

Chapitre I

Présentation générale des procédés de mise en forme par déformation plastique

Ce chapitre présente l'ensemble des procédés de fabrication des pièces métalliques, puis décrit de manière détaillée les opérations de mise en forme par déformation plastique avec et sans enlèvement de matière. Après avoir précisé la géométrie et la cinématique des différents procédés, le chapitre présente les phénomènes physiques fondamentaux, puis les modalités de la mise en œuvre pratique des procédés selon la température et la nature des principaux alliages (base fer, aluminium et cuivre).

1. Aspects généraux

1.1. Principales opérations de fabrication des pièces métalliques

La figure I.1 récapitule les principales classes de procédés utilisés. Elle montre qu'il existe trois voies principales de fabrication de pièces métalliques selon l'état de départ du matériau métallique :

- Le moulage à partir de l'état liquide.
- Le façonnage à partir d'une ou plusieurs pièces à l'état solide. Cette voie peut, elle-même, se scinder en formage, ou mise en forme sans enlèvement de matière par déformation plastique, usinage, ou mise en forme avec enlèvement de matière, et l'assemblage, où l'on solidarise deux ou plusieurs pièces selon les procédés.
- Le frittage à partir de poudres par disparition des vides intergranulaires à haute température et éventuellement sous pression hydrostatique (compaction isostatique) ou un état de contrainte plus général par forgeage, filage...

En raison, entre autres causes, de la classification socio-économique des secteurs industriels correspondants, on distingue dans le formage :

- Le travail des métaux à l'état massif, pratiqué essentiellement dans les industries métallurgiques : laminage, forgeage, filage, étirage, tréfilage.
- Le travail des métaux en feuilles, pratiqué comme l'usinage dans les industries mécaniques et dont le principal procédé est l'emboutissage des tôles.

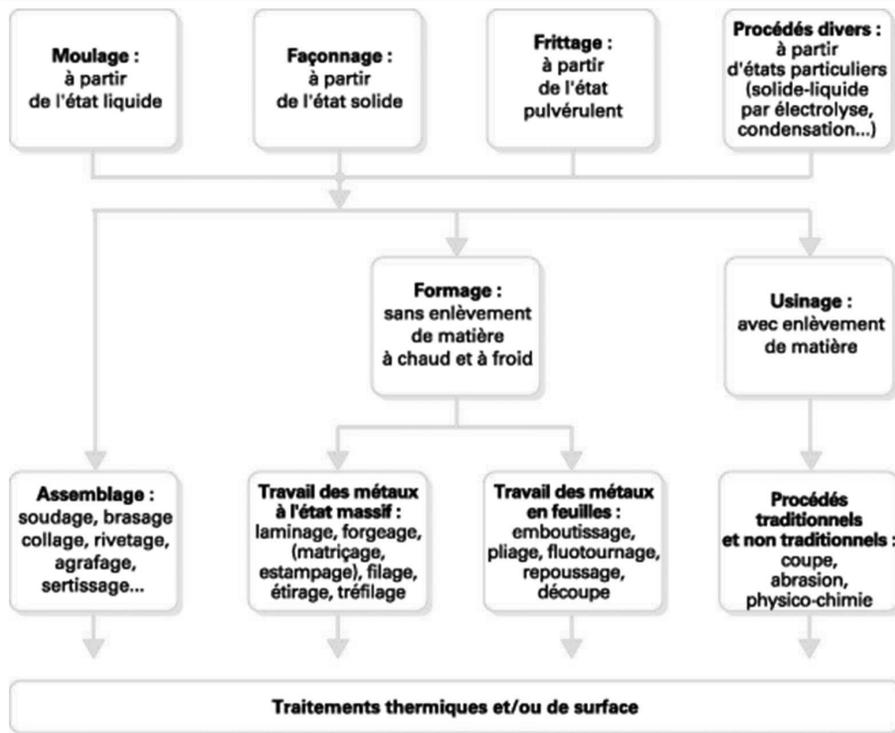


Figure I.1 : Principaux procédés de fabrication des matériaux métalliques [T.I.]

Bien que le volume de pièces concernées soit nettement plus modeste, il ne faut pas oublier diverses autres voies permettant de modifier la forme d'un solide et très utiles dans diverses situations, notamment pour la réalisation ou la réparation d'outillages de mise en forme :

- Addition d'un matériau métallique solide à une pièce en le transformant temporairement en ions par électrolyse (électroformage), en liquide (rechargement par les techniques de soudage) ou en gaz (pulvérisation et condensation).
- Passage temporaire d'un alliage métallique par l'état semi-solide entre liquidus et solidus et injection dans un moule.

