

### Forgeage : Classification des procédés



mercredi 19 mai 2021

#### U4 ETUDE DE PREINDUSTRIALISATION / COMPETENCES :

- C01. Proposer et argumenter des modifications de la pièce liées aux difficultés techniques et aux surcoûts de production.
- C03. Pour chacun des procédés visés, proposer un processus prévisionnel et des principes d'outillages associés.
- C04. Valider le choix du couple matériau - procédé d'élaboration au regard de la géométrie et des spécifications de la pièce à produire.
- C05. Spécifier les moyens de production nécessaires (machines-outils, outils, outillages...).
- C06. Établir les documents destinés aux partenaires co-traitants et sous-traitants.

. BO ou Référentiel : **BTS IPM 2005**

## SAVOIRS / Niveau 2 : Expression

### S7.1 Élaboration des pièces métalliques semi-ouvrées

- Principe physique associé au procédé.
- Principe des outillages.
- Limites et performances (matériaux, formes et précisions réalisables).
- Incidences sur le matériau et sur les procédés de transformations ultérieurs.
- Notion sur les coûts.

*Pour les procédés suivants :*

- moulage en moules non permanents et permanents ;
- déformation plastique : laminage, forgeage, estampage, matriçage, extrusion... ;
- déformation plastique des tôles : pliage, emboutissage... ;
- découpage, découpage fin, oxycoupage, découpage au jet d'eau haute pression, découpage au laser.

- **Enumérer les différents procédés de forgeage**

**Objectif Opérationnel**

**Document Professeur**

### Forgeage : Classification des procédés



mercredi 19 mai 2021

- . **SITUATION** : Classe de Première Année de BTS IPM
- . **PREREQUIS** : - Le moulage
- . **DONNEES DU PROBLEME, CONDITIONS DE REALISATION** :
  - **DUREE** : 1 Heure
- . **TRAVAIL DEMANDE** :
  - Situer historiquement l'apparition du forgeage
  - Décrire brièvement le principe du forgeage
  - Indiquer les propriétés mises en jeu et l'influence de la température
  - Lister les différents procédés de chauffage des pièces
  - Décrire le principe des machines utilisées en forgeage
  - Citer les contraintes subies par les outillages

#### PLAN ET DEROULEMENT DE L'ACTIVITE :

##### . **METHODE** :

- **ACTIVITE** (de Groupe, d'Equipe, Individuelle) : - Cours

##### . **MOYENS DIDACTIQUES** :

- **DOCUMENTS** :
  - Poly Cours
- **AUDIO-VISUELS** :
  - Vidéo durée 15 minutes Travail de forgeage
- **AUTRES** :
  - Exemple de pièces forgées
- **BIBLIOGRAPHIE** :
  - Mémotech : Procédés de mise en forme des matériaux Casteilla
  - Mémotech : Génie des matériaux Casteilla
  - Précis de construction mécanique Tome 2 Nathan
  - Cours ENSAM Lille
- **LIENS** :
  - <http://www.ac-amiens.fr/etablissements/post-bac/bts/forge/>
  - <http://www.angers.ensam.fr/ressources/frame.htm>

#### EVALUATION DE L'ACTIVITE :

. Evaluation Formative

. Evaluation Sommative



## 1 HISTORIQUE

Le forgeage des métaux date de l'antiquité, bien avant l'obtention de l'acier sous l'aspect liquide. Ce travail était réalisé sans exiger la fusion du métal, son état plastique (pâteux) était suffisant.

Ce procédé a toujours été utilisé pour diminuer la consommation de métal, c'est-à-dire réduire au minimum utile le poids de métal mis en oeuvre pour réaliser une pièce donnée.

Le forgeron date donc de l'antiquité ; son outillage a évolué dans le temps, la machine a désormais remplacé la force musculaire.

## 2 DIFFERENTS PROCEDES

Les différentes techniques ramènent toutes à la compression d'un matériau entre des outillages au moyen d'un engin qui fournit l'énergie nécessaire à l'opération, ceci afin de lui donner une géométrie définie à l'avance.

