
Généralités sur le laminage des tôles métalliques

Dans ce chapitre sont regroupées et résumées toutes les informations nécessaires concernant le laminage et les définitions de certaines terminologies, en se limitant à celles qui seront utiles dans le cadre des travaux détaillés dans le présent document. Divers supports sont utilisés pour dégager ces renseignements, mais les généralités sur le laminage exposées dans les paragraphes qui suivent, ont été principalement extraites des références [6-10].

1.1 Présentation du laminage

L'opération de laminage consiste à entraîner par effet de frottement une bande (tôle) métallique sous deux outils cylindriques (cylindres de travail : cf. § 1.3.2) animés d'un mouvement de rotation inverse. La matière est donc forcée de s'écouler plastiquement (cf. figure 1-1), ce qui va engendrer la réduction de l'épaisseur de la tôle en sortie de l'emprise¹. L'épaisseur du produit fini est obtenue progressivement par une succession de passes de laminage (cf. figure 1-2). Les premières séries de réduction s'effectuent à chaud afin d'exploiter la baisse de la résistance mécanique avec la température à des fins d'économies d'énergie, et pour ajuster les caractéristiques métallurgiques du produit. A ce niveau, une brame est transformée en une bobine de tôle fine, passant au fil des réductions de quelques centimètres à quelques millimètres d'épaisseurs (pour l'acier, on part généralement de 250mm pour arriver à une épaisseur entre 1.5 et 6mm). Pour les aciers, le laminage à chaud commence vers 1200 -

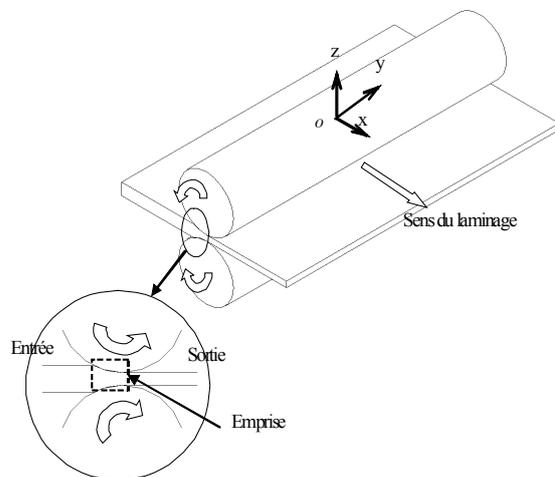


Figure 1-1. Schématisation simplifiée du principe du laminage d'une tôle.

¹ Zone de contact entre les cylindres de travail de la cage et la tôle, où s'effectue l'écrasement de cette dernière (cf. figure 1-1).

1300°C pour se terminer entre 700°C et 900°C. Par contre, les faibles épaisseurs ne peuvent pas être obtenues en laminage à chaud, pour plusieurs raisons :

- Du fait des dilatations thermiques (des outils surtout), il est difficile d'obtenir une grande précision géométrique à chaud, nécessaire aux produits fins.
- Une bande très mince se refroidit très rapidement, sa dureté augmente, les transformations de phase peuvent se produire et le contrôle du procédé peut devenir difficile.
- La surface oxydée d'une bande laminée à chaud est de piètre qualité pour beaucoup d'applications, il est nécessaire de relaminer à froid de toutes façons.
- Une déformation à froid suffisante doit être réservée pour atteindre les propriétés mécaniques voulues.

Lors de la deuxième phase à froid, le procédé de laminage est orienté vers des gammes d'épaisseurs plus faibles, qui sont inaccessibles par le laminage à chaud et qui peuvent descendre en dessous de la centaine de micromètres (de 3~4mm jusqu'à 0.7~0.8 mm pour les tôles de construction automobile) [6]. A ce stade, les caractéristiques mécaniques (emboutissabilité, résistance...), l'aspect de surface (aptitude aux traitements de surface et à l'emboutissage, rugosité contrôlée...) et la planéité, font l'objet d'une attention constante. En dépit du haut niveau d'expérience acquise au cours de décennies de pratique, des études et recherches très actives restent nécessaires pour améliorer la qualité dans des conditions toujours plus difficiles, du fait de l'augmentation des vitesses et de la dureté des nouveaux alliages.

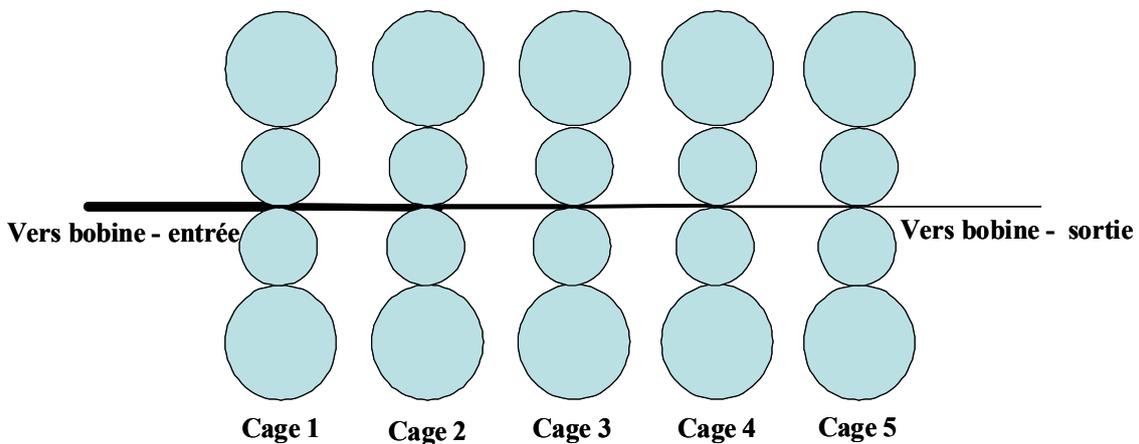


Figure 1-2. Schéma simplifié d'un train tandem de laminage à froid.

1.2 Problèmes géométriques en laminage : défauts de planéité

On distingue deux types de défauts de planéité (cf. figure 1-3):

- Des défauts de planéité non développables, tels que les défauts appelés bords longs ou centre long ;
- Des défauts de planéité développables, tels que les défauts de cintre, tuile et vrillage.