1.2. Evolution de la mise en forme des métaux

L'objectif premier de la mise en forme des métaux est de conférer à une pièce métallique des dimensions situées dans une fourchette de tolérance donnée. Les principaux procédés de mise en forme des métaux sont apparus progressivement, donnant naissance par la suite à diverses variantes, parfois très nombreuses. Les formes modernes des divers procédés sont le plus souvent apparues récemment pour assurer la production en grande série de pièces à faible coût. On note dans le tableau I.1 quatre stades principaux d'émergence des divers procédés.

- Dès les débuts de l'élaboration des métaux et alliages métalliques à partir de minerais sont pratiqués, semble-t-il, le moulage à partir de l'état liquide, le forgeage libre à chaud de pièces massives brutes de coulée ou réchauffées et le formage à froid de feuilles métalliques. Il s'agit en effet d'une extension assez naturelle du processus d'élaboration mettant en jeu des moyens assez simples : des fours, des moules, un outil de frappe et un support. Pour les pièces minces, les artisans pratiquaient sans doute le travail à froid par frappes successives entrecoupées de réchauffages pour adoucir le métal et restaurer sa capacité de déformation. Par la suite, il a fallu attendre 1940 pour que les Allemands inventent la forge à froid (extrusion) des aciers pour fabriquer des pièces d'armement durcis par écrouissage en économisant des éléments d'alliage. Cette innovation majeure a été rendue possible par l'introduction de la lubrification par la phosphatation et le savonnage. En 1970 dans le cadre des politiques d'économie d'énergie imposées par le premier choc pétrolier, la coulée continue des demi-produits en acier prend son véritable essor industriel et a depuis supplanté totalement la coulée traditionnelle en lingots pour la fabrication des produits courants en aciers. Depuis 1990 environ, l'hydroformage constitue une opération intéressante de certaines gammes industrielles de travail des métaux en feuille.
- Vers les premiers siècles de l'ère chrétienne, apparaissent les procédés d'étirage de fils à travers des plaques percées et d'usinage de pièces à l'aide de burins, forets, limes et scies. Petit à petit, ces procédés mécaniques d'usinage (dits traditionnels) se sont diversifiés en tournage, fraisage, perçage, brochage, taraudage..., procédés pratiqués sur diverses machines-outils spécialisées. Leur mise en œuvre et leurs performances ont considérablement évolué à partir de 1960 avec l'introduction de la commande numérique qui donne naissance, entre autres machines-outils polyvalentes, aux centres d'usinage. Malgré les progrès des procédés de formage sans enlèvement de matière, les procédés mécaniques d'usinage restent les procédés de mise en forme des métaux les plus importants d'un point de vue économique.
- À la Renaissance, apparaissent le laminage, devenu depuis, du fait de sa très haute productivité et de sa grande polyvalence, le procédé de mise en forme sans enlèvement de matière le plus important, et le procédé de gravure par eau forte, devenu à l'ère moderne l'usinage chimique. Ce dernier procédé reste toutefois le procédé d'usinage non traditionnel le plus confidentiel (si l'on excepte l'usinage des circuits imprimés dans l'industrie électronique), à côté des autres procédés développés à partir de 1945 : procédés d'usinage par abrasion (meulage, rectification, polissage, rodage, jet d'eau abrasif, ultra-sons), électroérosion, usinages électrochimique, au jet d'eau, oxycoupage, avec un faisceau de lumière laser ou d'électrons. Ces procédés ont permis, entre autres applications, de résoudre les problèmes d'usinage et/ou polissage des matériaux de faible usinabilité mécanique, comme les outils de mise en forme.
- Au XIX^e siècle, apparaît le filage à chaud des alliages cuivreux rendu possible par la réalisation de presses hydrauliques de fortes capacités. C'est au Français Séjournet que revient le mérite de l'invention, vers 1945, de la lubrification au verre qui rend possible le filage à chaud des aciers et d'autres alliages de haute dureté (alliages de titane...).