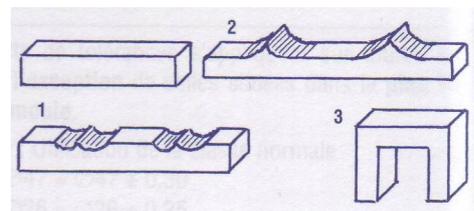
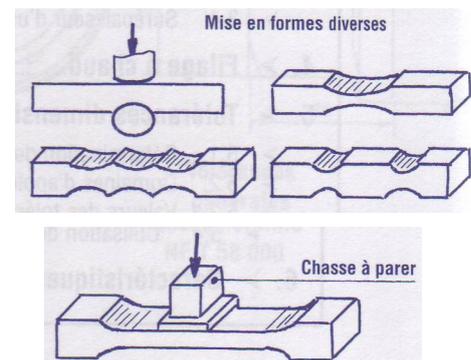
On distingue :

- le forgeage manuel
- le forgeage libre
- l'estampage
- le matriçage
- le refoulement sur machines horizontales

### 2.1 Le forgeage manuel

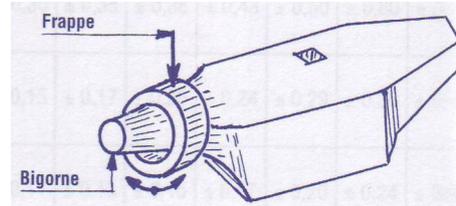
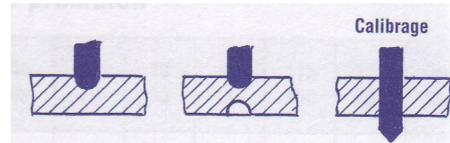
Le forgeage à la main utilise l'énergie musculaire de l'homme après chauffage du métal, les outillages mis en oeuvre n'ont pas beaucoup évolué depuis des siècles (Enclume, marteaux de forme, tranche, poinçons, mandrins, bigorne ...)

- **Etirage** : L'allongement du métal chauffé est réalisé progressivement par martelage entre l'enclume et le marteau. Les changements importants de section sont amorcés au dégorgeoir, un planage est réalisé ensuite. La zone étirée est redressée et régularisée par martelage à l'aide d'une châsse à parer sur l'enclume.
- **Cambrage** : La zone cambrée comportant des angles vifs est préparée par martelage et étirage pour éviter une diminution de la section de la pièce dans les zones pliées.
  - 1 - Amorçage au dégorgeoir
  - 2 - Étirage
  - 3 - Cambrage





- **Poinçonnage** : Le poinçonnage est réalisé progressivement par passage d'une série de poinçons de dimensions de plus en plus grosses. Les trous peuvent être carrés ou ronds.
- **Bigornage** : Après poinçonnage, l'alésage est mis en forme progressivement par étirage du métal sur la bigorne de l'enclume. La pièce subit un mouvement de rotation



### 2.2 Le forgeage libre

C'est une technique très ancienne et qui s'applique à tous les matériaux forgeables. Elle doit son nom à la grande liberté que possède la matière mise en oeuvre pour se déplacer. Les pièces sont de formes simples, leur poids pouvant varier du kilogramme à quelques tonnes pour les grosses. La précision obtenue est fonction de l'habileté du forgeron, elle est de l'ordre de plusieurs millimètres suivant les dimensions et les formes.

Cette technique mécanique (utilisée pour la réalisation de pièces unitaires ou de très petite série, de prototypes, de dépannages rapides) utilise des outils simples ramenés par le forgeron ou ses aides.

### 2.3 L'estampage

C'est une sorte de "moulage en phase plastique". Les outillages ne sont plus standards mais spécifiques à chaque pièce réalisée. Ils sont de plus fixés sur la machine.

Cette technique est réservée à des moyennes ou des grandes séries (d'une centaine à plusieurs milliers de pièces).

Le poids des pièces varie de quelques grammes à des pièces de 200 à 300 kg. Les tolérances obtenues sont de l'ordre de 2 à 3 mm suivant les formes et les dimensions.