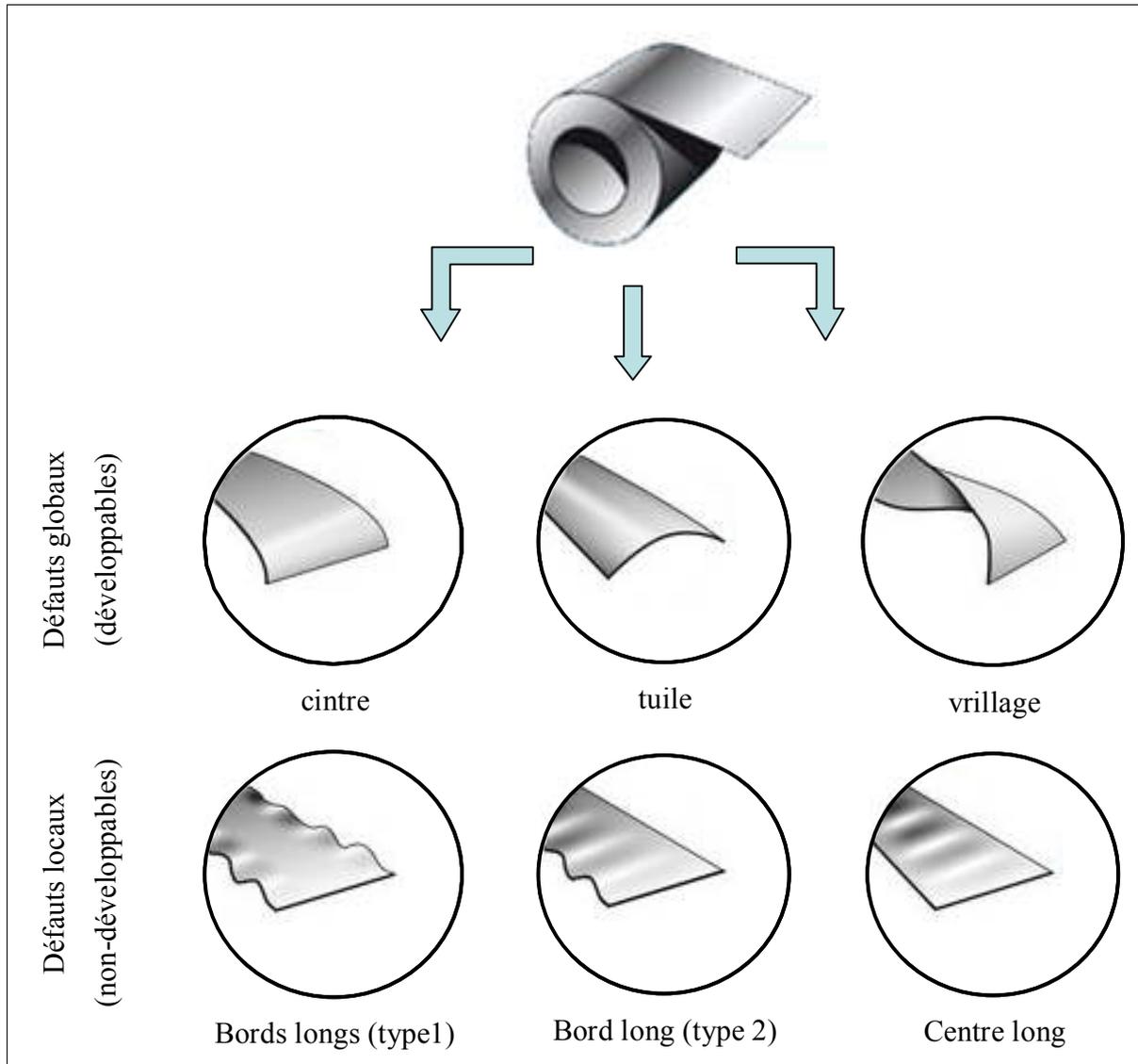


Figure 1-3. Différents types de défauts de planéité rencontrés en laminage.

1.2.1 Origine des défauts de planéité

Sous les chargements intenses du laminage à froid, la déformation des cylindres (définis dans les paragraphes 1.3.2 et 1.3.3) peut atteindre des déplacements verticaux supérieurs à l'épaisseur de la tôle. On conçoit que cela doit avoir des effets significatifs sur le laminage. On analyse souvent cette déformation des cylindres en termes de flexion (de l'axe du cylindre considéré comme une poutre) et d'aplatissement (raccourcissement d'un rayon sous l'effet de la contrainte de contact compressive) ; à ces effets élastiques s'ajoute le bombé thermique, produit de la dilatation hétérogène liée au champ de température complexe du cylindre. La figure 1-4 illustre ces composantes. La forme résultante du cylindre de travail dans l'emprise provoque un gradient transverse d'élongation du produit laminé en sortie de l'emprise. Ce phénomène engendre des contraintes en intercaje, qui peuvent demeurer suffisamment compressives dans certains endroits de la tôle et entraîner le flambage, désigné dans ce contexte comme défaut de planéité non développable (figure 1-3).

Il n'y a pas que la déformation des cylindres qui contribue aux défauts géométriques de la tôle. En effet, une anomalie de distribution des vitesses ou des efforts de frottement entre les deux faces de la tôle – c'est-à-dire entre les compartiments supérieur et inférieur de la cage (à cause d'un mauvais contrôle des vitesses des cylindres ou de la lubrification par exemple) – entraîne une hétérogénéité de l'élongation dans l'épaisseur de la bande. Ce type d'anomalie engendre également l'apparition de contraintes résiduelles hétérogènes dans l'épaisseur de la tôle, particulièrement dans le cas de faibles réductions. Le moment fléchissant ainsi créé entraîne une flexion générale de la tôle. On ne peut pas parler de flambage, car celui-ci se définit comme un déplacement hors plan d'un point de la bande, en réponse à des contraintes de compression dans le plan de celle-ci. On parlera donc ici de flexion qui donne naissance aux défauts de planéité développables (cintre, tuile, etc. : cf. figure 1-3).

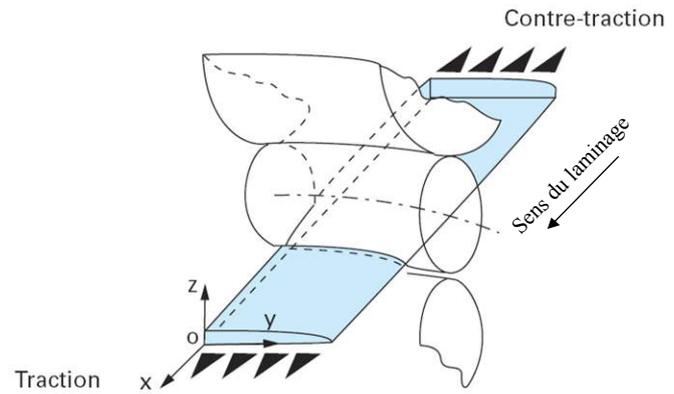


Figure 1-4. La déformation élastique de la cage lors du laminage combinant : l'aplatissement, la flexion et l'indentation.

1.2.2 Notion de défauts de planéité latents et défauts de planéité manifestes

Au cours du laminage, la tôle est souvent soumise à une traction (traction de débobinage, d'intercage, de bobinage ...) capable de masquer la totalité ou une partie des défauts de planéité (cf. § 1.3.8). Ainsi, dans certains cas, la tôle peut paraître plus ou moins plate, ou même parfaitement plate, sur la ligne de laminage. Il n'empêche que l'on peut quand même parler de défauts de planéité, dans la mesure où il peut y avoir des contraintes résiduelles qui, par exemple, se manifesteront sous forme de vrillage d'un flan après découpe. La distribution de ces contraintes internes ou résiduelles dans la tôle est donc appelée défaut de planéité latent, qui peut devenir ultérieurement manifeste par la découpe. Ce défaut de planéité latent peut être estimé à partir des mesures de contraintes explicites plus bas. Dans d'autres cas, l'hétérogénéité de contrainte est telle que même sous tension, le seuil de flambement est atteint et des déplacements hors plan apparaissent : c'est un défaut de planéité manifeste.

La réalité peut aussi être hybride. Le flambement relaxe les contraintes internes quand il se produit. Mais la relaxation peut être partielle et il peut rester, en plus d'un défaut manifeste, un défaut latent résiduel, qui là encore peut conduire à une amplification du défaut lors de la découpe.

Sur la figure 1-5-a, on montre un exemple de défaut de planéité latent en sortie d'une cage, qui correspond à une valeur négative de la différence σ_{xx} -Traction aval, et qui se transforme en défaut de planéité manifeste après la découpe comme on le montre sur la figure 1-5-b. C'est un exemple de simulation numérique d'un cas de laminage décrit dans le tableau 1 dans l'annexe 4, à l'aide d'un modèle de laminage développé et détaillé chapitre 6.

Quel que soit le type de défaut, latent ou manifeste, son élimination complète est quasi-impossible. On pratique toutefois deux procédés annexes au laminage, très importants. Le recuit a pour premier objectif la restauration par recristallisation de la ductilité du métal en vue de sa mise en forme ultérieure. Il élimine *in fine* les contraintes résiduelles. Un recuit de détensionnement, à plus basse température, pourrait éliminer les défauts latents, mais ne corrigerait pas non plus les défauts manifestes. On est donc conduit à utiliser en complément un procédé de planage. Un planage par traction avec faible déformation plastique, sur des feuilles découpées, permet d'éliminer

la plus grande partie des défauts latents comme manifestes. Pour garder un procédé continu, on pratique le planage sur des planeuses à rouleaux, par lesquelles une série de petites flexions, avec des petites déformations plastiques d'amplitude décroissante, corrige considérablement les défauts de planéité pour rester dans les marges de tolérances fixées par le client.