Procédés primitifs	Date d'émergence	Formes modernes
Forgeage libre du produit chaud	5000 avant J.-C.	Matriçage, estampage entre matrices sur pilon, presses mécaniques, hydrauliques Forge à froid des aciers Forge à tiède, Forgeage sans bavure
Fonderie	5000 avant J.-C.	Fonderie sous pression En moules perdus ou permanents Coulée centrifuge de tubes Coulée continue de brames, blooms, billettes
Formage des métaux en feuille par martelage, repoussage	5000 avant J.-C.	Opérations d'emboutissage Cisailage, Cintrage, Profilage Chaudronnerie et travail des tôles fortes Fluotournage, Repassage des produits tubulaires, Hydroformage
Étirage de fils	premiers siècles	Tréfilage multipasse Étirage de profilés
Usinage par burin, bédane, foret, lime, scie	premiers siècles	Coupe par tournage, fraisage, perçage, brochage, taraudage, sciage Usinages par abrasion : meulage, rectification, polissage, rodage, jet d'eau abrasif, ultra-sons
Gravure par eau forte	XV ^e siècle	Usinages physico-chimique : par électroérosion, faisceaux laser ou d'électrons, par jet d'eau, oxycoupage, chalumeau plasma, électrochimique, chimique
Laminage	XVI ^e siècle	Laminages sur train tandem, cage réversible, cage universelle, cage Sendzimir, l Laminoirs de tubes à pas pélerin, Laminoirs Manesmann perceurs...
Filage à froid de Pb, métaux mous	XIX ^e siècle	Filage à chaud des alliages Al, Cu Filage à chaud (1200°C) au verre des aciers Extrusion (20 C) des aciers phosphatés savonnés

Tableau I.1 : *Évolution et formes diverses des procédés de mise en forme des métaux et alliages métalliques*

La plupart des objets métalliques d'utilisation courante ont subi plusieurs opérations de mise en forme à l'état massif ou/et à l'état de feuilles. Traditionnellement, la mise en forme d'une pièce métallique est suivie d'un traitement thermique permettant de conférer à la pièce la microstructure et les propriétés mécaniques requises par son utilisation, et, le plus souvent, d'un traitement de surface pour maîtriser ses propriétés

superficielles : rugosité (aspect esthétique, adhésion à un autre matériau), propriétés mécaniques (résistance à la fatigue), chimiques (résistance à la corrosion, adhésion à un autre matériau) et tribologiques (diminuer le frottement, augmenter la résistance à l'usure). Si la nature des opérations de mise en forme n'a pas fondamentalement changé durant les cinquante dernières années, leurs conditions de mise en œuvre ont très fortement évolué dans le sens d'une productivité de plus en plus élevée. Quatre grandes tendances se sont ainsi développées.

- **Substitution de procédés**

Elle vise à remplacer diverses opérations d'usinage, peu économes en matière première et en énergie, par des opérations de mise en forme sans enlèvement de matière comme le forgeage à froid ou le frittage. Dans l'industrie automobile, par exemple, la forge à froid s'est développée au détriment de l'usinage. La coulée continue directe des demi-produits a permis d'améliorer la qualité métallurgique tout en supprimant les opérations de laminage à chaud sur lingots et en économisant de la matière (suppression des têtes et pieds de lingots). Pour les matériaux dont le coût matière est très élevé, de telles substitutions sont très attractives : ainsi le frittage permet de réduire notablement la perte de matière dans la réalisation d'éléments de turbomachines en alliages réfractaires de l'industrie aéronautique. Même pour des matériaux moins onéreux comme les aciers, le forgeage-frittage se révèle d'un grand intérêt économique pour fabriquer des pièces comme les bielles des moteurs à explosions. Par ailleurs, le forgeage à chaud se soucie régulièrement des progrès de la fonderie et de sa volonté de conquérir le marché de certaines pièces mécaniques comme les arbres à cames. Néanmoins, plutôt que de tenter la substitution systématique de procédés, il importe plutôt d'essayer de tirer parti, au mieux et de manière complémentaire, des performances des divers procédés de mise en forme, avec et sans enlèvement de matière, à l'état massif comme à l'état de feuilles, pour bâtir la gamme de fabrication la plus économique possible. Le concepteur a donc intérêt, sinon à disposer de la panoplie la plus large possible de procédés de mise en forme, du moins à bien connaître l'état actuel de leurs possibilités techniques.

- **Suppression ou réduction des traitements de finition des pièces**

Les praticiens de la mise en forme visent maintenant à produire directement et sans opérations supplémentaires la pièce avec toutes ses spécifications, tant dimensionnelles que mécaniques, à cœur comme en surface, tout en économisant au maximum l'énergie et la matière, notamment les éléments d'alliage rares et chers.