### 2.4 Le matriçage

Cette technique diffère peu de l'estampage ; elle intéresse surtout les matériaux non ferreux. Du fait des températures plus basses les outillages pourront être plus compliqués (matriçage sans bavure, matriçage en coquille), le temps de contact pièce-outil pouvant être plus important. Il faut aussi noter que ces alliages non ferreux sont généralement moins "pâteux" que les alliages ferreux.

### 2.5 Le refoulement en machines horizontales

Cette technique permet de fabriquer des pièces présentant des renflements par refoulement à partir de barres carrées, octogonales ou cylindriques. Elles permettent aussi de fabriquer des corps creux. à partir d'une barre par déplacement radial du métal

On peut travailler soit sur des lopins préalablement découpés ou dans des barres (les matrices de serrage comportant alors un jeu de cisaille permettant de détacher la pièce finie de la barre).



### 3 DÉFORMATION PLASTIQUE

#### 3.1 Définition et aperçu des mécanismes mis en jeu

La déformation plastique d'un agrégat polycristallin est le changement de forme extérieur de cet agrégat sans que les liaisons intermétalliques soient rompues.

Ce résultat est obtenu par le déplacement et la création de défauts dans l'empilement cristallin (dislocations). La multiplication de ces défauts a pour conséquence de modifier les caractéristiques du matériau (phénomène de l'écroutissage). On obtient ainsi un matériau à énergie interne plus élevé.

#### 3.2 Influence de la température

Une élévation de température va permettre au métal par déplacement et annihilation de ces défauts de retourner à un état plus stable. Ce sont les phénomènes de restauration et de recristallisation. On admet d'une manière simple que ce retour vers un état à énergie interne moindre est possible vers des température de l'ordre de la demi température absolue de fusion. A partir de cette remarque on définit les domaines de déformation de la manière suivante en fonction de la température à laquelle elle s'effectue.

##### *Remarque préliminaire*

- **TF** : Température de fusion
- **TD** : Température de déformation

**TD < TF/2**      domaine de déformation à froid

**TF/2 < TD < 2TF/3**      domaine de déformation à mi-chaud (ou intermédiaire)

**TD > 2TF/3**      domaine de déformation à chaud

### 4 LE CHAUFFAGE DES PIÈCES

Pour déformer à chaud, il faut tout d'abord chauffer les lopins à la température adéquate, enfermer cette matière chaude entre des outils appropriés montés sur l'engin pouvant délivrer l'énergie nécessaire au formage.

Les lopins doivent avoir la température nécessaire à leur formage et cette dernière doit être uniforme dans tout le métal (temps). Le chauffage aura plusieurs incidences sur le matériau.

#### 4.1 L'oxydation (appelée perte au feu)

Toutes les pièces métalliques sont recouvertes d'une couche d'oxyde. Ce phénomène d'oxydation est décuplé par la température. Le système amorphe de ces oxydes ne leur permet de se déformer plastiquement, ils se détachent lors d'un premier choc et constituent une véritable perte de métal pouvant aller jusqu'à 15% du volume total. Il y a donc lieu d'en tenir compte.

De plus il faut noter que ces oxydes, s'ils ne sont pas enlevés du lopin chaud avant formage peuvent créer une abrasion importante au niveau des outils.



## 4.2 Le grossissement des grains

Les caractéristiques mécaniques d'un matériau métallique dépendent de la taille des grains qui le constituent. On a intérêt à rechercher des grains fins. Les joints de grains (étant des parties désorganisées) augmentent l'énergie interne du matériau. Lors du chauffage ce dernier évoluera vers un système présentant un niveau d'énergie interne plus faible ; ce pourra se traduire par une diminution de la quantité de ces joints de grain donc une augmentation de la taille moyenne des grains.

La déformation plastique (par ces processus d'écroutissage et de recristallisation) pourra diminuer cette taille de grain. On devra évidemment veiller dans la mesure du possible à ce que les paramètres de cette déformation conduisent au résultat souhaité.

