

I.1 Mise en forme des métaux et alliages

I.1.1 Introduction

Les lingots métalliques obtenus par coulée du métal liquide peuvent être déformé directement sans enlèvement de matière sous forme de produits dont les cotes sont bien définies. Les opérations de mise en forme se font par déformation plastique.

Les principales opérations sont le forgeage, le laminage, le filage, le tréfilage, l'emboutissage. Elles peuvent être faites à froid ou à chaud, suivant la nature du matériau utilisé. Elles ont pour effet de provoquer dans le métal la formation d'une texture dont les caractéristiques dépendent de la température de l'opération et qui peut s'accompagner de phénomènes de recristallisation quand la déformation a été conduite à une température suffisamment élevée.[1]

I.1.2 Essais de forgeage

C'est l'opération qui consiste à déformer un lingot en exerçant sur le métal chaud des efforts de pression et de percussion. Le métal est dit corroyer. On utilise à cet effet des outils qui peuvent être le marteau, pour les pièces de petites dimensions, le marteau-pilon de plusieurs dizaines de tonnes, ou la presse de plusieurs milliers de tonnes pour les lingots pesant quelques tonnes ou dizaines de tonnes.

Les pièces mises en forme par forgeage présentent une texture bien définie, donc des caractéristiques mécaniques précises. Le forgeage des lingots provoque une homogénéisation par effet mécanique (écrasement de la structure dendritique) et par effet thermique (diffusion) [1]

I.1.3 Le Laminage

C'est l'opération qui consiste à déformer un métal en le faisant passer entre deux cylindres dont l'écartement est inférieur à l'épaisseur initiale. Elle peut être exécutée à froid ou à chaud. Les deux cylindres du laminoir tournent dans des sens opposés. Les frottements qui prennent naissance entre le lingot et les cylindres forcent celui-là à avancer (figure 1). Pour préparer des produits plats, on utilise des cylindres à génératrice rectiligne. Pour obtenir des produits présentant des formes particulières, on emploie des cylindres à cannelures.

La réduction d'épaisseur du lingot s'obtient de façon discontinue par passes successives dans le même laminoir dont l'écartement des cylindres est progressivement diminué, en continu en utilisant des laminoirs placés en série. Le taux de réduction que l'on peut obtenir à chaque passe dépend de la nature du métal et de la température à laquelle l'opération est effectuée.

Le laminage à froid a pour effet d'augmenter la limite élastique, la résistance à la rupture et la dureté, et diminuer l'allongement du métal. Lorsque l'on veut rendre au métal ses caractéristiques mécaniques, on le soumet à un recuit à une température qui dépend de la valeur des caractéristiques désirées. Au cours du laminage, la déformation du métal se fait essentiellement dans le sens du déplacement du lingot dont la longueur augmente à chaque passe. Cependant, il se produit également un léger élargissement du lingot. Cet élargissement dépend d'un certain nombre de facteurs comme l'épaisseur initiale du lingot, de la réduction d'épaisseur provoquée par chaque passe, du diamètre des cylindres, de la température et aussi de la nature du métal. [1]

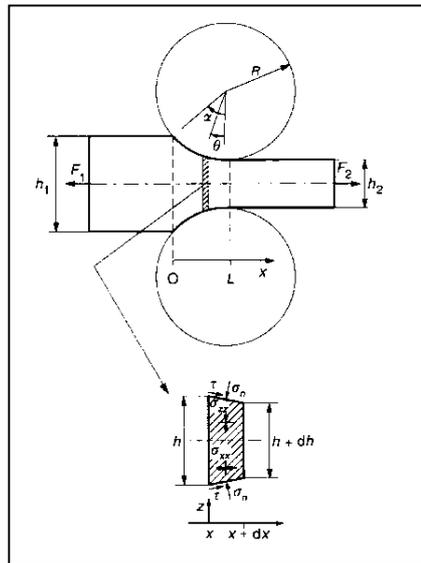


Figure 1 : principe de laminage [2]

I.1.4 Emboutissage

C'est l'opération qui consiste à transformer une tôle plane en une surface non développable. Dans la pratique, l'emboutissage d'un flan se fait à l'aide d'un poinçon, d'une matrice et d'un serre-flan.

Le métal présente deux zones de déformation :

- Une expansion dans la zone de contact avec le poinçon
- Un rétreint dans la zone située sous le serre-flan.

L'emboutissage peut être effectué à froid ou à chaud. Cette technique permet d'obtenir des pièces de forme très variées et une production importante en peu de temps. Pour certaines opérations, l'emboutissage s'accompagne d'un tréfilage, par exemple pour la préparation de douilles d'obus. Il ne permet pas d'obtenir des angles vifs ni des pièces peu déformées. En effet, la déformation élastique est alors très grande par rapport à la déformation totale.

Par emboutissage à chaud, à une température supérieure à la température de recristallisation, la pièce obtenue n'est pas écrouie. Par contre, lorsque l'emboutissage est effectué à froid, le métal est écroui, donc sa limite élastique et sa résistance à la rupture augmente alors que sa capacité à l'allongement diminue.