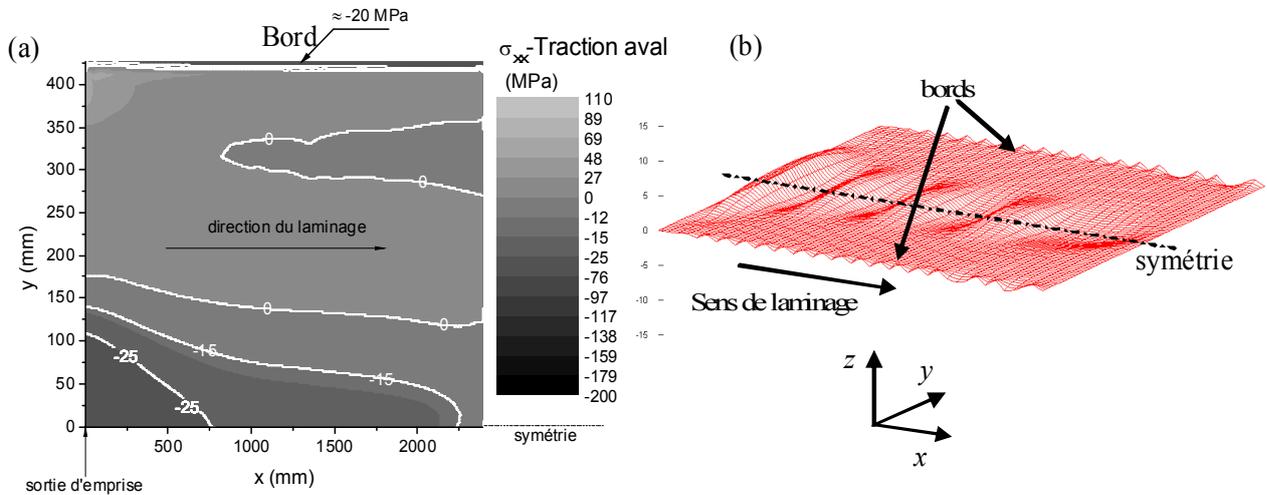


Figure 1-5. (a) : défaut de planéité latent, (b) défaut de planéité manifeste.

1.2.3 Quantification des défauts de planéité

Les défauts de planéité sont quantifiés à partir d'une grandeur « *IP* » (index de planéité) mesurable expérimentalement. En une position donnée de la largeur, cette grandeur est souvent définie comme le rapport de l'allongement d'une « fibre » matérielle par rapport à une longueur de référence (éq. (1.1)).

$$IP[U1] = \frac{L - L_{ref}}{L_{ref}} \times 10^5 \quad (1.1)$$

IP : index de planéité.

La longueur de référence L_{ref} , qui varie d'une convention à une autre, doit être choisie avec prudence. En fait, l'utilisateur des instruments de mesures de planéité, qui définit la longueur de la fibre en rive comme une longueur de référence, est confronté à l'imprécision des mesures à cet endroit. Cette difficulté est due d'une part au phénomène de chute en rive, et d'autre part au fait que parfois le capteur de mesure à cet endroit peut ne pas être totalement couvert par la tôle.

Afin de s'affranchir de ce problème, deux solutions sont possibles. L_{ref} est définie comme :

- la longueur de la fibre centrale ;
- la longueur de la fibre la plus courte ;
- la longueur de la fibre le long de laquelle la composante longitudinale du champ de contraintes résiduelles reste la plus proche de la traction imposée, à un endroit où des mesures sont prises.

En revanche, cette grandeur, caractérisant le défaut de planéité, ne peut pas être directement déduite quand le défaut est caché sous l'effet de la traction au cours du laminage. D'autre part, elle est généralement supposée comme étant une déformation élastique longitudinale reprise par le flambage de chaque fibre matérielle quand la traction est relâchée. En conséquence, elle peut

être exprimée en fonction du profil de la contrainte longitudinale résiduelle (ou défaut latent), mesuré suivant une section transversale de la tôle, et le module d'Young du matériau :

$$IP[UI] = \frac{1}{E} (\sigma_{y_i} - P) \times 10^5 \quad (1.2)$$

σ_{y_i} : valeur de la contrainte longitudinale mesurée en chaque point situé à la position y_i de la largeur de la tôle (cf. figure 1-6). P est la contrainte de traction moyenne.

Les expressions mentionnées dans les équations (1.1) et (1.2) permettent de qualifier l'ampleur d'un défaut, mais ne sont pas assez consistantes pour identifier sa géométrie. Pour cela, une formule dite de « steepness » est utilisée, supposant que le défaut engendré par le flambement a une forme de demi-onde sinusoïdale. L'évaluation d'un défaut implique alors le rapport f entre la flèche et la longueur de cette demi-onde, est exprimé en pourcentage (%). Afin de se ramener à une valeur exprimée en UI, ce rapport s'établit comme indiqué sur la figure 1-7 en supposant que l'ondulation a une forme sinusoïdale.

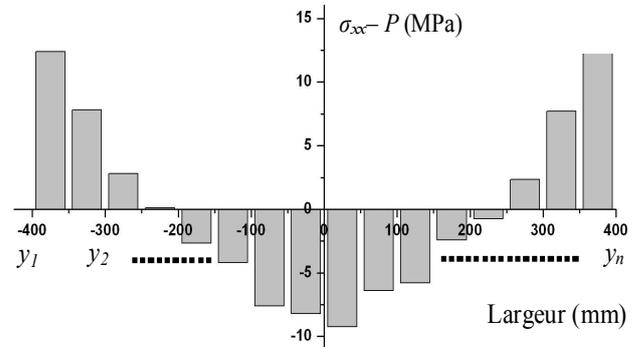


Figure 1-6. Un exemple (réel [5]) de mesure du profil de la planéité latente suivant la largeur de la tôle au cours du laminage, en utilisant un rouleau de planéité.

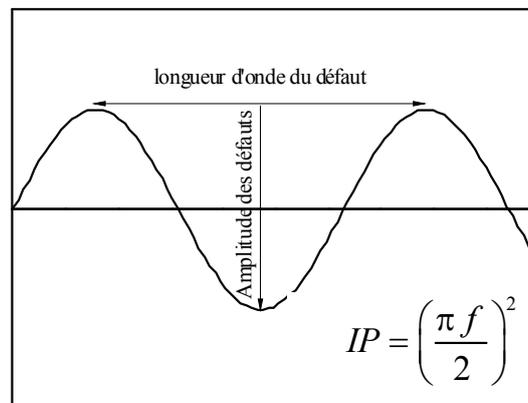


Figure 1-7. Forme d'une fibre matérielle ondulée approchée par une fonction sinusoïdale. Noter la flèche, la longueur d'onde, et leur rapport f .

Ces diverses caractérisations des défauts de planéité donnent une estimation globale de la qualité du produit, à partir d'une valeur en UI déterminée par comparaison entre une position donnée en largeur (le centre par exemple) et les rives (souvent prises conventionnellement à 40 mm de la vraie rive). On peut aller plus loin et utiliser non une valeur unique, mais une valeur variant en fonction de la largeur. Pawelski [11] propose une évaluation de l'indice de planéité IP dans la largeur de la bande suivant deux paramètres a_2 et a_4 selon une formule biquadratique décrivant la forme du défaut à une section transversale donnée. L'expression du défaut est alors :

$$IP[UI] = a_2 \left(\frac{2y}{b} \right)^2 + a_4 \left(\frac{2y}{b} \right)^4 \quad (1.3)$$

La forme des défauts que décrit la relation (1.3) n'est pas immédiatement perçue sans s'appuyer sur la figure 1-8. Cette figure permet de distinguer les différents types de défauts latents en fonction des coefficients a_2 et a_4 . En outre, en adoptant la relation (1.3), le défaut est supposé symétrique par rapport au centre de la tôle, ce qui n'est pas toujours vrai pour un grand nombre de cas de laminage.

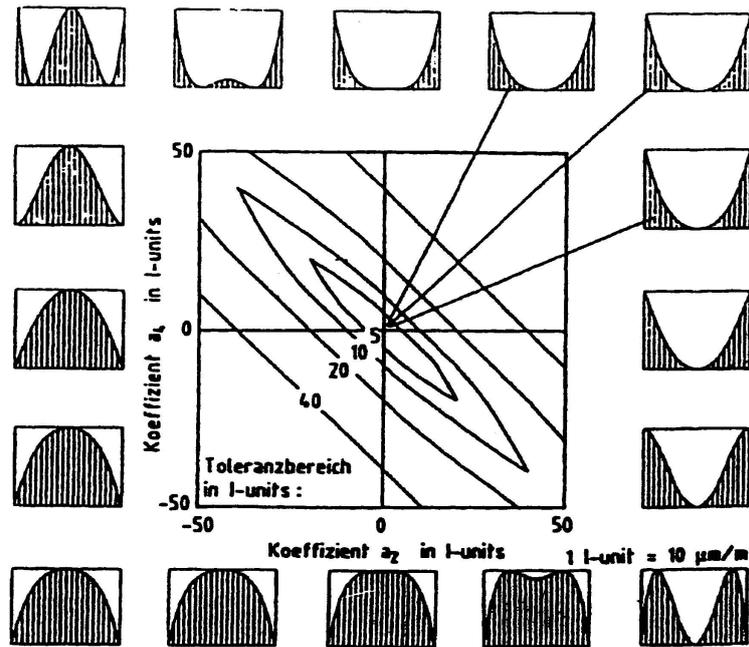


Figure 1-8. Exemple d'abaque permettant de distinguer le type et l'ampleur du défaut de planéité latent en UI suivant les paramètres a_2 et a_4 de la relation (1.3) [11] : les profils montrés représentent la forme du différentiel d'élongation suivant la largeur de la tôle en aval de l'emprise.