## 4.3 Moyens de chauffage

Les procédés physiques susceptibles de chauffer un matériau métallique sont :

- la conduction
- l'effet Joule (soit direct, soit induit)

La protection contre l'oxydation pourra, si le procédé de chauffage le permet, être réalisée par :

- une régulation de l'atmosphère
- un gaz neutre
- le vide
- le milieu chauffant (sels)
- la rapidité du chauffage

On peut citer :

- les fours à flammes (gaz, fuel)
- les fours électriques (baguettes ou résistances chauffantes)
- les chauffeuses à effet Joule
- les chauffeuses par induction

Le choix entre ces moyens sera fonction du lopin (matériau, formes, dimensions), du prix de revient de la série, des possibilités d'automatisation du formage etc... ,

## 5 LES ENGINES DE DÉFORMATION

D'une façon simpliste on peut classer les engins en deux familles

- les engins "de choc" vitesse du coulisseau supérieur à 1 m/s
- les engins "de pression" vitesse du coulisseau inférieur à 1m/s

Il faut également citer les systèmes à grande vitesse utilisant la détente d'un gaz (machine DYNA-PACK) ou l'explosion d'un mélange détonant (machine PETROFORGE). Ces machines de part leur grande vitesse permettent d'obtenir de grandes quantités de déformation et des détails architecturaux plus fins que les systèmes traditionnels.



## 5.1 Les engins de choc

On distingue les moutons et les marteaux pilons

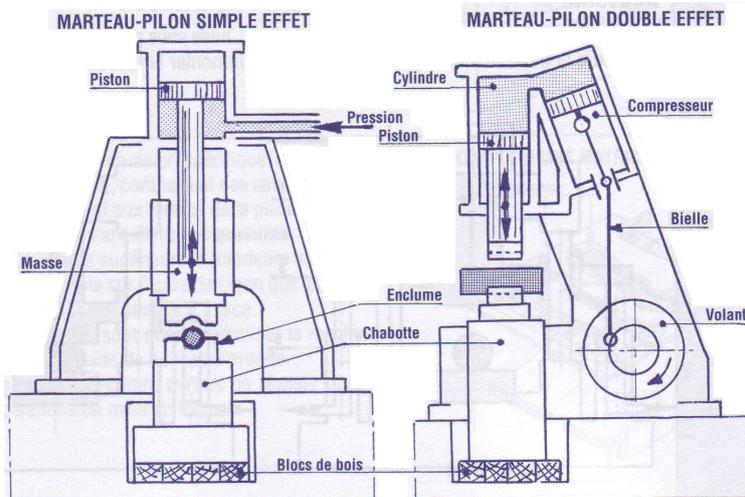
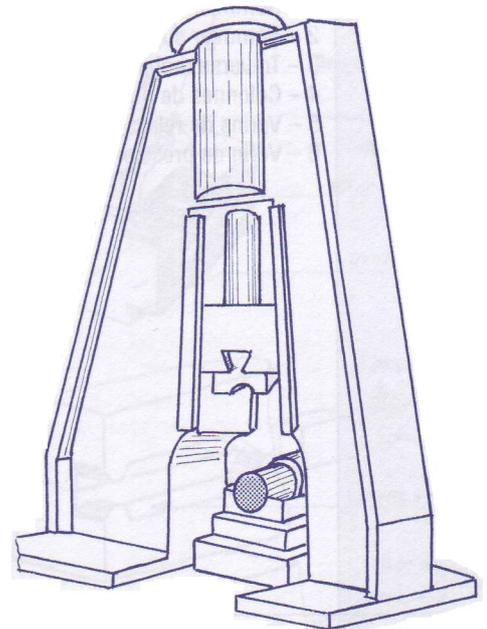
### 5.1.1. Les moutons

Ce sont des machines qui utilisent la chute libre d'une masse guidée par des glissières. Cette masse est remontée par un système mécanique. Ces machines sont employées en forge libre et en estampage (et plus rarement en matriçage).

### 5.1.2. Les marteaux pilons

On utilise la chute d'une masse. Le relevage étant assuré par un fluide sous pression (air, vapeur). Si cette masse tombe librement on parle de marteau pilon simple effet ; si au contraire ce fluide sous pression est utilisé pour accélérer la masse pendant sa descente on a alors un marteau pilon double effet.

