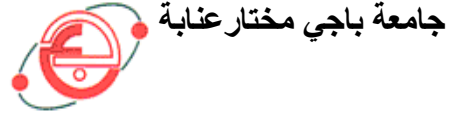


وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

### INTITULE

Evaluation du procédé de mise en forme d'une pièce forgée et amélioration du plan de maintenance

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE :

MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET FIABILITE MECANIQUE

PRESENTE PAR :

AMIRAT YASSINE

DIRECTEUR DU MEMOIRE : MR BOUNAMOUS B MAA

CO-ENCADREUR: MR BECKER E (ENSAM de Metz, France) MCA

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : MR KHELIF. R (UBMA) MCA

EXAMINATEURS : Mr TADJINE. K (UBMA) MCA

Mr BOUDECHICHE. N (UBMA) MCA

INVITE : Mr HADDAOUI. H (directeur de production,  
de l'E.P.E Ferroviol Annaba) Ing

CO-ENCADREUR: MR BECKER E (ENSAM de Metz, France) MCA

Année : 2013/2014

## **Remerciements**

Mes premiers remerciements vont au staff du département de Génie Mécanique, son chef de département, Dr HAOUAM Abdallah et ses adjoints de la pédagogie et de la Post-Graduation respectivement, Mr KALLOUCHE Abdelkader et Mr HAMADACHE Hamid, et aussi au responsable de la spécialité Maintenance Industrielle et Fiabilité Mécanique, Dr KHELIF Rabia, qui ont encouragé l'initiative d'une mobilité d'étudiant vers un laboratoire de recherche à l'étranger.

Mes deuxièmes remerciements vont à Mr BOUNAMOUS Boubaker qui a accepté de m'encadrer et d'engager le processus de convention d'une mobilité d'étudiant vers un laboratoire à l'étranger en l'occurrence le LCFC laboratoire de conception, fabrication et commande de l'ENSAM de Metz.

Mes troisièmes remerciements vont à Dr BECKER Eric de l'ENSAM de Metz qui a accepté de m'accueillir et de suivre mes travaux et de m'intégrer dans de l'équipe du LCFC de l'ENSAM de Metz. Son staff trouvera ici toute ma gratitude.

Mes quatrièmes remerciements vont au staff de l'Université de Badji Mokhtar Annaba, son Recteur, et Vice Recteur Chargé des Relations Extérieures, qui ne ménage aucun effort pour encourager la mobilité scientifique et technologique des étudiants à travers des conventions d'études et de stages.

Mes cinquièmes remerciements vont vers tous les enseignants, du département de Génie mécanique, qui contribuent de près ou de loin à la formation de Master en Maintenance Industrielle et Fiabilité Mécanique.

Je tiens à remercier vivement l'entreprise E.P.E Ferroviaire qui m'a très bien accueilli et m'a offert l'opportunité de connaître le métier de forge et ses applications. J'exprime toute ma gratitude à Mr Laskri Abdennacer, directeur des études, Mr Haddaoui Hacene, Directeur de production et à toutes les personnes ingénieurs, techniciens, opérateurs au niveau du bureau d'études et de la forge qui n'ont ménagé aucun effort pour m'aider à mener à bien ce travail.

Je tiens aussi à exprimer mes profonds remerciements à toute l'équipe du LCFC de Metz, Enseignants, Chercheurs, Ingénieurs de Labos, techniciens de Labos, Doctorants, Informaticiens, Secrétariat et toute personne qui de près ou de loin m'a aidé et apporté son soutien dans la réalisation de ce mémoire.

Mes sincères pensées vont à Pr Patrick MARTIN, Pr Régis BIGOT, et Dr Eric Becker.

La liste des personnes à remercier est longue, mais que chacune d'elle soit rassurée de mes sentiments les plus sincères.

## **Résumé :**

L'utilisation des procédés de mise en forme, est depuis toujours l'une des plus grandes productions industrielles, du fait qu'elle s'étend sur plusieurs domaines, mécanique, aéronautique, automobile, ferroviaire, armement et autres. La variance des pièces à forger est très contraignante du fait que pour chaque pièce, il faut concevoir son outillage qui représente 10 à 15% du coût de fabrication de la pièce dans les conditions optimales de production. Compte tenu de ces coûts, le service maintenance prend une place particulière dans la préparation des outillages et surtout leur maintenance. La fonction maintenance est donc une fonction clé qui contribue pleinement à la bonne performance de l'entreprise. L'évaluation régulière de la production met en évidence les actions préventives de la maintenance et le rôle de l'intégration de moyens technologiques avancés afin de rester compétitif dans un marché de plus en plus exigeant et concurrentiel.

Dans ce travail, l'évaluation d'un procédé de mise en forme d'une pièce forgée a été réalisée pour répondre aux besoins de rénovation et de modernisation des équipements de production de la forge de l'entreprise publique Ferroviaire sise à Annaba. Le système de production choisi pour cette étude est îlot de d'estampage de moyeu de roue en acier de construction composé d'une cisaille, d'un four à gaz, d'un marteau pilon et d'une presse mécanique. L'évaluation est réalisée en 4 étapes, diagnostic et expertise de la gamme de production, simulation de la gamme de production suivant un plan d'expérience déterminé. Les résultats montrent que lorsque les paramètres de mise en forme, la géométrie et les dimensions du lopin de départ, température de chauffe, nombre de coups, lubrification, l'alignement des outillages, le plan de joint et la maîtrise de la technologie, la production est optimisée et la durée de vie de l'outillage est prolongée. Ceci a conduit à des recommandations pour améliorer le plan de maintenance de l'îlot de production.

Mots clés : Norme NF X50-501, forgeage, marteau pilon, fours, FORGE2011®

## **Table des matières**

Remerciements  
Résumé  
Liste des Figures  
Liste des Tableaux

**Introduction**.....01

### **Chapitre I : Etat de l'art des moyens de production d'une pièce forgé**

1.1 Débitage.....	03
1.1.1 Techniques de débitage.....	03
1.1.2 Sciage.....	03
1.1.3 Cisailage.....	04
1.1.3.1 Cisailage à couteau ouvert.....	04
1.1.3.2 Cisailage en lunettes (en outils fermés).....	04
1.2 Les Moyens de Chauffage.....	05
1.2.1 Contraintes d'écoulement.....	05
1.2.2 Les fours à flammes :.....	06
1.2.3 Les Fours électriques.....	07
1.2.3.1 Chauffeuses par induction :.....	07
1.2.3.2 Chauffeuses par conduction :.....	08
1.2.4 Les fours à traitements thermiques.....	09
1.2.5 Classification.....	10
1.2.5.1 Fours continus et fours discontinus.....	10
1.2.5.2 Chauffage direct et chauffage indirect.....	10
1.2.5.2.1 Fours à chauffage direct.....	11
1.2.5.2.2 Fours à chauffage indirect.....	11
1.2.5.3 Fours à haute et fours à basse température.....	11
1.2.5.4 Combustibles.....	12
1.2.6 Transfert de chaleur dans les fours.....	13
1.2.6.1 Transfert par rayonnement.....	13
1.2.6.2 Transfert par convection.....	14
1.2.6.3 Transfert par conduction.....	14
1.2.7 Exploitation et maintenance des fours.....	14
1.2.7.1 Qualité du chauffage.....	14
1.2.7.2 Bilans énergétiques.....	14
1.2.7.3 Rendement en exploitation.....	15
1.2.7.4 Flux thermiques admissibles.....	15
1.2.7.5 Puissance installée.....	15
1.3 Moyens de mise en forme à chaud (estampage).....	15
1.3.1 Principe de mise en forme.....	15
1.3.2. Lubrification:.....	17
1.3.3 Machines utilisées durant la procédure d'estampage :.....	17
1.3.3.1 Les machines travaillant par chocs.....	20
1.3.3.1.1 Les marteaux pilons 'simple effet'.....	20
1.3.3.1.2 Les marteaux pilons 'double effet' :.....	22

1.3.3.1.3 Les marteaux pilons à ‘contre frappe’ :	22
1.3.3.1.4 Les machines à haute énergie :	22
1.3.3.2 Les presses mécaniques	23
1.3.3.3 Les presses à vis :	24
1.3.3.4 Presses hydrauliques	24
1.3.3.5 Les machines annexes	25
1.3.4. Thixoforgeage	25
1.3.5. Les outillages	26
1.3.6. Evolution des ateliers d’estampage	27
1.4 Le parachèvement	28
Conclusion du chapitre 1	29

## **Chapitre II : Analyse des Défauts de forge**

2.1 Endommagement des outils de forge	30
2.1.1 Sollicitations mécaniques	30
2.1.2 Sollicitations Thermiques des outils	31
2.1.3 Modes d’endommagement	31
2.1.3.1 Usure :	32
2.1.3.2 Fissuration thermique (fatigue)	33
2.1.3.3 Fissuration mécanique	33
2.1.3.4 Déformations plastiques	34
2.1.3.4.1 La plastification dans la masse :	34
2.1.3.4.2 La plastification superficielle	34
2.1.3.5 Formation de couches transferts	34
2.1.3.6 Localisation des différents modes d’endommagement	35
2.2 Classification des défauts de forge	35
2.2.1 Normes traitant des défauts	35
2.2.2 Caractérisation des défauts de forge :	37
2.2.3 Construction de la base de données ‘Gestion des Défauts de Forges	37
Conclusion du chapitre 2	37

## **Chapitre III : Plan d’expérience pour la simulation du processus d’obtention d’une pièce forgée**

3.1 Introduction :	38
3.2 Objectifs :	38
3.3 Plan d’expériences des simulations sous FORGE2011®	38
3.4 Diagnostic de la gamme réelle de production du moyeu de roue pour dumper :	39
3.4.1 Les moyens de production de la forge de l’E.P.E Ferroviaire	39
3.4.2 La gamme de production du moyeu	41
3.4.3 Analyse de la gamme de production	42
3.5 Expertise de la gamme de production	44
3.5.1 Avis de l’expert :	44
3.5.2 Définitions des différents problèmes :	44
3.5.3 Solutions à appliquer:	44

3.6 Simulations des gammes de production :.....	44
3.6.1 Technologies avancées en mise en forme.....	44
3.6.2 Simulations des gammes de production du moyeu de roue.....	47
Conclusion du chapitre 3.....	47

**Chapitre IV : Analyse des résultats de simulations du processus  
d'obtention d'une pièce forgée**

4.1 Introduction.....	48
4.2 Effet du positionnement des inserts.....	48
4.2.1 Détermination du nombre de coups pour la mise en forme du moyeu.....	49
4.3 Effet de la forme initiale du Lopin sur la morphologie de la pièce estampée.....	50
4.4 Effet de la lubrification sur la température de la pièce.....	50
4.5 Effet de la lubrification sur l'outillage.....	53
Conclusion du chapitre 4.....	58

**Chapitre V : Amélioration du plan de maintenance  
pour l'obtention des pièces forgées**

5.1 Introduction .....	59
5.2 Analyse du diagramme cause à effet de l'EPE Ferroviario :.....	59
5.3 Influence de la géométrie du lopin sur les besoins en matière première :.....	60
5.4 Influence du positionnement de l'outillage :.....	61
5.5 Effet de la lubrification sur l'usure de l'outillage:.....	62
5.6 Détermination et analyse des énergies de frappes :.....	62
5.7 Recommandations pour l'amélioration du plan de maintenance :.....	62
Conclusion du chapitre 5.....	65

**Conclusion Générale**.....

Références bibliographique .....

Annexe 1  
Annexe 2  
Annexe 3

## Liste des figures

### Chapitre I : Etat de l'art sur les moyens d'obtention d'une pièce Forgée

Figure 1.1 : Opération de cisailage [2].....	03
Figure 1.2 : Cisailage à couteaux ouverts [4].....	04
Figure 1.3 : Différentes étapes de Cisailage en lunettes [4].....	04
Figure 1.4 : Définition des jeux lors Cisailage en lunettes [4].....	05
Figure 1.5 : Evolution de la contrainte d'écoulement d'un acier en fonction de la température de chauffe [5].....	05
Figure 1.6 : Coupe schématique de la calamine sur du fer doux et sur un acier XC 45 [6].....	06
Figure 1.7 : Four à réchauffer à deux laboratoires avec chauffage aux huiles lourdes [7].....	06
Figure 1.8 : Four à sole tournante [7].....	07
Figure 1.9 : Principe de chauffage par induction [9].....	07
Figure 1.10 : Principe de fonctionnement d'une chauffeuse par induction [9].....	07
Figure 1.11 : Principe de chauffage par conduction [9, 10].....	08
Figure 1.12 : Principe de fonctionnement d'une chauffeuse par conduction [9, 11].....	09
Figure 1.13 : Vue d'ensemble d'une installation de traitement thermique industrielle [1].....	09
Figure 1.14 : Evolution des températures et des puissances de chauffe dans les fours [12].....	10
Figure 1.15: Four à cloche mobile [12].....	11
Figure 1.16 : Inducteur multicouches [13].....	12
Figure 1.17 : Traitement thermique de cylindre statique [13].....	13
Figure 1.18 : Traitement thermique superficiel de cylindre au défilé [13].....	13
Figure 1.19 : Traitement thermique d'un engrenage [13].....	13
Figure 1.20 : Evolution de la contrainte d'écoulement de la quantité limite de déformation et de la perte au feu en fonction de la température [1].....	16
Figure 1.21 Température de surface de l'outillage en deux points relativement proches [1,19].....	17
Figure 1.22 : Schéma de principe d'un marteau pilon classique [21].....	18
Figure 1.23 : Schéma de principe d'une presse hydraulique classique [21].....	18
Figure 1.24.a : Schéma de principe d'une presse mécanique [20,21].....	18
Figure 1.24.b : Cinématique d'une presse mécanique [20].....	19
Figure 1.25.a : Presse à vis à entraînement par plateau [20,21].....	19
Figure 1.25.b : Presse à vis à entraînement direct [20,21].....	20
Figure 1.26 : Marteau Pilon à Chaîne [21].....	20
Figure 1.27 : Marteau Pilon à Planche [21].....	21
Figure 1.28 Marteau Pilon simple effet à relevage hydraulique [21].....	21
Figure 1.29 : Marteau Pilon double effet [21].....	22
Figure 1.30 : Matrice de préformage, ébauchage et finition [21].....	23
Figure 1.31 : Gamme de production d'une pièce thixoforgée [30-31].....	26
Figure 1.32 : Exemple d'outillage à gravures multiple [21].....	27

### Chapitre II : Analyse des défauts de forge

Figure 2.1 Cycle thermique en surface d'un outillage (d'après CETIM) [9].....	31
Figure 2.2 : Modes d'endommagement des outils de forgeage à chaud [5 ].....	32
Figure 2.3 : Usure par abrasion de la surface d'une matrice d'estampage [5].....	32
Figure 2.4 : Contrainte tangentielle et contrainte normales sur la surface développée d'une matrice d'estampage [9].....	33
Figure 2.5 : Coupe micrographique d'une couche transfert [5].....	34
Figure 2.6 : localisation des différents modes d'endommagement des matrices [5].....	35
Figure 2.7 : Principe de caractérisation des défauts de forge [5].....	37

### Chapitre III Plan d'expérience pour la simulation du processus d'obtention d'une pièce forgée :

Figure 3.1 : Dessin d'ensemble Moyeu-roulement- essieu de roue de Transporteur [12, 14].....	39
--	----

Figure 3.2 : Ilot de mise en forme à chaud de moyeux de roues .....	40
Figure 3.3 : Photographie montrant l'ilot de production de moyeux de roues .....	41
Figure 3.4 : Insert Inferieur avec trace d'usure de l'empreinte de la préforme [12, 15].....	42
Figure 3.5 : Vue de l'Insert supérieur [12, 15].....	42
Figure 3.6 : Vue avant des outils sur la presse.....	42
Figure 3.7 : Vue arrière de la presse.....	43
Figure 3.8 : Vue générale des résultats de mise en forme [12, 15] .....	43
Figure 3.9 : Ilot de mise en forme à l'ENSAM de Metz [12, 13, 17].....	46

#### **Chapitre IV : Analyse des résultats de simulations du processus d'obtention d'une pièce forgée**

Figure 4.1 : Structure du système de production d'un moyeu de roue par estampage.....	48
Figure 4.2 : Effet du positionnement des inserts supérieur en inférieur sur la prise du lopin.....	49
Figure 4.3 : Evolution de la déformation du lopin en fonction du nombre de coups.....	51
Figure 4.4 : Effet de la forme du lopin sur la morphologie de la pièce estampée.....	52
Figure 4.5 : Effet de la lubrification sur la distribution de la température de forgeage .....	54
Figure 4.6 : Zones d'usure cumulative après forgeage à sec moyeu de roue (Lopin Carré).....	55
Figure 4.7 : Zones d'usure cumulative après forgeage moyeu de roue avec lubrifiant Eau-Graphite (Lopin Carré).....	56
Figure 4.8 : Zones d'usure cumulative après forgeage moyeu de roue avec lubrifiant Eau-Graphite (Lopin Cylindrique).....	57

#### **Chapitre V : Amélioration du plan de maintenance pour l'obtention des pièces forgées**

Figure 5.1: Evolution de l'énergie de frappe.....	63
Figure 5.2 : schéma d'amélioration du plan de maintenance d'un système de maintenance d'une pièce forgée.....	66
Figure 5.3: Diagramme de causes et effets du système de mise en forme à chaud d'un moyeu de roue au sein de la forge de l'E.P.E Ferroviaire, Annaba, Algérie .....	67
Figure 5.4 : Diagramme de causes et effets du système de mise en forme à chaud de l'ENSAM, Metz France.....	67
Figure 5.3 : Diagramme Ishikawa pour l'amélioration de la production et du plan de maintenance de L'EPE Ferroviaire.....	68

#### **Liste des Tableaux**

Tableau 1 : Secteurs d'activité de l'estampage [1, 18].....	16
Tableau 1.2 : Avantages du thixoforgeage par rapport aux procédés de forgeage et de fonderie [33,38].....	26
Tableau 2.1 : Composants d'un système de forgeage.....	31
Tableau 2.2 : Recensement des différentes imperfections de forge et leurs vocabulaires.....	36
Tableau 3.1 : Gamme de production du moyeu par matriçage [13].....	41
Tableau 3.2 : plan d'expertise des différents moyens de mise en forme.....	47
Tableau 5.1 : Besoin en matière première pour une commande minimale.....	61
Tableau 5.2 : Ratios des pertes au feu et de bavures.....	61
Tableau 5.3 : Récapitulatif des principaux résultats de simulations.....	62



## **Introduction :**

Ces dernières années, la fonction maintenance a pris une dimension nouvelle par suite de la mécanisation et de l'automatisation des processus. Sa part dans le prix de revient a augmenté dans de nombreuses entreprises industrielles. Elle est de moins en moins considérée comme une fonction de frais généraux, mais comme une fonction clé qui contribue pleinement à la bonne performance de l'entreprise. Pour rester compétitif et s'intégrer dans un marché de plus en plus exigeant et répondre à une demande croissante de produits à de variées et de cadences variées, les entreprises sont bien conscientes qu'elles doivent adopter une politique de rénovation, de modernisation et d'intégration des technologies avancées de production et surtout construire une organisation de la maintenance performante et efficace.

Quelle que soit l'entreprise concernée avec ses spécificités, il est donc logique d'ausculter régulièrement la fonction maintenance au travers d'une évaluation ou diagnostic de la production doit tenir compte de :

- La technicité du système de production qui intègre la diversité technologique des matériels, la complexité du processus de production, la dégradation des matériels engendrée par les produits mis en œuvre, la multiplicité des références produites et les volumes produits en kilogramme ou tonnes.
- Conjoncture commerciale qui peut avoir une incidence sur les coûts de maintenance. (Un outil de production saturé par une demande commerciale forte peut justifier des coûts de maintenance plus élevés (il faut augmenter le préventif, par exemple, pour améliorer la disponibilité de l'outil de production).

Utilisation de l'outil de production : Les ratios à retenir sont différents selon que l'usine fonctionne en feu continu, en horaire normal ou par saison.

- Vétusté du matériel qui a également une incidence sur les coûts. Cette incidence n'est pas aussi importante que celle évoquée parfois par certains responsables de maintenance. Si les équipements sont sous-entretenus, il faut quantifier ce sous-entretien et le réintégrer dans l'évaluation.

Aujourd'hui, les méthodes d'évaluation d'un système de production se reposent de plus en plus sur les outils de modélisation et de simulation. Ces outils permettent d'une part une bonne formalisation du procédé qui dépend de ses spécificités et d'autre part la détermination des actions préventives pour respecter les paramètres de production.

Dans un système de mise en forme à chaud des pièces métalliques par forgeage, la variance et la cadence des pièces à obtenir sont très contrariantes. En effet, aussi bonne est la sûreté de fonctionnement des équipements, ils présentent une spécificité dans les outillages de production. Ces derniers ont la particularité d'être soumis simultanément à des sollicitations intenses d'origine thermiques et mécaniques. Il y a très peu d'applications industrielles qui réunissent sur un même composant des conditions de travail aussi sévères. De plus pour chaque pièce à forger, il faut concevoir, fabriquer, calibrer et aligner son outillage composée de matrices supérieure et inférieure dont lesquelles sont réalisées les empreintes de la pièce à fabriquer. Ainsi, l'outillage représente couramment 10 à 15% des coûts de fabrication des pièces et même plus quand les paramètres d'entrée de mise en forme ne sont pas respectés. Par ailleurs, la gestion de la durée de vie des outillages est un problème critique dans toutes les entreprises de forgeage à chaud, particulièrement en matriçage. Et compte tenu de l'importance des coûts des outillages, les forges sont le plus souvent dotées d'un atelier de préparation et de maintenance de ces outillages.

Une bonne compréhension des difficultés auxquelles doivent faire face les forgerons ainsi que la recherche des solutions nouvelles plus performantes, nécessitent de prendre en compte :

- La nature du matériau à déformer (les propriétés chimiques et mécaniques, variance)
- La nature et le niveau des sollicitations supportées par les outils
- Les modes d'endommagement qui en résultent
- Les caractéristiques des matériaux d'outillage, des traitements et revêtements superficiels, ainsi que leur évolution avec la température de service des outils
- Les exigences de coût, de délai, de qualité, spécifiques à chaque application

L'objectif de ce travail est double : le premier est d'évaluer des procédés de mise en forme par forgeage d'une pièce donnée pour caractériser les paramètres d'entrée qui contribuent à la qualité du produit et à l'augmentation de la durée de vie des outillages et le deuxième de proposer des solutions à une entreprise de forgeage à chaud en quête de modernisation et de rénovation de ses équipements.

L'évaluation des procédés est réalisée par simulation sous un logiciel dédié aux métiers de mise en forme par déformation FORGE2011® et les solutions de modernisation et de rénovation des équipements sont basées sur les normes NF X50-501, (durée de vie et durabilité) NF EN 13306 (les méthodes de maintenance).

Le mémoire est divisé en 5 chapitres.

Le premier chapitre présente l'état de l'art sur les moyens d'obtention des pièces forgées depuis le débitage jusqu'au parachèvement. Il permet de prendre connaissance avec le fonctionnement et les caractéristiques des matériels, le comportement du matériel en exploitation, les avantages et les coûts de perte de production.

Le deuxième chapitre donne les défauts de forgeage qui sont impliqués à l'outillage et à la non-conformité de la pièce forgée. Les causes de défaillances des outils sont transcrites et localisées sur les empreintes des outils. Les défauts sur la pièce forgée étant caractérisés, classés, définis, leurs provenances sont identifiées avec les remèdes respectifs. Pour le service de maintenance, elles constituent une source d'informations très pratiques dans la détection de la cause de défaillance.

Le troisième chapitre est une étude pour déterminer le plan d'expériences pour la simulation des processus d'obtention d'une pièce forgée. Cette étude est réalisée sur un moyeu de roue produit par l'E.P.E Ferroviaire, dans un îlot de mise en forme à chaud de l'atelier de forge. Le système de production a été diagnostiqué et expertisé pour définir un plan d'expériences. La conception des outillages pour la mise en forme de la pièce a été réalisée sous SOLIDWORKS 2008. Les simulations sont conduites sous le Logiciel FORGE2011®.

Le quatrième chapitre donne les résultats des simulations qui permettent d'évaluer les conditions de mise en forme, du positionnement de l'outillage selon qu'il soit en position supérieure ou inférieure) effets de la géométrie et les dimensions des lopins, effets de la lubrification sur l'énergie de frappes et sur l'usure des outils.

Le cinquième chapitre présente les recommandations à suivre pour respecter la qualité du produit et les changements à réaliser au sein de l'entreprise Ferroviaire pour moderniser et rénover ses moyens de production.

Une conclusion générale reprend les principaux résultats de cette étude suivie des perspectives. Les références bibliographiques clôturent ce mémoire.

## 1. Etat de l'art des moyen d'obtention d'une pièce Forgée (estampée)

### 1.1 Débitage

#### 1.1.1 Techniques de débitage

Pour mettre en forme une pièce à chaud, il faut prendre un volume de métal égal à celui de la pièce à obtenir auquel il faut ajouter le volume de la bavure et celui de la perte au feu. En fonction de la section du demi-produit (barres ou billettes), la longueur du lopin à obtenir est calculée. Ce dernier est généralement débité par cisailage pour les sections inférieures à celles d'un carré de 150 mm de côté et par sciage pour les sections supérieures.

L'opération de cisailage (figure 1.1) consiste à rompre le demi-produit qui est placé entre 2 lames, l'une fixe, l'autre mobile, coulissant l'une devant l'autre [1]. Dans la majorité des cas, une empreinte correspondant à la forme à cisainer est usinée dans chacune des 2 lames. Le jeu entre les lames est réglable de sorte à avoir la coupe la plus perpendiculaire possible par rapport à l'arête du lopin.

Le cisailage présente l'avantage par rapport au sciage de s'effectuer à des cadences rapides et sans perte de métal. La précision de longueur, et donc de volume du lopin, est largement suffisante pour les opérations classiques. L'état de surface de la coupe est moins bon que celui du lopin scié, mais cela n'est pas du tout nuisible à l'obtention de pièces longues ou de pièces rondes débouchées. On peut, en prenant certaines précautions de réglage du jeu, améliorer cet état de surface, sinon il faut débiter les lopins par sciage.

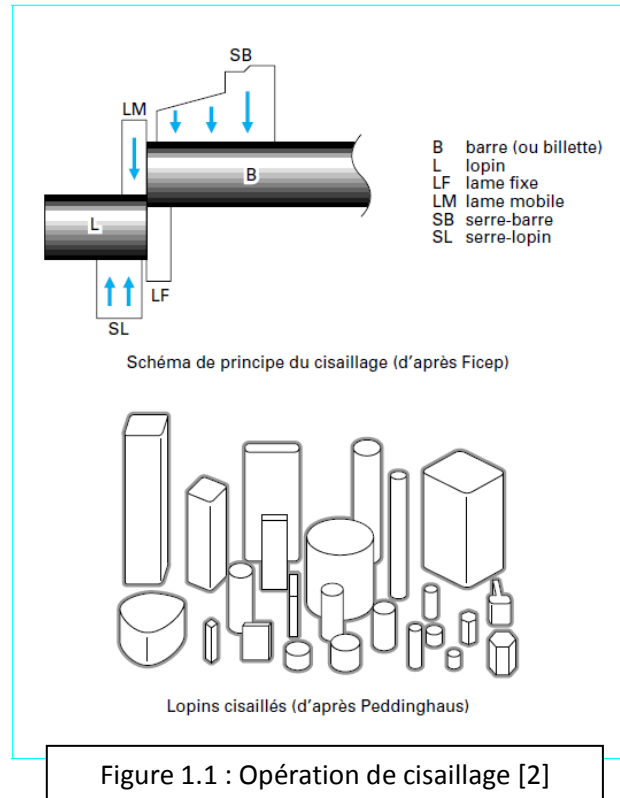
L'avantage du débitage par sciage consiste en l'obtention d'un lopin de géométrie régulière et utilisable sans préformage. Ses inconvénients sont liés à la faible cadence de production et à la perte de métal correspondant à l'épaisseur de la lame de scie.

Le choix s'effectue sur des considérations économiques et bien entendu en fonction des équipements disponibles, en particulier pour les gros diamètres.

#### 1.1.2 Sciage

Les cadences de production de lopins par sciage sont de l'ordre d'un lopin par minute pour un diamètre de 60 mm. Les scies sont donc équipées de systèmes automatiques de chargement des barres et un opérateur en conduit plusieurs [3,4]. Deux types d'outils peuvent être utilisés : les fraises scies (éventuellement à segments rapportés) ou les rubans, ces derniers permettant de limiter le plus possible les pertes de matière (la largeur du trait de scie étant, pour des lames appropriées, inférieure à 1 mm).

Du fait du renchérissement progressif des aciers, les solutions visant à diminuer les pertes de métal améliorent leur compétitivité d'année en année. Le sciage est surtout employé pour débiter de gros diamètres (> 50 mm par exemple) pour lesquels les équipements de



cisailage sont peu répandus. Il est également utilisé pour les faibles séries (inférieures à 5000 pièces par exemple) pour lesquelles les temps de réglage des machines à cisailer

### 1.1.3 : Cisailage

Les cadences de production sont de l'ordre de plusieurs milliers de pièces par heure selon les équipements (fonction bien entendu du diamètre débité), et les pertes restent limitées aux extrémités de barres [4]. La géométrie des lopins débités est d'autant plus mauvaise que le rapport longueur/diamètre  $d$  du lopin est faible. La limite pratique dépend de la nuance de l'acier et de son état structural ainsi que des types d'outillages utilisés : elle est voisine de  $0,7$  à  $0,8 d$ . Des faibles valeurs de la résistance à la rupture influencent également de manière défavorable la qualité de coupe.