1.2.4 Quelques dispositifs et méthodes utilisés pour les mesures des défauts

1.2.4.i Mesures en ligne

a) Mesures des défauts de planéité latents

Par la mesure des contraintes internes :

Au cours du laminage, lorsque les défauts de planéité sont latents, le seul moyen possible de les quantifier est de mesurer les contraintes internes. Dès lors, les défauts de planéité sont déduits de l'hétérogénéité de la contrainte longitudinale suivant la largeur de la bande. Un rouleau de planéité (ou stressomètre) est placé à une distance de l'ordre de 3 à 4m en aval d'une cage. Il est composé de plusieurs segments de 52 mm de largeur b_c chacun. Chaque segment est en fait un capteur de force de contact avec la bande en défilement (cf. figure 1-9). C'est à partir de cette force résultante $F_c(y)$ qu'il est possible de déduire la contrainte résiduelle longitudinale dans la bande $\sigma_{xx}(y)$ suivant la relation ci-dessous :

$$\sigma_{xx}(y) = \frac{F_c(y)}{2h(y) \times b_c \times \sin\left(\frac{\alpha_c}{2}\right)} \quad (1.4)$$

$h(y)$ est l'épaisseur suivant la largeur de la bande et α_c désigne l'angle de contact entre la bande et chaque capteur du stressomètre.

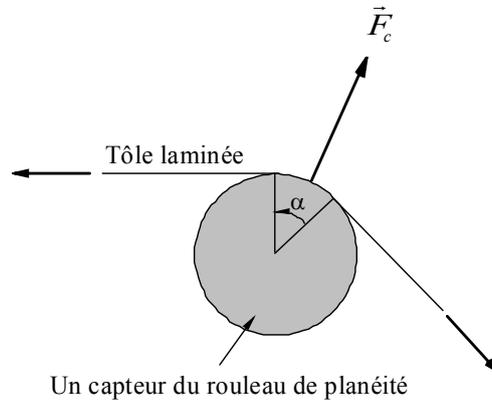


Figure 1-9. Description du passage d'une tôle sur un capteur du rouleau de planéité (stressomètre).

De cette manière, il est possible de reconstituer le profil de la contrainte σ_{xx} à travers la largeur de la bande, avec une résolution spatiale de 52 mm, afin de prédire une estimation du défaut qui pourrait se révéler dès l'élimination de la traction du laminage (cf. figure 1-10).

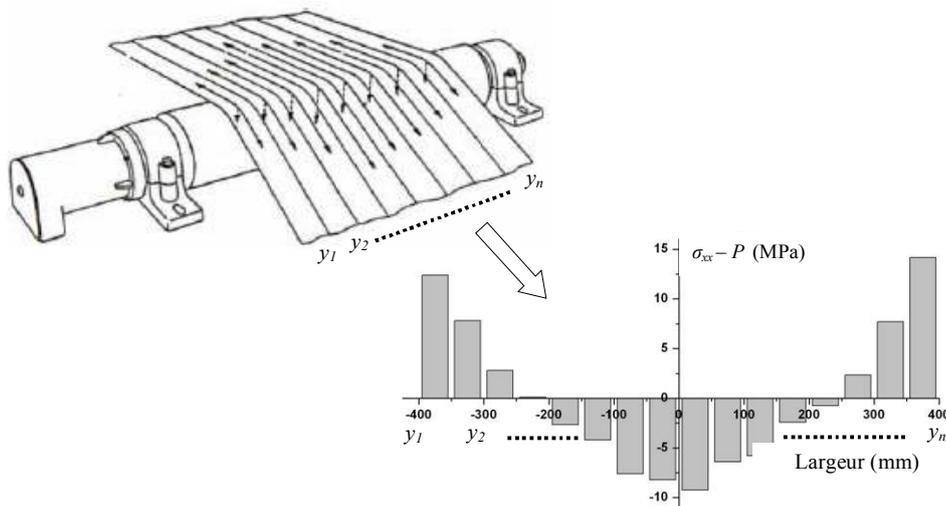


Figure 1-10. Profil du défaut latent suivant la largeur de la tôle au cours du laminage, qui est reconstitué à partir de différentes mesures fournies en chaque position y_i par les capteurs du rouleau de planéité.

Ce type d'instrument est capable de révéler les défauts cachés sous l'effet d'une traction de laminage assez élevée. Néanmoins, il est limité par plusieurs sources d'incertitudes sur les mesures mentionnées par Steiner et al. [12] :

- Les mesures prises par les rouleaux de planéité peuvent contenir des contraintes internes provenant d'un gradient thermique à travers la bande. Dans ce cas, les défauts de planéité latents ne sont plus représentatifs du produit refroidi. Toutefois, la compensation de cette

perturbation est possible en retranchant la contribution de la température, calculable par la thermo-élasticité. Cela nécessite une mesure de la température en chaque point de mesure de contrainte, ce qui est possible en utilisant des caméras infra-rouge.

- Un mauvais alignement des rouleaux de planéité avec les cages du tandem, qui peut être évité à l'aide d'un système de contrôle automatique ajustant l'alignement de ces rouleaux.
- Un recouvrement partiel des zones des extrêmes rives de la bande, qui signifie que le bord de la bande se trouve au milieu de l'un des capteurs du rouleau de planéité. A cet état, une correction peut être apportée sur l'équation (1.4), en ajustant b_c à la largeur réelle de recouvrement du capteur par la tôle (uniquement à l'endroit où le recouvrement n'est pas total : c'est-à-dire à l'extrême rive).

Remarque 1 :

Sur un pupitre de contrôle, on observe souvent, superposée au profil, une valeur P , contrainte moyenne de traction, soit $F_{tr}/b \cdot h_{moy}$. F_{tr} est la force de traction appliquée entre deux cages successives, b et h_{moy} sont respectivement la largeur de la tôle et l'épaisseur moyenne² de la tôle.

Par la mesure des vitesses [13] :

Au cours du laminage, suite à un différentiel d'élongation des fibres matérielles en sortie de l'emprise, celui-là même qui conduit aux défauts de planéité, un gradient transverse de vitesse de déformation se produit. Ce gradient s'atténue plus loin de la cage et la tôle retrouve un mouvement de corps rigide. Partant de ce principe, Person [13] a développé un dispositif composé de plusieurs galets placés très près de la sortie de l'emprise. En roulant sur la tôle en défilement, ils sont capables de mesurer le gradient transverse de la vitesse (ou d'élongation) $\Delta V/V_{ref}$ de la matière, à partir de laquelle il est possible de quantifier le gradient d'élongation, d'où le défaut de planéité $\Delta L/L_{ref}$ en UI (cf. équation (1.1)). L et V sont respectivement l'élongation d'une fibre et la vitesse locale, et V_{ref} est une vitesse de référence à une position donnée dans la largeur de la tôle, par exemple au centre. Toutefois, bien que cette méthode soit peu coûteuse, elle est limitée par le faible nombre de fibres mesurées en raison de l'encombrement des galets. De plus, les mesures par cette méthode peuvent être perturbées par :

- Le glissement des rouleaux sur la surface de contact avec la tôle.
- Le passage d'un défaut de planéité manifeste, apparent en ligne, sous les galets.

b) Mesure des défauts de planéité manifestes

Les mesures des défauts de planéité manifestes consistent à repérer les défauts géométriques de la tôle (ondulations, plis, « frisettes »...). Les appareils de mesure les plus répandus utilisent des moyens optiques, bien que d'autres systèmes basés sur les propriétés électroniques et électromagnétiques soient développés (le Méplaca par exemple [14]). En outre, ces différents types de techniques de mesures sont généralement sans contact entre l'appareillage et le produit, ce qui évite de créer des défauts de surface (rayures).

Coupe optique [15]

Le procédé de la coupe optique consiste à projeter une ligne lumineuse droite transversalement à la surface de la tôle à partir d'une source lumineuse (cf. figure 1-11). La projection de cette ligne décrira le profil de planéité manifeste suivant la largeur de la table, qui sera enregistré et stocké par un système d'acquisition. Un enregistrement périodique au cours du défilement de

² Epaisseur moyennée suivant la largeur de la table sur une section transversale de la tôle qui est souvent non rectangulaire (cf. la définition du bombé tôle dans le paragraphe 1.3.5).

la tôle lors du laminage permet de reconstituer la forme tridimensionnelle de celle-ci. Cependant, cette méthode demande un temps d'acquisition assez long pour une précision de mesure peu satisfaisante.