Les contraintes qui prennent naissance sont complexes et le métal déformé peut être très anisotrope. De nombreux métaux et alliages peuvent être déformés par emboutissage. Il est quelquefois indispensable de procéder à un recuit entre chaque passe pour obtenir une déformation suffisante. Une partie de l'énergie dépensée est absorbée par le frottement de la tôle sur l'appareil. L'utilisation d'un lubrifiant permet de diminuer cette perte d'énergie.

Le coefficient d'anisotropie d'un métal $r = \epsilon_1/\epsilon_2$ où ϵ_1 et ϵ_2 sont respectivement les déformations rationnelles principales en largeur et en épaisseur obtenues par les essais de traction, caractérise l'aptitude du métal à se déformer en rétreint. Le coefficient d'écrouissage η caractérise

L'aptitude du métal à se déformer en expansion. Il est obtenu à partir de la courbe rationnelle de traction : $\sigma = k \epsilon^n$. [1]

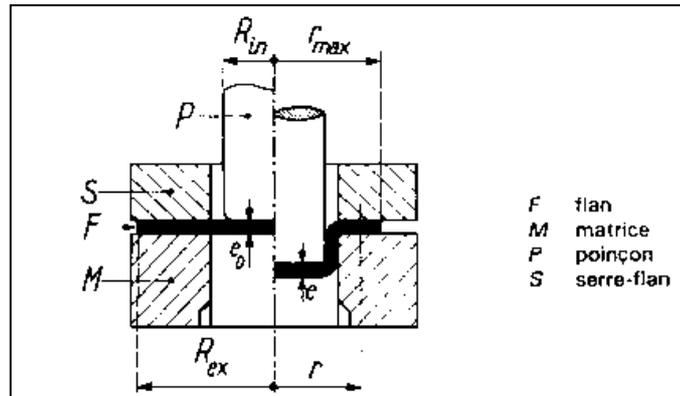


Figure 2 : principe d'emboutissage [2]

I.1.5 Le tréfilage

Depuis quelques années déjà du modèle simple faisant intervenir les théories de la plasticité ont permis de choisir, pour un matériau donné, la meilleure compromise usure/débit d'une filière. Les notions de seuil de déformabilité sont rapidement apparues delà desquels la rupture semble inéluctable et figeant ainsi les paramètres de tréfilage [3] [4].

Le tréfilage permet d'obtenir une pièce cylindrique en forçant son passage dans une filière (figure3). Le métal s'allonge et sa section se réduit : on dit qu'il file. La filière forme un cône de demi angle au sommet appelé angle de filière. Du fait de la symétrie axiale du procédé, la déformation est dite axisymétrique.

Le taux de déformation par tréfilage est défini par la relation suivante :

$$\varepsilon \% = (S_i - S_f / S_i) \times 100$$

Ou S_i et S_f sont respectivement les valeurs des sections initiales et finales du fil.

Le tréfilage en tant que procédé de mise en forme d'un matériau donné, est caractérisé par différents paramètres : le choix des paramètres de tréfilage garantissant un minimum d'énergie de déformation, c'est-à-dire quel angle de filière, taux de réduction, vitesse de tréfilage et lubrifiant

choisir pour minimiser l'effort de traction et l'usure de la filière, et également par la structure et les propriétés du matériau qui déterminent sa capacité à subir une déformation élevée en tréfilage [5].

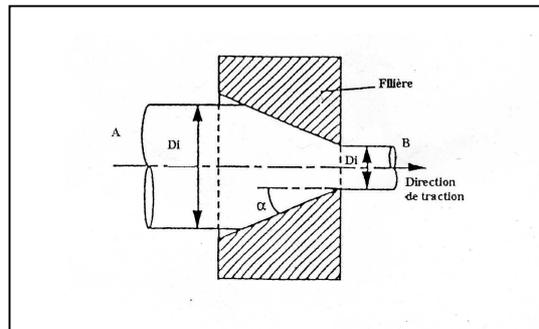


Figure 3 : principe de tréfilage

I.2 Les traitements thermomécaniques (TTM) :

I.2.1 Définition

On peut définir simplement ces traitements comme des procédés permettant de rechercher la meilleure combinaison des mécanismes structuraux mis en jeu par la déformation à chaud (consolidation, restauration, recristallisation, précipitation) et la transformation allotropique, afin d'obtenir des propriétés mécaniques améliorées pour un acier donné, comparativement aux caractéristiques obtenues sur la même nuance par les méthodes classiques de laminage et de traitements thermiques postérieurs au laminage [6] [9].

D'une manière générale, tout traitement thermomécanique peut être décomposé en 4 ou 5 grandes étapes (figure 4). La matière à mettre en forme (billettes, tôles...) est tout d'abord réchauffée à une température fixée pendant un temps imposé par les impératifs de la production ou les buts métallurgiques visés. Elle est ensuite transférée du four de réchauffage à l'outil de mise en forme : laminoir, pilon de forge... Pendant ce transfert, le refroidissement peut être naturel ou accéléré, selon la microstructure sur laquelle la déformation doit être imposée pour conduire aux résultats escomptés. Les opérations de mise en forme sont alors réalisées dans des conditions de température, de vitesse et de sévérité de taux de déformation déterminées par les buts poursuivis. Après mise en forme, la pièce finie est soumise à un refroidissement apte à lui conférer la microstructure souhaitée, éventuellement suivi d'un traitement thermique ou mécanique final.