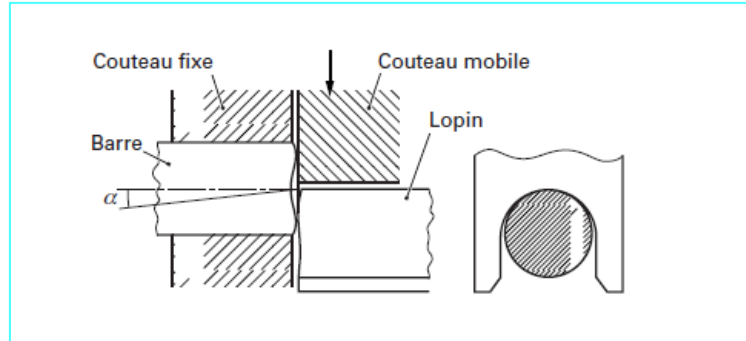


Figure 1.2 : Cisailage à couteaux ouverts [4]

#### 1.1.3.1 Cisailage à couteau ouvert

Le lopin est tranché par une lame ouverte et il n'est pas maintenu pendant le cisailage ; la forme de l'outil tranchant est circulaire et le lopin est assez fortement déformé. Cette déformation peut être compensée en partie par une inclinaison du plan de coupe par rapport à l'axe de la barre (figure 1.2). Le jeu entre les outils augmente au fur et à mesure de la descente du couteau mobile.

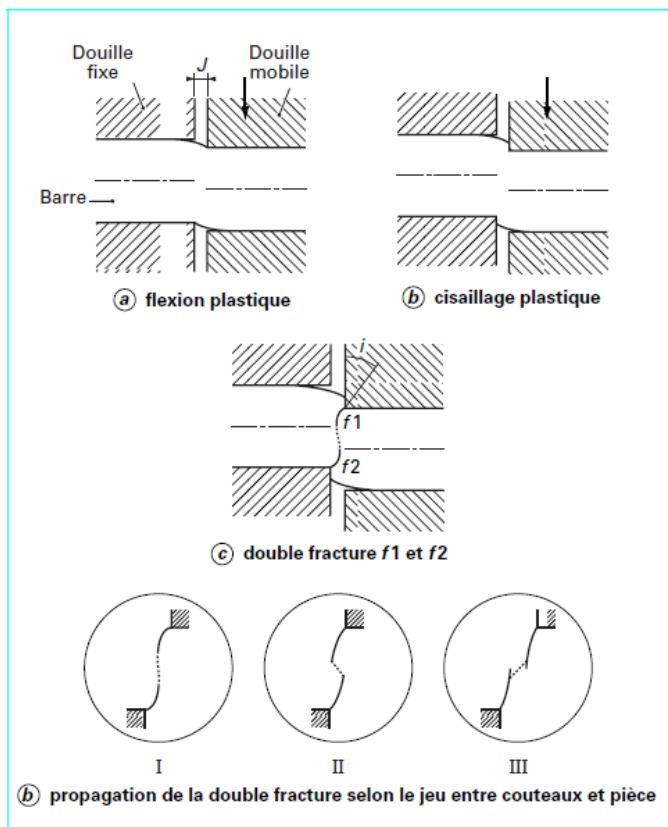


Figure 1.3 : Différentes étapes de Cisailage en lunettes [4]

#### 1.1.3.2 Cisailage en lunettes (en outils fermés)

La barre est enfermée de part et d'autre du plan de coupe dans deux couteaux l'enserrant avec le minimum de jeu compatible avec les tolérances du produit. Le cisailage s'effectue en trois phases (Figure 1.3):

- une flexion plastique ;
- un cisailage plastique ;
- une double fracture.

Lors de cette dernière phase, les fractures  $f_1$  et  $f_2$  se propagent pour se rejoindre au centre de la face fracturée si le jeu  $J$  est correct (loupe I).

Lorsque le jeu est trop faible, les fractures se raccordent par une zone arrachée génératrice de défauts sur la pièce future (loupe II) ; de même lorsque le jeu est excessif (loupe III). On constate expérimentalement une relative constance de l'angle  $i$  du plan de fracture, d'où une dépendance du jeu, d'une part, du diamètre de la barre cisailée et, d'autre part, de la position par rapport à l'axe  $zz'$  (Figure 1.4), le jeu total étant composé d'un jeu fonctionnel de coulissement  $J_f$  et d'un affûtage d'un ou des couteaux selon la forme  $A_f$ . Certaines formes plus complexes d'affûtage ont été proposées pour affiner la jonction des fractures.

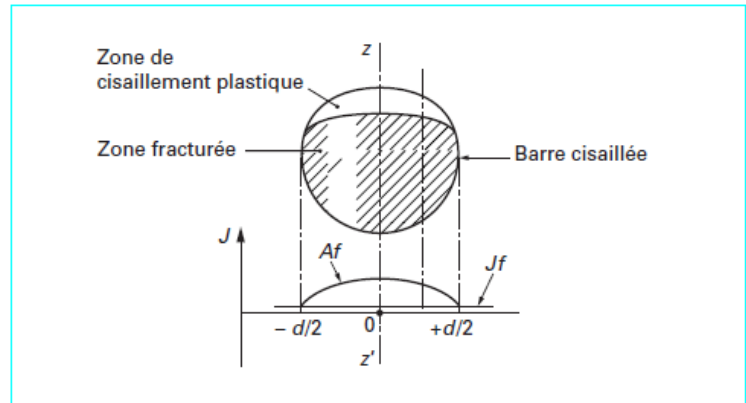


Figure 1.4 : Définition des jeux lors Cisailage en lunettes [4]

## 1.2 Les Moyens de Chauffage

### 1.2.1 Contraintes d'écoulement

Afin de diminuer l'effort nécessaire à la mise en forme, il est nécessaire de chauffer. On trouvera dans la figure 1.5 l'influence de la température sur la contrainte d'écoulement du métal estampé. Mais au cours du chauffage, les lopins se revêtent d'une couche dure d'oxydes appelée couramment « calamine ». Après estampage, on constate que cette couche ne s'est pas comportée comme le métal de base. Elle est moins déformable. La calamine a toujours une épaisseur faible mais une structure et une morphologie complexes, (Figure 1.6).

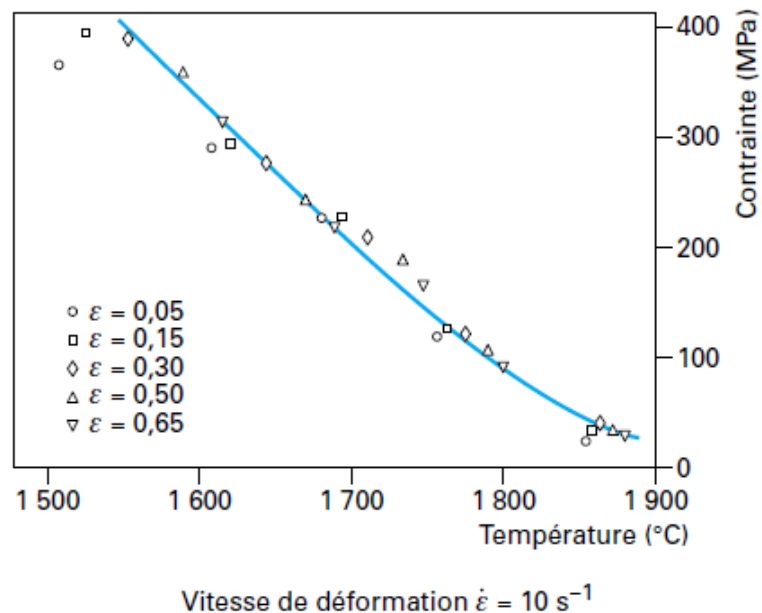


Figure 1.5 : Evolution de la contrainte d'écoulement d'un acier en fonction de la température de chauffe [5]

Dans le domaine de forgeage particulièrement le matriçage, les fours sont des équipements destinés à chauffer ou à réchauffer des pièces en métal avant de leur faire subir des déformations plastiques. Il existe deux techniques pour amener le métal à température favorable à l'estampage, la combustion de fluides liquides ou gazeux et l'énergie électrique.

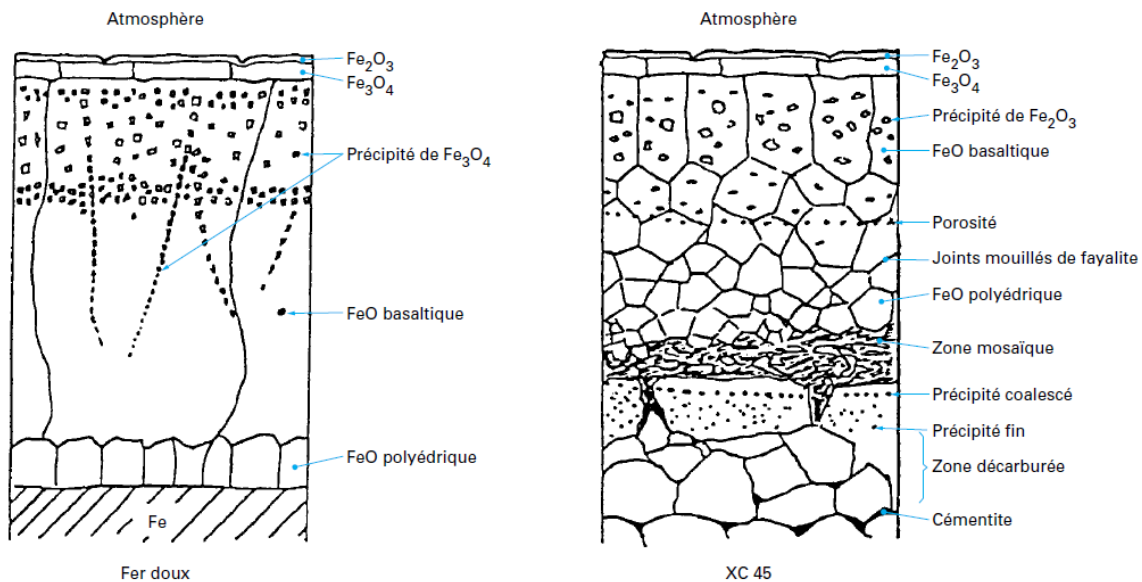


Figure 1.6 : Coupe schématique de la calamine sur du fer doux et sur un acier XC 45 [6]

### 1.2.2 Les fours à flammes :

Dans ces fours, la chaleur est fournie par la combustion de gaz ou de produits pétroliers tels que les fuels. On utilise pratiquement plus les combustibles solides. Les combustibles gazeux sont en particulier des gaz des cokeries ou de hauts fourneaux, le gaz de ville et le gaz naturel. Le combustible liquide le plus répandu est le mazout dans toutes ses différentes présentations, depuis le fuel lourd au fuel domestique. Les fuels lourds doivent être chauffés pour atteindre une viscosité permettant de les distribuer et de les pulvériser dans les brûleurs. C'est en fonction des installations générales des usines que l'on choisit une qualité du fuel déterminés.

Les fours à flammes [7] peuvent être répartis en deux catégories :

Les fours fixes ou dormants (figure 1.7). Ce sont des chambres en maçonnerie réfractaire munies de brûleurs. S'ils ont l'inconvénient d'entraîner une discontinuité dans le travail, car il y a rupture de débit entre le chargement et le moment où les pièces sont à température, en revanche, ils permettent de chauffer des pièces de toutes formes.

Les fours continus poussant ou à sole tournante : Ils permettent une production continue et un meilleur rendement thermique. Les fours poussants, dans lesquels on fait progresser les lopins bout à bout, ne peuvent permettre le chauffage de pièce de géométrie complexe. leur préfère des fours à

sole tournante (Figure 1.8) dans lesquels les produits sont déposés sur une sole circulaire ; ils progressent dans la chambre de chauffe par rotation de la sole jusqu'au défournement.

Les fours à flammes ont l'inconvénient de soumettre les produits à chauffer à une atmosphère oxydant et décarburante à haute température. De ce fait les estampeurs ont de nombreux problèmes de présentation des pièces, car il est difficile de se débarrasser de la

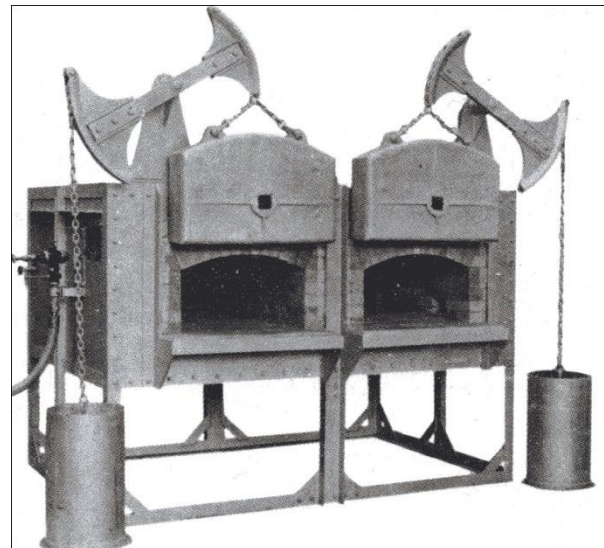


Figure 1.7 : Four à réchauffer à deux laboratoires avec chauffage aux huiles lourdes [7]

gange d'oxyde qui recouvre les lopins à la sortie du four et qui se retrouve sur les pièces sous forme d'incrustations de calamine conduisant à des rebus.

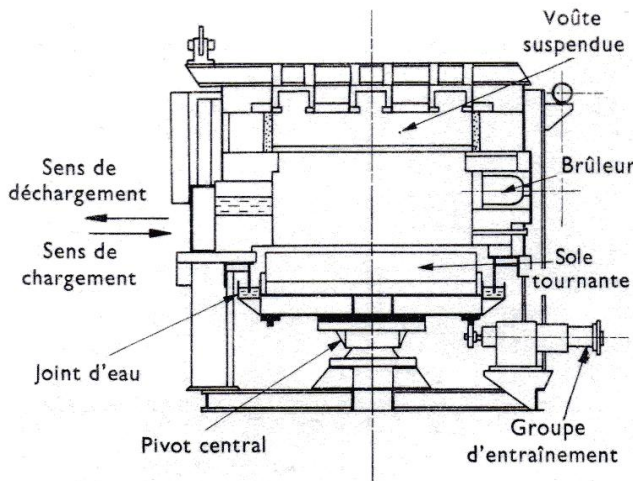


Figure 1.8 : Four à sole tournante [7]

De ce fait, une régulation automatique permet de compenser les entrées de lopins froids et les sorties de lopins chauds. Les temps de mise en route sont généralement longs : quelques heures, car le brûleur doit chauffer le four, qui lui-même doit chauffer les lopins. Les rendements énergétiques de ce type de four ont fait de très gros progrès ces dernières années, mais ils restent inférieurs à 50 %. La vitesse de chauffage est faible

### 1.2.3 Les Fours électriques

Dans les ateliers modernes, on installe de plus en plus fréquemment des moyens de chauffage électrique [8]. Les plus répandus sont les chauffeuses par induction et les chauffeuses par conduction.

#### 1.2.3.1 Chauffeuses par induction :

Elles consistent (Figure 1.9) [1, 9] à induire, dans un inducteur à l'aide d'un générateur G, à la surface du métal passant dans une bobine B créant un champ magnétique alternatif, des courants qui échauffent par effet Joule la périphérie des lopins. La chaleur

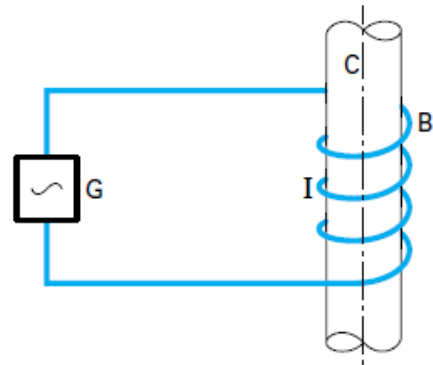


Figure 1.9 : Principe de chauffage par induction [9]

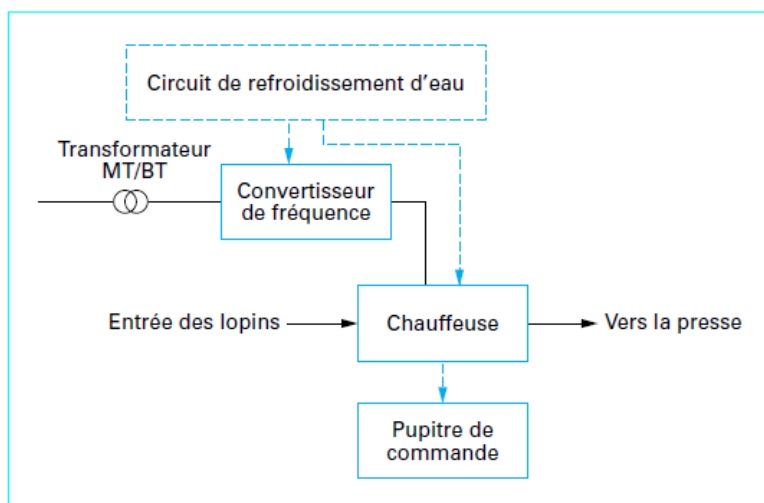


Figure 1.10 : Principe de fonctionnement d'une chauffeuse par induction [9]

ainsi créée se propage vers le centre du lopin C par conduction thermique. Ce procédé permet un chauffage rapide des lopins et limite l'épaisseur de calamine formée. Les lopins (Figure 1.10) traversent à une vitesse constante de l'ordre de 0,2 à 5 m/min, l'inducteur selon son axe longitudinal.

Cet inducteur est alimenté par un convertisseur de fréquence, lui-même alimenté en MT/BT [10, 11].

Les convertisseurs de fréquence sont aujourd'hui statiques à

thyristors. Ils sont refroidis par un circuit d'eau. Les fréquences utilisées pour les aciers varient selon la section des lopins : 2 000 à 10 000 Hz pour les diamètres inférieurs à 100 mm, 500 à 1 000 Hz pour les diamètres supérieurs à 100 mm.

Le rendement global des chauffeuses à induction varie entre 70 et 80 % selon le couplage réalisé entre la section de l'inducteur et celle du lopin.

Les temps de chauffage sont très réduits par rapports aux fours à flammes et la rapidité de chauffage permet d'éviter la formation de calamine, du moins en quantité gênante. L'inconvénient du chauffage par induction réside en ce qu'il nécessite des investissements plus élevés que les fours à flamme. En effet, en plus des chauffeuses proprement dites il faut installer les alternateurs qui fournissent le courant à la fréquence souhaitée ; ce sont soit des groupes tournants moteur-alternateur, soit des groupes statiques de thyristors.

Le choix de la fréquence du courant est déterminé par la section de la matière à chauffer et les inducteurs sont calculés en fonction du diamètre des lopins et du débit horaire. Lorsque l'on a à chauffer des sections différentes de métal, il faut prévoir le changement des inducteurs. Malgré ses contraintes le chauffage par induction apporte des nombreux avantages qui permettent de rentabiliser les investissements [1,7,8]:

- Economie de matières résultant d'une moindre perte par oxydation au feu. Cette économie est d'environ 15%.
- Débit régulier de métal chaud permettant une cadence précise dans l'alimentation des machines et une mécanisation éventuelle.
- Gain de surface dans l'atelier car une chauffeuse est environ 5 fois moins encombrante qu'un four à flammes
- Meilleure ambiance de travail
- Economie sur les frais d'entretien des produits réfractaires.
- Elimination de l'inertie calorifique. Dans un four à flammes il faut prévoir une période de mise à température de plusieurs heures, et en cas d'arrêt de production il faut maintenir le four à température. Avec le chauffage par induction, la mise en température est instantanée.

### 1.2.3.2 Chauffeuses par conduction :

Les chauffeuses par conduction d'une puissance de 10 à 1 000 kVA ont un emploi plus spécialisé. Elles sont limitées aux lopins très allongés dont le rapport diamètre/longueur est élevé : supérieur à 8. Avec un investissement relativement faible, ces matériels permettent un chauffage encore plus rapide que les chauffeuses par induction. Le principe du chauffage par conduction est celui de l'effet Joule (Figure 1.11).

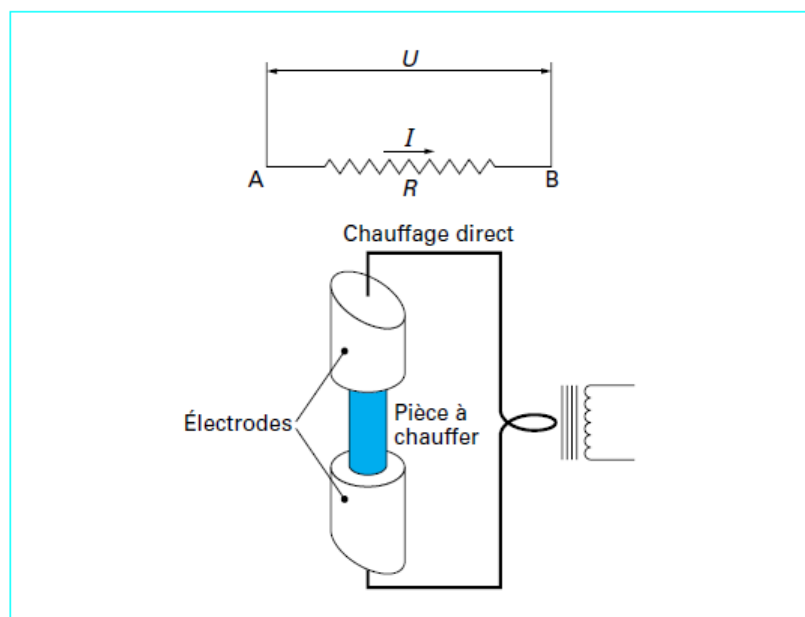


Figure 1.11 : Principe de chauffage par conduction [9, 11]]



La pièce à chauffer est placée entre deux électrodes. La chaleur ainsi produite, directement à l'intérieur du lopin, confère à ce mode de chauffage une très grande efficacité énergétique : rendement voisin de 100 %. Les chauffeuses par conduction fonctionnent souvent à la fréquence du réseau. D'une manière schématisée, elles comprennent : un transformateur BT/TBT, la chauffeuse proprement dite comprenant les électrodes d'amenée de courant et le système de manipulation du lopin, un système de refroidissement des électrodes et des équipements de régulation (Figure 1.12).

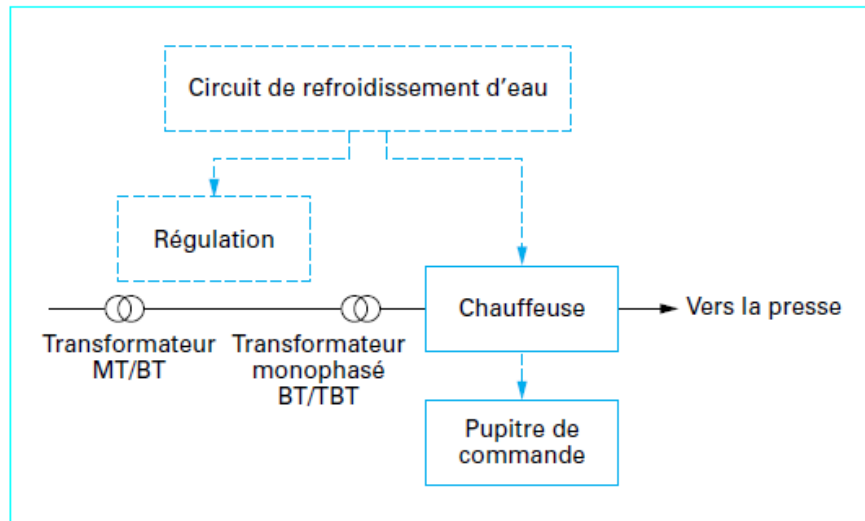


Figure 1.12 : Principe de fonctionnement d'une chauffeuse par conduction [9, 11]

#### 1.2.4 Les fours à traitements thermiques

Il est presque toujours nécessaire de faire subir un traitement thermique [10] aux pièces estampées, soit pour obtenir une usinabilité meilleure, et dans ce cas on opère un recuit de normalisation ou un recuit conduisant à une structure de la matière plus favorable à l'usinage, soit pour donner aux pièces des caractéristiques mécaniques définitives en pratiquant une trempe suivie d'un revenu.

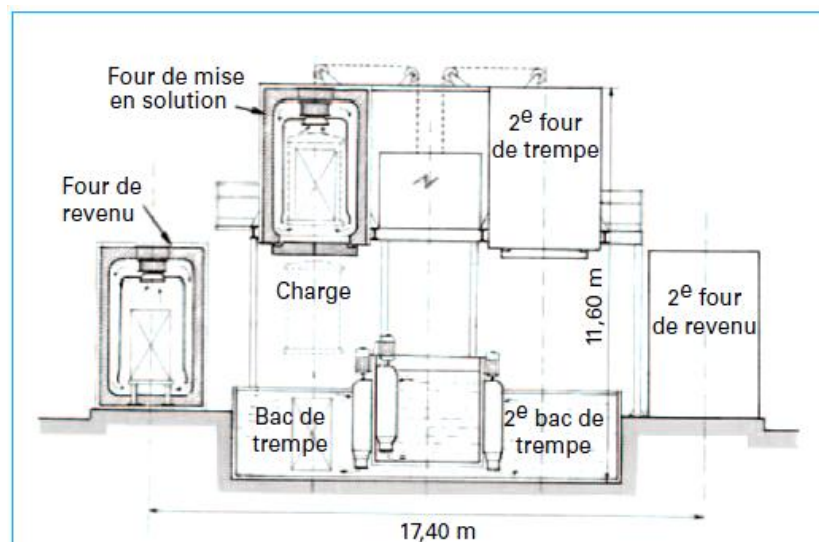


Figure 1.13 : Vue d'ensemble d'une installation de traitement thermique industrielle [10]

Ces opérations se font dans des fours poussant continus, les pièces étant chargées dans des plateaux ou dans des dispositifs spéciaux qui réduisent les risques de déformations. Ces fours sont chauffés au gaz ou au mazout et on ne prête pas une attention particulière à l'atmosphère ambiante des fours. En revanche on assure une régulation très stricte des températures (Figure 1.13).

### 1.2.5 Classification

Il n'est pas évident de trouver une classification des fours puisqu'ils forment des éléments qui s'intègrent dans une chaîne de production d'un grand nombre d'activités industrielles. Dans le contexte industriel, les dossiers de Techniques de l'ingénieur [12] présente une classification arbitraire mais intéressante puisqu'elle permet de donner des caractéristiques communes. Elle propose quatre classifications, en fonction :

- de la manutention du produit : fours continus ou discontinus ;
- du procédé de chauffage : direct ou indirect ;
- du niveau de température ;
- du combustible.

#### 1.2.5.1 Fours continus et fours discontinus

Le critère principal est la manutention et la circulation du produit. Dans un four continu, le produit à chauffer entre à une des extrémités et en ressort à l'autre. C'est le cas :  
 — des fours de réchauffage de semi-produits (fours à longerons et fours poussant) de la sidérurgie ;  
 — des fours de l'industrie chimique et du raffinage ;  
 — des fours rotatifs de l'industrie cimentière.

Dans un four discontinu, le produit à chauffer est immobile dans le four ; il est chargé et déchargé (enfourné et défourné) au même endroit. C'est le cas :

- des fours à sole mobile de forge ;
- des fours à soles fixes de traitement thermique ;
- des fours à cloches mobiles et élévateurs.

Cette différence dans la manutention entraîne des différences notables du point de vue thermique.

Dans un four continu, un point du four sera toujours (ou à peu près) à la même température ; dans un four discontinu la température en un point donné du four évoluera en fonction du cycle de chauffage que l'on veut faire subir au produit (figure 1.14).

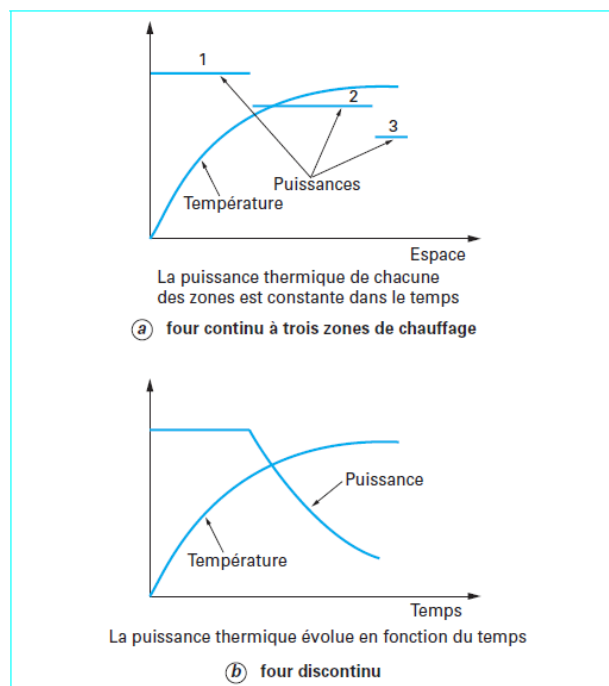


Figure 1.14 : Evolution des températures et des puissances de chauffe dans les fours [12]

#### 1.2.5.2 Chauffage direct et chauffage indirect

Le critère est ici le contact entre le produit et les gaz issus de la combustion.

### 1.2.5.2.1 Fours à chauffage direct

Il y a contact entre les gaz issus de la combustion et les produits à chauffer. Du point de vue thermique, cela entraîne qu'une partie du transfert de chaleur s'effectue par convection. Cette dernière provoque des phénomènes à la surface du produit, qui peuvent lui être préjudiciables. C'est le cas de décarburation et oxydation dans les fours de réchauffage de métaux.

Pour éviter ce contact, on place parfois, entre les produits et les gaz un écran protecteur : le chauffage est alors indirect (Figure 1.15).