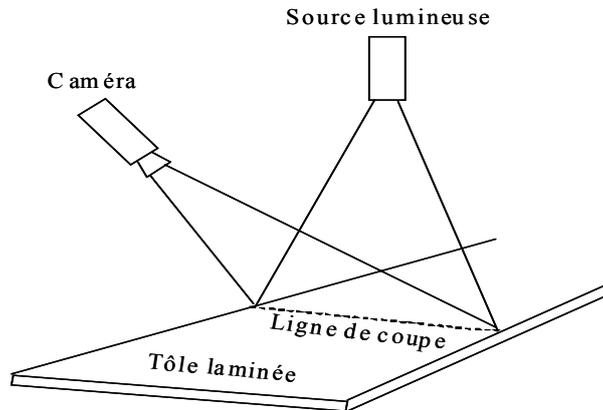


Figure 1-11. La coupe otique.

La méthode des moirés [16,17]

La méthode des moirés consiste à projeter une grille lumineuse (ou une série de lignes lumineuses perpendiculaires au sens du laminage [17]) sur la surface de la tôle (cf. figure 1-12). Les défauts géométriques de cette dernière causent une distorsion de la grille ; cette distorsion, superposée à l'image initiale, forme une image de moiré capable de décrire les défauts de planéité manifestes, et enregistrée à l'aide d'une caméra CCD. En revanche, les défauts de planéité instantanés (de type bords longs ou centre long par exemple) présentent une certaine difficulté pour ce type de mesures. De ce fait, des prises séquentielles de mesures à des temps d'acquisition suffisamment courts, et synchronisés par rapport à la vitesse du laminage, sont nécessaires dans le but de décrire la planéité du produit au cours de son défilement. Toutefois, cette procédure ne sera plus assez précise pour des vitesses de laminage élevées.

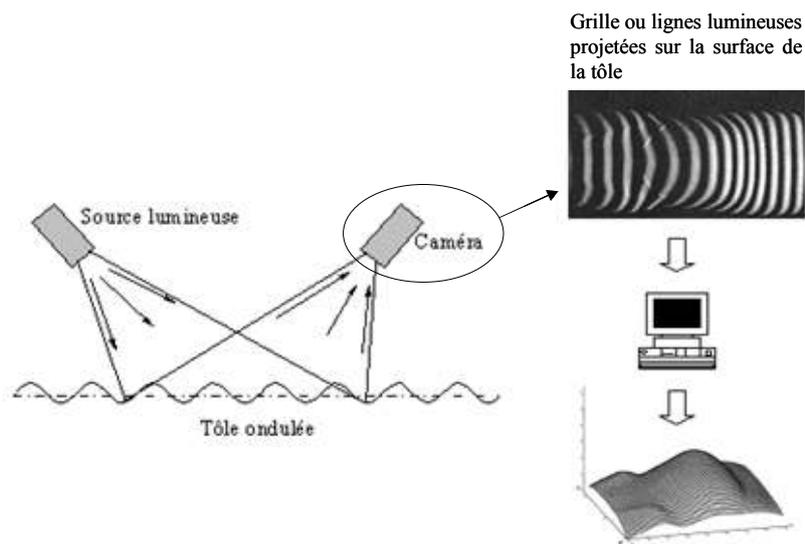


Figure 1-12. Visualisation des défauts de planéité manifestes d'une tôle à l'aide de la méthode de moirés.

Remarque 2 :

Les grilles ou les lignes lumineuses qu'on vient de citer, peuvent être de différentes natures. Elles peuvent provenir d'une projection de rayons laser qui forment des lignes (ou une grille) sur la surface de la tôle. Ou bien ce sont des franges provoquées par l'interférence de deux ondes lumineuses provenant de deux sources différentes (ce qui est le cas de la figure montrée ci-dessus : figure 1-12).

La télémétrie à balayage [18]

Cette méthode ressemble aux précédentes, sauf qu'ici un faisceau laser est projeté perpendiculairement à la surface de la tôle (cf. figure 1-13). Une caméra CCD est capable de repérer le point d'impact et de définir sa position spatiale par rapport à une référence. À partir de l'altitude de ce point, on est alors capable de déduire localement l'amplitude du défaut manifeste. De plus, afin de balayer toute la surface de la tôle, un miroir est souvent mis en place permettant de dévier le faisceau laser d'un point d'impact à un autre, ce qui limite cette procédure aux faibles vitesses de laminage.

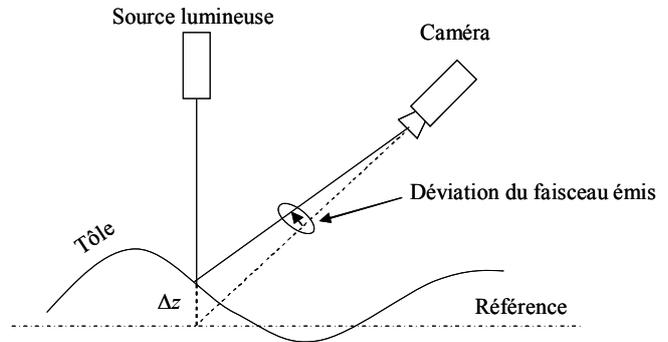


Figure 1-13. La technique de mesure des défauts manifestes d'une tôle à l'aide de la méthode de télémétrie à balayage.

Le « Meplaca » [14]

C'est un dispositif qui a été récemment mis au point par ArcelorMittal et qui fait encore l'objet de quelques améliorations. Le « Meplaca » est une série d'armatures de condensateurs alignés selon la largeur de la tôle en défilement, à une distance de quelques centimètres (5 à 10 cm) de la surface de celle-ci (cf. figure 1-14). Au cours du défilement de la tôle, le Meplaca enregistre les variations de tension électrique correspondant à la distance qui sépare les armatures de chaque condensateur de la surface de la tôle. Cela nécessite alors un calibrage liant ces deux grandeurs (cf. figure 1-15). De cette manière, une cartographie décrivant la forme géométrique du produit est déduite, comme le montre la figure 1-16. Ce dispositif est peu coûteux par rapport aux autres précédemment cités, mais est astreint à respecter une distance de séparation adéquate. La distance doit être suffisante pour que le dispositif ne soit pas heurté par la tôle, quand elle présente des défauts géométriques de forte amplitude. Mais la tôle doit être assez proche pour ne pas perdre le signal électrique généré par les condensateurs.

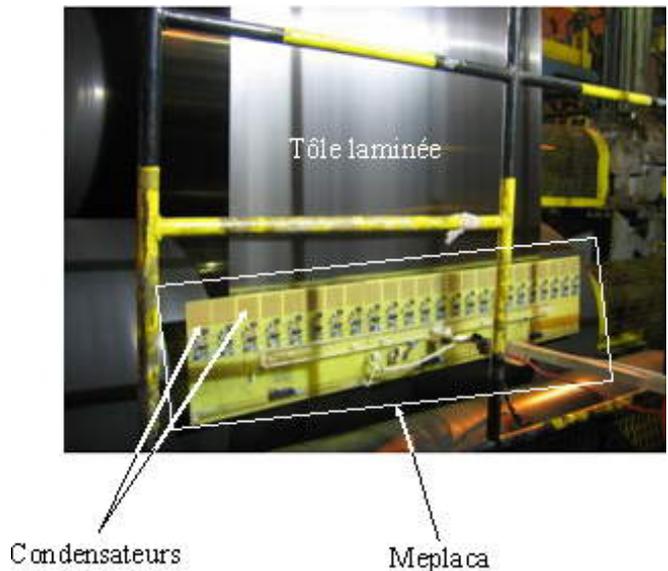


Figure 1-14. Le Meplaca [14].

Remarque 3 :

Dans certains cas de laminage, en particulier pour de très faibles réductions, un différentiel d'élongation suivant l'épaisseur est fréquemment rencontré, avec les gradients de contraintes résiduelles correspondants. Pour des épaisseurs de tôle assez faibles, la mesure de ces contraintes

résiduelles ou des défauts latents suivant l'épaisseur est très difficile. Ainsi, ce que mesurent les rouleaux de planéité par exemple, est le profil transversal de la moyenne dans l'épaisseur de la contrainte interne longitudinale. Ce problème ne se pose pas dans les cas de faibles épaisseurs et à forte réduction, où le gradient des contraintes résiduelles suivant l'épaisseur de la tôle est négligeable.