Des traitements thermomécaniques sont ainsi pratiqués en laminage, forgeage, filage et emboutissage à chaud. Moyennant un choix judicieux de la composition chimique de l'alliage mis en forme et des conditions thermiques durant, entre et après les opérations de formage, ces traitements permettent d'obtenir les structures et les propriétés adéquates pour l'utilisation. De tels traitements thermomécaniques ont souvent été mis au point en simulant expérimentalement la séquence des opérations à l'aide d'essais rhéologiques comme la torsion à chaud. Ainsi la baisse constante de la température de laminage à chaud des tôles d'acier et le bobinage à une vitesse adéquate permettent d'obtenir des tôles de structure bainitique, compromis intéressant entre dureté et fragilité. L'emboutissage à chaud de l'acier 22MnB5 permet d'obtenir par trempe après formage dans les outils refroidis d'obtenir une pièce de très haute résistance (1500 MPa). Par ailleurs, par le développement de procédures d'essais tribologiques, on peut maîtriser le

régime de lubrification par optimisation du lubrifiant et de la nature et de l'état de surface des outils de mise en forme. On contrôle ainsi le frottement et l'état de surface du produit tout en augmentant la durée de vie des outils. Ainsi, des essais de bipoinçonnements répétés ont montré que l'utilisation d'aciers à cylindres présentant en surface des carbures durs, type carbure de vanadium, et le choix de bons additifs de lubrification permettent de former sur les outils un film de transfert fin. Ce film de transfert assure un bas frottement et permet dans le laminage à froid sur cage Sendzimir d'obtenir des tôles d'acier inoxydable au fini miroir.

- **Enchaînement continu des diverses opérations**

Il se développe de manière irrésistible, avec élimination progressive des temps morts et des stockages intermédiaires, donnant naissance à une chaîne de production aussi continue que possible. Le caractère continu des diverses opérations a en effet un double avantage : réduction des coûts de stockage ; amélioration de la qualité du produit, toute rupture dans la chaîne de fabrication amenant l'apparition de défauts ou une baisse de propriétés. On enfourne directement de plus en plus les demi-produits chauds en aciers élaborés par coulée continue dans les trains de laminage à chaud. On assiste au développement pour les tôles, d'installations réalisant sur une ligne continue les opérations de laminage à froid, de recuit, de déposition d'un revêtement...

- **Le recours aux logiciels de simulation numérique**

La mise en forme des matériaux métalliques est devenu un secteur industriel de haute technicité et en progrès constant, avec une foule de problèmes dont la résolution nécessite le recours à des moyens très performants. Parmi ces outils, l'informatique occupe une place de choix. A côté d'applications classiques, type CAO, conduite de chaînes de fabrication, ou gestion de banques de données, les bureaux d'études utilisent de plus en plus les logiciels de simulation par des calculs par éléments finis des procédés. On sait en effet de mieux en mieux résoudre numériquement les équations (cf. Chap. II) décrivant les grandes déformations induites dans les procédés grâce notamment aux techniques de remaillage. Nous pouvons par exemple citer les principaux développements réalisés dans FORGE®, un code commercial de simulation tridimensionnelle implicite par éléments finis des procédés :

- 1995 : Remaillage automatique (*automatic remeshing*) permettant la simulation de très grandes déformations.
- 1996 : Contrôle automatique de la qualité des éléments (*element quality control*) et remaillage adaptatif.
- 1997 : Développement du calcul parallèle (*parallel computing*) permettant de diminuer les temps de calcul.
- 2002 : Simulation des traitements thermiques dont la trempe (*heat treatments, quenching*).
- 2003 : Prise en compte de la déformation des outils (*deformable tools*).
- 2005 : Calculs thermomécaniques de la mise en forme couplés à l'évolution métallurgique (*coupling with metallurgy*).

- 2007 : Calcul du régime thermique des outils (*thermal regime in tools*), permettant de modéliser leur usure, et formage de multi-matériaux, (*multi body forming*).

- 2009 : “Optimisation automatique de procédés avec multi-critères (*automatic” process optimization*).

- 2014 : Modélisation tridimensionnelle du chauffage par induction (*three-dimensional modeling of induction heating*).

De tels progrès permettent d’envisager dans un assez proche avenir des outils logiciels permettant la réalisation d’une usine virtuelle de mise en forme capable, à l’aide des résultats d’expériences de métallurgie physique, d’essais rhéologiques et tribologiques, d’améliorer fortement les performances des chaînes de fabrication.