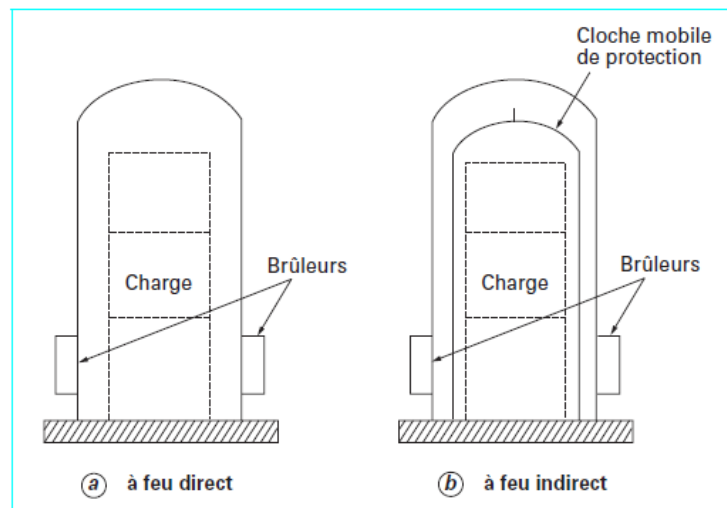


Figure 1.15: Four à cloche mobile [12]

### 1.2.5.2.2 Fours à chauffage indirect

L'interaction entre les gaz de combustion et les produits n'existe plus. Par contre, il introduit une résistance supplémentaire au transfert de chaleur qui doit se faire par conduction au travers de la paroi protectrice, puis par rayonnement et éventuellement convection vers la charge. Le problème technologique est alors la tenue de cette paroi qui est portée à haute température et est au contact de la flamme et/ou des gaz à haute température. C'est le cas des fours à cloche mobile, des fours à moufle et des fours équipés de brûleurs à tubes radiants.

### 1.2.5.3 Fours à haute et fours à basse température

La classification est ici plus arbitraire car une même température peut être considérée comme haute dans un type d'activité et basse dans une autre activité. Exemple : une température de 700 °C sera considérée comme haute dans l'industrie chimique et basse en sidérurgie ou dans l'industrie du verre. Même si cette limite est un tant soit peu arbitraire, elle n'en est pas moins réelle. D'un point de vue technologique, au-dessus de 700 °C à 800 °C, il devient délicat de construire des fours à chauffage indirect.

D'un point de vue thermique :

- au-dessus de 1 000 °C, le transfert de chaleur se fait essentiellement par rayonnement ;
- au-dessous de 700 °C, la part de la convection devient non négligeable et on cherchera l'améliorer par mise en circulation des gaz autour du produit.

#### 1.2.5.4 Combustibles

On peut également classer les fours en fonction de l'énergie utilisée [13-16]. Le type d'énergie disponible et utilisé a, en effet, un impact important sur la conception, l'utilisation et l'exploitation des fours.

On trouvera dans le domaine des fours industriels, avec plus ou moins d'importance selon les activités, toutes les formes d'énergie :

- des fours électriques : il s'agit des fours à résistances (effet Joule), à arcs, à induction, à électrodes submergées, etc. ;
- des fours à gaz ; ils utilisent le gaz naturel, mais aussi le gaz de cokerie, le gaz de raffinerie, le gaz de haut-fourneau, etc. ;
- des fours à combustibles liquides : ils utilisent le fuel lourd, mais aussi le gazole, le naphta,
- des fours à combustibles solides : ils utilisent les charbons ou le coke de pétrole (généralement sous forme pulvérisée), mais aussi les déchets divers. Ces combustibles sont de moins en moins utilisés.

Dans ce domaine, le progrès le plus spectaculaire concerne la structure d'inducteurs multicouches « à haut flux ». Les spires de l'inducteur sont divisées en couches superposées (Figure 1.16) parcourues par le courant inducteur.

- L'avantage est que ce courant circule dans toute l'épaisseur de l'inducteur au lieu d'être rejeté vers la périphérie par effet de peau. La résistance de l'inducteur diminue puisque sa section apparente augmente.
- L'inconvénient est de soumettre les couches internes du bobinage au champ magnétique créé par les couches externes et ainsi de générer des pertes supplémentaires dans l'inducteur

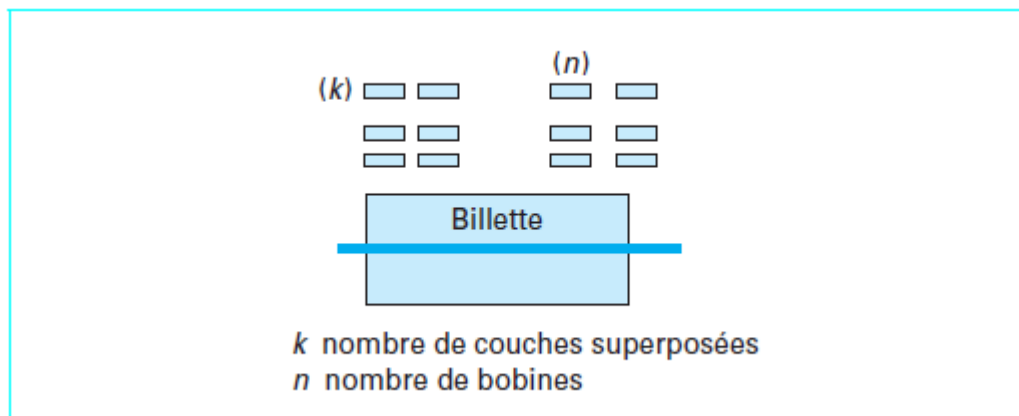


Figure 1.16 : Inducteur multicouches [13]

La trempe superficielle bénéficie de la montée en puissance et en fréquence des générateurs jusqu'à 400 kHz. En ce qui concerne les cylindres, on trouve le cas des pièces statiques (Figure 1.17) ou au défilé (Figure 1.18). Pour les engrenages, la possibilité de trempe à « double fréquence » permet même des traitements quasi simultanés des diverses parties des dents (Figure 1.19). La fréquence basse (2 à 10 kHz) permet de traiter le contour durant quelques secondes, tandis que le haut des dents est traité par la fréquence élevée (150 à 400 kHz) durant 150 à 500 ms. Le temps de chauffe est ainsi très réduit, ce qui évite la diffusion thermique vers le cœur du métal.

Les puissances mises en jeu sont importantes, souvent supérieures à 100 kW.

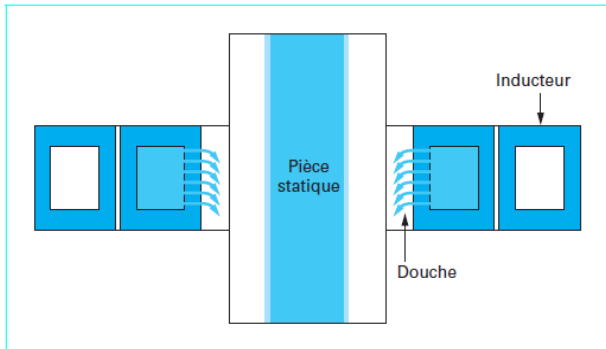


Figure 1.17 : Traitement thermique de cylindre statique [13]

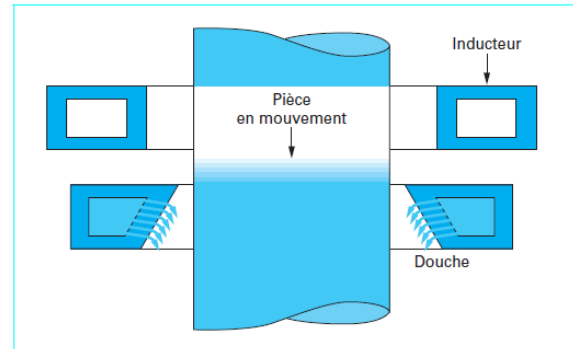


Figure 1.18 : Traitement thermique superficiel de cylindre au défilé [13].

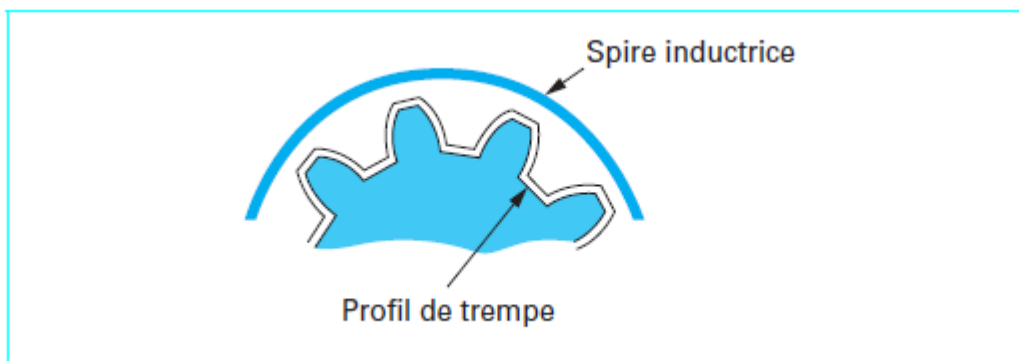


Figure 1.19 : Traitement thermique d'un engrenage [13]

## 1.2.6 Transfert de chaleur dans les fours

La finalité d'un four est de transférer de l'énergie à une charge (produits) pour en élever la température. Ce transfert se fera pas les trois modes de transfert de chaleur (rayonnement, convection, conduction), la plupart du temps simultanément, mais dans des proportions très variables [12, 14, 17].

### 1.2.6.1 Transfert par rayonnement

Ce sont les fours de sidérurgie, de verrerie, de cimenterie. La température que l'on veut obtenir sur le produit dépasse, et parfois nettement, 1 200 °C. C'est également le cas d'un certain nombre de fours de l'industrie du pétrole et de la chimie dans lesquels, bien que la température du produit soit inférieure à 500 °C, une partie importante de la chaleur est fournie directement par le rayonnement de la flamme dans une zone de radiation. Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par rayonnement de la flamme et des gaz issus de la combustion.

### **1.2.6.2 Transfert par convection**

Ce sont, en particulier, les fours de traitement thermique de métallurgie, les fours de revêtement de surface et les fours pour les métaux non ferreux. La température que l'on veut obtenir sur le produit dépasse rarement 700 °C, et est parfois sensiblement inférieure.

C'est également le cas des zones de convection des fours de l'industrie du pétrole et de la chimie. Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par convection de gaz transparents.

### **1.2.6.3 Transfert par conduction**

Si le rayonnement et la convection sont les vecteurs principaux du transfert de chaleur du four vers la charge, avec, selon les cas, la prédominance de l'un ou de l'autre, la conduction assure le transfert de chaleur à l'intérieur des produits. Pour les produits de grandes dimensions et/ou de faible conductivité thermique, la conduction est même assez souvent le mode déterminant dans la mesure où c'est le transfert de chaleur à l'intérieur de la charge qui limite la vitesse de chauffage et détermine le temps de séjour dans le four. Les lois à prendre en compte sont alors celles de la conduction en régime variable. C'est le cas du réchauffage de lingots de forge.

La conduction joue aussi un rôle important pour les parois des fours, puisque c'est elle qui conditionne, en partie, les pertes thermiques du four et son rendement. Lorsque le régime de température est établi dans le four, ces pertes se calculeront par les lois de la conduction en régime permanent.

## **1.2.7 Exploitation et maintenance des fours**

### **1.2.7.1 Qualité du chauffage**

La qualité de chauffage consiste à obtenir, à la sortie du four, un produit à une température la plus homogène possible. Cela n'est pas toujours facile du fait des dissymétries qui existent inévitablement dans l'enceinte des fours tels que les produits ou partie de produits inégalement exposés au rayonnement des flammes (fours de réchauffage de lingots).

La qualité du chauffage sera donnée par l'écart de température maximal entre deux points d'un même produit et/ou entre deux produits successifs.

Exemple : écarts de température :

- entre le haut et le bas d'un lopin ;
- entre deux ébauches successives avant matriçage.

Cette qualité de chauffage est obtenue lorsque les conditions de chauffage sont respectées. Ces conditions sont données sur la base des principes à respecter pour surveiller le bon fonctionnement des fours.

### **1.2.7.2 Bilans énergétiques**

Quel que soit le four, l'objectif est de fournir aux produits une quantité de chaleur déterminée par :

- sa température initiale ou température d'enfournement ;
- la température finale désirée ou température de défournement
- la masse des produits à chauffer ;
- la chaleur massique des produits et, s'il a lieu, les chaleurs de transformation durant la montée en température.

### 1.2.7.3 Rendement en exploitation

Les rendements sont utilisés pour déterminer les performances d'une installation dans des conditions bien définies. En exploitation industrielle des fours les conditions d'exploitation sont variables :

- le four n'est pas utilisé en permanence à sa production maximale ;
- certaines installations fonctionnent d'une façon discontinue. Cela entraîne une consommation énergétique qui peut être sensiblement supérieure à celle obtenue lors d'un essai limité dans le temps.

On utilise alors la notion de consommation spécifique  $C_s$  qui est le rapport de l'énergie totale utilisée pendant une période donnée (par exemple un mois) à la quantité de produit chauffé ou traité durant la même période :

### 1.2.7.4 Flux thermiques admissibles

Le flux thermique admissible est la quantité de chaleur que l'on peut fournir à la charge par unité de temps et de surface. On l'exprime en kW/m<sup>2</sup> ou encore parfois en kcal.h-1.m-2. Dans un four continu, le flux reçu par le produit varie en fonction de la position de celui-ci dans le four. Dans un four discontinu, le flux reçu varie au cours du temps. Très souvent ce flux est limité par les capacités d'absorption de la charge.

Un flux trop élevé peut entraîner :

- des contraintes thermiques inacceptables dans les pièces de grandes dimensions (fours de forge) ou de faible conductivité thermique (four de cuisson de céramique) ;
- une température de surface entraînant une fusion locale du produit (fours de réchauffage avant laminage) ;
- une température trop élevée de l'écran de protection intermédiaire (four à cloches mobiles) ;
- une température entraînant localement une dissociation du produit chauffé (four tubulaire de la chimie).

La maîtrise des flux thermiques est un des points les plus importants dans la définition et la conduite des fours. Elle impose de savoir maîtriser et d'adapter à chaque four, les phénomènes de combustion et de transfert de chaleur.

### 1.2.7.5 Puissance installée

C'est la quantité de chaleur maximale que l'on peut introduire par unité de temps dans le four.

## 1.3 Moyens de mise en forme à chaud (estampage)

### 1.3.1 Principe de mise en forme

La fabrication consiste à chauffer un morceau de demi produit d'une géométrie bien déterminée appelé « lopin » à une haute température, puis le placer entre deux outillages « matrices », dans lesquelles une gravure a été usinée. Cette gravure est la représentation exacte de la forme de l'avant produit, appelé brut de forge [1].

Une force est exercée, par choc ou par pression, sur le lopin tel qu'il est contraint d'épouser la forme de la gravure dans la matrice, présentant un cordon qui longe la bavure lors de

l'opération de forgeage souvent appelé « cordon de bavure ». Cette bavure permet la maîtrise de la géométrie de la pièce finie ; elle est ôtée à chaud dans une « presse d'ébavurage »

Un traitement thermique peut être appliqué sur la pièce brute ébavurée, et ceci est en fonction des caractéristiques mécaniques souhaitées.

Pour avoir une déformation plastique, il faut que l'effort exercé sur le lopin engendre dans la pièce un état de contrainte vérifiant les critères de plasticité à savoir que la contrainte généralisée soit égale à la contrainte d'écoulement du métal .

La figure 1.20, montre l'évolution de la contrainte d'écoulement, de la Quantité limite de déformation et de la perte au feu, en fonction de la température [1].

L'effort appliqué doit être inférieur à la limite d'élasticité de l'outillage, pour ne pas avoir une déformation de l'outillage.

Le lopin subit une déformation plastique ainsi qu'une déformation élastique, et une contraction lors de son refroidissement. L'outillage subit seulement une petite dilatation et une déformation élastique due à l'échauffement durant l'opération d'estampage. La prise en compte de ces données est nécessaire pour l'obtention de pièces brutes aux cotes souhaitées à l'intérieur des tolérances dimensionnelle (norme européenne EN 10 243 et EN 10 243-2).

Le Tableau 1.1 montre les secteurs d'activité de l'estampage selon SNEF [1,18]

Lors de l'opération d'estampage, les lopins convenablement chauffés sont mis à la forme de l'avant-produit par les gravures de l'outillage qui sont portées à une température de 150° à 200 °C maximum afin d'augmenter leur ténacité, c'est-à-dire leur résistance à la propagation brutale de fissures surtout lors du travail par chocs. Une seule exception à cette règle : le forgeage dit « isotherme » pour lequel l'outillage est préchauffé à une température voisine de celle du métal à chauffer. Cette exception se justifie dans quelques cas particuliers où les matériaux forgés ont des particularités métallurgiques qui imposent cette procédure. C'est le cas des alliages réfractaires utilisés pour fabriquer les pales de la zone chaude des réacteurs d'avions ou des turbines à gaz.

Tableau 1 : Secteurs d'activité de l'estampage [1, 18]

Secteurs d'activité	% du tonnage total
Constructeurs automobiles	30 à 40 %
Organes de transmission	8 à 11 %
Matériels agricoles	10 à 12 %
Matériels de travaux publics	8 à 11 %
Matériels ferroviaires	3 à 7 %
Matériels de mines	1,4 à 2,5 %
Constructions mécaniques	6 à 9 %
Aéronautique	1 à 2 %
Robinetterie	4 à 6 %
Armement	1 à 2 %
Divers	5 à 10 %

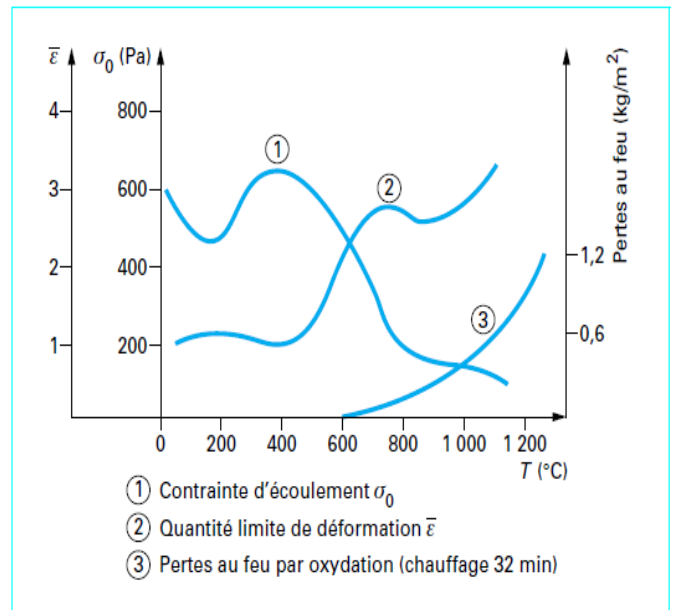


Figure 1.20 : evolution de la contrainte d'écoulement de la quantité limite de déformation et de la perte au feu en fonction de la température [1]



Dans tous les cas traditionnels, le profil thermique relevé dans les matrices dépend de la zone de l'outillage, de ses dimensions et des temps de contact lopin/matrice, comme le montre la figure 1.21. De plus, la calamine, la lubrification et l'état de surface de l'outillage sont des paramètres qui viennent dans la pratique perturber les considérations théoriques énoncées ci-avant.

### 1.3.2. Lubrification:

Durant l'opération d'estampage, il est souvent nécessaire de mettre des lubrifiants. Au moins 3 types de lubrifiants sont mis en jeu :

- gazeux : air et vapeur d'eau contenus dans la sciure de bois ;
- solide : graphite dans l'eau ou de l'huile déposé généralement par

pulvérisation ;

- fluide (visqueux) : verre fondu principalement utilisé pour les pièces en alliage de titane.

Les propriétés thermiques des lubrifiants sont différentes, leurs influences sur les outils et lopin le sont aussi. Les lubrifiants vont remplir les trous et les interstices existants entre pièce et matrice. Les lubrifiants avec une conductivité thermique médiocre jouent le rôle d'isolant thermique. Contrairement, ceux avec une bonne conductivité thermique joueront le rôle de joint (produit, graphite) et assureront un bon contact thermique nécessaire à une bonne évacuation de la chaleur [1]

### 1.3.3 Machines utilisées durant la procédure d'estampage :

Le type de machines employées pour forger un lopin, influence toute la mise en forme. En effet, la presse utilisée conditionne la vitesse de déformation, la température du lopin et les cadences de production.

Selon qu'elles travaillent par choc, par pression ou en intermédiaire (entre choc et pression), Il existe quatre types de machines [20] pour la mise en forme du lopin :

- les marteaux pilons. (Figure 1.22)
- les presses hydrauliques (Figure 1.23)
- les presses mécaniques (Figure 1.24)
- les presses à vis (Figure 1.25).

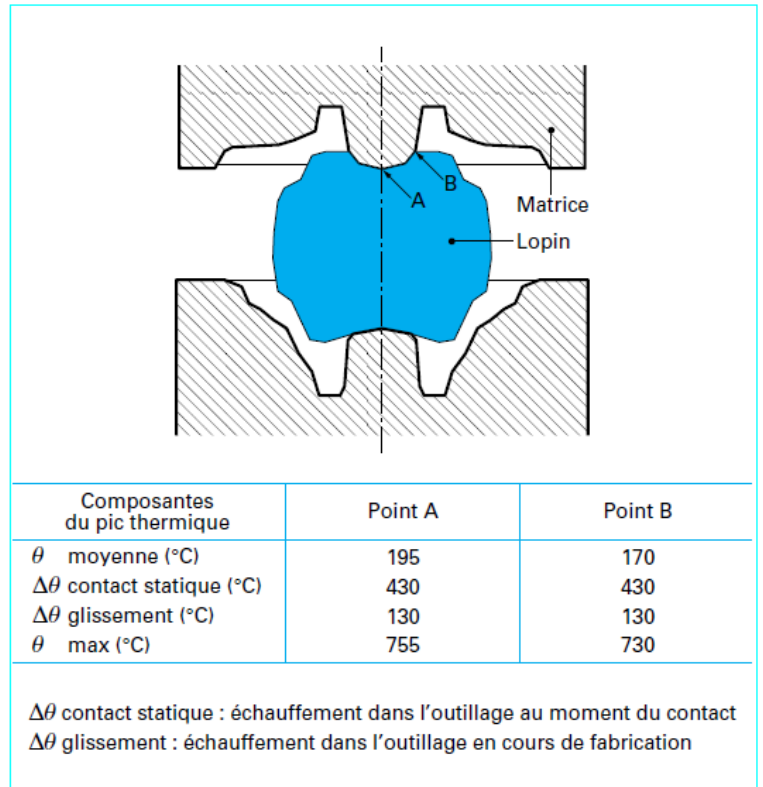


Figure 1.21 Température de surface de l'outillage en deux points relativement proches [1,19]

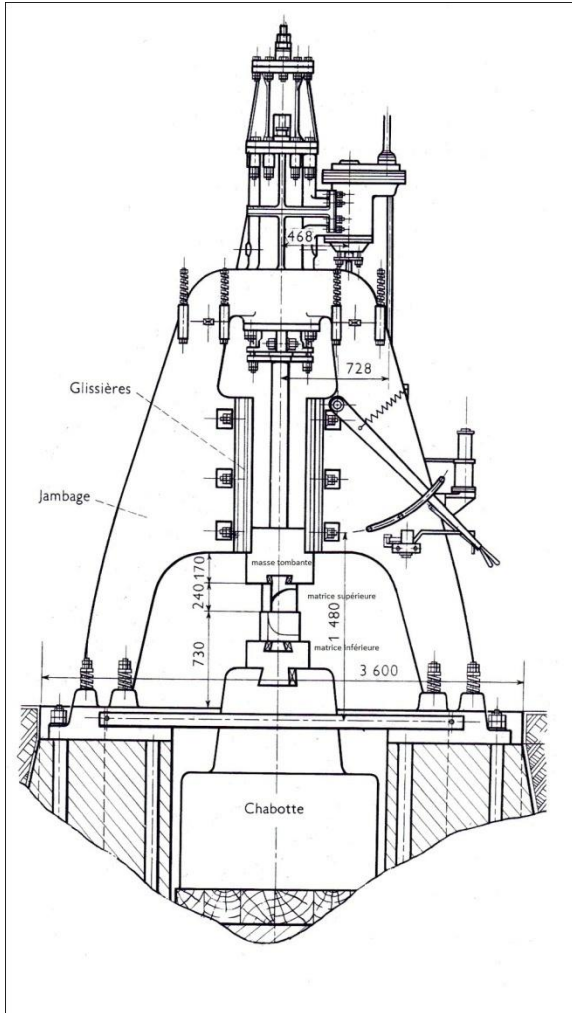


Figure 1.22 : Schéma de principe d'un marteau pilon classique [21]

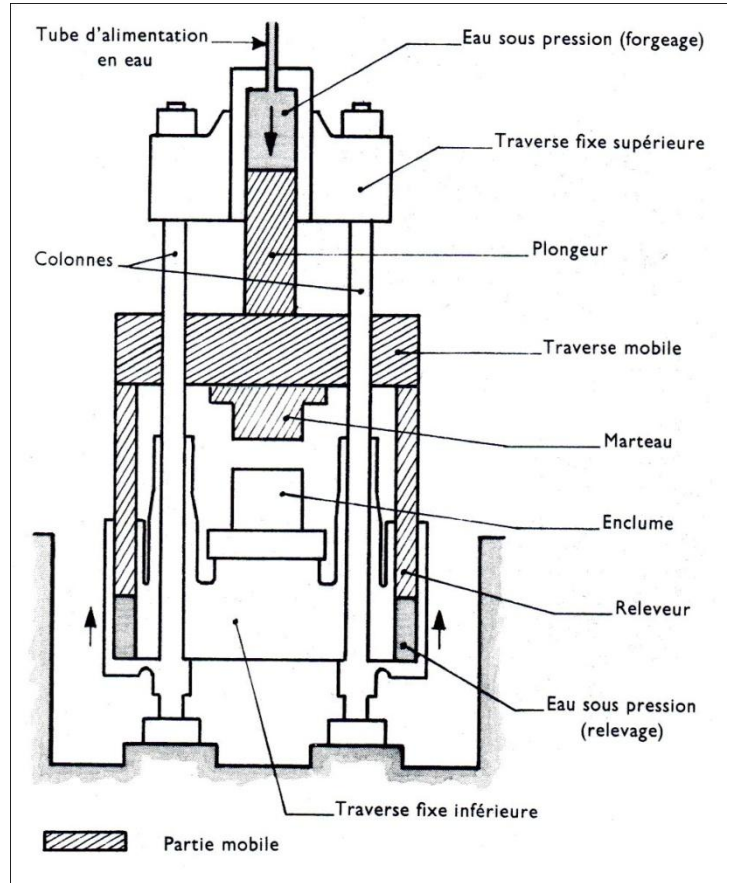


Figure 1.23 : Schéma de principe d'une presse hydraulique classique [21]

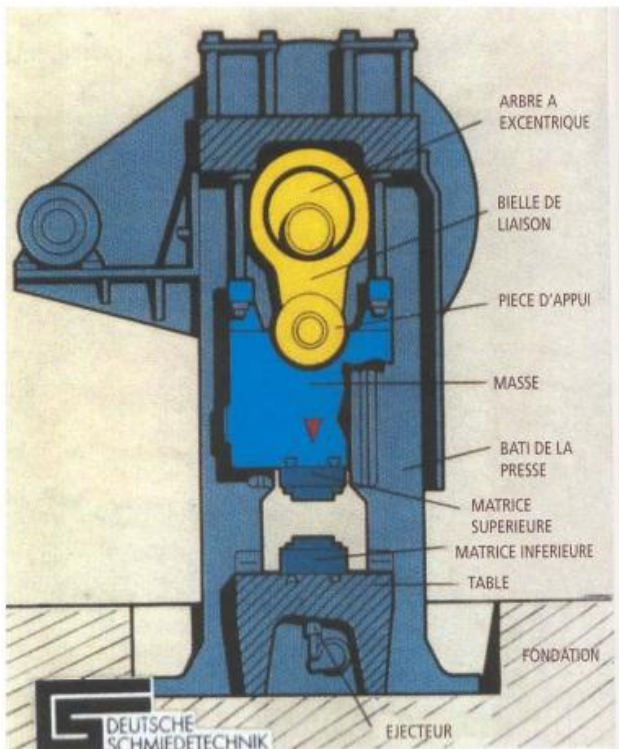
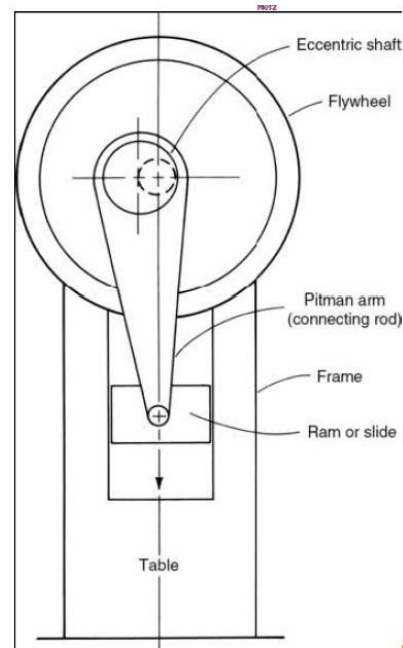


Figure 1.24.a : Schéma de principe d'une presse mécanique [20,21]



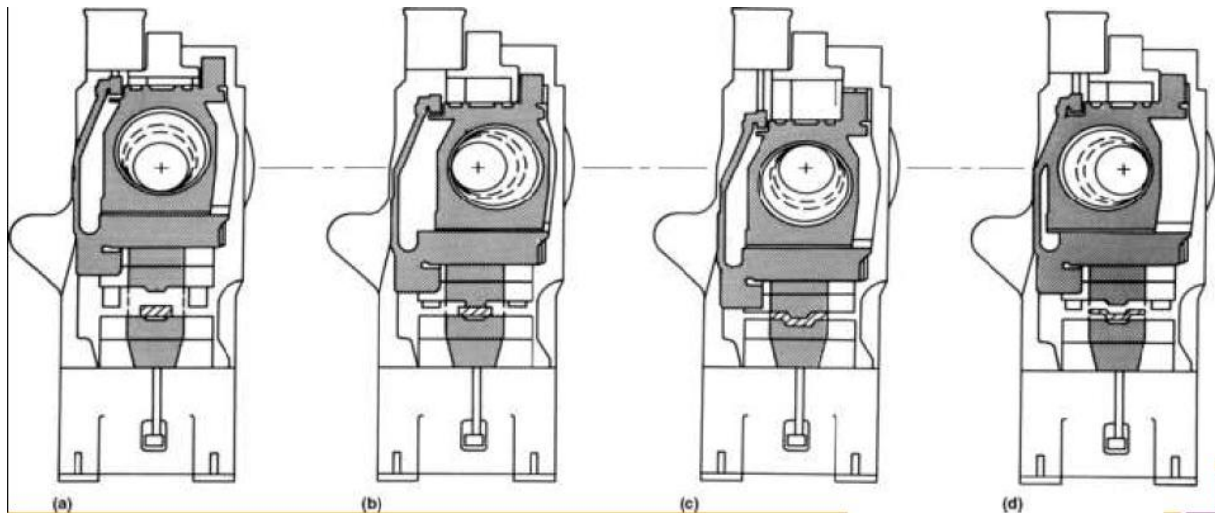


Figure 1.24.b : Cinématique d'une presse mécanique [20]