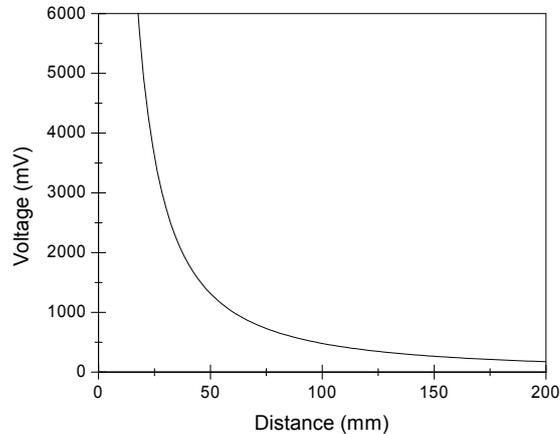


Figure 1-15. Courbe de calibration des capteurs du Meplaca : relation entre la distance qui sépare un capteur de la surface de la tôle et la tension électrique enregistrée [14].

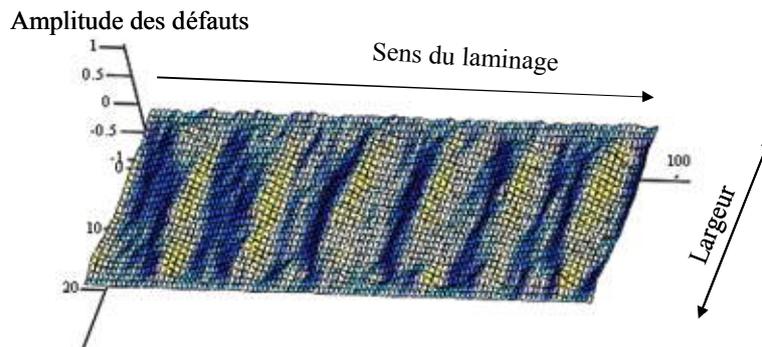


Figure 1-16. Un exemple de défaut de planéité manifeste mesuré par le Meplaca [14].

Toutes ces techniques de mesures en ligne sont généralement confrontées aux problèmes de vibration et aux états de surface de la tôle, pouvant entraîner des erreurs d'estimation des défauts de planéité. En outre, les équipements doivent être protégés contre la température générée lors du laminage, en particulier en laminage à chaud, et contre la vapeur dégagée pour éviter leur dégradation.

1.2.4.ii Mesures hors ligne

Une mesure hors ligne est prise sur une portion (échantillon) de tôle découpée et posée sur une table ou suspendue.

Les méthodes des moirés et la télémétrie à balayage optique, citées précédemment, sont notamment applicables dans le cadre de mesures hors ligne, tout en s'affranchissant des difficultés provenant de l'aspect instationnaire de certains types de défauts manifestes. Un autre principe, le

plus simple, consiste à mesurer à la règle les amplitudes des défauts géométriques (cf. figure 1-17). Par contre, comme mentionné dans le paragraphe 1.2.2, même si une tôle flambe quand elle est relâchée, il se peut que les contraintes résiduelles ne soient pas totalement relaxées. C'est en effet la raison pour laquelle Palkowski et al. [19] découpe en bandelettes l'échantillon considéré dans le sens du laminage. De cette manière, les défauts de planéité sont plus précisément quantifiés par cette méthode connue sous le nom de « *fendage* ». Il est clair que cette méthode n'est pas la plus sophistiquée, mais elle permet d'obtenir des mesures adéquates sans demander une instrumentation coûteuse. Par ailleurs, une méthode de mesure par rayons X, qui paraît plus avancée et non destructive, est capable de caractériser les défauts latents de la tôle risquant de se révéler chez le client. Par contre, cette méthode présente une certaine lourdeur de mise en œuvre. En effet, les défauts latents sont visualisés via l'effet des contraintes résiduelles sur les distances entre plans atomiques, mesurées par la diffraction des rayons X. Cette interaction dépend des caractéristiques intrinsèques et de la texture du matériau (propriétés mécaniques, anisotropie, etc...). La méthode a besoin d'une référence à contrainte nulle sur le même matériau. La difficulté réside donc dans le besoin d'une tôle ayant les mêmes propriétés, en particulier la même texture, sans contraintes résiduelles. Une solution proposée consiste à récupérer un bout de tôle de la même bobine après un recuit de détensionnement. Ce recuit permet d'effacer les contraintes résiduelles à l'issue du procédé du laminage, tout en conservant les propriétés mécaniques et la texture du produit.



Figure 1-17. Mesure hors ligne et à la règle d'un défaut de planéité manifeste [1].

1.3 Quelques éléments techniques sur le laminage

Dans ce paragraphe, on cite quelques éléments techniques qui permettent de contrôler le laminage. Ils offrent aux lamineurs la possibilité d'intervenir d'une manière ou d'une autre dans le but d'optimiser la qualité du produit, pour chaque bobine.

1.3.1 Exemples de cages de laminoirs utilisées

La figure 1-18 illustre quelques types de cages que nous allons décrire, du plus simple au plus complexe. La plus simple est la cage *Duo* avec seulement deux cylindres de travail (cf. §1.3.2) de grands diamètres. Par contre, les cages *Quarto* sont constituées également de deux cylindres de travail, mais de plus faible diamètre, et qui sont soutenus par deux cylindres d'appui ayant un gabarit plus important (cf §1.3.3). Dans les cages *Sexto*, des cylindres d'appui intermédiaires additionnels permettent un contrôle plus fin de la planéité grâce aux possibilités offertes par leur translation latérale [20]. Enfin, les cages *Sendzimir* sont beaucoup moins conventionnelles : vingt cylindres sont disposés en grappe ; les cylindres de travail sont de faible rayon. Ce type de cages

permet le laminage des produits très durs et minces tels que les aciers inoxydables [20]. On notera que plus les cylindres d'appui sont nombreux, plus les cylindres de travail peuvent être petits.

Notons qu'un train tandem n'est pas forcément constitué d'un seul type de cage : on associe parfois des cages *sexto* à des *quartos*, à des positions critiques, pour assurer au mieux le contrôle de la planéité.

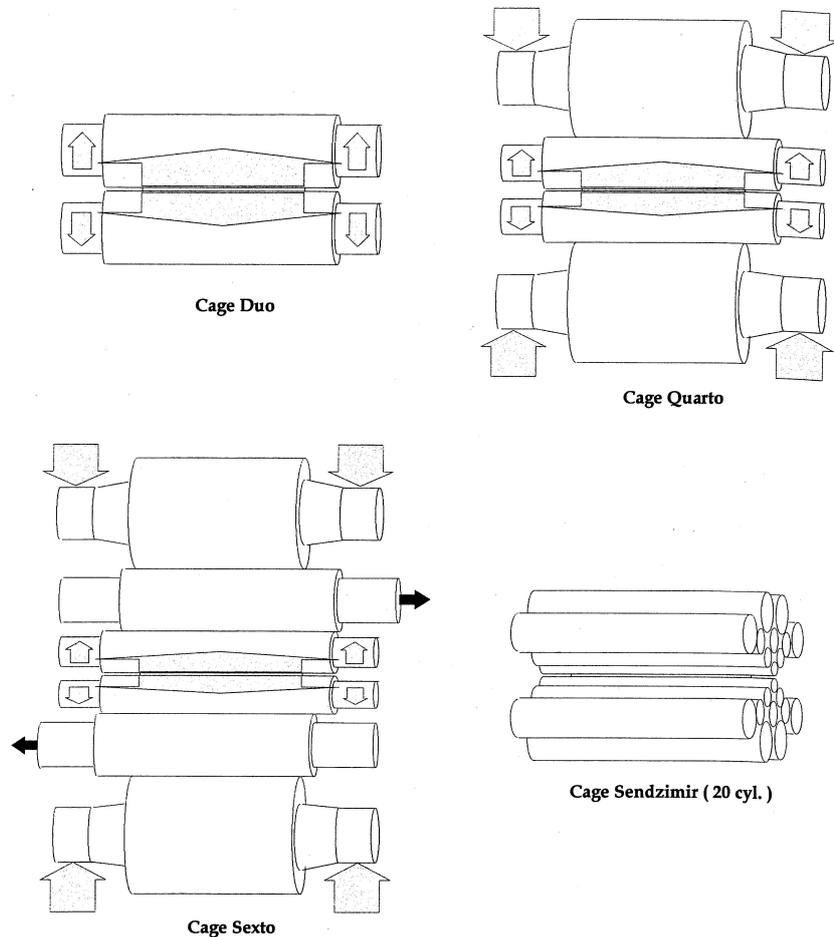


Figure 1-18. Différents types de cages de laminoirs couramment utilisés : les flèches représentent des efforts qui sont mis en jeu au cours du laminage [5].