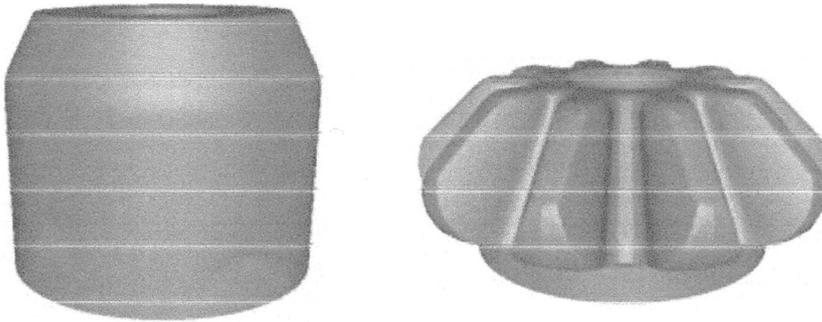


Figure I.2 : *Opération de forgeage à tiède (600°C) d’engrenage en acier–
L’optimisation multicritère de la forme géométrique de la préforme permet de réduire
de 9,4 % la force de forgeage et de 9,8 % les risques de repli [CEMEF]*

Actuellement, on conçoit systématiquement les opérations de forgeage à froid et à chaud et d’emboutissage par simulation numérique. On optimise les opérations de laminage par simulation numérique. L’informatique devient donc l’auxiliaire incontournable de l’ingénieur de mise en forme. La figure I.2 donne ainsi l’exemple d’une opération de forgeage à tiède (600°C) d’engrenages en acier. L’opération comporte deux passes de forgeage. L’optimisation par de tels calculs de la forme géométrique des outils (matrices) de la passe d’ébauchage permet de diminuer significativement la force de forgeage de la passe de finition et les risques de formation de replis.

1.3. Problématiques scientifiques

Les figures I.3 et I.4 présentent schématiquement les divers phénomènes induits par la mise en forme par déformation plastique et conditionnant la qualité du produit :

- Un **écoulement de matière et de chaleur** qui détermine les forces et énergies de mise en forme, la forme finale du produit, divers défauts internes ou superficiels (fissures, porosités, replis, peau d’orange...), l’évolution de la température T du métal, la structure métallurgique (fibrage, taille des grains, texture cristallographique) et les propriétés mécaniques du produit, ses contraintes résiduelles ...

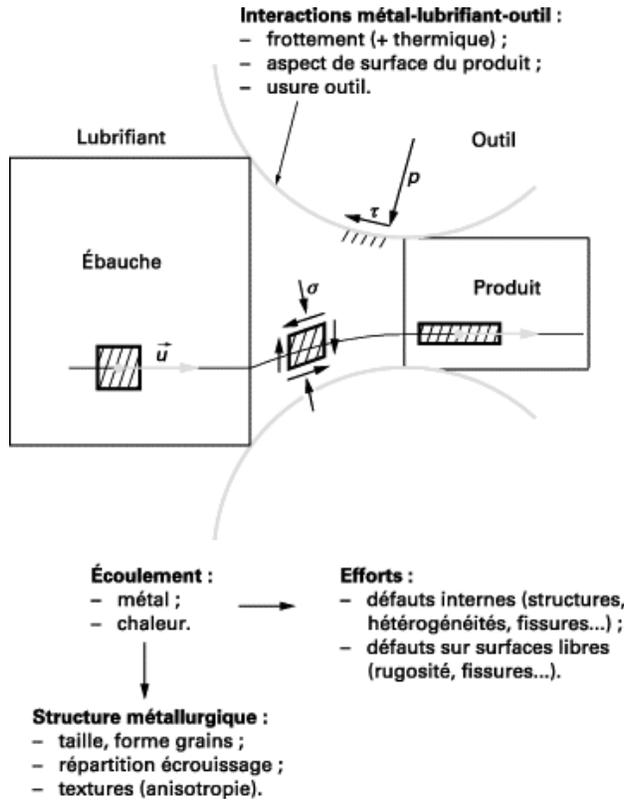


Figure I.3 : Problèmes scientifiques de la mise en forme par déformation plastique [T.I.]

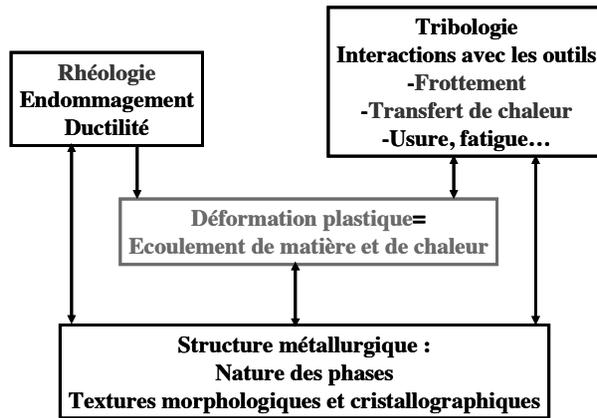


Figure I.4 : Les interactions thermomécaniques, métallurgiques et tribologiques dans un procédé de mise en forme