Il faut aussi noter qu'il existe des marteaux pilons où les deux masses sont mobiles de façon à éviter la transmission au sol des vibrations du choc des outils. Il s'agit alors de marteaux pilons à contre frappe.



## 5.2. Les engins de pression

Ce sont les presses. On en trouve de deux types :

- presses mécaniques
- presses hydrauliques

### 5.2.1. Les presses mécaniques

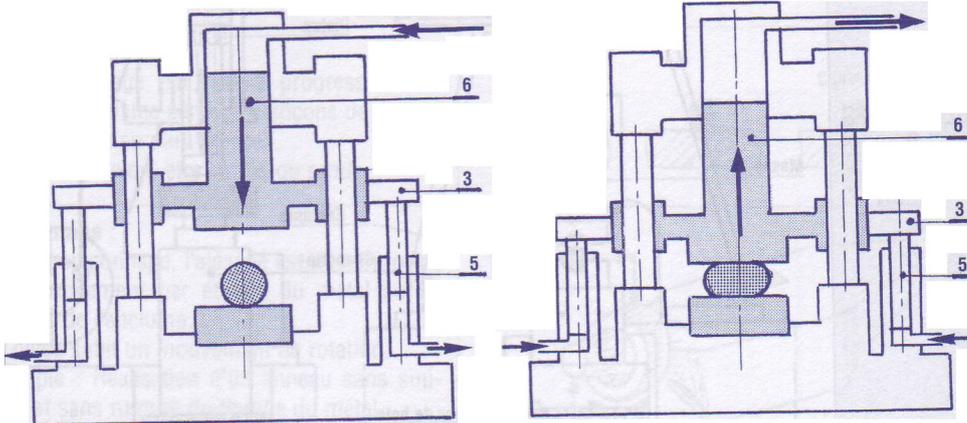
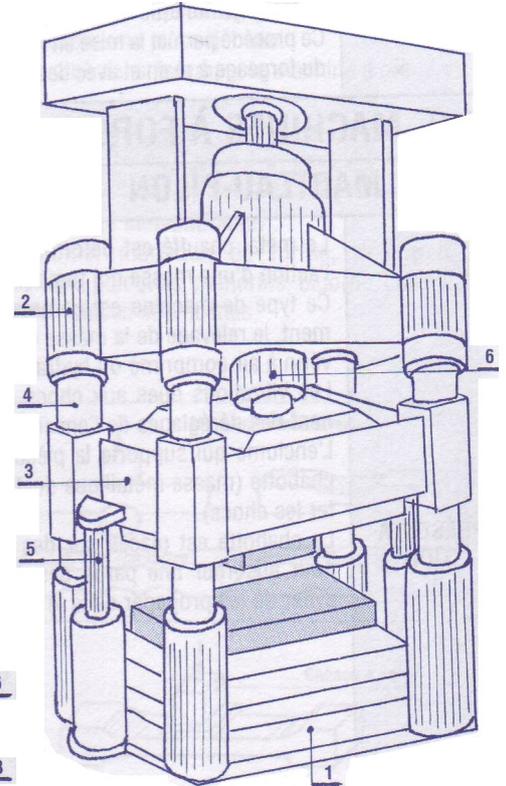
Elles peuvent être à vilebrequin, à excentrique ou à genouillère. Elles sont utilisées en estampage et en matriçage (plus rarement car, comme pour les pilons, les vitesses de déformation peuvent être importantes pour un maintien du matériau dans la fourchette des températures de matriçage). On n'utilise jamais les presses mécaniques en forgeage libre.



## 5.2.2. Les presses hydrauliques

Elles ont l'avantage d'avoir une vitesse constante sur toute la course qui peut être aussi lente que l'on veut. Elles sont utilisées en forgeage libre pour les très grosses pièces et en matriçage pour le formage des matériaux nécessitant de faibles vitesses de déformation.

1. *Sommier inférieur*
2. *Sommier supérieur*
3. *Traverse mobile*
4. *Colonnes de guidage*
5. *Vérins de relevage*
6. *Vérins de pression*



D'une manière générale, pour une bonne rentabilité, les engins de choc sont employés pour les petites séries alors que les engins de pression (presses mécaniques) sont réservés aux très grandes séries.