À titre d'exemples, et en se reportant à l'organigramme de la figure 4, les quelques traitements thermomécaniques (TTM) suivants peuvent être décrits succinctement :

- **Le laminage contrôlé**: qui comporte une déformation de l'austénite stable suivie d'un refroidissement naturel à l'air ; il correspond donc à la trajectoire (1)-(3) (figure 4).

- **Le traitement thermomécanique à haute température (TTMHT)** : qui se distingue du laminage contrôlé par le refroidissement final accéléré, permettant de conférer à l'acier une structure martensitique ou bainitique, auquel on ajoute un traitement de revenu à basse température ; il correspond ainsi à la trajectoire (1)-(4) .

- **Le traitement d'austénitiformage**: qui est constitué d'une déformation de l'austénite métastable, avec transformation partielle éventuelle, suivie d'une trempe avant toute recristallisation ; il est généralement complété d'un revenu, et correspond donc à la trajectoire (2)-(4), également applicable au traitement thermomécanique des aciers TRIP (*transformation induced by plasticity*), dont la déformation finale à froid induit une transformation martensitique conférant au matériau une très bonne ductilité lors de son utilisation.

- **Les traitements d'isoformage ou de perlitoformage** : qui consistent à déformer une structure ferrite-perlite formée par trempe isotherme (ou refroidissement continu) et à imposer un revenu au produit fini ; ils correspondent donc à la trajectoire (2)-(3) à laquelle s'ajoute le revenu final.

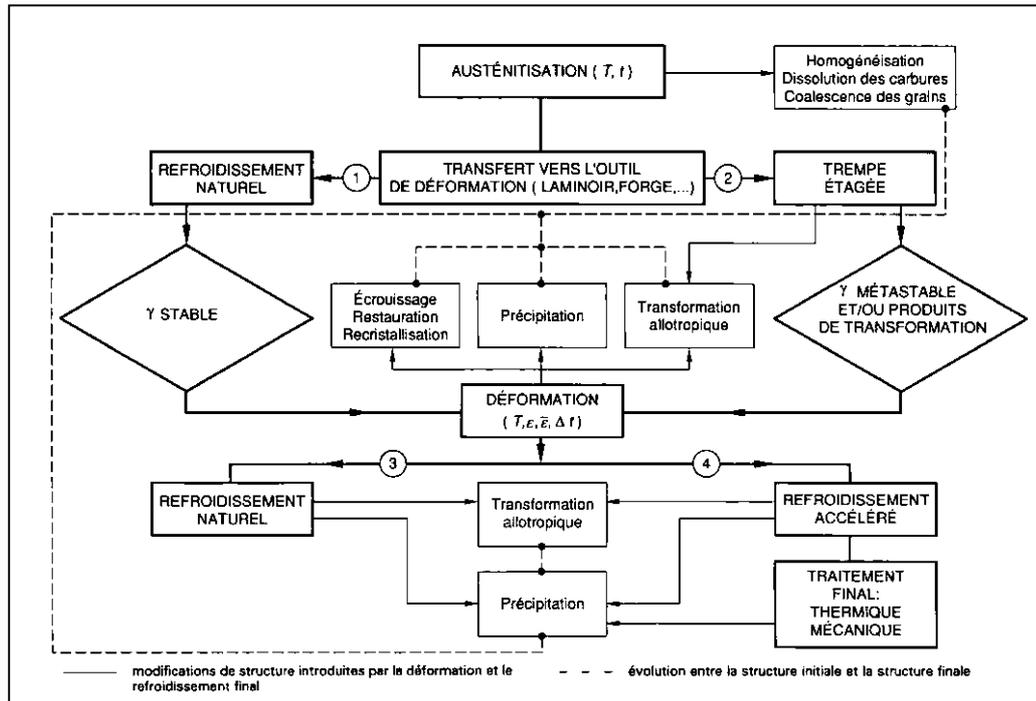


Figure 4 : Différentes étapes du traitement thermomécanique [6]

I.2.2 Classification :

Les nombreux TTM existants peuvent être classés en trois grands groupes selon que la déformation qu'ils font intervenir est imposée au métal avant la transformation allotropique, pendant celle-ci ou aux produits de transformation. Les trois grandes classes ainsi définies peuvent encore être subdivisées pour tenir compte de l'état structural de la phase métallique subissant la déformation. Le tableau 1 illustre cette classification en rappelant le schéma de principe des principaux traitements thermomécaniques ainsi que les nuances d'aciers auxquelles ils peuvent être appliqués. Les commentaires suivants peuvent être formulés pour chacune des classes de TTM précédemment définies.

I.2.2.1 Traitements thermomécaniques avant un changement de phase

Ceux qui ont fait l'objet d'études détaillées peuvent être classés en distinguant successivement les traitements à hautes et à basses températures. Dans les traitements thermomécaniques à haute température (TTMHT) (température comprise entre 800 et 1200°C), conduisant après transformation et écrouissage à une phase austénitique stable, les phénomènes de restauration ou de recristallisation

sont importants. On distingue souvent le laminage contrôlé du laminage à tiède ou *hot-cold rolling*. Dans ce dernier, la déformation est effectuée à haute température (au-dessus de A_3) et on cherche à « bloquer » la structure introduite au cours de la déformation par une trempe rapide. Dans le laminage contrôlé, on impose un cycle précis de températures de déformation et d'écrouissage lors des dernières passes, la dernière passe de laminage étant toujours effectuée au voisinage du point de transformation $\gamma \rightarrow \alpha$ (au-dessus ou au-dessous).