- a) Piston en haut de la course, la culasse est centrée,
- b) à mi-chemin de la course descendante, la culasse est en position avant extrême
- c) En bas, au point mort, la culasse est au centre du piston
- d) à mi-chemin de la course ascendante, la culasse est en position arrière extrême

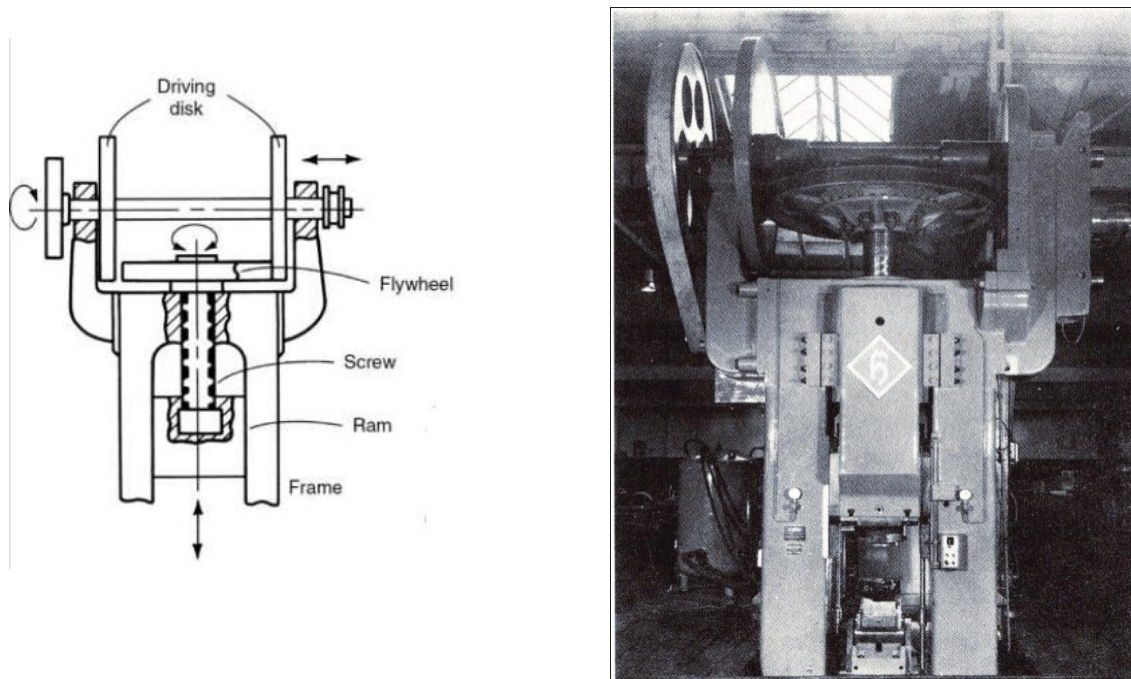


Figure 1.25.a : Presse à vis à entraînement par plateau [20,21]

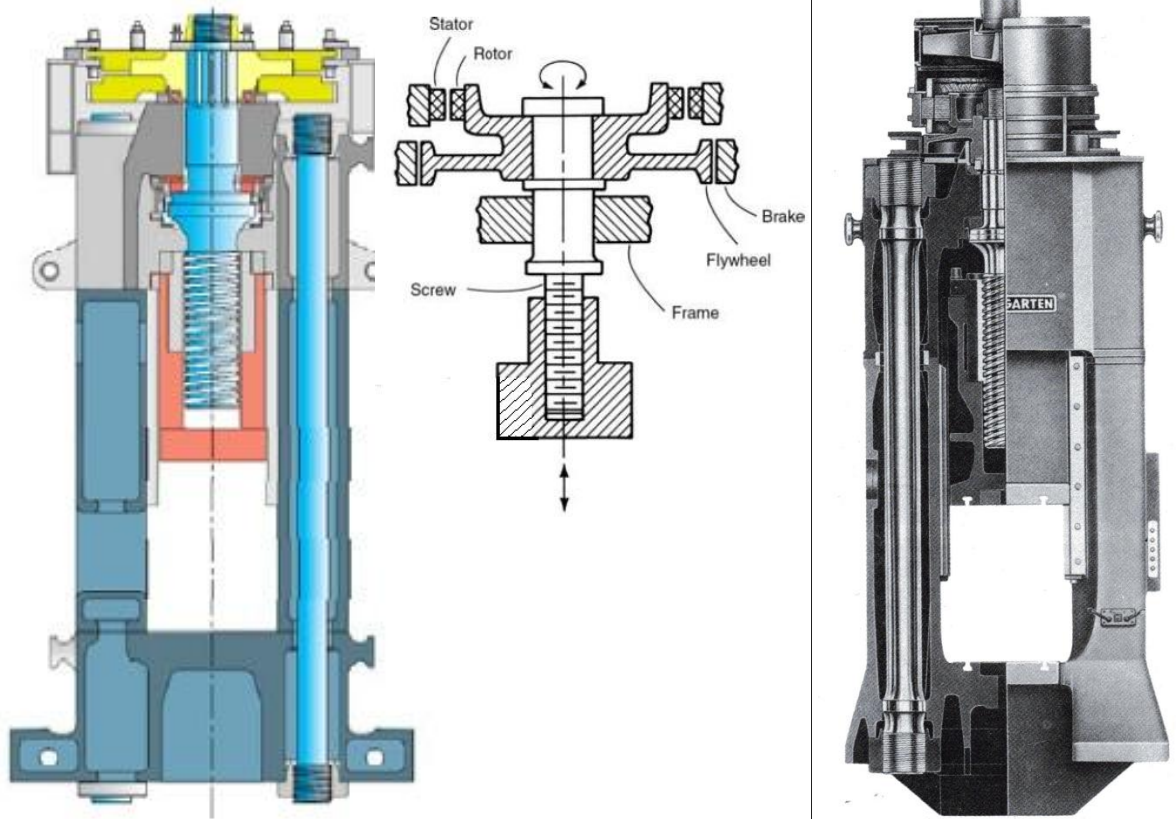


Figure 1.25.b : Presse à vis à entraînement direct [20,21]

### 1.3.3.1 Les machines travaillant par chocs

#### 1.3.3.1.1 Les marteaux pilons 'simple effet'

Ce sont les machines les plus utilisées en forgeage [21]. Ils comportent (Figure 1.22)

- une chabotte**, masse métallique servant de table de travail et sur laquelle on fixe la matrice inférieure,
- un marteau**, masse tombante sur laquelle est fixée la matrice supérieure
- des organes de guidage**, jambages ou montants fixés sur la chabotte et portant des glissières dans laquelle la masse tombante est guidée
- des organes de relevage** de la masse tombante supportée par les jambages

Les marteaux pilons se divisent en deux grandes catégories :

**Les pilons utilisant la gravité** : qui, par leur nature, caractérisent le type de mouton : mouton à corde (lorsque le marteau est relevé au moyen d'une corde), à courroie, à chaîne (Figure 1.26) ou à planche (Figure 1.27). Aujourd'hui leur diffusion est très restreinte. Cependant ce sont les machines plus économiques sur le plan de la consommation, mais leur rythme est assez lent et leur puissance est limitée (on ne dispose que de l'énergie résultant de la chute libre de la masse tombante, fonction de la masse et de la hauteur de chute).

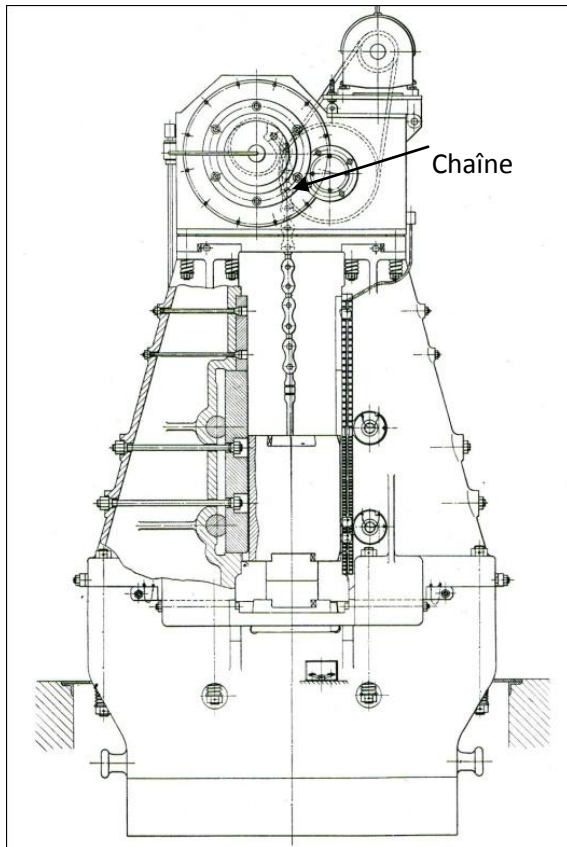


Figure 1.26 : Marteau Pilon à Chaîne [21]

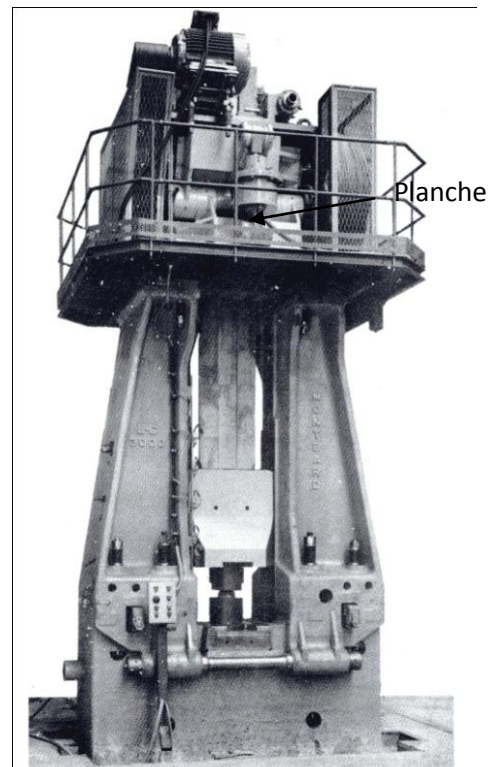


Figure 1.27 : Marteau Pilon à Planche [21]

**les marteaux motorisés :** dans lesquels le relevage est assuré au moyen d'un cylindre pneumatique ou hydraulique (Figure 1.28).

#### Les principaux avantages des pilons :

- Les pilons développent des charges importantes pour un temps de contact court entre l'outil et le lopin.
- le pilon est la machine la moins cher
- le pilon est le procédé de forgeage le plus économique,
- c'est également le procédé le plus polyvalent, dans la diversité des opérations qu'il peut exécuter

#### Les Inconvénients des pilons :

- les chocs subis par la matrice limitent sa durée de vie ,
- le contrôle métallurgique de la pièce forgée est rendu difficile par rapport aux autres procédés (mauvaise maîtrise de la vitesse de déformation).



Figure 1.28 Marteau Pilon simple effet à relevage hydraulique [21]

### 1.3.3.1.2 Les marteaux pilons 'double effet' :

Ils sont appelés aussi 'Pilons matriciers' (Figure 1.29). Ces machines représentent une amélioration des pilons à chute libre. Ils comportent comme eux une chabotte, des jambages avec glissières et une masse tombante, mais celle-ci est reliée par une tige au piston d'un cylindre à double effet. Le marteau étant en haut de course, on admet le fluide moteur au-dessus du piston, ce qui a pour effet d'accélérer considérablement la vitesse du marteau, et par conséquent d'augmenter l'énergie emmagasinée. La vitesse de ces marteaux est 2 à 3 fois plus grande que celle des pilons à simple effet. Le fluide moteur est de la vapeur d'eau ou de l'air comprimé sous pression de 7 bars en général.

Sur les installations existantes on a tendance à remplacer la vapeur par l'air comprimé pour se libérer des contraintes de production de vapeur ; cependant le rendement est plus faible car le remplissage est plus lent avec l'air comprimé qu'avec la vapeur : la productivité se trouve réduite. On construit des pilons à double effet de toutes dimensions ; leur capacité caractérisée par l'énergie maximale disponible à chaque frappe peut atteindre 600 kJ.

### 1.3.3.1.3 Les marteaux pilons à 'contre frappe' :

Dans ces machines [21] qui sont des pilons à double effet perfectionnés, on a remplacé la chabotte par un second marteau travaillant en opposition avec le marteau supérieur. Les deux marteaux sont synchronisés par une liaison mécanique ; ils se heurtent à une certaine distance et leurs énergies s'ajoutent. Les avantages de ces machines sont surtout sensibles dans le cas de grandes capacités ; leur principe supprimant les réactions de frappe sur le sol permet de supprimer la chabotte et de réduire considérablement le volume des fondations. Les pilons à contre frappe se construisent pour des capacités de 150 à 600kJ.

L'inconvénient de ces pilons est d'entraîner une perte de temps. La pièce, placée sur la matrice inférieure, se déplace avec le marteau inférieur ; dans ces conditions il n'est pas possible de rester entenaillé pendant le travail. La perte de temps entraînée par la reprise en tenailles des pièces après chaque frappe interdit l'utilisation de ces pilons pour la fabrication des pièces de faibles dimensions exigeant une productivité élevée.

### 1.3.3.1.4 Les machines à haute énergie :

Pour augmenter l'énergie disponible à chaque frappe, l'action sur la vitesse est très intéressante. Pour obtenir une augmentation de la vitesse d'impact lorsque la course de la masse tombante est fixée, on agit sur l'accélération, et par conséquent sur la force appliquée à la masse. Dans une machine à haute énergie [21] le marteau est relié par une tige au piston d'un cylindre pneumatique comme dans un marteau pilon classique. Il est verrouillé en

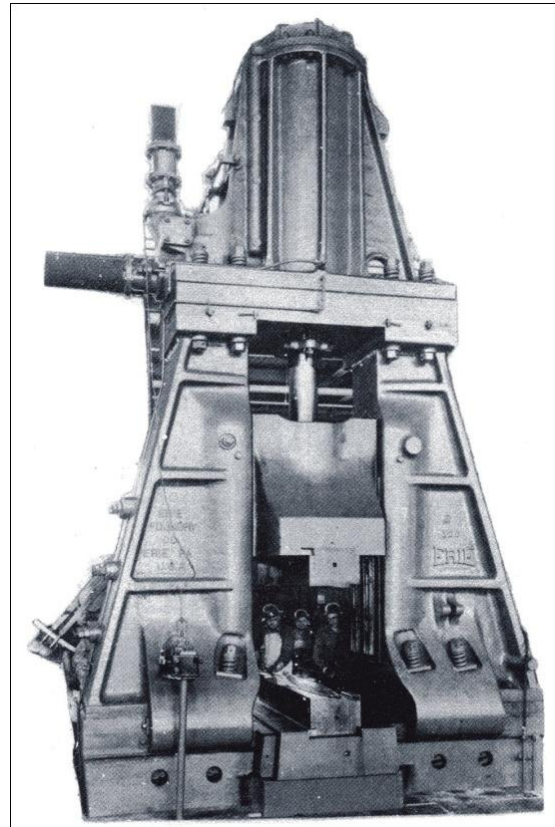


Figure 1.29 : Marteau Pilon double effet [21]

position haute et dans la partie du cylindre située au dessus du piston on admet un gaz (air ou azote) sous une pression proche de 150 bars. Pour frapper, on déverrouille le marteau. Avec ce système on atteint des vitesses d'impact voisines de 20m/s. La technologie de construction est telle qu'il n'y a pas de réaction de choc sur le bâti, ni, par conséquent sur les fondations. Cependant, le développement de cette technique reste très timide du fait de la durée de vie réduite des outillages d'estampage soumis à des contraintes considérables et une usure très rapide.

### 1.3.3.2. Les presses mécaniques

Toutes les presses mécaniques [20,21] utilisent l'énergie d'un volant. Le système de guidage le plus employé est basé sur un mécanisme de glissière qui transforme le mouvement de rotation en translation. Ceci impose au piston vertical une longueur de frappe constante (Figure 1.24).

Dans les constructions les plus répandues les presses mécaniques comportent un bâti fermé dont la partie inférieure forme la table de travail ; elle est reliée à la partie supérieure par quatre colonnes.

Un coulisseau se déplace verticalement dans ces colonnes, actionné par un système bielle manivelle . Figure 1.24. a. Le principe cinématique est expliqué dans la figure 1.24.b. Le vilebrequin tourillonne dans la partie supérieure du bâti et porte, à une extrémité, un embrayage pneumatique à disques et, à l'autre, un frein pneumatique à disque ou à bande. Le carter d'embrayage muni d'une couronne dentée est entraîné par l'intermédiaire d'un arbre grande vitesse portant un volant d'énergie et un pignon. L'entraînement de l'arbre grande vitesse se fait par courroies trapézoïdales. Ces presses sont équipées d'éjecteurs permettant d'extraire les pièces des matrices, et par suite réduire considérablement la dépouille sur les pièces.

On construit ces machines dans la gamme de 6 000 à 100 000 kN. La vitesse varie à l'inverse de la force nominale, elle est proche de 70 coups par minute pour une presse de 25 000kN et de 30 coups par minute pour une presse de 80 000 kN. L'estampage se fait en général en plusieurs opérations, et l'outillage comporte côte à côte des matrices de préformage, d'ébauche et de finition (Figure 1.30). Ces machines ne permettent pas d'exécuter économiquement des opérations d'étirage telles qu'elles sont pratiquées sur pilons. Lorsque la pièce nécessite une telle opération, on l'exécute sur une machine annexe telle que laminoir ébaucheur ou pilon ébaucheur.

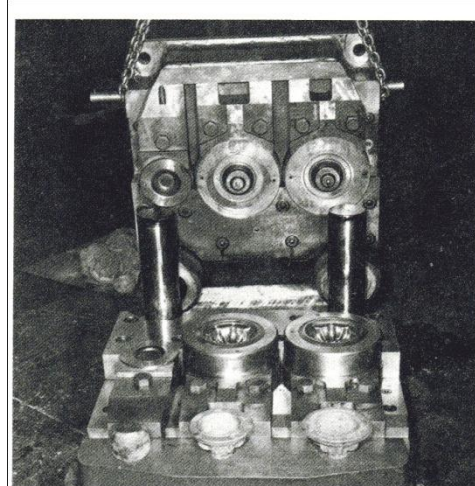


Figure 1.30 : Matrice de préformage, ébauchage et finition [21]

#### Les principaux avantages des presses mécaniques sont :

- comparées aux pilons, les presses mécaniques sont plus précises dans les tolérances géométriques des pièces forgées,
- elles autorisent une alimentation et un enlèvement automatique des lopins, ainsi les taux de production (30 à 60 frappes par minute) sont également supérieurs aux pilons,

- les presses mécaniques sont soumises à des forces de compression par opposition aux impacts, donc on peut utiliser des matrices moins massives ou en matériaux plus durs.

### **Les inconvénients des presses mécaniques sont:**

- le coût initial d'une presse mécanique est trois fois supérieur à celui d'un pilon de même capacité,
- du fait de la constance de la force de frappe, les presses mécaniques ne peuvent pas exécuter des opérations de mise en forme intermédiaires comme sur les pilons.

### **1.3.3.3 Les presses à vis :**

Ces machines [20, 21] appelées également balanciers ou presse à friction, sont intermédiaires entre les machines travaillant par choc et celle travaillant par pression. Elles s'apparentent aux premières en ce qu'en fin de frappe les matrices supérieure et inférieure viennent en contact ; Leur vitesse d'impact se rapproche de celle des presses mécaniques et l'énergie disponible est accumulée dans un volant comme dans les presses mécaniques.

Ces machines comportent (Figure 1.25) un bâti fermé dont les montants servent au guidage des coulisseaux. Le mouvement du coulisseau est obtenu par un système vis-écrou dans lequel la vis (ou l'écrou) est mise en rotation.

Dans la construction la plus classique (Figure 1.25.a) l'arbre moteur porte deux plateaux qui entraînent par friction un volant claveté sur la vis. Suivant que l'on met au contact le volant ou l'autre des plateaux, on peut inverser le sens de rotation et commander la descente ou la remontée du coulisseau.

Dans une construction moderne (Figure 1.25.b) le volant est constitué par le rotor d'un moteur électrique qui entraîne la vis. L'inversion du sens de rotation du moteur commande le sens du mouvement du coulisseau. Les presses à vis sont disponibles jusqu'à 50 000kN.

### **Les principaux avantages des presses à vis :**

- elles ont plus d'énergie disponible par frappe que les presses mécaniques à tonnage équivalent. Cela leur permet d'obtenir plus de travail en déformation par frappe.
- l'ajustement en hauteur de la matrice n'est pas critique et la presse ne peut pas se bloquer.
- les effets thermiques et les contraintes de la matrice sont limités : cela se traduit par une durée de vie accrue des outillages.

### **Les inconvénients des presses à vis :**

- en général, le taux de production d'une presse à vis est inférieur à celui d'une presse mécanique, particulièrement dans le cas de grandes séries automatisées,
- plus la taille des presses à vis augmentent moins elles sont rapides (de 40 à 50 frappes par minutes pour de petites presses à vis et seulement 12 à 16 pour les plus grosses).

### **1.3.3.4 Presses hydrauliques**

Dans les presses hydrauliques [20,21] (Figure 1.23), le marteau est piloté par un cylindre et un piston reliés à un système hydraulique ou hydropneumatique à haute pression.



Le marteau sur le quel est placé l'outil supérieur se déplace avec une allure réduite jusqu'à l'application d'une force de compression sur le lopin. Le contrôle de la vitesse de forgeage sur cette presse permet une maîtrise de la vitesse d'écoulement de matière du lopin.

#### **Les avantages des presses hydrauliques sont :**

- maîtrise de la vitesse d'écoulement de la matière du lopin (forgeage de précision).
- Application d'effort de forgeage les plus importants (1.8 à 125MN).
- la pression appliquée peut être changée à tout moment au cours de la frappe en ajustant la valve de contrôle de pression,
- le taux de déformation peut être contrôlé ou changé si nécessaire pendant la frappe ; ceci est particulièrement important dans le forgeage de métaux sensibles à la rupture sous forts taux de déformation,
- on peut appliquer doucement la force de compression lorsque les matériaux utilisés permettent des transferts thermiques importants (temps de contact plus long mais chocs thermique et mécanique plus faibles).
- la force maximale de forgeage peut être limitée pour protéger l'outillage.
- On obtient des coûts de maintenance moins élevés et une augmentation de la durée de vie des matrices par rapport aux autres procédés de forgeage.

#### **Les Inconvénients des presses hydrauliques sont :**

- le coût initial d'une presse hydraulique est supérieur à une presse mécanique équivalente,
- les presses hydrauliques sont plus lentes que les mécaniques,
- les temps de forgeage longs avec les presses hydrauliques augmentent le temps de contact entre le lopin et la matrice. Pour le forgeage de métaux à températures élevées (alliages de nickel ou de titane), ce temps de contact réduit la durée de vie des matrices.

#### **1.3.3.5 Les machines annexes**

Dans certains cas l'estampeur doit avoir recours à des machines annexes [21] pour préparer les ébauches destinées à l'estampage. Il a également recours à des machines annexes pour des opérations d'ébavurage, de perçage, de pliage ou maillage, et de calibrage. Plusieurs travaux de recherche sont développés cette dernière décennie pour comprendre les différents phénomènes qui contribuent à l'amélioration des processus de production [22-26] et apporter des propositions pour augmenter la durée de vie des outillages [27-29]

#### **1.3.4. Thixoforgeage**

Le thixoforgeage est un procédé de mise en forme de matériaux (Figure 1.31) , se situant entre le procédé de forgeage et le procédé de fonderie [30, 31]. Ce procédé exploite le caractère thixotrope des Matériaux à l'état semi-solide caractérisé par une viscosité qui évolue en fonction de la vitesse de déformation et du temps [32-36]. Une des raisons est la demande croissante, dans différents secteurs, principalement automobile, de pièces à la fois légères, à géométrie complexe et très proches des cotes finales (diminution de la consommation d'énergie) et surtout de très haute résistance (augmentation de leur durée de vie) puisqu'elles sont sujettes à des contraintes élevées (1400 °C)

Même s'il a connu des avancées très importantes dans son développement, le thixoforgeage de l'acier est peu connu dans le contexte de la grande série, en particulier pour la durée de vie des outillages, aspect stratégique vu le niveau de température. Plusieurs équipes de recherches en font une stratégie de développement à travers des programmes comme

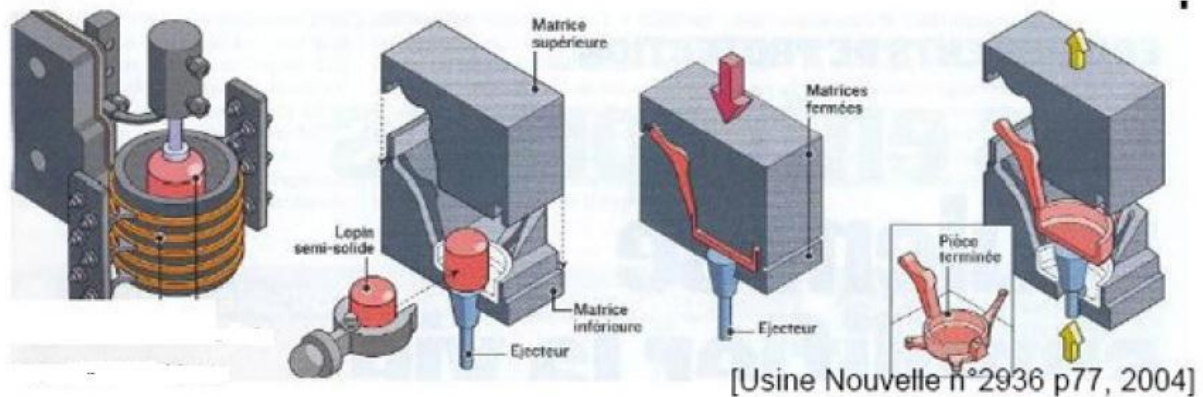


Figure 1.31 : Gamme de production d'une pièce thixoforgée [30-31]

La pièce est réalisée en 4 étapes :

- Chauffage : les lopins sont chauffés par induction
- Transport : La matière chauffée est guidée vers la machine de thixoforgeage
- Mise en forme : Le métal est alors mis en forme à l'aide d'un outil actionné par une presse en un seul stade
- Ejection : la pièce est fabriquée et solidifiée en 0.3s et puis éjectée

Les avantages du thixoforgeage par rapport au forgeage et à la fonderie sont mentionnées dans le Tableau 1.2. [33, 38]

Tableau 1.2 : Avantage du thixoforgeage par rapport aux procédés de forgeage et de fonderie [33,38]

Avantage du thixoforgeage par rapport au	
Procédé de forgeage	Procédé de fonderie
Pièce de géométrie complexe « net shape »	Caractéristique mécanique supérieur
Faible effort de mise en forme	Température de mise en forme plus basse
Amélioration de la durée de vie des outillages	Meilleure santé interne

### 1.3.5. Les outillages

La mise en forme du métal par estampage se fait dans des matrices métalliques [1-21]. Les matrices de finition (Figure 1.32) représentent, en négatif, les formes définitives des de la pièce. Les dimensions des gravures sont celles de la pièce. Les dimensions des gravures sont celles de la pièce à obtenir augmentées du retrait. En fonction de la complexité de la pièce, on est fréquemment amené à créer des gravures de préparation ou gravures d'ébauches, de formes plus floues et dans lesquelles on s'efforce de faciliter l'écoulement du métal en allongeant les rayons de raccordement des différentes zones de la pièce. Une autre fonction de ces gravures

d'ébauches est de supporter l'usure provoquée par l'écoulement du métal et par conséquent limiter le plus possible l'usure des matrices de finition.

Les matrices sont réalisées à partir de blocs d'aciers alliés qui doivent présenter de hautes caractéristiques de résistance aux chocs, une bonne résistance à chaud, car le contact avec le métal chaud ne doit pas provoquer des déformations permanentes, et une bonne résistance à l'usure. L'amortissement des matrices d'estampage représente un handicap certain du fait de leur prix élevé et de leur usure rapide. Il peut atteindre 15 à 20% du prix de la pièce estampée. Une matrice est en générale utilisable pour 5000 pièces.

Les blocs peuvent être usinés à l'état recuit puis traités après usinage, ou bien usinés à l'état trempé et revenu. Les moyens d'usinage sont d'une part les moyens conventionnels de tournage, fraisage, perçage, rabotage, rectification et d'autre part, l'électroérosion et l'électrochimie. On assiste aujourd'hui à l'usinage à grande vitesse, économique, précis et rapide et surtout le bloc est usiné traité.