1.3.2 Cylindres de travail

Les cylindres de travail sont les principaux éléments de la cage en contact avec la bande à laminier. Les efforts de laminage exercés par les actionneurs sont transmis à cette dernière dans la zone de contact connue sous le nom d'« emprise ». Par ailleurs, le diamètre de ces cylindres a un effet déterminant sur la longueur de contact. D'une part, en l'absence de déformation élastique, la longueur de contact est approximativement en $\sqrt{R \cdot \Delta h}$ (R est le rayon des cylindres de travail et Δh est la réduction de l'épaisseur de la tôle). La force de laminage croît donc mécaniquement au moins comme \sqrt{R} . D'autre part, l'aplatissement des cylindres, fonction de la force de laminage elle-même fonction croissante de la longueur de contact, amplifie encore cet effet. C'est ainsi qu'on peut mettre en évidence, en laminage à froid, l'influence considérable du diamètre sur l'énergie consommée lors du laminage (c'est-à-dire sur le couple de laminage), ainsi que sur la qualité du produit laminé (en particulier sur la planéité). Les études théoriques montrent que la pression de contact dans cette zone et l'effort de laminage sont de plus en plus faibles quand le

rayon des cylindres de travail diminue. Il en va de même pour le couple, du fait d'un moindre travail dissipé par le frottement, ce qui va dans le sens d'une économie d'énergie. D'autre part, l'élargissement, non souhaitable, de la tôle est plus faible quand les cylindres de travail sont de faible rayon. Toutefois, minimiser ces diamètres doit respecter les limites technologiques acceptables.

Les avantages apportés par la réduction des diamètres des cylindres de travail font partie des raisons, parmi d'autres, pour lesquelles les laminoirs *Sexto* et *Sendzimir*, respectivement à 6 et à 20 cylindres, ont été inventés et utilisés par un certain nombre de groupes industriels. En revanche, les laminoirs *Quarto* se sont imposés par leur simplicité comme laminoirs courants pour le laminage à froid [7].

1.3.3 Cylindres d'appui

Les cylindres de travail de faible diamètre sont susceptibles de fléchir, ce qui incite à l'utilisation des cylindres d'appui. Ces cylindres d'appui sont généralement de rayon plus grand que celui des cylindres de travail qu'ils soutiennent, afin d'être suffisamment rigides pour empêcher leur flexion. Cela minimise l'hétérogénéité de la réduction d'épaisseur et de la répartition de l'effort du laminage dans la largeur du produit dans l'emprise, et permet de limiter les défauts de planéité (cf. §1.2). Enfin, l'effort de laminage est une traduction de l'effort de serrage exercé sur les cylindres d'appui, à partir duquel la planéité du produit sera contrôlée.

1.3.4 Bombé thermique

L'échauffement des cylindres de travail lors du laminage, qui a plusieurs origines (déformation plastique de la tôle, frottement, ...), induit une expansion thermique des outils. Cette expansion est la plupart du temps hétérogène dans l'emprise, en particulier dans le sens transversal de la table, suivant lequel un gradient thermique est souvent observé. Cet échauffement est contrôlé par un système d'arrosage des cylindres et de la bande à raison de plusieurs dizaines de mètres cubes par minute [21]. En effet, si cet échauffement n'était pas absorbé par l'arrosage, les températures du produit et de l'outil pourraient atteindre ou dépasser les 200°C, ce qui poserait des problèmes de planéité impossibles à gérer pour deux causes principales :

- bombé thermique excessif des cylindres ;
- forts gradients de contraintes internes d'origine thermique dans le produit, cause supplémentaire de flambage.

1.3.5 Bombé tôle

Dès le laminage à chaud, dans la partie centrale sous l'emprise (au centre de la brame), les forces latérales de frottement s'opposent à l'écoulement transverse de la matière. Cet effet dû au frottement devient de plus en plus limité vers les rives, ce qui facilite la déformation latérale de la tôle laminée dans ces zones. De ce fait, la composante d'aplatissement de la déformation des cylindres de travail (cf. § 1.2.1) devient de moins en moins importante en rive, là où la déformation plastique est plus facile qu'au centre, d'où le bombé tôle. Cet aplatissement et la flexion des cylindres de travail conduisent à l'hétérogénéité transverse de l'épaisseur de la brame, qui est généralement plus épaisse au centre qu'aux bords. Le bombé tôle n'est pas considéré comme un défaut géométrique en soi, mais s'il est excessif, il joue un rôle déterminant dans la génération des défauts de planéité [22]. Le produit livré doit aussi respecter des tolérances en bombé (ou défaut de profil), pour des questions d'utilisation sur les lignes de mise en forme ultérieure.

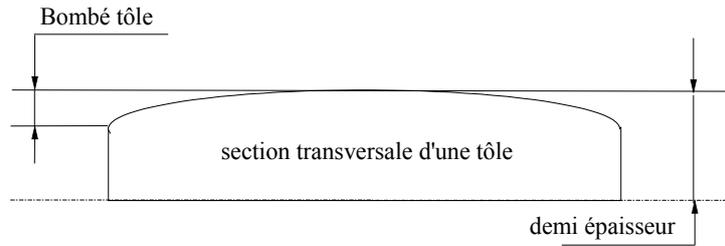


Figure 1-19. Représentation simplifiée d'une coupe transversale d'une tôle présentant un bombé : « bombé tôle ».

Remarque 4 :

La plupart du temps, la diminution de l'épaisseur est plus importante en rives : « chute en rive ». Ce mécanisme est nettement plus faible en laminage à froid, où l'épaisseur devient très petite par rapport à la largeur. En revanche, le « bombé tôle » reste conservé et omniprésent depuis le laminage à chaud, malgré les techniques adoptées afin de le limiter. Parmi ces techniques, on distingue le « bombé cylindre » (cf. § 1.3.6) qui a pour but de compenser le « bombé tôle ».

1.3.6 Bombé cylindre

Le « bombé cylindre » décrit la variation du diamètre d'un cylindre entre le centre et les extrémités de celui-ci. Il est de l'ordre de quelques centièmes de millimètres et il constitue une pré-compensation de la flexion globale de la cage. Le « bombé cylindre », en particulier le bombé des cylindres de travail, est une alternative déterminante pour contrôler la planéité du produit. En fait, les bombés de rectification des cylindres d'un tandem à froid (de forme parabolique) sont généralement dimensionnés pour pouvoir viser une planéité en léger centre long en première et dernière cage. Cela permet l'auto-centrage de la bande dans le laminoir. Sur les cages intermédiaires, une planéité en bords longs est plutôt visée pour limiter les ruptures de bandes, car sur un train tandem, les niveaux de traction sont très élevés sur les cages intermédiaires. A la sortie des tandems, la traction est beaucoup moins élevée (traction bobineuse), là où généralement des rives tendues sont souhaitées.

Le bombé nécessaire pour obtenir in fine une tôle plane varie en fonction du processus et des conditions de laminage. Par exemple, une cage *Quarto* fléchit de manière très différente d'une largeur du produit laminé à une autre : idéalement, des gammes de bombés différents doivent être utilisés. Néanmoins, pour des raisons de productivité (changements de cylindres moins fréquents) de plus en plus de tandems utilisent un unique bombé de rectification sur le cylindre de travail, quelle que soit la largeur du produit laminé. Mais cette pratique se fait au détriment de la qualité du produit.

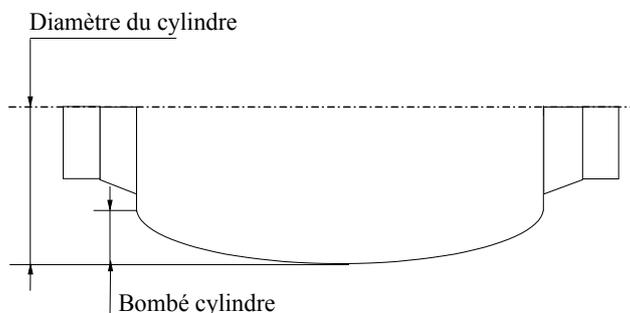


Figure 1-20. Schéma représentatif d'un cylindre d'un laminoir présentant un bombé : « bombé cylindre ».