Dans les traitements thermomécaniques à basse température (TTMBT) (température inférieure à A_{c3}), conduisant après transformation et écrouissage à une phase austénitique métastable, le TTM qui a été le plus étudié est certainement l'**austénitoformage**, appelé encore *ausforming* dans la littérature anglo-saxonne, pour lequel la déformation est effectuée dans le domaine de l'austénite métastable.

1.2.2.2 Traitements thermomécaniques en cours de changement de phase:

En se référant aux phases qui apparaissent au cours d'un maintien isotherme ou d'une trempe, on peut distinguer deux types de traitement.

Isoformage

Ce traitement qui consiste à effectuer la déformation dans le domaine des températures où s'effectue la transformation austénite-ferrite proeutectoïde et perlite est encore appelé dans la littérature anglo-saxonne *isoforming*. Il permet d'obtenir une répartition fine de carbures de fer Fe_3C dans une matrice ferritique finement polygonisée, conduisant à d'excellentes propriétés de traction et de résistance aux chocs pour des aciers se transformant normalement en ferrite et perlite.

Le marformage

Ce traitement, correspondant à une déformation à basse température, voisine de M_s , est bien connu dans l'utilisation des aciers inoxydables austénitiques. En effet, il est possible de relever le point M_s correspondant à la transformation austénite-martensite en appliquant une contrainte. La transformation martensitique ainsi induite par déformation permet d'obtenir des limites d'élasticité importantes tout en conservant une ductilité appréciable. Diverses dénominations sont utilisées dans la littérature anglosaxonne pour ce traitement comme *zerolling* ou *marworking*.

1.2.2.3 Traitements thermomécaniques après un changement de phase :

Le traitement de perlitoformage consiste à déformer une structure ferrite-perlite à une température correspondant au domaine de formation de cette structure, avec ou sans refroidissement intermédiaire. La déformation est suivie d'un recuit au-dessous de Ac1.

La déformation permet d'accélérer la vitesse de globularisation de la cémentite et d'obtenir des structures adoucies et malléables plus rapidement que par traitement thermique de recuit. Son champ d'application est celui des aciers destinés à la frappe à froid. Le traitement qui consiste à déformer la martensite avant revenu, que l'on appelle *marstraining*, permet également d'atteindre des durcissements importants.

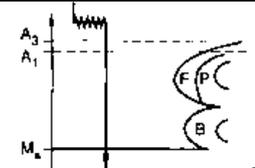
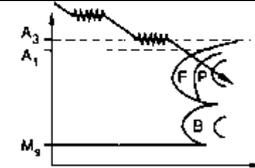
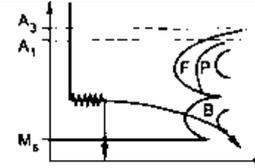
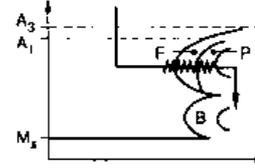
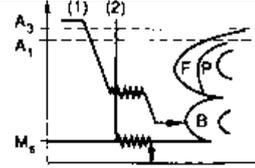
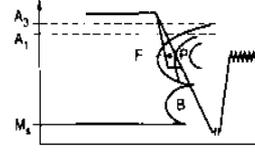
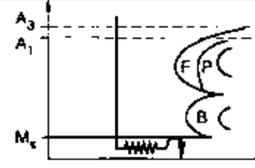
Moment de la déformation par rapport à la transformation de l'austénite	Type	Température de déformation	Produit sur lequel s'effectue la déformation	Dénomination	Schéma du traitement	Aciers concernés	
Avant	I	Ia	au-dessus de A ₃	Austénite stable	TTMHT		Tous
					Laminage contrôlé		Aciers de construction métallique
		Ib	au-dessous de A ₃	Austénite métastable	TTMBT Austénitoformage		Aciers faiblement ou fortement alliés
pendant	II	IIa	entre A ₁ et M _s	Austénite et ferrite-perlite ou perlite	Isoformage		Aciers à transformation perlitique
		IIb	proche de M _s	Austénite et martensite	Marformage : — traitement des aciers TRIP (1) — zerolling (2)		Aciers austénitiques et semi-austénitiques
Après	III	IIIa	au-dessus de M _s	Ferrite-perlite	Perlitoformage		Aciers à transformation perlitique
		IIIb	au-dessous de M _s	Martensite	Marstraining		Aciers à structure martensitique

Tableau 1 : Différentes classes de traitements thermomécaniques [6]

(1) TRIP: transformation induced plasticity. (2) Marformage

I.2.3 Commentaires bibliographiques

Tous les auteurs s'accordent pour dire que les TTMHT donnent un gain appréciable des propriétés lorsque la température de la (ou des) déformation(s) est basse (voisine de A_{c3}), lorsque le maintien entre la fin de la dernière déformation et le début du refroidissement est court, et que la vitesse de refroidissement est rapide. On peut ajouter qu'une grande vitesse de déformation est favorable. Ces conditions rappellent les problèmes d'écroissage et de recristallisation après déformation à haute température.