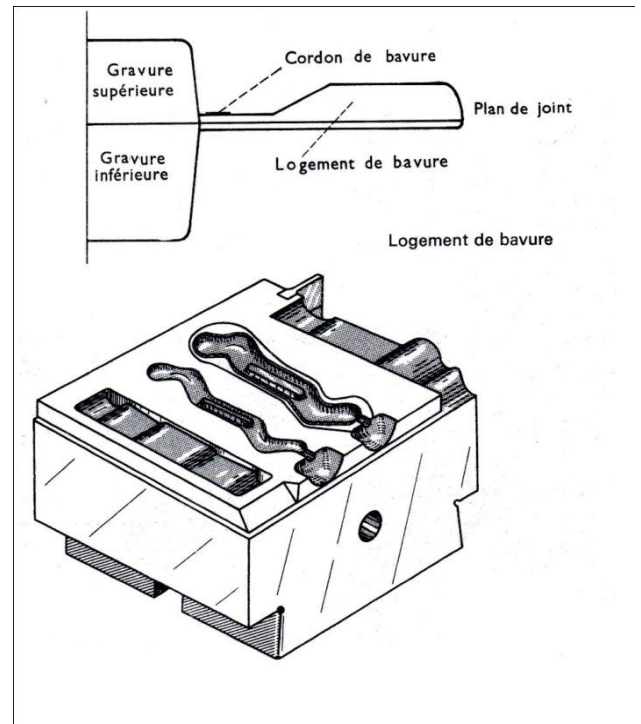


Figure 1.32 : Exemple d'outillage à gravures multiple [21]

### 1.3.6. Evolution des ateliers d'estampage

Dans les ateliers d'estampage, l'action est principalement orientée vers la réduction des frais de main-d'œuvre et vers une meilleure utilisation de la matière. La productivité d'un atelier d'estampage peut être accrue par le perfectionnement des moyens de manutention et par la mécanisation des machines [1-21] et [29-33]. Automatisation, chaîne de transfert, transporteurs à chaînes métalliques, convoyeurs aériens ont été les moyens qui ont contribué aux performances des ateliers de forgeage. L'apparition des robots pour assurer la présentation des pièces dans les matrices et pour les évacuer sont fréquents dans les postes dont le travail est répétitif.

Aujourd'hui on assiste à des systèmes de mise en forme complètement automatisés de la chauffe du loin jusqu'au contrôle de la pièce estampée. Ces systèmes sont équipés de robots de manutention des pièces et de systèmes à commande numérique pour le contrôle des paramètres d'entrée de forgeage et de systèmes d'acquisition de données de l'opération de forgeage. Le choix d'une gamme de production est d'abord simulé sous un logiciel qui reprend les conditions de travail d'un poste de travail. Ce logiciel [39] permet d'une part de modéliser et simuler les opérations de mise en forme afin de déterminer les paramètres d'entrée permettant une meilleure maîtrise du processus de production et d'autre part assurer la qualité du produit fini et veiller à la longévité des outillages de production. Toute la station peut-être gérée et contrôlée à distance à travers les liaisons intranet et internet. Les diagnostics de maintenance se font à distance par les constructeurs eux-mêmes, qui peuvent intervenir à distance quand il s'agit d'interventions sur les programmes de contrôle des différentes machines et ou de programmer des actions de maintenance préventive sur la base de l'analyse des données du système d'acquisitions de données.

## 1.4 Le parachèvement

Les pièces estampées sont soumises à un certain nombre de contraintes de présentation définies par le client et qui nécessitent des opérations de parachèvement [40] répondant à des problèmes d'aspect, de géométrie et de conformité.

Aspect : Les pièces estampées, qu'elles soient brutes ou de forge, ou qu'elles aient subi un traitement thermique, sont recouvertes d'une pellicule d'oxyde. Cet oxyde est indésirable dans les opérations d'usinage parce qu'il provoque une usure prématurée des outils coupants et pollue les huiles de coupe. Par ailleurs, il faut l'éliminer dans les parties des pièces non usinées devant recevoir une peinture.

On se débarrasse de cette pellicule d'oxyde par des moyens mécaniques : sablage ou grenailage ou par roulage au tonneau en présence d'abrasifs.

Le sablage ou le grenailage consistent en des projections de sable ou de grenaille métallique sur la surface des pièces. L'impact des grains provoque l'éclatement de la pellicule d'oxyde et met le métal à nu.

Ces opérations confèrent aux pièces estampées une surface plus ou moins rugueuse selon la granulométrie du sable ou de la grenaille.

Les pièces peuvent aussi être nettoyées par dissolution des oxydes dans des bains d'acide sulfurique au chlorhydrique. Par ailleurs les pièces peuvent présenter un reliquat de bavure qu'il faut éliminer par ébarbage à la meule.

Géométrie : Deux cas à considérer ;

Le premier se rapporte à la géométrie générale de la pièce. A la sortie de l'estampage, les pièces chaudes et fragiles sont jetées dans des bennes de manutention. Leur chute dans ces bennes peut produire des déformations. Au traitement thermique, les pièces se déforment par libération des contraintes de forgeage et création des contraintes de trempe.

Pour que leurs formes soient conformes au plan de pièce donné par le client, on est amené à procéder à un redressage. Cette opération est faite sur des petites presses mécaniques ou hydrauliques.

Le second cas est celui des tolérances dimensionnelles. L'estampage à chaud, malgré toutes les précautions prises, ne permet pas l'obtention des cotes précises. Les tolérances des pièces estampées sont régies par la norme E 02-500. Elles varient en fonction de la masse de la pièce, de sa difficulté de réalisation et de la composition chimique de l'acier.

Contrôle de conformité

Il s'exerce sur la géométrie, les caractéristiques mécaniques et sur la santé des pièces.

- a) Contrôle géométrique : le contrôle géométrique des pièces estampées se fait à l'aide des calibres et de montages de présentation. Il sert à vérifier que :
- Les pièces sont bien venues c'est-à-dire il n'y a pas de manque de matière provenant d'un mauvais remplissage des gravures d'estampage
  - Elles sont en rapport c'est-à-dire il n'y a pas de désaxage de part et d'autres du joint de matrice provenant d'un mauvais réglage des outillages
  - Géométrie générale est respectée : entraxe de bossages, dénivellations)
  - Par ailleurs, ce contrôle permet aussi de vérifier que les cotes sont dans les tolérances demandées et que la pièce peut-être usinée sans enlèvements de trace de brute ou 'trace de feu'

- b) Caractéristiques mécaniques : Il faut contrôler que La matière est bien de la qualité demandée. Pour cela on a recours aux appareils magnétoscopiques ou à l'analyse la composition chimique du matériau (diffractomètre). Un billage permet de s'assurer que la dureté du matériau est conforme à la demande.
- c) Santé les pièces estampées peuvent présenter des défauts provenant de la matière utilisée : criques, lignes, etc. ou de l'estampage lui mêmes, replis, tapures, etc. Ces défauts ne peuvent pas toujours être décelés par un examen visuel attentif, et on les met en évidence par attaque à l'acide ou par fluorescence. Dans ce procédé les pièces sont immergées dans un liquide fluorescent qui est fixé par les défauts de surfaces. Ceux-ci sont ensuite mis en évidence par un examen en lumière noir

## Conclusion du chapitre 1

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art d'un système de production de pièces forgée particulièrement les pièces obtenues par estampage. L'objectif est de chercher à comprendre le rôle de chaque équipement qui intervient dans la chaîne de production depuis le débitage du lopin jusqu'au façonnage de la pièce finie de forge afin d'assurer une qualité requise du produit dans des délais les mieux appropriés et à moindre coût. La production est attribuaire d'une part de l'exploitation, c'est-à-dire des opérateurs sur machines et d'autre part des mainteneurs qui doivent veiller sur le bon fonctionnement des machines et des outillages de production. Ainsi avec une meilleure connaissance des moyens de production et particulièrement de leurs indices de performance, les mainteneurs contribuerons du mieux dans la gestion de la maintenance des la chaine de production.

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise. Pour choisir, il faut donc être informé des objectifs de la direction, des directions politiques de maintenance, mais il faut connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels, le comportement du matériel en exploitation, les conditions d'application de chaque méthode, les coûts de maintenance et les coûts de perte de production.

Ainsi l'état de l'art sur la mise en forme des pièces forgées depuis l'approvisionnement en matière première jusqu'à l'expédition des pièces finies, que nous venons de présenter contribuera de très près dans la réalisation de ce mémoire et mettra les bases de réflexion sur une procédure de modernisation des équipements de production d'une entreprise dont les besoins sont accrues et aussi sur la mise à niveau de la fonction maintenance.

## 2. Analyse des Défauts de forge

Dans le métier de forgeage, les outillages ont un impact sur le coût de la pièce forgée. La maîtrise de la durée de vie des outillages constitue donc un enjeu critique puisqu'elle représente un gain économique substantiel. L'analyse des défauts de forge constitue une part particulière pour veiller sur la qualité du produit estampé. Les défauts de la pièce forgée est le résultat du comportement du couple outils-pièce lors des opérations de mise en forme. Il est donc impératif de mettre en évidence ce comportement par rapport à l'outillage et par rapport à la pièce. Dans ce chapitre, dans une première étape nous présentons les conditions d'endommagement des outillages [1-4] afin d'appréhender au mieux les difficultés auxquelles doivent faire les forgerons afin d'augmenter la durée de vie de l'outillage. Dans une deuxième étape, une classification des défauts de forge [5] sur la pièce permettra de définir un vocabulaire concernant ces défauts afin de favoriser les relations entre donneurs d'ordres et forgerons. Et dans une troisième étape, notre contribution est de mettre en œuvre une base de données pour optimiser les actions et les décisions de maintenance [6]. Cette base de données est structurée et développée sous le logiciel de Microsoft Office MsAccess [7,8].

### 2.1 Endommagement des outils de forge

Les matrices, poinçons, filières et lames de cisailles utilisés en forgeage à chaud présentent la particularité d'être soumis simultanément à des sollicitations intenses d'origine thermiques et mécaniques.

Il y a très peu d'applications industrielles qui réunissent sur un même composant des conditions de travail aussi sévères, souvent à la limite, voire au-delà, de ce que peuvent raisonnablement supporter les matériaux traditionnels « haut de gamme » que les caries à outils.

Il résulte de ce constat que la durée de vie des outillages est un problème critique dans toutes les entreprises de forgeage à chaud, tout particulièrement en matriçage des alliages de titane, de cobalt et de nickel, ainsi qu'en estampage de l'acier. Ce dernier procédé représente de loin, la consommation d'outillages la plus importante.

Une bonne compréhension des difficultés auxquelles doivent faire face les forgerons dans ce domaine, ainsi que la recherche des solutions nouvelles plus performantes, nécessitent de prendre en compte :

- La nature et le niveau des sollicitations supportées par les outils
- Les modes d'endommagement qui en résultent
- Les caractéristiques des matériaux d'outillage, des traitements et revêtements superficiels, ainsi que leur évolution avec la température de service des outils
- Les exigences de coût, de délai, de qualité, spécifiques à chaque application

L'amélioration de la tenue des outillages de forge à chaud reste des préoccupations majeures des forgerons. En effet l'outillage représente couramment 10 à 15% des coûts de fabrication.

#### 2.1.1 Sollicitations mécaniques

Un poste de forgeage à chaud est un système complexe (Tableau 2.1) constitué de trois sous-systèmes à considérer dans leur contexte thermique spécifique :

- Sous-système mécanique : il comporte toutes les conditions et moyens nécessaires à la réalisation de l'opération de forgeage.

- Sous-système métallurgique : il concerne essentiellement l'outil avec les choix du matériau, de son traitement thermique, des traitements et revêtements superficiels, qui permettent d'obtenir les structures et donc les propriétés recherchées.
- Sous-système tribologique : constitué de tous les paramètres qui conditionnent l'interface matériau forgé-outil

Tableau 2.1 : Composants d'un système de forgeage

Sous-système mécanique	Sous-système métallurgique	Sous-système tribologique
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Géométrie de la pièce</li> <li>• Matériau forgé</li> <li>• Machine</li> <li>• Gamme de forgeage</li> <li>• Géométrie de l'outil</li> <li>• Conditions opératoires</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Outil : -matériau Traitement thermique de masse Traitement(s) ou revêtement(s) superficielles (s)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surface de l'outil</li> <li>• Surface du matériau forgé</li> <li>• Interface : - Lubrifiant - Oxydes - ...</li> </ul>

### 2.1.2 Sollicitations Thermiques des outils

La surface des outils de forge à chaud est soumise à un cycle thermique dont l'allure est schématisée, Figure 2.1. L'examen détaillé d'un cycle [9] met en évidence un pic thermique qui se produit durant le contact sous pression avec le métal à forger, suivi d'une phase de refroidissement provoquée par la diffusion de la chaleur dans l'outil et par l'action éventuelle d'un fluide refroidissant qui sert généralement de vecteur au lubrifiant.

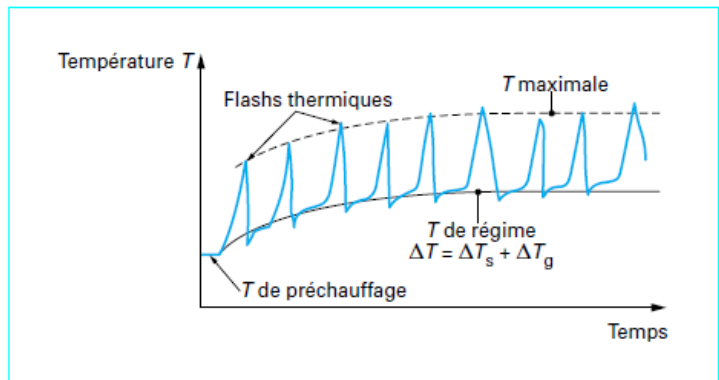


Figure 2.1 Cycle thermique en surface d'un outillage (d'après CETIM) [9]

La température maximale atteinte par la surface de l'outil et la pénétration

thermique, sont deux informations essentielles à la prévision des modes d'endommagement ainsi qu'à la définition de la nature et de l'épaisseur d'un traitement ou revêtement superficiel.

### 2.1.3 Modes d'endommagement

Les outillages de mise en forme par forgeage à chaud sont soumis à des sollicitations mécaniques et thermiques sévères qui induisent différents modes d'endommagement :

- Usure
- Fatigue thermique
- Fissuration mécanique
- Déformations plastiques
- Formation de couches « transferts »

La principale cause de mise hors service des outils est l'usure, Figure 2.2.

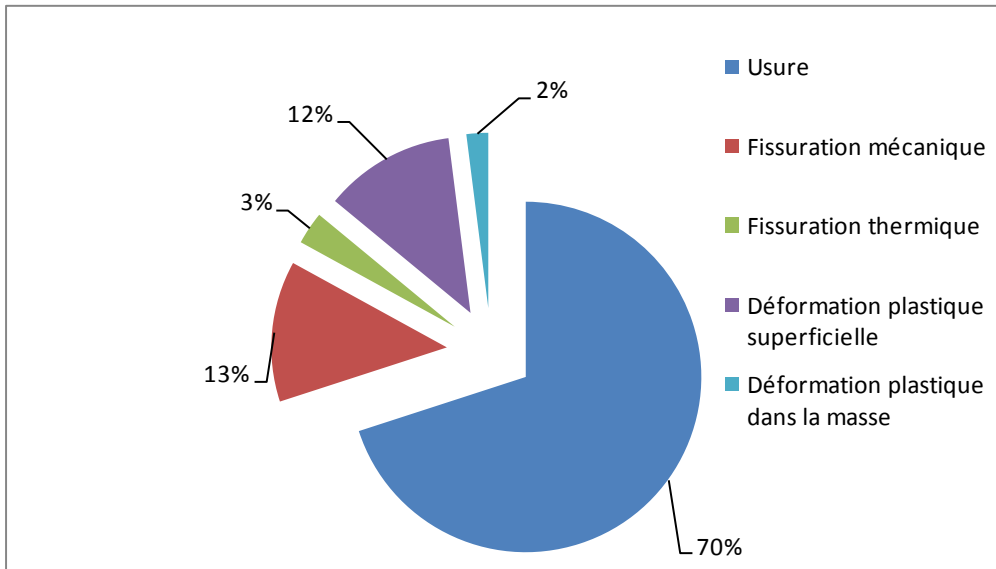


Figure 2.2 : Modes d'endommagement des outils de forgeage à chaud [5 ]

### 2.1.3.1 Usure :

En forgeage, il s'agit essentiellement d'un enlèvement de matière par abrasion qui peut être assimilé à un micro-usinage (Figure2. 3)

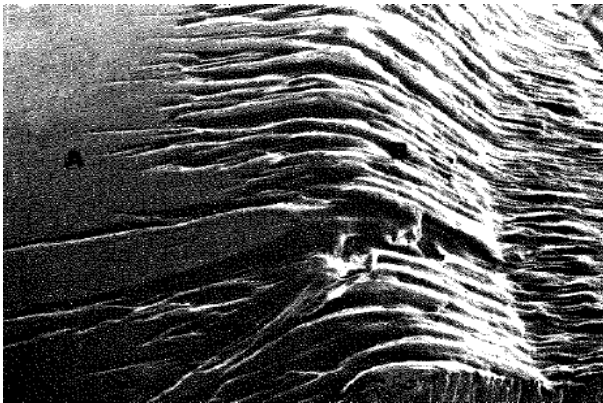


Figure 2.3 : Usure par abrasion de la surface d'une matrice d'estampage [5]

La loi générale de ce type d'usure est la suivante :

$$V_{\text{volume usé}} = K \frac{\sigma \cdot L}{HV^m}$$

Où  $\sigma$  = contrainte normale ; L=longueur du glissement, HV= Dureté de l'outil ; m= exposant caractéristique de la structure de l'outil et k= constante caractéristique de l'interface.

$$\text{La perte de cote } \Delta h(M, \theta) = \int_0^t K \frac{\sigma \cdot U_g}{HV^m} dt$$

Où  $U_g$  : vitesse de glissement du métal forgé

L'expression de l'usure confirme l'importance de la dureté superficielle de l'outil et de sa structure à la température de travail. Elle montre également que tous les autres facteurs influents sont liés à l'opération de forgeage :

- La température superficielle de l'outil
- La pression normale
- La nature de l'interface (présence ou non d'oxyde durs...)
- La vitesse et la longueur de glissement, qui sont dépendant des conditions de lubrification et de la gamme de forgeage.



En pratique l'usure par abrasion est fréquemment associé à d'autres modes d'endommagement des surfaces en particulier la fatigue thermique, le fluage superficiel et des évolutions métallurgiques, ce qui complique singulièrement le diagnostic et la recherche d'une solution.

### 2.1.3.2 Fissuration thermique (fatigue)

Lors du contact avec le métal chaud les couches superficielles de l'outil subissent une expansion qui se trouve contrariée par la sous-couche restée froide. Cet effet de « frettage » génère des contraintes de compression dans les directions tangentes à la surface qui peuvent conduire à une plastification des couches superficielles.

Puis dans la phase de refroidissement du cycle de forgeage, les couches superficielles subissent un retrait qui, s'il y a eu déformation plastique dans la phase de chauffage, crée des contraintes de traction importantes susceptibles de conduire à une plastification, voire à une fissuration superficielle.

### 2.1.3.3 Fissuration mécanique

Un outil de forge est une pièce mécanique soumise à des sollicitations mécaniques et thermiques sévères aggravées par des concentrations de contraintes de traction dues au moment de flexion dans les congés de raccordement, en particulier en fond de gravure (Figure 2.4)

L'endommagement par fissuration mécanique peut se présentée sous deux aspects :

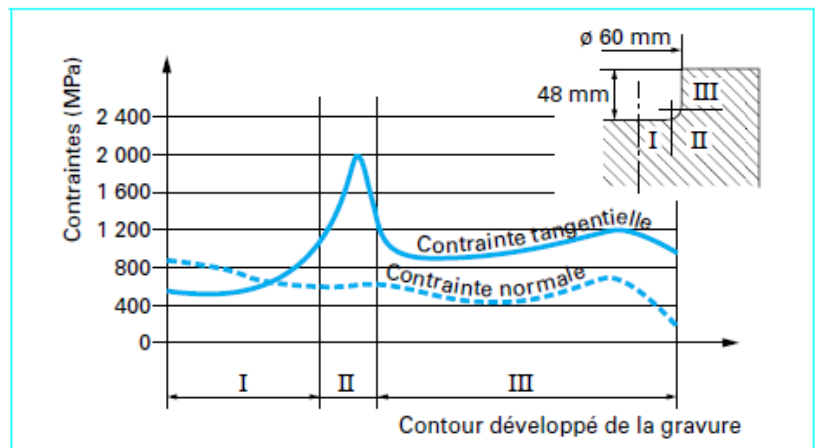


Figure 2.4 : Contrainte tangentielle et contraintes normales sur la surface développée d'une matrice d'estampage [9].

- Rupture brutale : l'examen de la cassure révèle un faciès non oxydé, ceci indique que l'amorçage de la fissure, puis sa propagation, se sont développés dans un très court laps de temps
- Fissuration progressive : la zone de fissuration progressive apparaît oxydée et polluée ; la rupture brutale, si elle se produit, correspond à une zone brillante.
- Les causes habituelles qui sont à l'origine de l'amorçage d'une fissure d'origine mécanique sont les suivantes :
  - Contraintes de traction trop élevées :
    - Conception de la gamme de forgeage inadaptées
    - Conception et dimensionnement de l'outil incorrects
    - Conditions de travail anormales : mauvaises portées, surcharges
  - Matériau d'outillage fragile :
    - Mauvais choix de l'acier et de son traitement de masse
    - Structure incorrecte (ex : réseau intergranulaire de carbures)

- Fragilité induite par un traitement superficiel dur ; dans ce cas, il peut être nécessaire de protéger les zones sensibles lors de la réalisation du traitement (ex. protection des congés de raccordement en fond de gravures profondes avant traitement thermo-chimique)

#### 2.1.3.4 Déformations plastiques

Les sollicitations mécaniques et thermiques sévères que doivent supporter les outils de forge à chaud créent des conditions propices au dépassement de la limite élastique du matériau à la température de travail, ceci génère une plastification parfois assimilée à tort du « fluage ». On distingue :

- La plastification dans la masse
- La plastification superficielle

##### 2.1.3.4.1 La plastification dans la masse :

- Elle concerne une partie, voire la quasi-totalité de l'outil. C'est toujours une cause de rebut rapide car elle altère la qualité des pièces et perturbe l'opération de forgeage (formation de contre dépouilles par exemple)
- Il s'agit d'un mode d'endommagement volumique qui n'est que peu influencé par les caractéristiques des surfaces actives de l'outil ; les traitements superficiels sont donc peu concernés
- Les solutions à ce type d'endommagement passent par une remise en cause de la gamme de forgeage, de la conception (ex : frettage), du dimensionnement de l'outil et des conditions de travail

##### 2.1.3.4.2 La plastification superficielle

Ce sont les surfaces actives très sollicitées à la fois thermiquement et mécaniquement (écoulement intense du métal forgé) qui sont concernées. La plastification intéresse une épaisseur généralement comprise entre 1 et 200  $\mu\text{m}$ . Seul un examen micrographique permet de l'identifier avec certitude. La plastification superficielle est fréquemment associée à des fissures de fatigue thermique, à des évolutions métallographiques des couches superficielles des outils et de l'usure par abrasion.

La lutte contre la déformation plastique présente une grande analogie avec une recherche de diminution de l'usure. Elle passe par l'utilisation de matériaux de haute dureté à chaud. De ce point de vue les superalliages offrent un intérêt certain par rapport aux aciers à outils consolidés ou non par un traitement thermo-chimique de type nitruration.

#### 2.1.3.5 Formation de couches transferts

Les surfaces actives des outils en service sont fréquemment recouvertes d'une pellicule plus moins adhérente constituée essentiellement d'oxydes issus du métal forgé et de résidus éventuels de lubrification, d'où l'appellation de couches de transfert, Figure 2.5.

L'épaisseur de cette pellicule peut varier de quelques  $\mu\text{m}$  à plusieurs dizaines de  $\mu\text{m}$ .

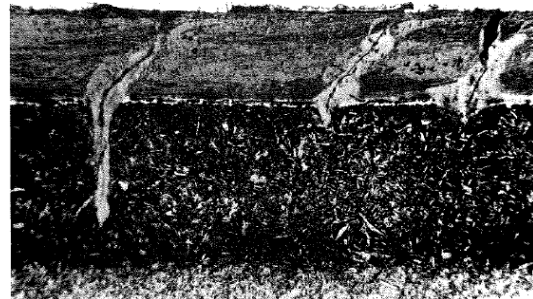


Figure 2.5 : Coupe micrographique d'une couche transfert [5]

- Présence de fissures de fatigue thermique elles-mêmes oxydées
- La couche transfert s'est déformée plastiquement jouant un rôle d'interface similaire à celui d'un lubrifiant solide

En forgeage de précision, la formation de couches transfert modifie les cotes et l'état de surface des pièces et peut contrarier l'éjection des pièces.

Tout traitement ou revêtement qui contribue à diminuer la formation de la couche transfert est potentiellement intéressante pour les outils de forge à chaud.

### 2.1.3.6 Localisation des différents modes d'endommagement

La Figure 2.6 illustre la localisation principale de chaque mode d'endommagement. Cependant on retiendra que les zones les plus sollicitées mécaniquement et thermiquement supportent simultanément plusieurs endommagements.

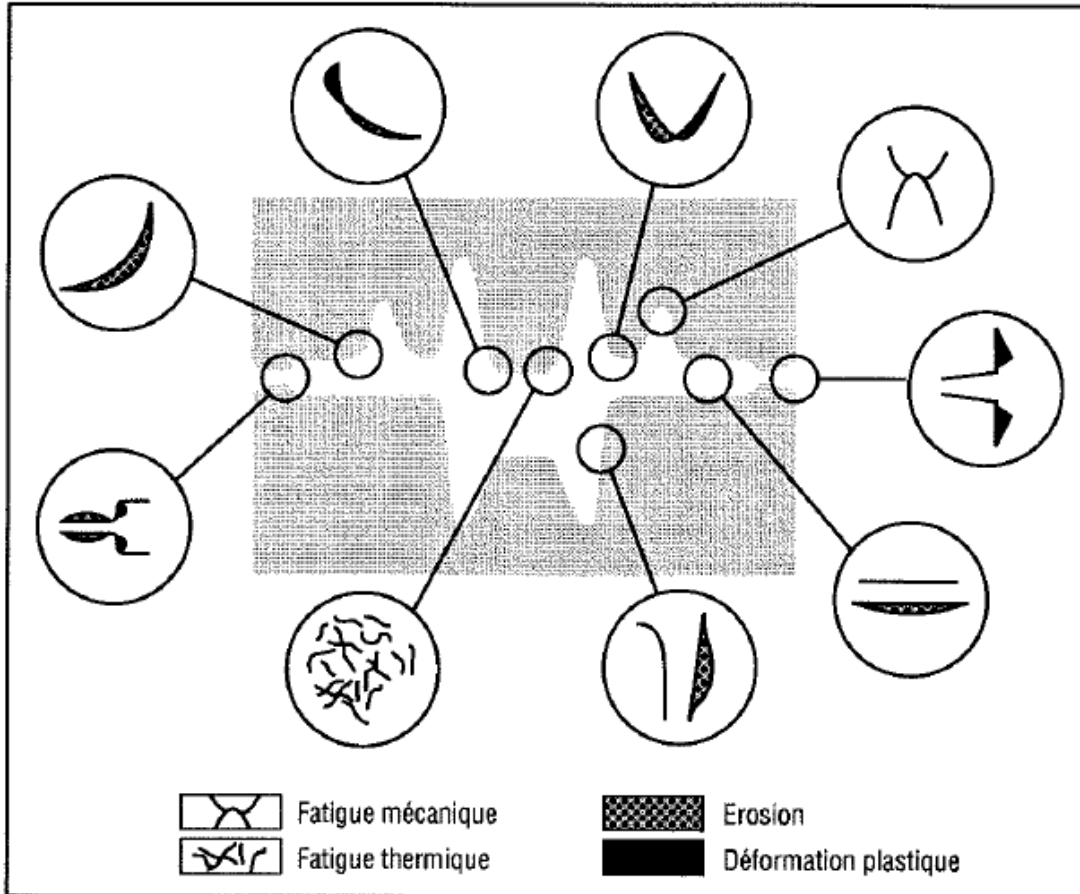


Figure 2.6 : localisation des différents modes d'endommagement des matrices [5]

## 2.2 Classification des défauts de forge

La classification des défauts de forge a pour objectif de définir un vocabulaire concernant ces défauts afin de favoriser les relations entre donneurs d'ordres et forgerons. Elle comporte

- 1) un listing des normes européennes, françaises, allemandes traitant du sujet en termes de vocabulaire, caractérisation et cotation
- 2) Un recensement des différentes imperfections de surfaces rencontrées en forge avec des illustrations schématiques et photographiques

### 2.2.1 Normes traitant des défauts

Nous avons juger utile de donner les normes pour guider les donneurs d'ordre et les forgerons dans l'uniformisation du vocabulaire. Le Tableau 2.2 illustre le vocabulaire dans 3 principales langues ( Français, Anglais et allemand) en référence aux principaux constructeurs de machines dans les pays membres de l'union européenne.

