributeurs :

ThyssenKrupp Materials	**www.kenmacmetals.com**
Magna Inoxydable Inc.	**www.magnastainless.com**
Métalium	**www.metalium.com**
Ryerson	**www.ryerson.com**
Samuel, sons et cie.	**www.samuel.com**

Lorsqu'il s'agit de grand volume ou de commandes spéciales, on peut s'adresser directement aux producteurs. On peut s'informer sur les produits qu'ils fabriquent en consultant leur site :

Arco Aluminum Inc.	**www.arcoaluminum.com**
Golden Aluminum	**www.goldenaluminum.com**
JW Aluminum	**www.jwaluminum.com**
Nichols Aluminum	**www.nicholsal.com**
Novelis	**www.novelis.com**

PCP Canada fait classe à part puisqu'ils œuvrent dans la fabrication de plaques de précision découpées (au lieu de laminées) et de blocs de moulage en aluminium coulé.

PCP Canada	**www.pcp-canada.com**

BIBLIOGRAPHIE

1. Rolling Aluminium From the Mine Throuhg the Mill. The Aluminum Association (2007). www.aluminum.org
2. Aluminium standards and data 2003. The Aluminum Association (2007). www.aluminum.org
3. Mise en forme de l'aluminium, P. Deneuville, Technique de l'ingénieur M3140
4. Aluminum and aluminum alloys, ASM specialty handbook (1996)
5. Le laminage de l'aluminium : procédé et produit, TALAT, F1301
6. Manufacturing Engineering and Technology, S. Kalpakjian, S.R. Schmid, Prentice Hall (2003)

Le Feuillard technique est publié par :

Centre québécois de recherche et de développement de l'aluminium
637, boulevard Talbot, bureau 102
Chicoutimi (Québec) G7H 6A4
Téléphone : 418 545-5520 | Télécopieur : 418 693-9279
info@cqrda.ca | www.cqrda.ca

Rédaction
Maurice Duval

Collaboration
Édith Villeneuve

Conception
Marianne Parent

Révision linguistique
Andréanne Martin

Développement économique, Innovation et Exportation Québec

CQRDA Centre québécois de recherche et de développement de l'aluminium
DES IDÉES EN TRANSFORMATION