## 6. LES OUTILLAGES

Un problème épineux de la forge réside dans la durée de vie des outillages. De nombreux facteurs sont à l'origine de la détermination plus ou moins rapide des outils, à savoir :

- les efforts dus à la frappe
- les températures et ces variations dans le temps
- la lubrification
- l'oxydation des pièces chauffées

### 6.1. Les efforts dus à la frappe

Ce sont des efforts cycliques qui sollicitent les outillages en fatigue. Ceux-ci se détériorent plus rapidement sur les engins de choc que sur les engins de pression ; il faut donc les changer plus souvent sur les premiers.



D'une façon générale on peut dire que pour une série de quelques milliers de pièces (3 à 5) les deux engins sont équivalents, en dessous les engins de choc sont préférables, au-dessus les presses mécaniques sont préférables.

Lors du stade de la conception de ces outils, ces efforts déterminent le choix du matériau et leur dessin.

**6.2. La température**

Lors du forgeage la température de l'outil varie et cette variation est d'autant plus néfaste que sa valeur moyenne est élevée et que sa variation est importante. La valeur moyenne dépend évidemment des matériaux forgés.

Nature de l'alliage cuivreux	Intervalle de température (°C)	Nature de l'alliage cuivreux	Intervalle de température (°C)
Cuivre Cuivre-argent Cuivre-chrome Cuivre-cadmium-étain	750-950 750-950 750-900 700-850	<b>Cupro-aluminium</b> Cupro-aluminium monophasés (Al = 5 à 8 %) Cupro-aluminium biphasés (peu déformables à froid) Cu Al 10 Fe3 Cu Al 9 Mn2 Cu Al 9 Fe2 Ni2 Mn Cu Al 9 Ni5 Fe3 Mn (on tiendra compte d'une zone de fragilité entre 450 et 750 °C)	800-900  800-950 800-925 800-950 850-975
<b>Cupro-béryllium</b> Cu-Be2 Cu-Co2-Be0,5	600-800 700-900	<b>Cupro-nickel</b> Cu Ni10 Fe1 Mn Cu Ni20 Mn1 Fe Cu Ni30 Mn1 Fe1 Cu Ni30 Mn2 Fe2	850-950 875-975 925-1 050 925-1 050
<b>Laitons</b> Cu Zn 15, Cu Zn 20 Cu Zn 30 Cu Zn 33 Cu Zn 37 Cu Zn 40	750-900 750-870 750-850 720-820 650-750	<b>Maillechorts</b> (alliages monophasés faiblement malléables à chaud, très bons à froid, seuls les alliages biphasés sont déformés à chaud) Cu Zn 45 Ni10 (matrçage) Cu Zn 45 Ni9 Cu Ni10 Zn 42 Ph2	700-850 700-850 725-825
<b>Laitons au Plomb</b> Cu Zn 36 Pb3 Cu Zn 39 Pb2 (matrçage) Cu Zn 40 Pb3	700-775 650-750 625-725		
<b>Cupro-étain-phosphore</b> (ou bronzes phosphoreux) Cu Sn2 P Cu Sn4 P Cu Sn5 P	750-875 700-800 650-750		

Pour remédier aux effets néfastes de la température, il faut concevoir des outillages suffisamment dimensionnés avec des systèmes de refroidissement. Notons que ces outillages doivent être préchauffés avant utilisation afin d'éviter un choc thermique important en début d'opération.

**6.3. La lubrification**

Elle a pour rôle de faciliter l'écoulement du métal et l'éjection de la pièce finie. La lubrification se fait généralement sur les outillages eux-mêmes. Il n'y a pas de lubrifiant type. On peut utiliser de la sciure de pin, une solution d'eau et de graphite ...

**6.4 Les oxydes**

Les oxydes peuvent s'ils existent dans la gravure, l'user et ainsi la détériorer plus rapidement. On peut en diminuer la quantité par un système de chauffage rapide ou procéder à un nettoyage de la pièce soit par brossage ou par une légère déformation libre avant tout formage.