Tableau 2.2. Recensement des différentes imperfections de forge et leurs vocabulaires

N°	Français	Anglais	Allemand
1	Bavure Hors Tolérance	Bur except tolerance	rauhe Kante außerhalb der Toleranz
2	Bavure Incrustée	Bur incrusted	inkrustierte raue Kante
3	Bavure Verticale en Haut de Bol	Vertical bur in Top of Bowl	vertikale raue Kante in oberem Teil
4	Chocs (Heurts-Blessures)	Shock	Schock
5	Chocs Saillants/Blessures	Projecting schok/wound	hervorstehender Schock/Verletzung
6	Déréglage -Déport	Offset Maladjustment	Versetzungsderglage
7	Déréglage en Long	longitudinal Maladjustment	dereglage langsseits
8	Ebarbages Défectueux	Defective trimming	fehlerhaftes Beschneiden
9	Fissure/Eclatement	Bursting	Riss/Platzen
10	Incrustation Bavure de Cisailage	Incrustation bur of shearing	Inkrustation raue Kante Zerschneiden
11	Ligne de barre ou Repli de Laminage	Folds of rolling	überwalzungen
12	Manque Matière	Miss Matter	Materialmangel
13	Marque Poinçon	Mark Punch	Meißelzeichen
14	Oxydation	Oxidation	Oxydation
15	Replis	Folds	Falten
16	Replis dans Alésage de Débouchage	Folds in boring of clearing	Falten in Ausäumungsausbohren
17	Replis en Long CLIR (crique longitudianle intérieur rayon)	Folds Longitudinally	Falten längsseits
18	Replis en travers dans la partie arquée	Folds transversally in the arched part	Falten quer durch im gebogenen Teil
19	Ridage/Gerçures	Surface crack / crack	Riss
20	Traces d'Usure d'Outils	Trace wear of tool	Spur der Werkzeugabnutzung
21	Vaguelette en Haut de Bol	Wavelet in Top of Bowl	kleine Welle in oberem Teil Schüssel

#### Vocabulaire

- NF E -82-000 d'octobre 1984 : 'Forge par estampage et matriçage-vocabulaire'  
Caractérisation et cotation

- NF EN 10228-1 de juin 1999 : 'Essai non destructifs des pièces forgées en acier-  
Partie 1 : contrôle par magnétoscopie'
- NF EN 10228-2 de juillet 1998 : essais non destructifs de pièces forgées en acier-  
Partie 2 : contrôle par ressurgage
- NF EN 10228-3 de septembre 1998 : ' Essais non destructifs des pièces forgées en  
acier –

- Partie 3 : contrôle par ultrasons des pièces forgées en acier ferritique et martensitique
- NF EN 10228-4 d'octobre 1999 : ' Essais non destructifs des pièces forgées en acier – Partie 3 : contrôle par ultrasons des pièces forgées en acier inoxydables austénitiques et austéno-ferritiques

### 2.2.2 Caractérisation des défauts de forge :

La caractérisation consiste à :

- Recenser les défauts (photographies, schémas, visualisation, micrographie,
- Identifier (attribuer un vocabulaire)
- Causes (Provenance) des défauts
- Définition
- Remède

Déréglage - déport	
Anglais :	maladjustment offset
Allemand :	Versetzungsderglage
Type de défauts :	défaut d'aspect
Provenance :	mauvais alignement des matrices d'ébauches et ou de finitions
Définition :	non respect des mini matières, problèmes d'usinage
Remède :	régler l'alignement des matrices d'ébauches et ou de finitions

La Figure 2.7 présente le principe de caractérisation des défauts de forge réalisés par CETIM, le centre des études techniques des industries mécaniques en 2009 [5] à la demande de la commission forge dans le cadre de l'action professionnelle AP2282.



Figure 2.7 : Principe de caractérisation des défauts de forge [5]

### 2.2.3 Construction de la base de données 'Gestion des Défauts de Forges'

Cette partie est développée pour mettre à la disposition des forgerons particulièrement les mainteneurs une base de données 'Gestion des défauts de forges' afin d'optimiser les actions de la maintenance et de garder un historique sur les différentes imperfections de forge qui ont causé des arrêts. Le principe se base sur les résultats de contrôle d'une pièce estampée. Dès qu'une anomalie est observée, la base de donnée est consultée pour :

- Caractériser les défauts
- Inspecter les outils
- Définir les actions de maintenance

### Conclusion :

La connaissance du comportement du couple outillage-pièce lors de la mise en forme est d'une importance capitale par ce qu'elle permet de récolter des informations très utiles pour le service maintenance. En effet, chaque défaut peut nous renseigner sur les actions d'interventions à entreprendre. La construction d'une base de données historique des arrêts doit prendre en considération ces informations pour une meilleure gestion. Il faut retenir :

- Il existe une classification des défauts de forge (normes, caractérisation).
- L'endommagement par usure des outils de forge constituent 10 à 15% des couts de fabrication, aussi le fait d'améliorer leur durée de vie contribue pleinement au bon fonctionnement de la production des pièces forgées.
- Les modes d'endommagement des outils peuvent être localisés pendant la production.

### 3. Plan d'expérience pour la simulation du processus d'obtention d'une pièce forgée

#### 3.1 Introduction :

Les travaux de forgeage rassemblent une multitude de disciplines et de compétences [1-5]. Dans le cas d'estampage ou encore le matriçage, la caractérisation des matériaux, les règles de conception des pièces, les descriptifs des machines et les défauts de production, génère beaucoup d'informations qui ne sont pas capitalisées et difficiles à appréhender [6]. Et puis, les essais pour le lancement ou le contrôle de la production sont très coûteux et prennent beaucoup de temps. Le recours aux simulations géométriques et numériques est aujourd'hui incontestable [7-9], puisqu'il existe des outils de plus en plus performants et simples d'utilisation, mais qui nécessitent une bonne connaissance du procédé de production. Dans le domaine de mise en forme à chaud et à froid FORGE® [10] est la solution logiciel pour la simulation de ces procédés (Annexe 1).

Dans le travail ci- présent, l'étude a porté sur l'axe de moyeu de roue de transporteur de chape ou d'équipements type dumper, fabriqué dans les ateliers de forge de l'entreprise publique et économique Ferroviaria en Algérie [11, 12], dont les machines sont installées depuis une cinquantaine d'années. Le souci de l'entreprise est justement d'étudier les opportunités sur la modernisation et la rénovation de ses équipements et d'intégrer les nouvelles technologies de conception et de recherche de solutions optimales pour assurer la qualité du produit, la réduction des coûts de production et aussi la réduction de coûts de maintenance. Ce travail est mené au sein de l'équipe du laboratoire conception – fabrication et commande de l'école nationale des arts et métiers (ENSAM Paris Tech centre de Metz) [12, 13] en France équipé d'un laboratoire de forge moderne et géré par des experts en mise en forme.

#### 3.2. Objectifs :

Le stage effectué en entreprise et à l'ENSAM de Metz a permis de prendre connaissances avec les moyens de mise en forme et d'évaluer les risques et les problèmes susceptibles de créer des dysfonctionnements dans la production des pièces, générant des surcoûts indésirables. L'étude menée sur l'une de ces pièces a pour objectifs :

- La détermination des anomalies de productions
- Les causes probables qui pourraient être les sources de défaillances
- Trouver des solutions appliquées pour réduire le taux de rebut
- Eviter la sur-utilisation des outils d'estampage
- Diminuer les arrêts de production
- Diminuer les coûts de maintenance

#### 3.3. Plan d'expériences des simulations sous FORGE2011®

Les études avancées d'un procédé de mise en forme d'une pièce donnée doit suivre un plan d'expériences de simulations logiques afin de déterminer les actions à entreprendre pour déterminer les paramètres d'entrée et définir les conditions de production de chacune des pièces pour respecter le cahier des charges. Le protocole suit 5 étapes distinctes

- a) Diagnostic de la gamme réelle de production du moyeu de roue
- b) Expertise de la gamme de production
- c) Simulation de la gamme production

- Simulation 1 : Gamme réelle
  - Simulation 2 : Effet de la forme du lopin
    - Lopin carré
    - Lopin rond
  - Simulation 3 : Effet de la lubrification
    - Lubrification à l'huile
    - Lubrification à l'eau plus graffite
  - Simulation 4 : Effet du procédé de mise en forme
- d) Analyse des résultats

### 3.4 Diagnostic de la gamme réelle de production du moyeu de roue pour dumper :

#### 3.4.1 Les moyens de production de la forge de l'E.P.E Ferroviaire :

Le département forge de l'E.P.E Ferroviaire [11, 12] Annaba est composé d'une forge universelle (parachèvement et estampage), d'un atelier d'usinage mécanique dédié à la préparation et maintenance des outillages et d'un laboratoire de contrôle qualité. Elle est dotée de toutes les utilités nécessaires à son fonctionnement (Electricité moyenne tension, Gaz naturel moyenne pression, Eau à 5 bars, Air comprimé à 7 bars). Toute opération de préparation ou de maintenance est planifiée au niveau du bureau d'études et de méthodes de la Forge.

La forge de l'E.P.E Ferroviaire a pour objet principal l'étude, la fabrication et la commercialisation :

- o Des pièces de brute de forge.
- o Des pièces mécaniques usinées.
- o Des produits emboutis (brouettes, fonds bombés etc.).
- o De la quincaillerie (pelles, pioches, serre joints, houes).
- o De la confection d'outillages.
- o Et d'autres prestations de service ayant une relation avec l'activité du forgeage.

Le moyeu de roue, Figure 3.1, est produit dans un îlot de mise en forme à chaud composé de, Figure 3.2, d'un four à sole 6, d'une presse mécanique 5 et d'un marteau pilon 4. Les lopins sont préparés sur une cisaille à couteaux ouverts de marque FICEP. On peut distinguer les postes de travail de 2 estampeurs, l'un sur la presse et l'autre sur le marteau pilon, Ils sont secondés chacun par un aide estampeur, un opérateur spécialiste sur le four spécialiste du four, et un ouvrier. Au total, 5 personnes interviennent pour fabriquer un moyeu. Un sixième intervenant appelé 'autre spécialiste' souvent, le mainteneur vient inspecter les opérations pour contrôler la conformité de la pièce et relever les défaillances liées à l'outillage et les équipements de production. La Figure 3.3 illustre une photographie de l'îlot de production du moyeu de Dumper.

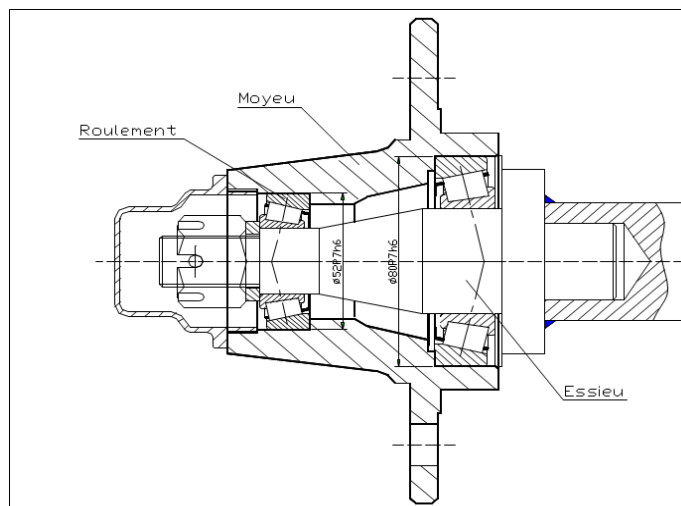


Figure 3.1 : Dessin d'ensemble Moyeu-roulement-essieu de roue de Transporteur [12, 14]

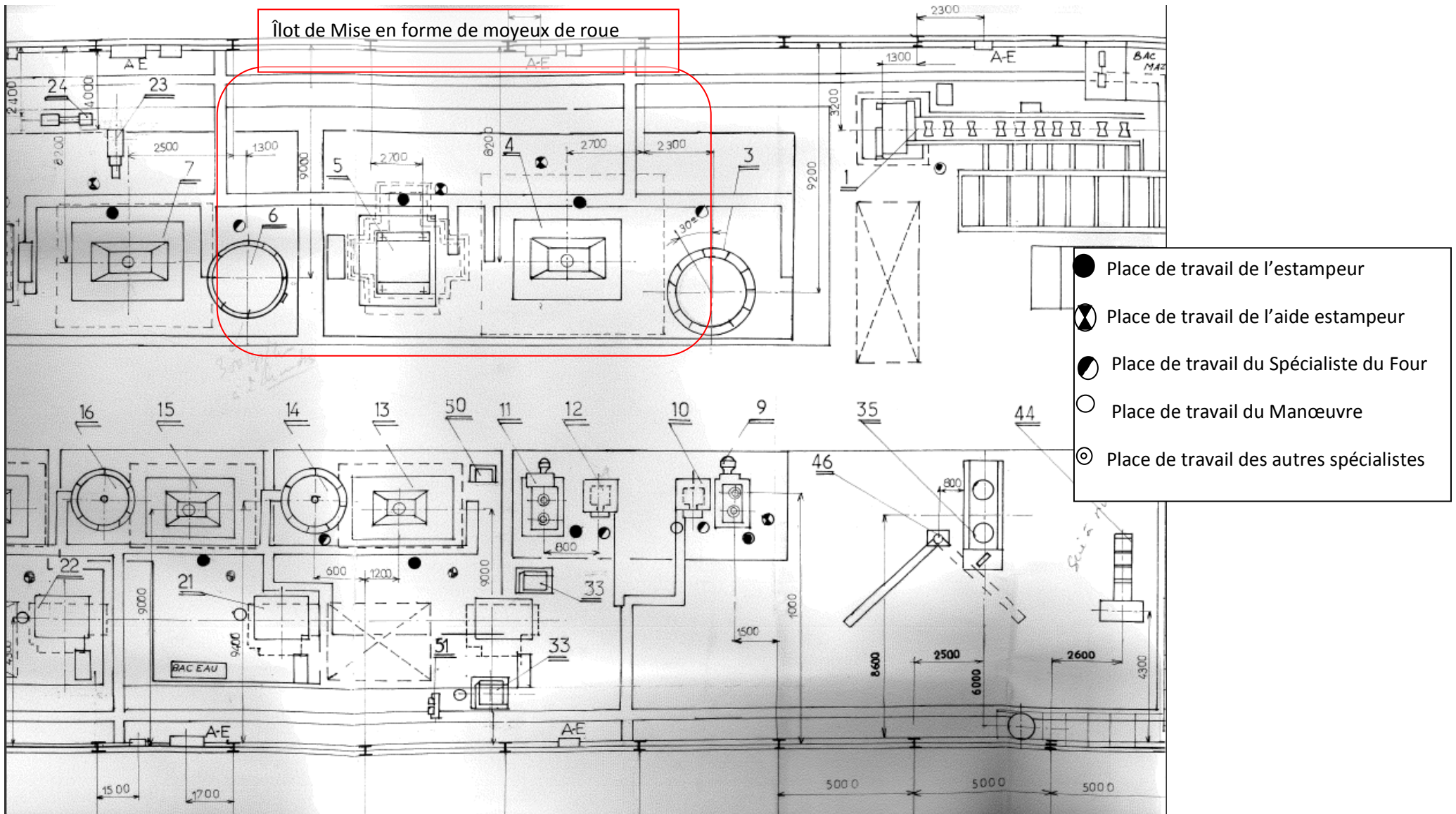


Figure 3.2 : Îlot de mise en forme à chaud de moyeux de roues : 4 Marteau Pilon, 5) Presse mécanique et 6) Four à gaz  
 (Extrait du plan d'ensemble de l'atelier 'Forge' de l'E.P.E Ferrovia) [12, 14].





Figure 3.3 : Photographie montrant l'îlot de production de moyeux de roues  
a) Four ; b) Presse et c) Marteau pilon [12, 15]

### 3.4.2 La gamme de production du moyeu

Le moyeu est la partie centrale d'une roue, Figure 3.1 il transmet le mouvement rotatif de l'essieu à la roue. Suite à un cahier des charges, la Forge lance son programme de production selon la gamme de production décrite au Tableau 3.1 en 6 phases.

GAMME DE PRODUCTION										METHODES			
Désignation Pièce:		Moyeu pour Roue de Dumper		N° Plan:	FM 639. 00.000	Client:	ENMTP El Harrach						
Contrat N°:				Nombre Commandé	1500	Poids Pièce	10kg	Poids Lopin	11,30kg		UNITE		
Nuance Demandée:		XC38		Nuance de Substitution:				Nuance utilisée:		XC42		FORGE	
Dimension du Lopin Théorique			□ 100x144		Dimension du Lopin utilisé			□ 80x225					
Etabli par :			Date de Lancement		Quantité à Lancer			Cadence Horaire		25			
Phase	Sous Phase	Opération		Machine	N° Outillage	Outil de Contrôle	Tc	Temps Maintenance	Hauteur de Chute	Nombre de Coups	Temps Machine	Tps Manut	Tps réglage
I		Débitage: delopins aux dimensions demandées		FICEP		Double Mètre							
II		Chauffage: bien positionner les lopins sur la sole et les chauffer jusqu'à 1200°C		Four		Pyromètre	1200°C	45min					
III	Préforme	Estampage: Placer le lopin sur la gravure d'aplatissement et donner des coups forts pour avoir une préforme et donner des coups forts		Filon KH500	FM 639,00,000		1200°C		1m	6	10"	10"	10"
	Mise en forme	Estampage: Ensuite Placer le Lopin sur la gravure de finition et donner des coups forts		Filon KH500	FM 639,00,000		1200°C		1m	3	3"	3"	3"
IV	Ebavurage	Ebavurage: Prendre la pièce estampée, placer sur la découpe; ébavurer		Presse 400T	FEP 639 00,000		850°C			1"	2"	2"	2"
	Poinçonnage	ensuite prendre la pièce ébavurée et placer dans le poste poinçonnage et poinçonner								1"	2"	2"	2"

Tableau 3.1 : Gamme de production du moyeu par matriçage [13]

- Un débitage du lopin aux dimensions requises (section carrée de 80x80mm<sup>2</sup> x225 mm de hauteur) sur une cisaille à couteaux ouverts, FICEP
- Un chauffage sur un four à gaz, CFI statique a 1200°C pendant 45 minutes
- Une préforme sur un marteau pilon KH500 avec 6 coups
- o La finition sur la matrice de finition sur un pilon KH500 avec 3 coups
- Un Ebavurage et un poinçonnage sur une presse K9536
- Un grenailage pour nettoyer la pièce de la calamine et autres

### 3.4.3 Analyse de la gamme de production

L'analyse de la gamme de production consiste à suivre la production depuis le débitage jusqu'au parachèvement. Plusieurs points ont été soulevés :

- a) Une fournée comporte 32 lopins à chauffer pendant 1 heure à 1200 °C
- b) Le défournement se fait à la main en utilisant une pince et une perche (une cohésion et une synchronisation des mouvements depuis la prise de la pièce, son extraction du four, son transfert vers le marteau pilon est très décisif pour respecter la précision de chargement et le temps de chargement du lopin chauffé)
- c) La préforme se fait sur un coin du bloc inférieur porte insert (le bloc porte l'empreinte carrée du lopin. (Figure 3.4)
- d) Le nombre de frappes est de 2 coups (un recalage est nécessaire quand la pièce glisse au travers)
- e) Le lopin préformé est positionné difficilement sur l'empreinte de l'insert à cause de la forme débordante type poinçon au centre de l'empreinte
- f) Le nombre de frappes est de 12 coups
- g) Souvent, l'estampeur est tenu de régler la pièce pour ramener l'ébauche au centre de l'empreinte.
- h) La lubrification n'existe pas.
- i) Entre 2 pièces l'insert inférieur est nettoyé.
- j) La poussière de calamine est très présente et s'infiltré partout (particulièrement au niveau des glissières)
- k) La calamine qui reste collée sur l'outil supérieur (Figure 3.5) risque d'endommager l'outil
- l) Le déchargement du lopin se fait avec les mêmes moyens (pince et perche) ; il est lâché dans une gouttière pour le présenter devant la presse pour exécuter l'ébavurage et le poinçonnage
- m) La pièce estampée étant chaude est saisie par une pince et chargée sur l'outil d'ébavurage (Figure 3.6 a)



Figure 3.4 : Insert inférieur avec trace d'usure de l'empreinte de la préforme [12, 15]



Figure 3.5 : Vue de l'insert supérieur [12, 15]



Figure 3.6 : Vue avant des outils sur la presse: a) Ebarbage et b) Poinçonnage [12, 15]

- n) L'ébavurage se fait d'une manière souple sous pression
- o) Une fois les bavures enlevées, la pièce est placée sous le poinçon pour réaliser le trou central (Figure 3.6 b). La figure 3.7 montre les bavures et les bouts de métaux rejetés après poinçonnage.



Figure 3.7 : Vue arrière de la presse: a) bavures d'Ebarbage et b) Bouts de poinçonnage [12, 15]

- p) La pièce finie est déchargée dans un bac à lot de pièces.
- q) Une fois les pièces refroidies, elles sont transférées vers la station de grenailage pour les nettoyer de la calamine.
- r) Le contrôle est effectuée pour chaque fournée sur :
  - a) La première pièce pour vérifier l'alignement des outils et déceler toute anomalie
  - b) La pièce à moitié du lot
  - c) La dernière pièce du lot
- s) Le nombre de frappes ne correspond pas à celui défini dans la gamme de production.
- t) Les machines ne sont pas sécurisées. Il y a un grand risque de faire écraser les mains des opérateurs.

Toute anomalie conduit automatiquement à l'arrêt de la production, et la production ne pourra être reprise que lorsque les causes de cette anomalie sont déterminées et remédiées.

Les erreurs de manipulation dues à la fatigue du personnel ou bien à une inattention ne causent pas d'arrêts, mais une pause est obligatoire si c'est nécessaire.

La Figure 3.8 illustre une vue générale des résultats de mise en forme d'un lopin carré en ébauche estampée et quelques pièces ratées dues à une mauvaise prise du lopin pendant les opérations d'estampage.



Figure 3.8 : Vue générale des résultats de mise en forme [12, 15] :

- a) Lot de lopins carrés ;
- b) lot de pièce estampées ;
- c) Pièces rebutées

### 3.5 Expertise de la gamme de production

L'expertise de la gamme est confiée à PR régis Bigot, expert en procédé de mise en forme par forgeage [16].

#### 3.5.1 Avis de l'expert :

L'expertise a révélé plusieurs défauts dans la gamme de production, en concluant qu'il est difficile d'avoir un moyeu de qualité avec une telle gamme de production. Il a suggéré de faire des simulations sous forge pour appuyer son expertise.

#### 3.5.2 Définitions des différents problèmes :

- Géométrie du lopin : la forme carrée utilisée n'est pas recommandée pour l'obtention des pièces de forme axisymétrique comme le moyeu de roue.
- Le rapport entre le rayon de la base et la hauteur du lopin est de 2,8 n'est pas conforme étant donné que ce rapport doit être compris entre 1,5 et 2,5.
- La préforme étant qu'un aplatissement rend le positionnement du lopin sur la gravure de finition très difficile et engendre une mauvaise mise en forme et donc un mauvais moyeu.
- Position de l'outillage à revoir (difficulté à positionner le lopin sur l'outil inférieur)

#### 3.5.3 Solutions à appliquer:

Pour remédier à tous les défauts de mise en forme, et d'après les différentes anomalies observées, quelques changements dans la gamme de production doivent être appliqués pour optimiser la production et éviter la non-conformité des pièces forgées. Parmi elles :

- Inverser la position de l'outillage.
- Utiliser un lopin de forme cylindrique.
- Dans le cas d'un lopin carré, il faut prévoir une préforme qui va permettre d'avoir une forme proche d'un lopin cylindrique : donc il faut casser les angles du carré.
- Respecter le rapport diamètre de base / hauteur.
- Lubrifier la pièce

Avant d'appliquer ces solutions un appui par modélisation géométrique et simulation du procédé de mise en forme, doit être fait. Cet appui est réalisé sur un outil de simulation dédié aux travaux de mise en forme, utilisé par les bureaux d'étude et méthode des entreprises de mise en forme créé par « TRANSVALOR SOLUTIONS » « FORGE2011® » [42].

### 3.6 Simulations des gammes de production :

#### 3.6.1. Technologies avancées en mise en forme

Les simulations de la mise en forme d'un moyeu de roue ont été réalisées au niveau de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers du Centre de Metz (ENSAM), en France. Elle est

équipée d'une forge moderne (Figure 3.9) pour répondre aux besoins de la formation, la recherche et l'industrie.

La forge est composée d'un four à induction, d'une presse hydraulique, 800t (Loire acb) équipée d'un système d'acquisition de données de forgeage, d'un robot (Kuka) de manutention de pièces à forger et d'une presse à vis, 400t (Lasco) nouvellement installée, automatisée et équipée d'une commande numérique (Siemens). Un logiciel 'Forge' permet de modéliser et simuler les opérations de mise en forme afin de déterminer les paramètres d'entrée permettant une meilleure maîtrise du processus de production afin d'assurer la qualité du produit fini et de veiller à la longévité des outillages de production. La particularité de cet ilot est qu'il est intégré dans une plateforme d'enseignement à distance de type X-Remote-Manufacture.

C'est ce qui ressort de la philosophie du laboratoire Conception –Fabrication-Commande créée en 2009 [13] dont la démarche et l'objectif sont reportés ci-dessous.

Profondément ancrés dans une démarche de recherche méthodologique et technologique, nos travaux sont pour la plupart réalisés en étroite collaboration avec le monde industriel dans divers secteurs. De manière générale, les recherches visent à apporter des réponses complètes aux défis technologiques de l'industrie et de la société. Elles font l'objet, en proportions variées, de travaux fondamentaux, de simulations sur ordinateur et d'études expérimentales, et se prolongent parfois par une assistance à la mise en œuvre sur le site industriel.

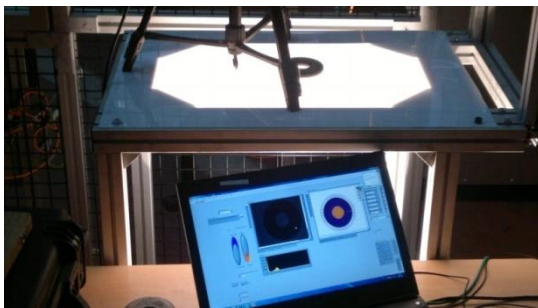
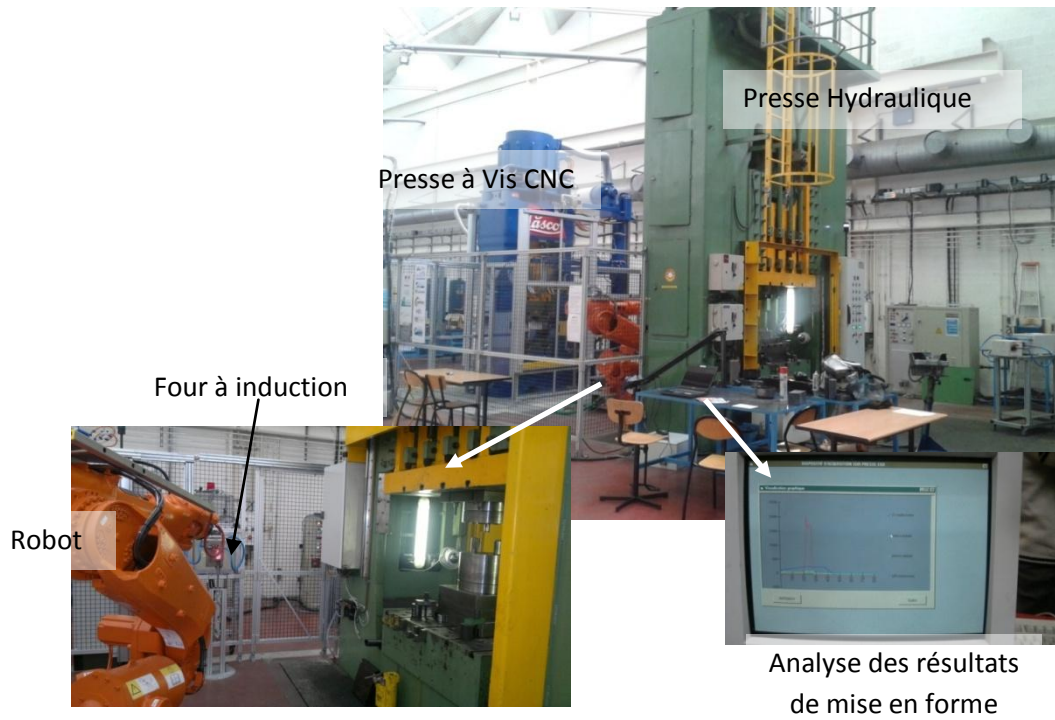
Identification, modélisation et traitement des connaissances technologiques pour la conception, fabrication et commande de produits mécatroniques.

L'objectif est de formaliser des connaissances technologiques, de valider la pertinence des modèles et les démarches proposées dans un souci de cohérence, de robustesse, de gestion des incertitudes et d'optimisation globale liées aux procédés, processus de fabrication et moyens de production afin de disposer de modèles, démarches et outils d'aide à la décision pour la conception et la fabrication de produits de haute qualité ou la conception et la commande des moyens de production (machines, actionneurs, surveillance...) performants.

L'ilot de forge du Centre ENSAM de Metz est composé d'équipements modernes avec des technologies de pilotage et de contrôle très avancées. Cependant, les machines ne fonctionnent pas à plein régime comme en industrie. Elles sont destinées à la formation d'étudiants et d'industriels et aussi à la recherche pour répondre aux soucis des industriels. Les opérations de maintenance sur les machines et robot, peuvent être gérées à distance et ordonnées par les constructeurs (contrat de e-maintenance). Mais le principal problème exposé par tous les forgerons est la durée de vie des outillages. Ces derniers représentent 10 à 15% du coût de la production et si elle n'est pas bien maîtrisée, elle peut avoir des conséquences économiques graves.

Avant toute opération de mise en forme une étude approfondie est réalisée par simulation sous le logiciel 'FORGE®' pour une meilleure gestion du processus des points de vue : qualité de la pièce et durée de vie de l'outillage. Ainsi la simulation sous 'forge' est très utile pour les mainteneurs dans la gestion de la durée de vie des outillages. La simulation est aussi prédictive si la formalisation du procédé est bien réalisée et si les modèles et paramètres associés sont bien identifiés. Ainsi, les interventions impliquent toute opération qui améliore la qualité de la production ou empêche un phénomène indésirable de se reproduire au niveau de la pièce forgée ou bien les outillages.

# Plan d'expérience pour la simulation du processus d'obtention d'une pièce forgée



b) Système optique de contrôle de la pièce



c) Interface de Forge11®

Figure 3.9 : Ilot de mise en forme à l'ENSAM de Metz [12, 13, 17]

### 3.7 Simulations des gammes de production du moyeu de roue

L'analyse de la gamme de production du moyeu de roue de l'entreprise et son expertise ont donné lieu à la définition d'un plan d'expérience pour vérifier les solutions à appliquer et recommandées par l'expertise. La vérification de ces solutions est appuyée par l'outil de simulation FORGE2011®.

Le plan d'expérience est présenté dans le tableau 3.2.