L'état structural de l'austénite est très important puisque l'on assiste à une compétition entre l'écroissage et la recristallisation. Tous les artifices préconisés visent à obtenir un état structural de l'austénite qui est le plus à même de fournir de bonnes propriétés après une transformation sans diffusion (martensite) ou après une transformation avec diffusion (ferrite-cémentite). Pour cette raison, il n'y a pas unanimité sur l'importance de la déformation idéale. En effet, ce paramètre est lié à tous les autres par le biais des recristallisations statique et dynamique.

En général, tous les facteurs qui conduisent à une structure austénitique modifiée par écroissage sont favorables, pour peu que cet état reste suffisamment stable dans le temps vis-à-vis des cinétiques de recristallisation, pour que la transformation ait lieu sur cette austénite différente de celle que l'on obtiendrait dans le traitement thermique de référence. C'est pourquoi, dans le cas du laminage contrôlé (ferrite-cémentite), on peut compenser la faible vitesse de refroidissement en écroissant un peu avant A_{r3} (température à laquelle l'austénite commence à se transformer en ferrite au refroidissement).

Enfin, concernant la relation entre les TTM des types Ia et Ib, l'accroissement de résistance mécanique obtenu par les TTMHT n'est pas aussi important que celui obtenu avec un procédé comme l'austénitoformage.

Les figures 5 et 6 montrent qu'un traitement thermomécanique de type austénitoformage (*ausforming*) permet d'obtenir, par l'intermédiaire d'une diminution de la température de laminage et d'une augmentation du taux de déformation, un accroissement simultané de la limite d'élasticité et de la résistance mécanique à la rupture d'aciers, sans détérioration importante de leur ductilité.

Les développements suivants sont axés sur le traitement thermomécanique dans le domaine de l'austénite métastable, type austénitiformage, avec étude de l'influence des paramètres de ce TTM et des facteurs à l'origine du durcissement par austénitiformage.

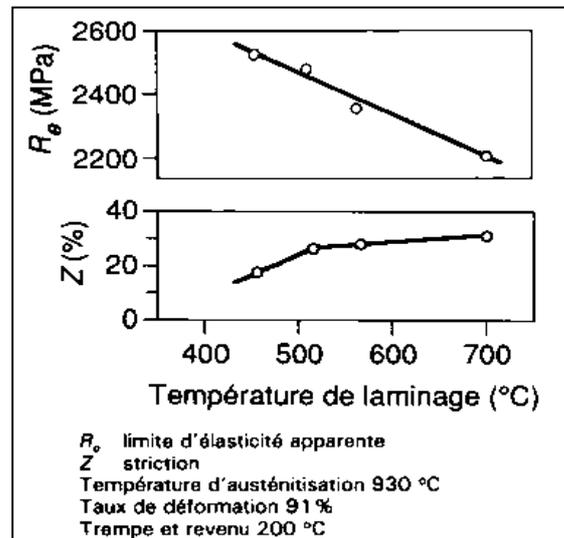


Figure 5 : Effet de la température de laminage sur la limite d'élasticité et la striction d'un acier à 0,44 % C - 3,0 % Cr - 1,5 % Ni [9]

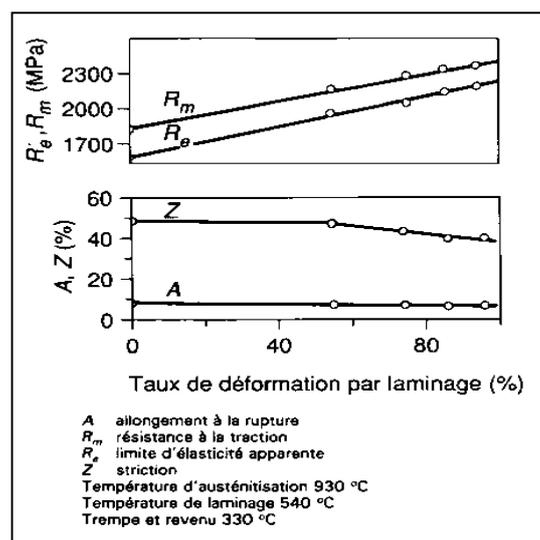


Figure 6 : Effet du taux de déformation par laminage sur les propriétés mécaniques de traction d'un acier à 0,31 % C - 3,0 % Cr - 1,5 % Ni [9]

I.3 Exemples d'études :

I.3.1 Traitement thermomécanique du laminage à température contrôlée

I.3.1.1 Optimisation du laminage des aciers de construction C-Mn-Nb

L'acier C-Mn-Nb utilisé a la composition chimique dans le tableau suivante:

C	MN	SI	AL	N	NB
0.1	1.250	0.2	0.03	0.0106	0.027

Suivant les conditions de laminage, la limite d'élasticité varie de 380 à 500 MPa et TK50 % de 75°C à 125°C.

La figure 7 montre de façon synthétique le résultat de cette optimisation :

- température de réchauffage : $T_\gamma = 1\ 150^\circ\text{C}$.
- température de fin de laminage : $\text{TFL} = 820^\circ\text{C}$.
- vitesse de refroidissement : $V_R = 10^\circ\text{C/s}$.
- température de bobinage : $T_B = 550^\circ\text{C}$.
- limite d'élasticité : $R_e = 490\ \text{MPa}$; $\text{TK}_{50\ \%} = -120^\circ\text{C}$.