1.3.7 Serrage et équilibrage des cylindres

Le système de serrage applique des efforts sur les empoises d'appui qui, par les roulements, les transmettent aux cylindres d'appui (appelés aussi de soutien). C'est à partir de la régulation de ces efforts de serrage que l'épaisseur désirée du produit en sortie de cage est assurée. D'autre part, le poids des cylindres supérieurs (d'appui et de travail) est supporté en l'absence de bande par les forces d'équilibrage appliquées entre les empoises des deux cylindres de travail. Sous charge, les actionneurs « WORB » (Work Roll Bending) ou d'équilibrage s'opposent à la flexion des cylindres de travail. Par ailleurs, au cours du laminage, les lamineurs utilisent les « actionneurs FOX » ou de cambrage, qui sont des vérins situés entre les empoises des cylindres d'appui et des cylindres de travail, afin de modifier la flexion de ces derniers. De cette manière, ils modifient la répartition transversale de l'effort de laminage. Ainsi, ces deux types d'effort (cambrage - équilibrage) sont utilisés pour modifier certaines conditions de laminage tels que les profils géométriques des cylindres dans l'emprise, qui agissent considérablement sur la planéité du produit. Ces actionneurs permettent de corriger les défauts simples de bords longs ou de centres longs symétriques (cf. § 1.2.2). Par opposition à l'actionneur « figé » qu'est le bombé de rectification des cylindres présenté en § 1.3.6, l'adaptabilité de ces actionneurs est utilisée pour corriger d'une part les variations de flexion des cylindres liées aux variations des conditions de laminage d'une bobine à la suivante (force de laminage, liée à la variation de largeur, d'épaisseur et de dureté produit...), d'autre part pour compenser les perturbations de la planéité en cours de laminage d'une même bobine (variations intra-bobine de la dureté, du profil d'épaisseur entrante en sens travers ...).

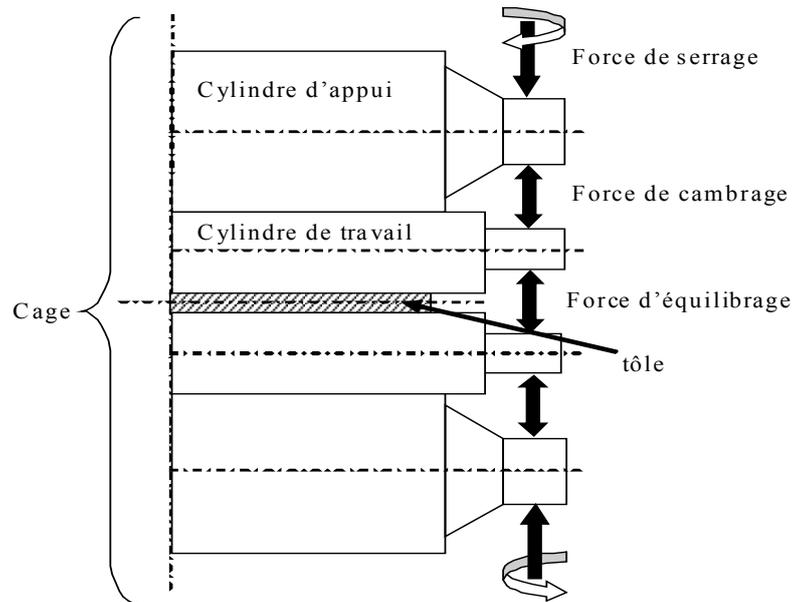


Figure 1-21. Illustration simplifiée des différents efforts mis en jeu et exercés par les actionneurs au cours du procédé de laminage.

1.3.8 Traction en laminage

Les niveaux de traction couramment utilisés en laminage sont toujours nettement inférieurs à la limite élastique de l'alliage. Néanmoins, pour un laminoir de grande largeur, ceci conduit à des efforts considérables. La traction dépend de la nature de l'alliage, de la largeur et de l'épaisseur de la pièce laminée, etc...

Un premier effet important des tractions est leur action sur la ligne neutre. A l'entrée de l'emprise, la vitesse périphérique des cylindres de travail est plus importante que celle de la bande. Or, du fait de la réduction de l'épaisseur dans l'emprise, l'augmentation de la vitesse de la bande, par le principe de la conservation du débit de matière, inverse cette tendance. Ainsi, la vitesse relative de la bande par rapport à la vitesse périphérique des cylindres, passe d'une valeur négative à une valeur positive de l'amont vers l'aval. Par conséquent, cette vitesse relative (glissement) s'annule quelque part sous l'emprise, le long d'une « ligne neutre » (cf. figure 1-22). La position de cette ligne neutre est fortement sensible à la traction de laminage imposée de part et d'autre de l'emprise : elle est de plus en plus amenée vers l'amont si la bande est plus tirée en

aval, et vice versa. Un déséquilibre important entre les deux efforts de traction amont et aval peut provoquer un déplacement considérable de la ligne neutre. Si c'est la traction amont qui est trop forte, elle peut faire sortir la ligne neutre de l'emprise côté sortie, ce qui signifie une perte d'entraînement de la bande par les cylindres de travail : c'est ce que l'on appelle le patinage, qui se traduit souvent par une dégradation du contrôle de l'épaisseur et autres paramètres de laminage, d'où la détérioration du produit.

Les tractions permettent d'autre part de diminuer les pressions de contact et les forces de laminage. On peut expliquer ce phénomène par le fait que les tractions imposées en amont et en aval d'une cage sont transmises sous l'emprise, où elles vont intervenir dans le mécanisme de l'écrasement plastique de la bande (cf. figure 1-22). En effet, pression de contact et traction sont deux composantes de contrainte, qui collaborent via le critère de plasticité pour assurer la déformation plastique: une augmentation de l'un des efforts de traction s'accompagne d'une diminution de la pression des cylindres. Une des conséquences est la diminution des efforts de frottement. Cela explique l'intérêt de laminier sous traction pour minimiser les efforts de laminage, ce qui permet de :

- diminuer les pertes d'énergie dues aux efforts de frottement (cf. 1.3.2) ;
- minimiser les déformations de la cage par l'effet du soulagement des efforts de serrage, ce qui permet de mieux profiter des avantages des cylindres de travail à faible diamètre (cf. 1.3.2).

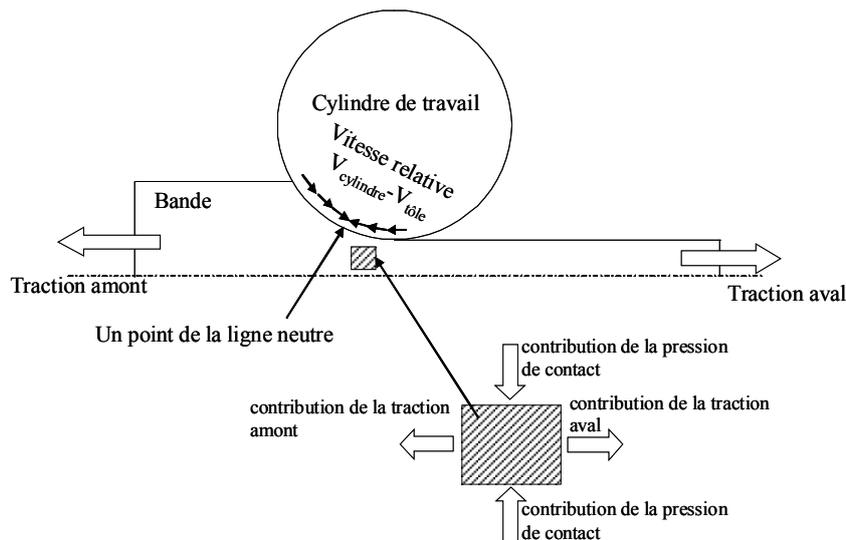


Figure 1-22. Représentation de la ligne neutre dans l'emprise, ainsi que les contributions de la pression de contact et des efforts de laminage à la déformation plastique du matériau dans l'emprise.

Remarque 5 :

1- La traction à chaque intercage aide aussi à transmettre une puissance disponible d'une cage vers une autre.

2- La traction efface les défauts géométriques de la bande (ondulations, frisettes, etc...) engendrés par le flambage (cf. § 1.2.2), ce qui permet de régulariser le débit de la matière entre deux cages successives. Cela permet également de maintenir la bande tendue afin de :

- Présenter à l'entrée d'une cage une bande plate qui ne plisse pas, surtout dans les cas de fortes réductions.
- Maintenir la bande le plus plat possible à la sortie des cylindres pour des mesures correctes de l'épaisseur.