Simulation	Presse	Lopin : forme dimension	Température de chauffe	Lubrification	Maillage lopin/outil
Gamme de production Ferroviaire	Pilon KH500	Carré 80*80*225	1200°C	Aucune	3/surfacique
Gamme de production Ferroviaire	Pilon kh500	Carré 80*80*225	1200°C	Eau + graффite	2/surfacique
Gamme de production Ferroviaire	Pilon KH500	Carré 80*80*225	1200°C	Huile	2/surfacique
Gamme de production avec lopin cylindrique	Pilon KH 500	Cylindrique 100*184	1200°C	Eau +graффite	2/surfacique
Presse a vis lopin cylindrique	Presse a vis 630T	Cylindrique 100*184	1200°C	Eau + graффite	2/surfacique

Tableau 3.2 : plan d'expertise des différents moyens de mise en forme

Avant d'appliquer ces solutions un appui par modélisation géométrique et simulation du procédé de mise en forme, doit être fait. Cet appui est réalisé sur un outil de simulation dédié aux travaux de mise en forme, utilisé par les bureaux d'étude et méthode des entreprises de mise en forme créé par « TRANSVALOR SOLUTIONS » « FORGE2011® » [10]

#### Conclusion :

L'expertise de la gamme de production du moyeu de roue a permis d'évaluer et d'analyser les anomalies qui ont généré de la non-conformité des pièces estampées. Le fait de mettre en place un plan d'expérience pour la simulation du processus de mise en forme de la pièce, déduit la meilleure façon de l'obtenir. L'importance et l'intérêt de la consultation d'un expert en forgeage et le fait d'avoir recours à la simulation des procédés de mise en forme (FORGE2011® ou de tout autres outils de simulation) contribuent pleinement dans l'amélioration des décisions à prendre en production et en maintenance.

Chapitre IV: Analyse des résultats de simulations du processus d'obtention d'une pièce forgée

**4.1 Introduction**

Conformément au plan d'expériences recommandé suite au diagnostic de la gamme de production du moyeu de roue produit dans l'atelier de forge de l'entreprise publique Algérienne Ferroviaire et aux suggestions de l'expert, les résultats des simulations sont organisés de manière à prendre en considération l'analyse des différents paramètres qui pourraient éventuellement apporter des solutions aux différentes anomalies soulevées et observées. La Figure 4.1 montre la structure et les principaux paramètres d'entrée que doit respecter le système de production pour garantir une pièce de qualité, conforme au cahier des charges en respectant la cadence et les délais.

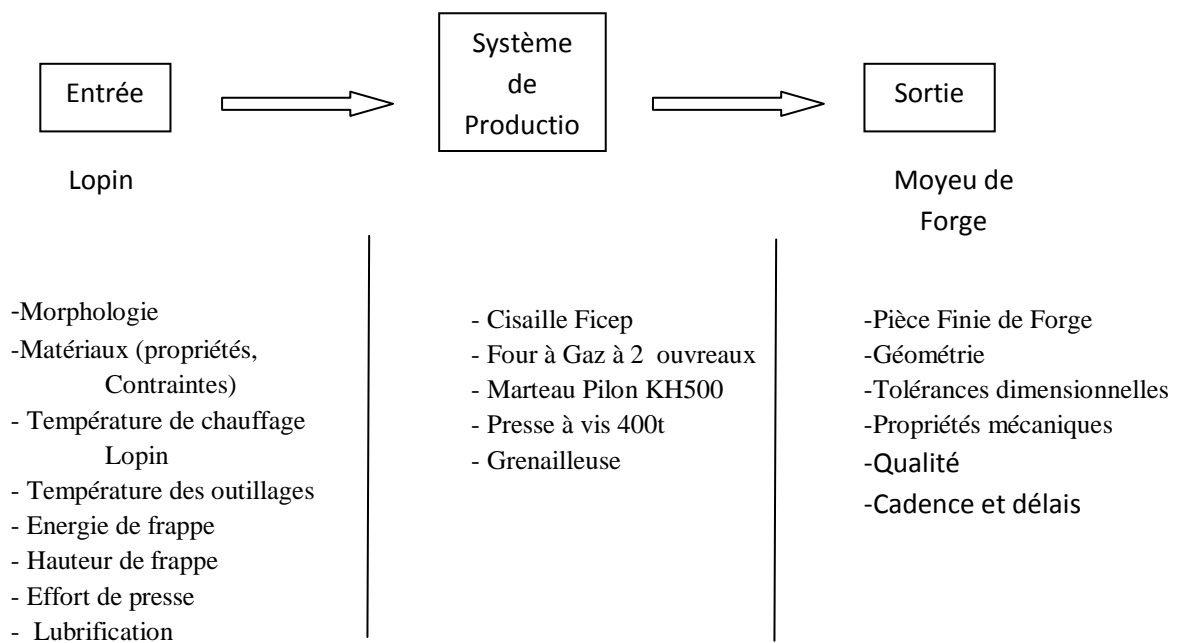


Figure 4.1 : Structure du système de production d'un moyeu de roue par estampage

**4.2 Effet du positionnement des inserts**

Le premier problème rencontré lors du lancement de la simulation conformément à la gamme de production réelle de l'entreprise est le positionnement des inserts. En effet, l'insert inférieur, Figure 3.4, qui porte le poinçon central dépassant de 31 mm (Figure 4.2.a) la surface de contact des matrices à savoir le plan de joint, ne permet pas d'assurer un positionnement juste et calibré du lopin. Cette opération nécessite une maîtrise parfaite de la manipulation de la perche porte pince et une synchronisation des mouvements de chargement entre l'estampeur et l'aide estampeur. La pièce au premier coup risque de glisser et de conduire à une excentricité du trou central par rapport au diamètre extérieur de la pièce. L'estampeur doit être très vigilant et rapide dans le recentrage de la pièce surtout lors des 1<sup>ères</sup> frappes. La simulation sous Forge de ce positionnement, n'a pas donné de résultats convainquants, au contraire on observait une rotation de la pièce qui ne permettait pas de



conclure la simulation. Donc, il a été décidé de renverser les inserts pour continuer les simulations (Figure 4.2.b). L'inversement des inserts montre la bonne prise du lopin qui dès la première frappe, il vient se loger dans le creux de l'empreinte, contrairement à la disposition initiale.

Le fait de bien positionner le lopin sur l'outillage facilite l'opération d'estampage. Dans ce cas, inverser les outils est recommandé pour une meilleure opération de mise en forme par estampage. Le lopin va se loger dans la matrice inférieure et il y aura moins de risque pour qu'il bouge.

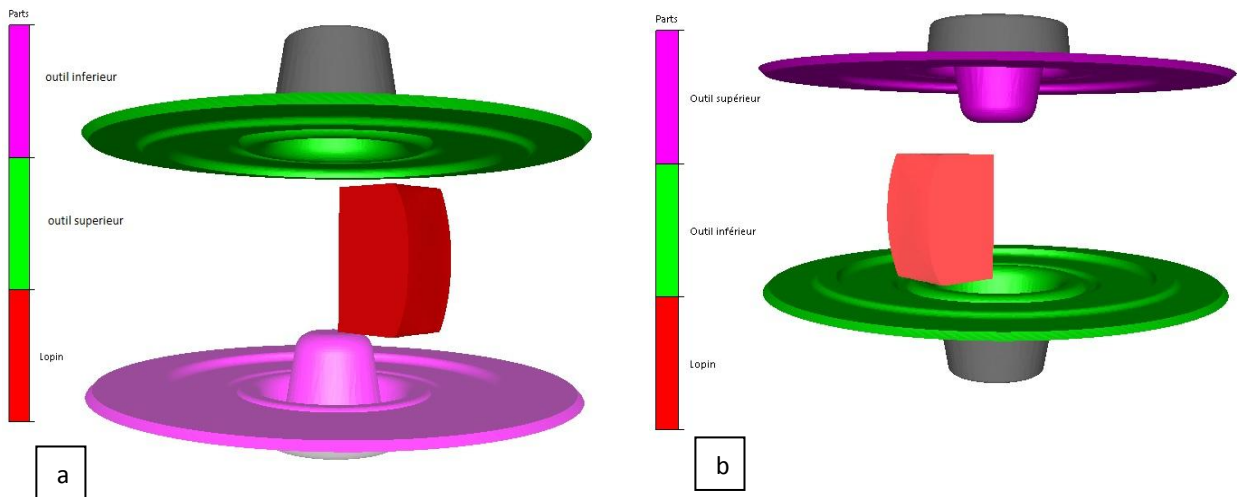


Figure 4.2 : Effet du positionnement des inserts supérieur en inférieur sur la prise du lopin

- a) fDisposition non stable, insert inférieur avec poinçon central, risque de glissement,
- b) disposition stable, insert inférieur avec creux au centre, bonne prise du lopin dans le creux

#### 4.2.1 Détermination du nombre de coups pour la mise en forme du moyeu

Une fois les inserts sont bien positionnés et alignés, la simulation du matriçage peut commencer. Elle permet de fixer les paramètres d'entrée (matériau du lopin, matériau des inserts, température du lopin, température des inserts, hauteur de frappe, nombre de frappes, arrêt sur course finale, énergie de la presse, masse tombante). La simulation est suivie à travers l'écoulement régulier au fur et à mesure que la matière s'écoule le long des parois des gravures de la matrice en fonction du nombre de frappes et de la hauteur finale. La Figure 4.3 illustre l'écoulement de la matière lors de la mise en forme depuis la 1<sup>ère</sup> frappe jusqu'au dernier coup.

Dés le premier coup, le lopin se loge dans la gravure inférieure et commence à prendre forme, pendant que le poinçon central sur l'insert supérieur pénètre dans la partie supérieure du lopin. Au fur et à mesure que le nombre de frappes augmente, la matière du lopin s'écoule le long des parois de l'empreinte de l'insert inférieur, alors l'insert supérieur porte pression sur le lopin pour permettre à la matière de s'écouler et prendre forme le long des parois de la gravure de l'insert supérieur. Au final, la mise en forme est terminée lorsque la hauteur finale quand la fin de course de l'outil supérieur est atteinte. Le nombre de coups est déterminé en fonction de la hauteur finale. Si elle n'est pas atteinte, on rajoute des coups, si elle est atteinte le système s'arrête.

#### **4.3 Effet de la forme initiale du Lopin sur la morphologie de la pièce estampée**

La géométrie du lopin joue un rôle important pour avoir une bonne pièce forgée. Le choix de celle-ci dépend de la géométrie de la pièce forgée. L'EPE Ferroviaire semble ne pas considérer ce détail qui pourrait avoir une influence majeure sur la qualité du produit. Et puis, le rapport de 2.8, entre la hauteur et la base de la section du lopin est un peu plus élevé que le rapport recommandé par les experts (1 à 2.5). Les résultats des simulations de l'effet de la forme initiale du lopin et le respect du rapport entre la hauteur et le diamètre de base du lopin sont présentés dans la Figure 4.4. L'utilisation d'un lopin cylindrique avec un rapport entre la hauteur et le diamètre de base montre une meilleure mise en forme, avec moins de perte de matière en bavure. La préforme montre une déformation non homogène lorsque le lopin est carré. Ce comportement permet de déterminer la différence de coûts de production et de maintenance.

#### **4.4 Effet de la lubrification sur la température de la pièce**

La variation de la température dans la pièce dépend à la fois des caractéristiques intrinsèques du matériau de la pièce (contrainte d'écoulement, conductivité thermique), mais aussi du procédé de mise en forme (vitesse de déformations, échanges thermiques avec les outillages). Dans cette étude, la variation de la température est causée par l'échange thermique entre la pièce et l'outillage. Cette variation est provoquée par les conditions de lubrification. A cet effet, 3 simulations ont été considérées pour analyser la variation de la température dans la pièce :

- a) Pièce obtenue à partir du lopin carré sans lubrification, Figure 5.
- b) Pièce obtenue à partir du lopin carré avec lubrifiant Eau-Graphite, Figure 6
- c) Pièce obtenue à partir du lopin cylindrique avec lubrifiant Eau- Graphite, Figure 7

Lorsqu'on aplatit un lopin carré sans lubrification pour lui donner une préforme, Figure 5, la température au centre de la pièce chute de 1%, certaines régions externes gardent encore la température de chauffe. Le matriçage provoque une distribution de la température qui se dissipe du centre de la pièce en fonction de son contact avec l'outillage. Quelques points de la pièce sur la surface externes du centre de la pièce dépassent la température de fusion du matériau. Le scalaire de température donné par FORGE11® varie de 1000 °C pour les zones en bleu pour atteindre 3200 °C pour les zones en rouge. Les températures au niveau des bavures données par le scalaire sont très élevées dépassant la température de fusion et sont de l'ordre de 2600°C à 1600°C comme l'indique le système au-delà de la température de fusion ce qui permet un écoulement facile de la matière en excédant. Plus on s'éloigne du diamètre extérieur de la pièce forgée, plus la température chute.

Lorsqu'on introduit la lubrification, Figure 4.5, les valeurs de la température chutent dans les zones rouges à 2500°C. Globalement, la température initiale de chauffe a chuté dans toute la pièce pour se dissiper à travers les bavures. Dans la région des bavures même s'il y a des

régions en rouge indiquant des températures élevées, celle-ci restent bien au dessous des températures observées lorsque la pièce n'est pas lubrifiée.

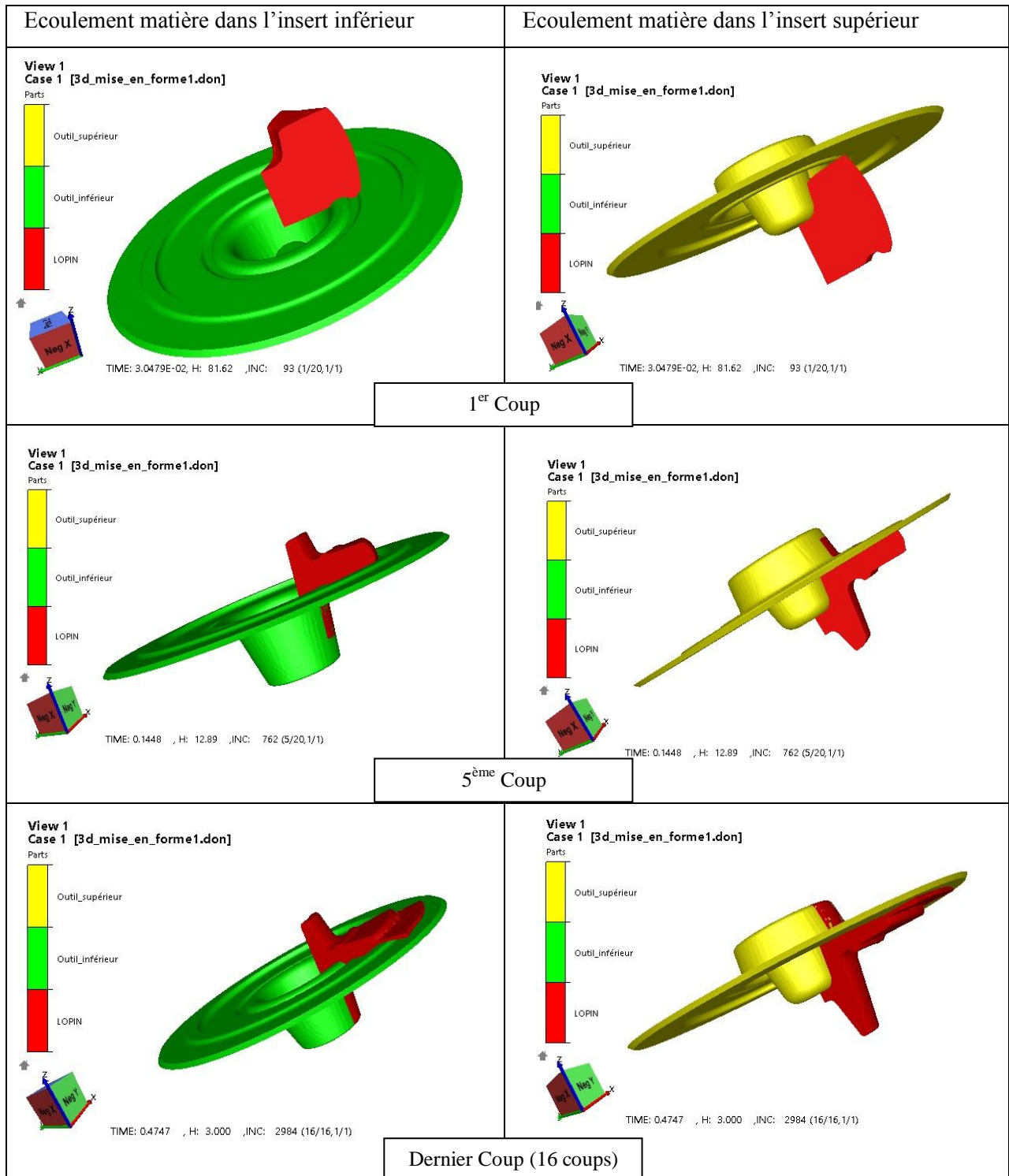


Figure 4.3 : Evolution de la déformation du lopin en fonction du nombre de coups

## Analyse des résultats de simulations du processus d'obtention d'une pièce forgée

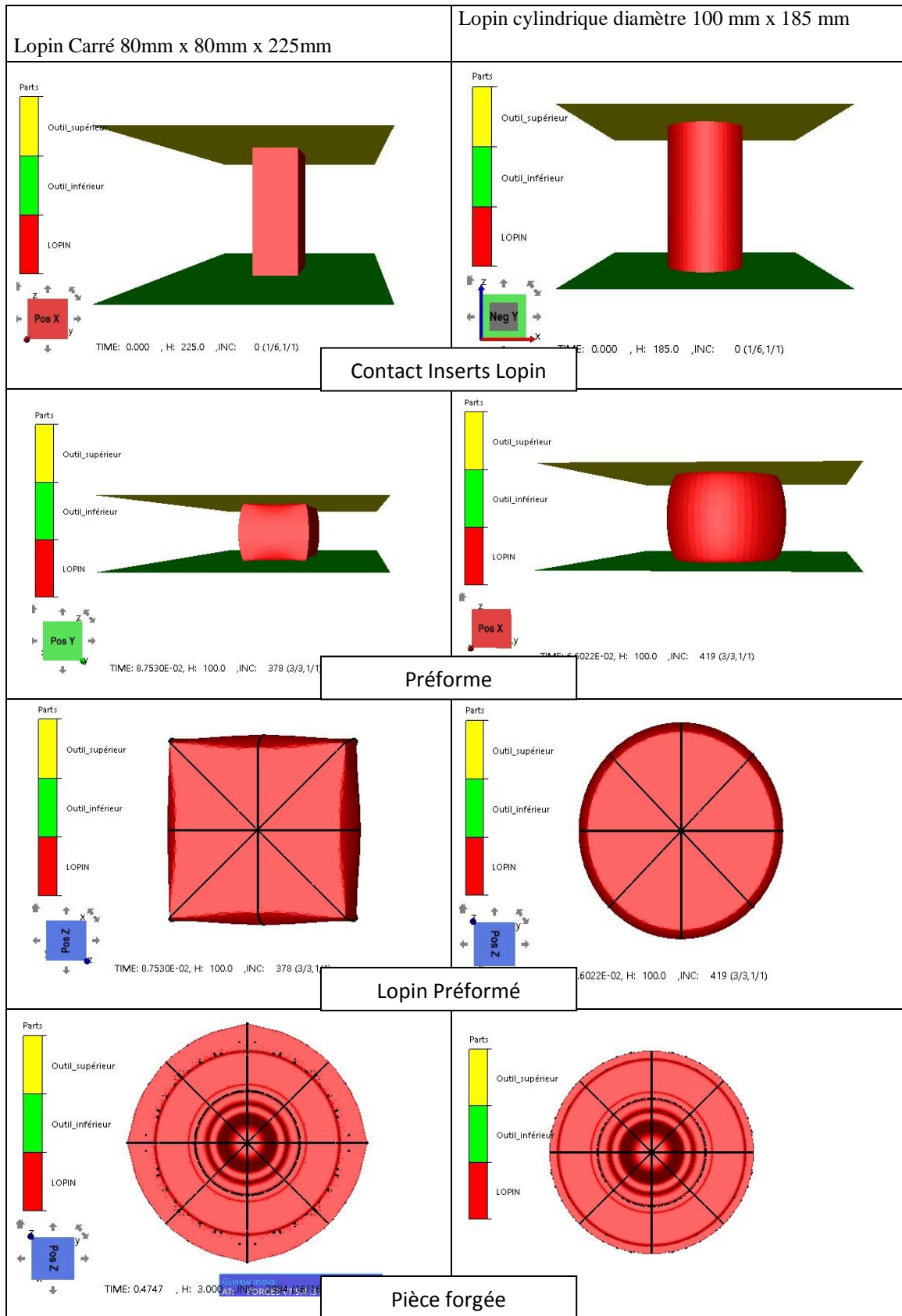


Figure 4.4 : Effet de la forme du lopin sur la morphologie de la pièce estampée

Lorsqu'on aplatit un lopin cylindrique, et à la fin de la préforme la température initiale de chauffe de 1250°C chute de 1% jusqu'à 1100°C et elle pratiquement uniforme sur toutes les parties de la pièce préformée. Le matriçage provoque une élévation de température mais bien au dessous de la température de fusion du métal. Le scalaire des températures indique des valeurs qui augmentent de 1000 °C à 1500°C. Les températures les plus élevées sont réparties uniformément autour de la pièce dans les bavures. La distribution de la température est très régulière, autour de 1250 °C et un peu moins dans les parties les plus épaisses de la pièce. Cette distribution caractérise l'homogénéité des caractéristiques intrinsèques du matériau à travers toute la pièce.

#### **4.5 Effet de la lubrification sur l'outillage**

L'outillage constitue la partie sensible d'un procédé de mise en forme. L'usure de l'outillage est définie via la vitesse de glissement (entre la pièce et l'outil) et la contrainte normale appliquée sur la surface. Ce scalaire ne donne pas une usure en micron ou millimètre, mais donne simplement une estimation de la zone où l'usure de l'outil est la plus forte. L'unité donc est exprimée par FORGE11® en mm.MPa. Toute l'analyse est effectuée sur la base de l'usure cumulative.

Lorsqu'on utilise un lopin carré sans lubrification, les outils sont affectés dès la première pièce. En effet le scalaire de l'usure cumulative donne des valeurs très élevées allant jusqu'à 176883 mm.MPa, Figure 4.6. Seize coups ont été nécessaires pour réaliser la mise en forme.

L'examen de l'insert inférieur montre que la partie la plus touchée est l'anneau extérieur de l'outil qui permet l'écoulement de la matière en excédant correspondant à la bavure et la dissipation de la chaleur. Donc cette partie doit être régulièrement surveillée car après un certain nombre de pièces, les tolérances de la pièce ne seront plus respectées. La pièce aura un défaut de 'Hors Tolérance'.

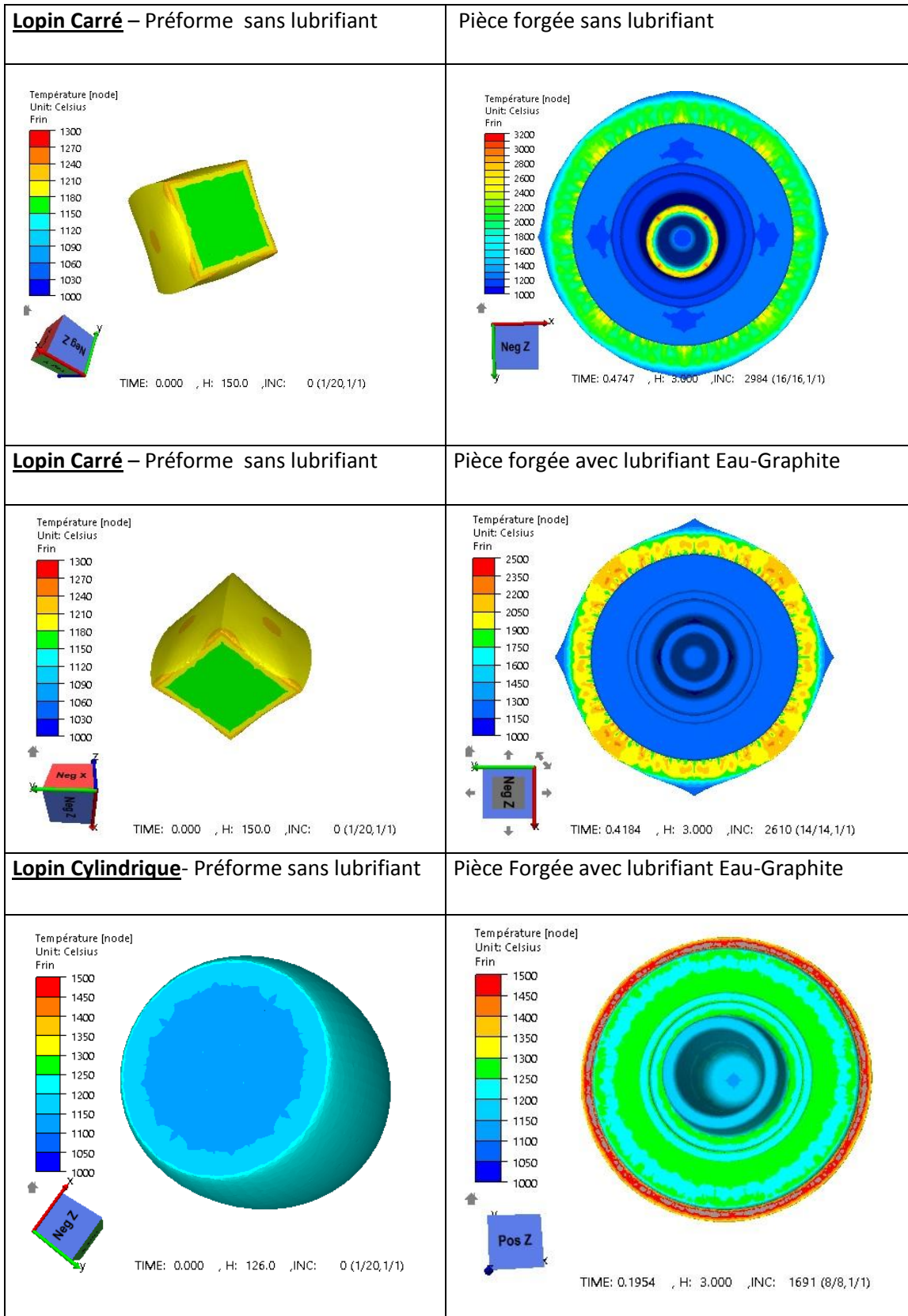


Figure 4.5 : Effet de la lubrification sur la distribution de la température de forgeage

Quand on examine l'insert supérieur, la partie la plus affectée est le fond central de l'outil, puisqu'il correspond à la partie qui refoule le plus de matériau en fin de course. Le glissement est si important pour que l'outil résiste aux sollicitations thermiques et mécaniques. La surveillance de cette partie est très délicate et nécessite des moyens de contrôle très développés. Néanmoins, le défaut de la pièce reste à l'appréciation de l'utilisateur qui doit l'accepter ou la rejeter (dans ce cas le défaut peut être toléré si la surface ne porte pas de cotes fonctionnelles).

### Forgeage d'un lopin carré sans lubrifiant

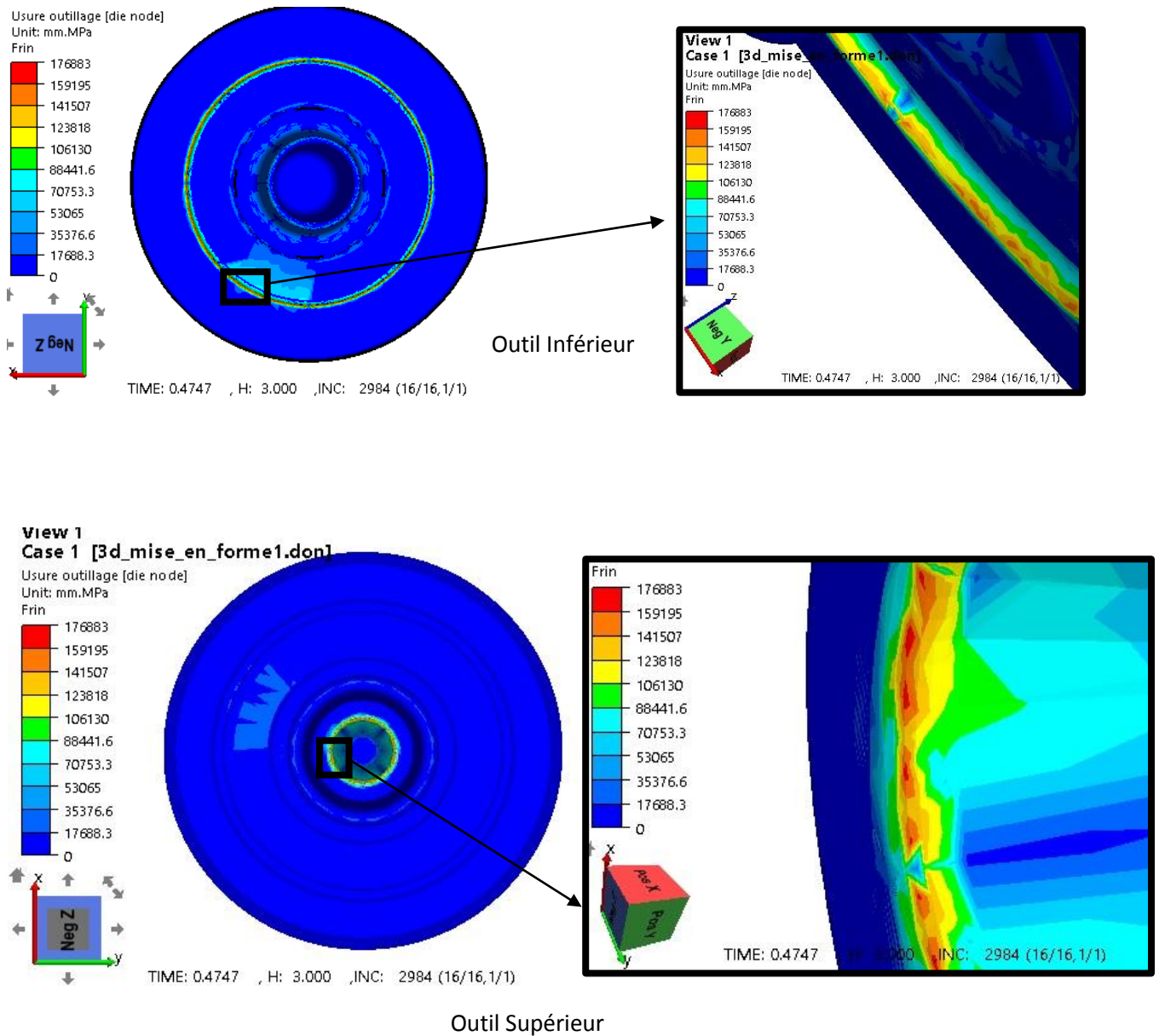


Figure 4.6 : Zones d'usure cumulative après forgeage à sec moyeu de roue (Lopin Carré)

L'ajout d'un lubrifiant tel que l'Eau-Graphite, montre une nette diminution de l'usure cumulative sur l'outil inférieur, Figure 4.7. Par contre, il y eu une augmentation de la valeur de cette usure sur l'outil supérieur. Il est difficile d'expliquer ce phénomène mais il faut retenir, que le nombre de coups est tombé à 14.