Par rapport au cas de l'acier C-Mn, il faut prendre en compte la précipitation des carbonitrides de niobium qui accroît la limite d'élasticité mais dégrade la résilience, en particulier lorsque les précipités sont très fins.

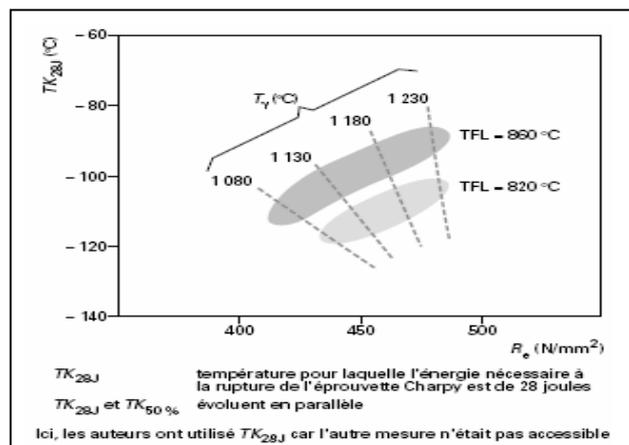


Figure 7 : Compromis résistance-résilience de l'acier C-Mn-Nb

I.3.1.1.1 Température de réchauffage

En abaissant la température de laminage, on limite la remise en solution des précipités Nb(C, N) et, par conséquent, le durcissement par le niobium à l'état final. Cette perte de durcissement n'est pas compensée par l'affinement du grain austénitique. En revanche, cela permet d'accroître les caractéristiques de résilience. Le choix de 1 150°C est le résultat d'un compromis.

I.3.1.1.2 Température de laminage

L'optimisation correspond à la limite du point de transformation Ar₃ car, si la limite d'élasticité continue d'augmenter quand on termine le laminage dans le domaine intercritique, la résilience est, quant à elle, fortement dégradée.

I.3.1.1.3 Vitesse de refroidissement et température de bobinage

Au-delà de 5°C/s, l'augmentation de la vitesse de refroidissement ne modifie plus les caractéristiques mécaniques de l'acier considéré. Il en est de même en ce qui concerne la température de bobinage dont l'effet en deçà de 600°C est très limité. Nous venons de voir l'importance relative des principaux paramètres thermomécaniques en fonction de la nature de l'acier, microallié ou non. Le fait remarquable est que, pour une même analyse chimique, les caractéristiques de résistance et de résilience obtenues varient dans des plages considérables. Cela démontre l'intérêt des traitements thermomécaniques au train à bandes [15].

I.3.2 Traitement thermomécanique d'austinoformage

I.3.2.1 Préambule

En 1954 est publiée la description d'un nouveau procédé de durcissement par traitement thermomécanique [10] au cours duquel la déformation se réalise au-dessous de la température de recristallisation, et cela d'autant plus que le domaine d'existence de l'austénite métastable est important et que la température de déformation peut être atteinte sans formation appréciable de ferrite.

Pour un acier type nickel-chrome (4,5 % Ni, 1,5 % Cr, 0,35 % C) qui présente ordinairement, par traitement conventionnel, les propriétés mécaniques suivantes :

✓ dureté Rockwell C	56,5
✓ limite d'élasticité	2 032 MPa
✓ allongement	2 %
✓ striction	5 %

L'application du TTM précédemment défini conduit à leur amélioration comme suit :

✓ dureté Rockwell C	58
✓ limite d'élasticité	2 756 MPa
✓ allongement	12 %
✓ striction	42 %

1.3.2.2 Amélioration des propriétés mécaniques par austénitiformage

Les résultats de la littérature sont très nombreux. Ce traitement thermomécanique a été appliqué à une gamme très large d'aciers, et son influence a été mesurée sur l'ensemble des propriétés mécaniques [8].

Les aciers à hautes caractéristiques ont la meilleure réponse au traitement. Le gain sur la limite d'élasticité et sur la résistance à la traction est de 30 % environ. La ductilité est conservée le plus souvent. Les propriétés de résilience et de résistance à la propagation de fissures sont largement améliorées. Les conditions de traitement varient d'un auteur à l'autre, mais les résultats sont néanmoins directement comparables.

1.3.3 influence des paramètres du traitement d'austinoformage

1.3.3.1 l'influence de la composition chimique d'austinoformage

L'austénitiformage n'est applicable qu'aux aciers dont le diagramme TTT (figure 8) répond aux conditions suivantes. la courbe de début de transformation perlitique est repoussée à droite du diagramme la courbe représentant la loi de refroidissement du métal, de la température d'austénitisation à la température de déformation, ne doit pas traverser le domaine perlitique afin d'éviter la transformation d'une partie de l'austénite en perlite. La courbe de début de transformation bainitique doit également être repoussée à droite du diagramme.

Le domaine d'austénite métastable doit être assez large pour que les variations de température au cours de la déformation (de l'ordre de 50°C en laminage) ne provoquent pas un changement de phase. Le domaine d'austénite métastable doit s'étendre vers des temps assez longs pour permettre la mise en température et la déformation du métal. Ce traitement est, par conséquent, limité aux aciers suffisamment alliés. Cependant, tous les aciers qui possèdent un diagramme TTT répondant aux conditions précédentes ne durcissent pas par austénitiformage. La présence de certains éléments d'alliage est nécessaire.

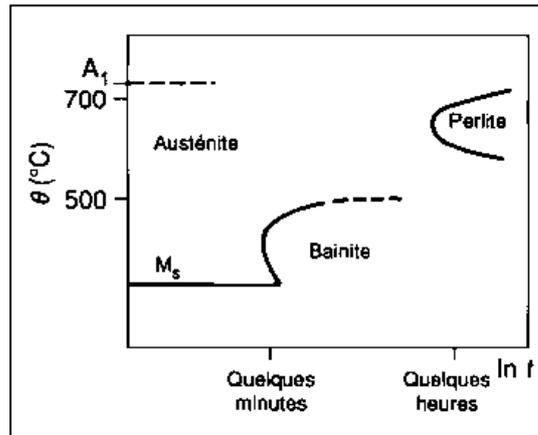


Figure 8 : Diagramme schématisé de transformation isotherme montrant une transformation perlitique avec longue durée d'incubation [7]

La figure 9 montre que le durcissement obtenu par austénitiformage est sensiblement indépendant de la teneur en carbone [11]. Aucune étude systématique n'a été entreprise pour déterminer le rôle des divers éléments d'addition, les aciers étudiés étant pour la plupart des aciers connus pour les hautes caractéristiques qu'ils permettent d'obtenir par un traitement conventionnel consistant en une trempe martensitique suivie d'un revenu. Cependant, le durcissement obtenu est d'autant plus important que la contrainte d'écoulement de l'austénite est élevée, celle-ci étant contrôlée par la teneur en éléments d'addition.

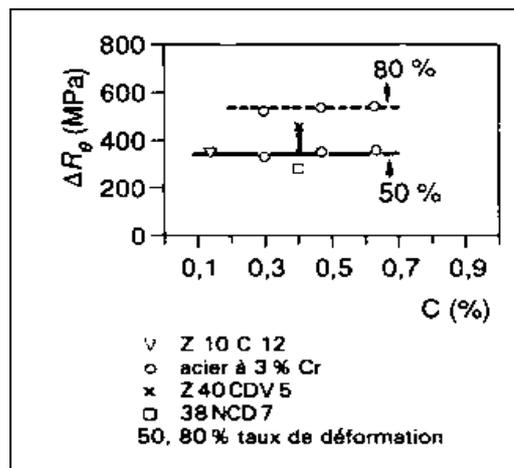


Figure 9 : Influence de la teneur en carbone sur l'augmentation de la limite d'élasticité de différents aciers par austénitiformage[11]

I.3.3.2 Influence des conditions de déformation sur le durcissement

L'étude de l'influence des différents paramètres du traitement d'austénitiformage des aciers sur leurs caractéristiques mécaniques permet de formuler les conclusions suivantes [7] [13] :

- La température et la durée d'austénitisation contrôlent la grosseur du grain austénitique et la remise en solution des carbures dans les aciers alliés ; l'influence sur le durcissement est très faible (figure 10) :

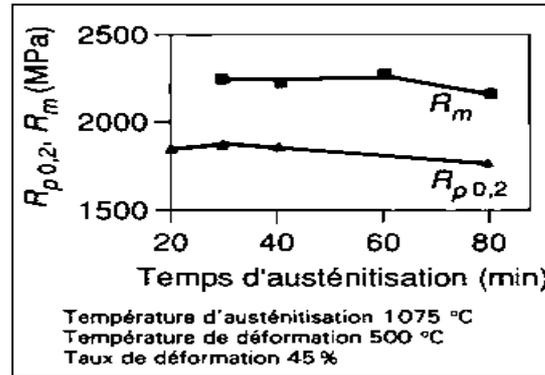


Figure 10: Influence du temps d'austénitisation sur la résistance à la traction et sur la limite d'élasticité de l'acier Z 30 C 13 [13]

- les résultats concernant la température de déformation sont contradictoires, mais, dans la mesure où la déformation a lieu sans changement de phase, on constate que la température n'a pas d'influence sensible dans le domaine compris entre 400 et 550°C (figure 11)

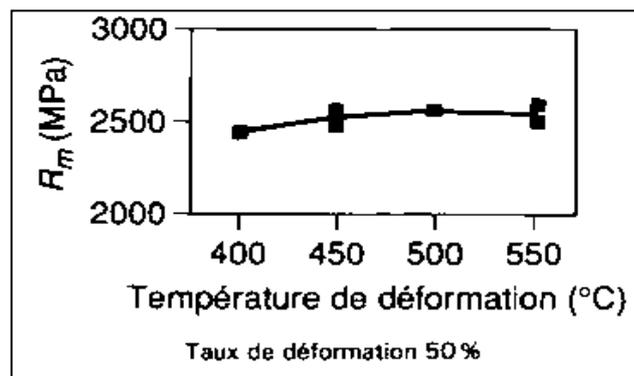


Figure 11 : Influence de la température de déformation par traction sur la résistance à la traction de l'acier Z 40 CDV 5 [13]

• Le taux de déformation est la seule variable qui contrôle essentiellement la valeur du durcissement supplémentaire apporté par la déformation en phase austénitique métastable (figure 12)

- La dureté, la limite d'élasticité, la résistance à la traction augmentent avec le taux de déformation,
- La forme de la courbe de durcissement n'est pas générale et varie avec chaque acier,
- on observe très souvent une limite du durcissement à partir de 70 % de déformation et une déformation préalable de 20 % environ est nécessaire pour enregistrer un durcissement appréciable ;

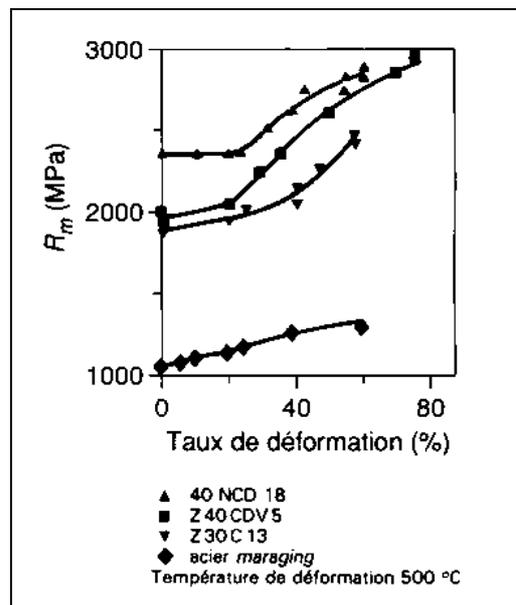


Figure 12 : Influence du taux de déformation par traction sur la résistance à la traction de différents aciers après austénitiformage [13]

• Le durcissement produit par la déformation de l'austénite est conservé pour toutes les températures de revenu et à des températures de revenu supérieures comparativement à un état non déformé ; le pic de durcissement secondaire dans les aciers correspondants est souvent plus faible et décalé vers les températures supérieures (figure 13).

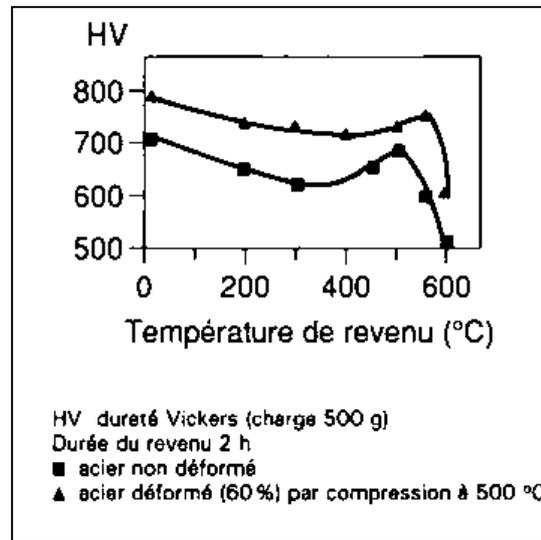


Figure 13 : Comparaison de l'évolution de la dureté d'un acier Z 40 CDV 5 traité ou non par austénitiformage en fonction de la température de revenu [13]

1.3.3.4 Applications industrielles du traitement d'austénitiformage

Le traitement thermomécanique d'austénitiformage nécessite le contrôle de la température du produit en cours de formage et une puissance mécanique disponible suffisante fournie par les outillages pour réaliser des taux de déformation voisins de 80 %, ces deux contraintes étant liées à la forme du diagramme TTT de l'acier utilisé [13].

En effet, d'après la forme de celui-ci et en conservant le traitement d'austénitiformage proprement dit, c'est-à-dire une déformation uniquement dans le domaine de l'austénite métastable, on constate que, par exemple pour l'acier Z 30 C 13, l'opération n'est envisageable que dans le domaine de température de 350 à 550°C environ.

La déformation effectuée à ces températures relativement faibles et sur des aciers riches en éléments durcissants nécessite des contraintes importantes. Ainsi, pour produire à 500°C une déformation de 70 % pour l'acier Z 40 CDV 5, la contrainte d'écoulement mesurée en traction est voisine de 1 500 MPa. Par contre, pour l'acier 40 NCD 18, dont la teneur en éléments carburigènes

est plus faible et qui permet de réaliser la déformation à de plus hautes températures, les niveaux de contrainte pour produire la déformation est nettement plus faible.

Ainsi à 500°C, la contrainte d'écoulement conduisant à une déformation de 70 % est voisine de 1 000 MPa ; pour des essais à 600°C, elle est réduite à 750 MPa pour le même taux de déformation. Les applications industrielles de l'austénitiformage, pour obtenir des produits finis à hautes caractéristiques mécaniques, demandent donc la mise en oeuvre de moyens de déformation puissants, selon la nuance choisie, la température et le taux de déformation requis.

Les caractéristiques de résistance mécanique, de ductilité et de résistance à la rupture fragile des aciers « ausformés » permettent l'emploi de ces matériaux pour des applications dans la construction métallique (boulons à haute résistance, câbles) ou mécanique dans les industries aéronautique (ailettes de turbine, enveloppes de moteurs de fusée) et automobile (axes de piston, engrenages) [7] [12] [14].