### Forgeage d'un Lopin Carré avec lubrifiant Eau-Graphite

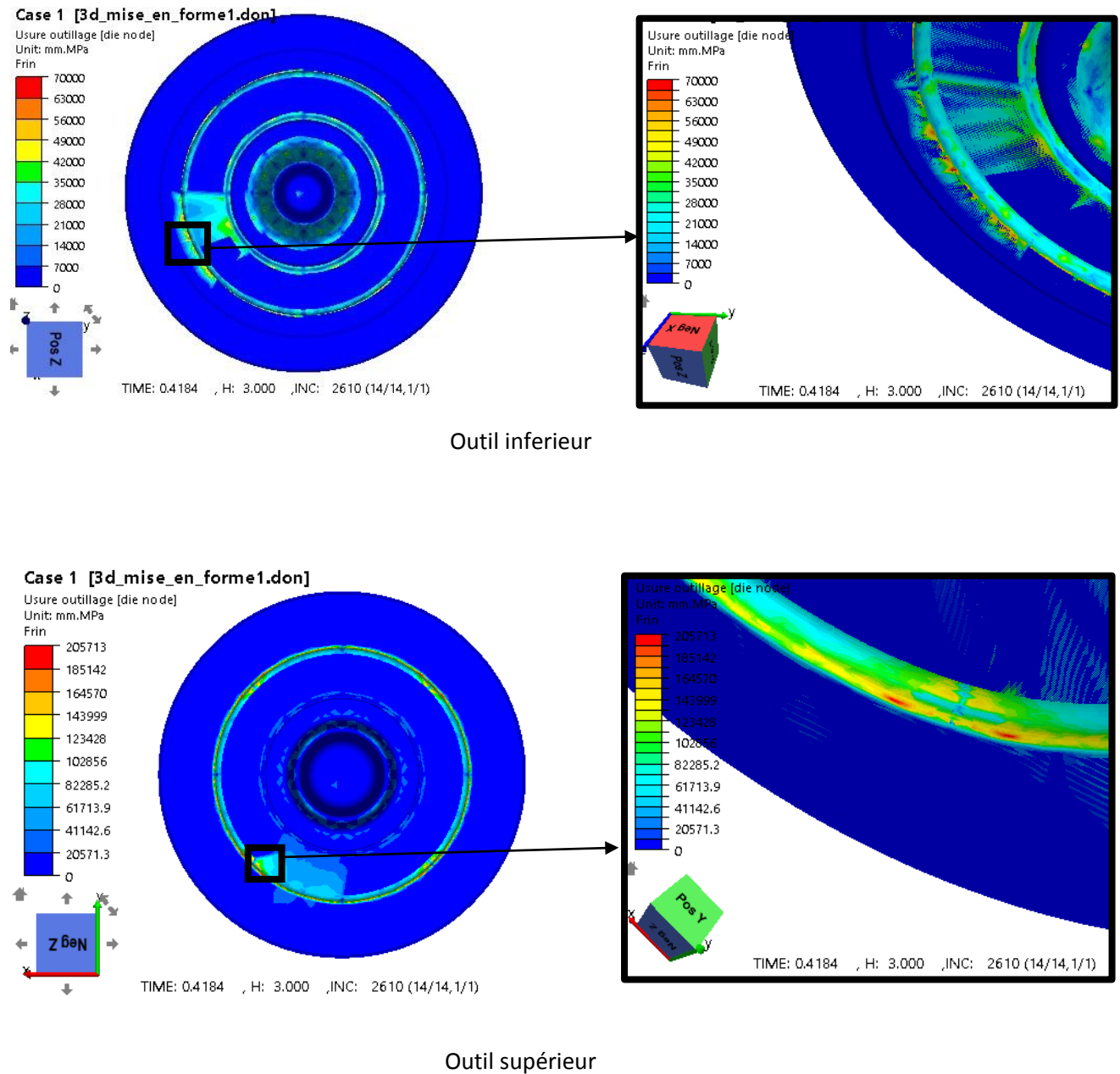


Figure 4.7 : Zones d'usure cumulative après forgeage moyeu de roue avec lubrifiant Eau-Graphite (Lopin Carré)



La mise en forme d'un lopin cylindrique en utilisant un lubrifiant Eau-Graphite, montre un meilleur résultat géométrique du moyeu, Figure 4.8, (Une bavure plus homogène), mais aussi un nombre de coups qui lui a baissé de moitié (8 coups au lieu de 16) ceci est due a l'utilisation de la lubrification a l'eau et graphite. Les résultats d'usure sont très intéressants, en effet, la résistance à l'usure par rapport au cas ou le lopin est carré est 7 fois supérieure ; elle est d'autant plus supérieure de 17 fois quand la pièce n'est pas lubrifiée. Il est assez classique de voir que le nombre de coups est tombé à 8. Le Tableau 4.1, donne un récapitulatif des résultats de simulations.

### Forgeage d'un Lopin cylindrique avec Lubrifiant Eau-Graphite

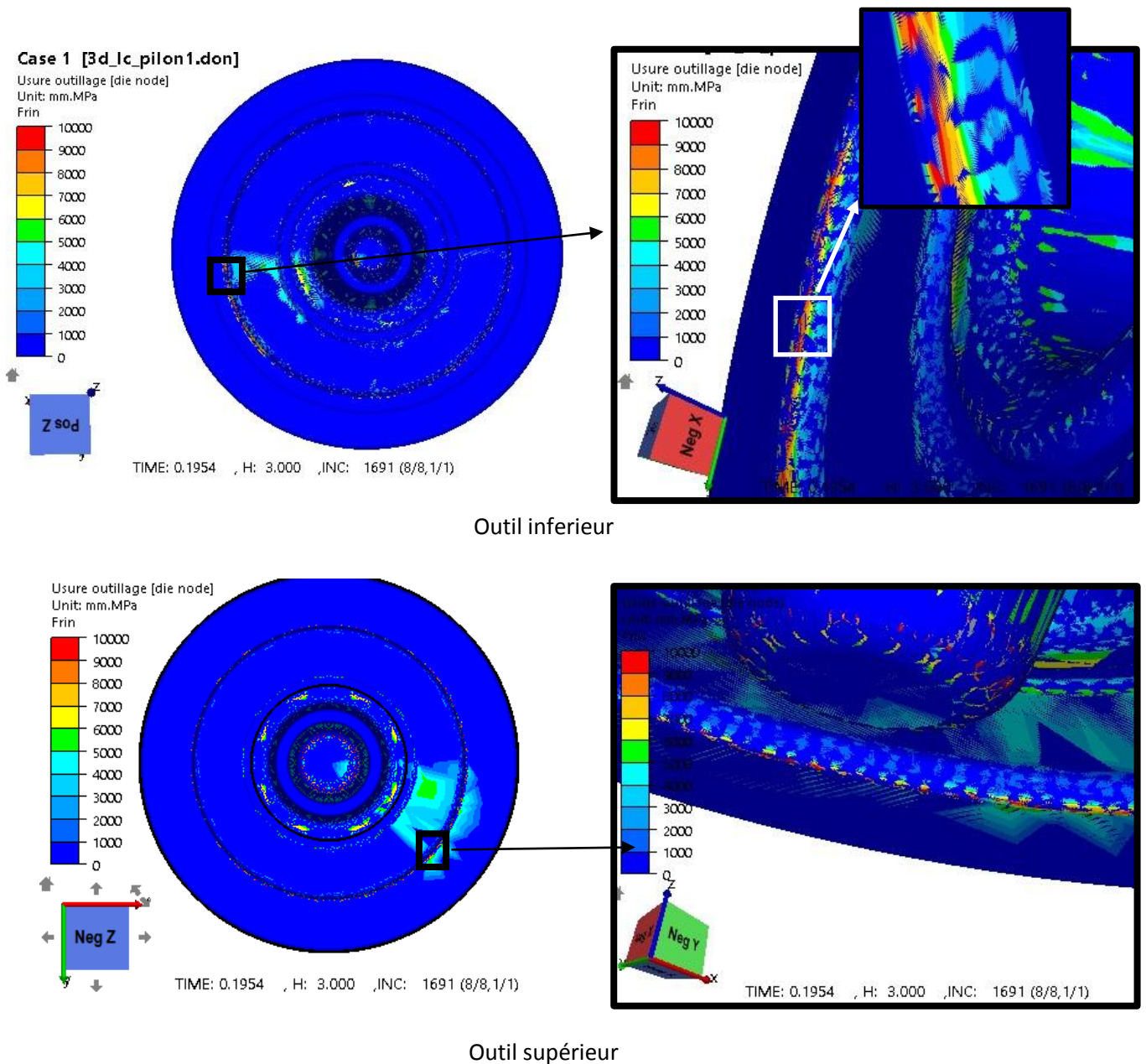


Figure 4.8 : Zones d'usure cumulative après forgeage moyeu de roue avec lubrifiant Eau-Graphite (Lopin Cylindrique)

**Conclusion :**

L'analyse des résultats de simulation des différentes gammes utilisées a montré l'effet de la géométrie initiale du lopin sur les différents paramètres de mise en forme ainsi que l'effet de la lubrification sur la déformation et la température de la pièce finale et sur le comportement de l'outillage aux défauts dus principalement à l'usure.

L'étude élaborée dans ce chapitre permet de déterminer d'une part le meilleur moyen d'avoir une pièce conforme et d'autre part d'optimiser les sollicitations mécaniques et thermiques afin d'allonger la durée de vie de l'outillage.

## 5.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, la prise de connaissance des différents moyens de production et des défaillances et défauts liés au système de production de pièces par mise en forme a chaud particulièrement le forgeage a été faite. L'étude a été orientée vers le forgeage d'un moyeu de roue au niveau de l'atelier forge de L'EPE Ferroviaire Annaba. Les moyens utilisés sont des engins de forgeage implantés sous forme d'un îlot figure 3.2 et figure 3.3. L'évaluation ou bien le diagnostic de cet îlot de production est caractérisé par le diagramme causes à effets figure 3.4

Les résultats de ce diagnostic a été confié aux experts de mise en forme qui ont recommandé des changements dans la gamme de production et de vérifier les solutions suivantes :

- Inverser la position de l'outillage.
- Utiliser un lopin de forme cylindrique.
- Dans le cas d'un lopin carré, il faut prévoir une préforme qui va permettre d'avoir une forme proche d'un lopin cylindrique : donc il faut casser les angles du carré.
- Respecter le rapport diamètre de base / hauteur.
- Lubrifier la pièce

L'évaluation de ces solutions a été faite en utilisant des moyens de mise en forme moderne et de technologie avancée au niveau de l'ENSAM de Metz équipée d'une forge moderne (Figure 3.9) pour répondre aux besoins de la formation, la recherche et l'industrie. La forge est composée de fours à induction et électrique, d'une presse hydraulique, 800t (Loire acb) équipée d'un système d'acquisition de données de forgeage, d'un robot (Kuka) de manutention de pièces à forger et d'une presse à vis, 400T (Lasco) nouvellement installée, automatisée et équipée d'une commande numérique (Siemens). Cette forge est caractérisée par un diagramme d'Ishikawa figure 3.10.

Avant toute opération de mise en forme une étude approfondie est réalisée par simulation sous le logiciel 'FORGE®' pour une meilleure gestion du processus des points de vue : qualité de la pièce et durée de vie de l'outillage. Ainsi la simulation sous 'forge' est très utile pour les mainteneurs dans la gestion de la durée de vie des outillages. La simulation est aussi prédictive si la formalisation du procédé est bien réalisée et si les modèles et paramètres associés sont bien identifiés. Ainsi, les interventions impliquent toute opération qui améliore la qualité de la production ou empêche un phénomène indésirable de se reproduire au niveau de la pièce forgée ou bien les outillages.

## 5.2 Analyse du diagramme cause à effet de l'EPE Ferroviaire :

La méthode appliquée pour forger le moyeu est une méthode classique qui consiste en un débitage, chauffage, estampage, ébavurage, poinçonnage, nettoyage et contrôle. La simulation sous FORGE2011®, a permis de vérifier la gamme de production du moyeu de

roue Tableau 3.1 à savoir les paramètres d'entrée, la forme du lopin, les dimensions du lopin, la température de chauffe, le nombre de frappes. Les résultats obtenus par la simulation, différent de la gamme de production réelle. Ceci est la cause des moyens de productions :

- Débitage : la cisaille semi automatique FICEP utilisée pour le débitage, assure une bonne planéité des surfaces de contact avec les outils de production.
- Le chauffage : le four à sole présentant des défaillances au niveau du servomoteur, du régulateur de température et l'étanchéité des portes (four a deux ouvrants) n'assure pas une température précise.
- Estampage : le marteau pilon Lasco KH500, même si il continue à fonctionner, il présente :
  - o Des défaillances au niveau de la machine elle-même (sécurité, électriques, mécanique, hydraulique, nettoyage contrôle) qui ne permettent pas de contrôler l'énergie de frappes, le nombre de frappe, l'alignement des outils, l'amortissement des coups, la réduction des vibrations qui conditionnent la qualité du produit. Un rapport détaillé des travaux de maintenances est donnée dans le rapport de stage présenté dans le cadre de la préparation de ce mémoire.
  - o Des défaillances au niveau de l'outillage : c'est l'objet des simulations
    - Vérification du positionnement des inserts supérieur et inférieur
    - Estimation de la durée de vie (usure)
- Ebavurage et poinçonnage : la presse à vis K9536 est utilisée pour effectuer les deux opérations. Le dispositif d'ebavurage et de poinçonnage, est conçu pour finaliser la production du moyeu. Pour ces deux opérations la presse est fiable, pour deux raisons :
  - o Les consignes de maintenance préventive du constructeur sont respecter
  - o Les interventions au niveau de la commande des coulisseaux, système de freinage, l'électro distributeur, le système bielle manivelle, les outils. Un rapport détailler est donné dans le rapport de stage présenté dans le cadre de la préparation de ce mémoire.

### **5.3 Influence de la géométrie du lopin sur les besoins en matière première :**

Conformément aux recommandations de l'expert, deux points ont été pris en considération :

- Changement de la section carrée du lopin en section circulaire.
- Respect du rapport hauteur/diamètre de base de la section.

Les résultats sont analysés dans la rubrique 4.3 du chapitre IV. Un calcul des besoins pour un cahier des charges donné a fait l'objet d'une analyse qui tient compte de la quantité de matière à utiliser, du volume de bavure, et d'une estimation du volume des pièces rebutées (5% à 10% dans le cas de l'EPE Ferroviaire) et des délais de livraison. Le Tableau 5.1 exprime les besoins en matière première pour une production minimale exigée par l'entrepris en fonction de la géométrie du lopin et le rapport hauteur/diamètre de base de la section.

Le Tableau 5.2 résume le résultat des pertes au feu et des pertes en bavure après forgeage en fonction de la géométrie du lopin et le rapport hauteur/diamètre de base de la section. Il en résulte deux points importants :

- Le volume final de la pièce forgée obtenue à partir d'un lopin carré, est supérieur que celui obtenu à partir du lopin cylindrique. Ceci est dû au fait que toute la masse de la calamine qui a été formée à cause de l'échauffement de la pièce est rejetée quand il s'agit d'une pièce axisymétrique. Par contre dans le lopin à géométrie carrée il y a une certaine quantité de calamine qui reste accrochée en fin de forgeage.
- Le volume de bavure de la pièce obtenue à partir d'un lopin carré est au moins deux fois supérieur que celui de la pièce obtenue à partir d'un lopin cylindrique. En effet, quand la pièce est axisymétrique, l'écoulement de la matière est homogène dans toutes les sections de la pièce. Dans le cas du lopin carré, l'écoulement n'est pas homogène à cause de la petite quantité de calamine qui est rejetée avec les bavures. Même si l'apparence externe des pièces visuellement et dimensionnellement est identique, elles restent à explorer du point de vue métallographique
- En utilisant les lopins cylindriques, les efforts de coupe sur la cisaille sont plus importants et demandent plus de puissance pour couper les lopins. La cisaille étant fortement sollicitée pour préparer les lopins de toutes les pièces de la forge, doit être régulièrement inspectée et soigneusement entretenue.

Tableau 5.1 : Besoin en matière première pour une commande minimale

N°	forme du lopin	section du lopin (mm)	longueur du lopin (mm)	longueur de la barre (mm)	nombre de lopins par barre calculé	nombre de lopins par barre retenu	volume initial du lopin (mm <sup>3</sup> )	nombre minimal de pièce à produire	nombre de barre	estimation du rebut a 5%	nombre de barre à utiliser
1	carrée	80*80	225±0.1	6000	26.67	26	1 440 000	1000	38	2	40
2	cylindrique	50*50*π	183.5±0.1	6000	32.70	32	1 440 000	1000	31	2	33

Tableau 5.2 : Ratios des pertes au feu et de bavures

N°	forme du lopin	volume initial du lopin	volume final de la pièce forgée	perte au feu	perte au feu en %	volume de la bavure	volume total de la matière perdue	volume de la pièce final sans bavure	taux de matière perdue
1	carrée	1 440 000	1 436 632	3 368	0.23%	79 060	82 428	1 354 204	5.74%
2	cylindrique	1 440 000	1 430 240	9 760	0.68%	36 811	46 571	1 383 669	3.26%

#### 5.4 Influence du positionnement de l'outillage :

L'influence du positionnement de l'outillage est donnée dans la rubrique 4.2 du chapitre IV.

#### 5.5 Effet de la lubrification sur l'usure de l'outillage:

L'influence de la lubrification est donnée dans la rubrique 4.5 du chapitre IV.

Le Tableau 5.3 donne un récapitulatif de l'influence de la lubrification sur les inserts supérieur et inférieur. L'utilisation d'un lopin cylindrique lubrifié respectant le rapport hauteur/diamètre de base, montre une amélioration de la résistance à l'usure de 94,34% par rapport au lopin carré non lubrifié, et de 85,71% par rapport au lopin carré lubrifié au mélange eau-graphite.

Cas	Simulation	Température	Temps	Nombre de	Insert	insert	*Amélioration de la
		Lopin	Machine		Coups	Inférieur	
1	Lopin Carré sans lubrifiant	1200 °C	3,3472	16	176883	176883	94,34%
2	Lopin Carré avec lubrifiant	1200 °C	3,7976	14	70000	205200	85,71%
3	Lopin Rond avec lubrifiant	1200 °C	1,5632	8	10000	10000	

\* La résistance à l'usure dans le cas 3 est améliorée est améliorée de 94,34 % par rapport au cas 1

Elle est améliorée de 85,71% par rapport au cas 2

Tableau 5.3 : Récapitulatif des principaux résultats de simulations

### 5.6 Détermination et analyse des énergies de frappes :

Cette amélioration de la résistance à l'usure s'explique par le fait que l'énergie de frappe dans chacune des conditions de simulation, est très intéressante dans le cas du lopin cylindrique. L'outil de simulation FORGE2011® permet de déterminer l'énergie de frappe pour chaque coup donné. La figure 5.1, montre l'évolution des énergies de frappe respectives au plan d'expérience. Dans les trois conditions, jusqu'au sixième coup, l'énergie maximale de frappe est faible et inférieure à 1000 Joules.

Dans le cas du lopin cylindrique l'énergie consommée ne représente que 10% de l'énergie maximale du marteau pilon. Alors que dans les conditions de travail actuel elle peut atteindre la valeur maximale. Ce qui veut dire que la machine et l'outillage sont très sollicités mécaniquement et thermiquement.

### 5.7 Recommandations pour l'amélioration du plan de maintenance :

Suite aux travaux de recherche effectuée, les recommandations suivantes sont proposées :

- a) Avoir recours à un expert en forgeage
- b) Remettre à niveau le système de sécurité des équipements
- c) Appliquer la méthode des 5S
- d) Matière : la géométrie, les dimensions et les propriétés mécaniques et chimiques du matériau (Annexe 3) à utiliser sont importants dans la détermination des paramètres d'entrée du forgeage
- e) Les équipements :
  - 1- La cisaille FICEP :
    - Inspecter régulièrement la cisaille FICEP
    - Respecter les actions de maintenance préventive recommandée par le constructeur

2- Le four a Gaz :

- Soit Rénover et améliorer le four
- Soit remplacer par un moyen de chauffage moderne ( four électrique, four a induction électromagnétique)
- 

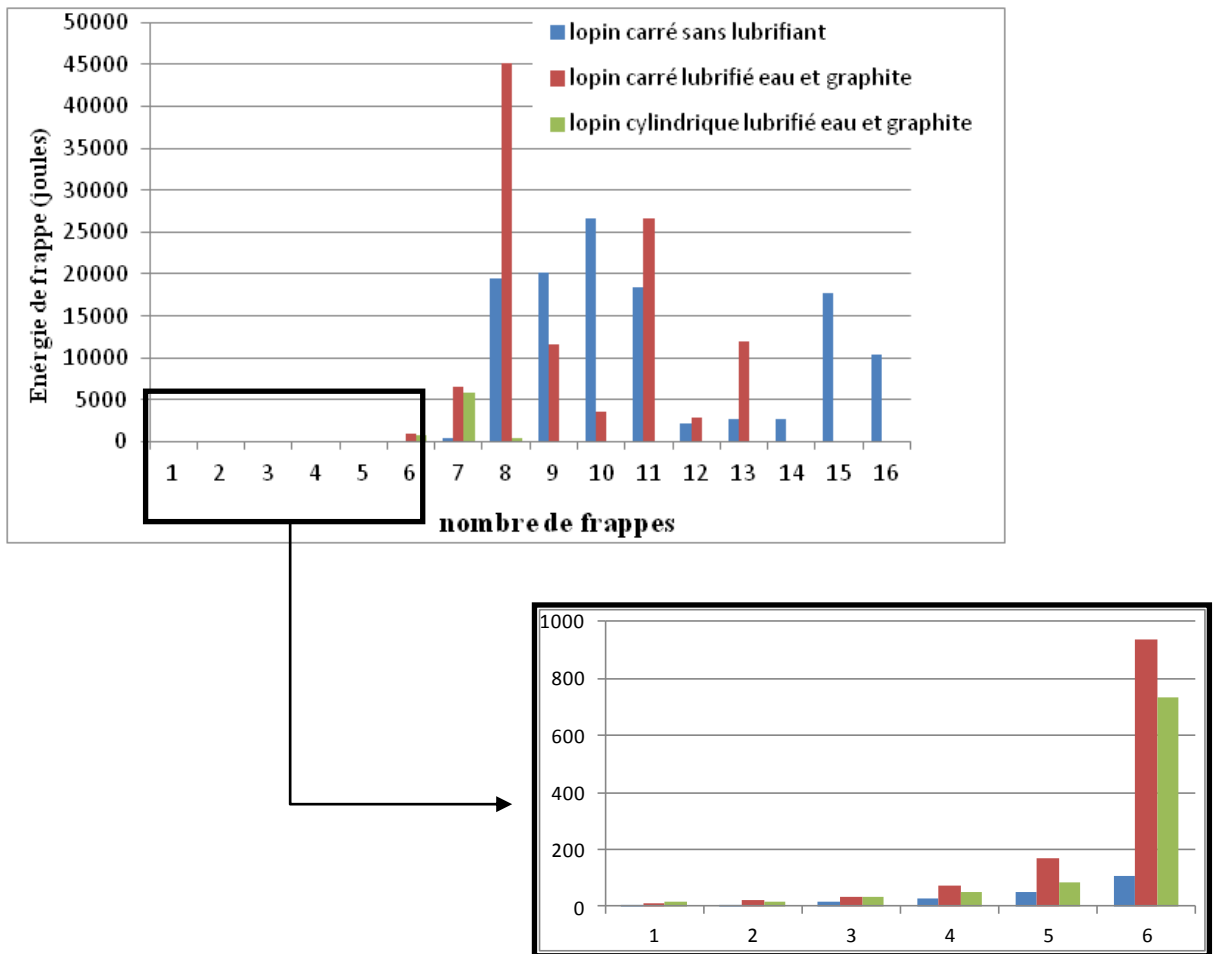


Figure 5.1: Evolution de l'énergie de frappe

3- Le marteau pilon KH500 :

- Rénover et améliorer le marteau pilon
  - o Système de sécurité (URGENT)
  - o Système d'amortissement au dessous de la chabote
  - o Entretien des glissières, coulisseaux,...
  - o Nettoyage du marteau de la calamine
  - o Améliorer le système électrique
  - o Améliorer le tableau de commande
  - o Réviser le système hydropneumatique
  - o Intégrer un système d'acquisition de données
- 4- La presse mécanique 400T :

- Respecter les consignes de maintenance périodique.
  - Rénover le système de sécurité de la presse.
- f) L'outillage :
- Inverser le positionnement des outils.
  - Nettoyage des outils entre deux productions.
  - Utilisation des lubrifiants.
  - Eliminer toute les arrêtes vives des outils
  - Inspecter automatiquement l'outillage dès qu'une anomalie est détectée sur la pièce forgée
  - Localiser les imperfections sur les outils. (figure 2.6 chapitre II).
  - Suivre les recommandations de la classification et caractérisation des défauts de forge (Tableau 2.1 et figure 2.7 du Chapitre II).
- g) Lopin :
- Penser à construire une base de données pour suivi de la production et maintenance :
    - o Cahier des charges (pièce à fabriquer, matériau, nombre, délai)
    - o Calcul des besoins (nombre de pièce à livrer, estimation des pertes)
    - o Date et heure de démarrage de la production
    - o Date et heure de détection du défaut
    - o Identifier la pièce défectueuse par un numéro dans le lot
    - o Cause du défaut
    - o Impacte du défaut sur la production (arrêt de la production ou tolérer le défaut)
    - o interventions
    - o Date et heure de la reprise de la production
    - o Calcul des indices de maintenance
  - Utiliser des lopins d'une géométrie adaptée à la pièce a forgé.
  - Respecter le rapport hauteur/diamètre de base de la section.
- h) Moyen de manutention :
- Introduire soit un bras mécanique soit un robot manipulateur.
- i) Intégrer des outils de Conception assisté par ordinateur et de simulation de mise en forme ex :SolidWorks®, FORGE2011®.

Toutes ces recommandations sont inspirées des moyens de production de l'EPE Ferroviaire, et des moyens de production de l'ENSAM de Metz. L'amélioration du système de production et de maintenance de l'atelier forge de l'EPE Ferroviaire peut être résumé dans la Figure 5.2 qui présente le schéma de principe d'amélioration du plan de maintenance de la production des pièces forgées sur un îlot de production.

Les pièces forgées sont d'abord identifiées par un numéro de passage sur machine. Elles sont contrôlées par fournée (chaque fournée contient 30 lopins). Le contrôle consiste à inspecter :



- Si la pièce est conforme elle est expédiée
- Si la pièce n'est pas conforme, elle est examinée pour détecter les causes de la non-conformité. L'examen consiste à détecter toute imperfections et la caractériser (voir chapitre 2 Défaut de forge). C'est à partir de cette caractérisation qu'il faut commencer à chercher la cause de l'imperfection et programmer les interventions.
- Si l'imperfection est tolérée, la pièce est expédiée
- Si l'imperfection n'est pas tolérée, alors la production est arrêtée pour déterminer les causes et les interventions à réaliser
- Les outils sont vérifiés systématiquement. Il faut surtout localiser toute anomalie (voir rubrique 2.1.3.6 du chapitre 2).
- Le suivi de l'usure de l'outil permet d'obtenir des informations pour améliorer leur durée de vie.
- Toutes les informations doivent être enregistrées depuis la date de début de l'arrêt jusqu'à la date de reprise de la production en notant tous les interventions et les temps intermédiaires et toutes autres actions réalisées avant la remise en marche des machines. les interventions dans une base de données historique des pannes pour permettre une meilleure gestion de la maintenance.
- Les décisions à entreprendre sont toujours le résultat d'analyse approfondie des problèmes rencontrés pendant la production.

Cependant pour réaliser ce plan de maintenance, le département forge de Ferroviaal dont le principe de son système de production est représenté dans la figure 5.3 par le diagramme cause - effet, doit adapter les moyens de production modernes. En tenant compte des moyens existants a l'ENSAM de Metz dont la technologie est très avancée représenté par le diagramme d'Ishikawa figure 5.4, l'E.P.E Ferroviaal peut s'en inspirer pour moderniser l'îlot de production du moyeu. La figure 5.5 illustre en rouge les nouveaux équipements qui peuvent faire l'objet de cette modernisation. Il est important de mettre en valeur la place du logiciel de simulation Forge 2011® pour l'exploitation et la maintenance dans la production des pièces forgée. Rubrique 3.6 du chapitre III et annexe.

### **5.8 Conclusion :**

Ce chapitre est une synthèse des quatre précédents chapitres. Il propose une série de recommandations pour améliorer le plan de maintenance de l'E.P.E Ferroviaal. Les changements et les améliorations à réaliser sont montrés dans un diagramme Ishikawa. Il faut noter que le fait d'adapter les moyens de production modernes aux moyens existants est essentiel pour améliorer la performance du système de production. L'intégration d'une base de données 'historique des arrêts' est accrue car elle permet au mieux d'évaluer régulièrement les actions d'interventions préventives et d'avoir un retour d'expérience dans la gestion d'éventuelles défaillances.

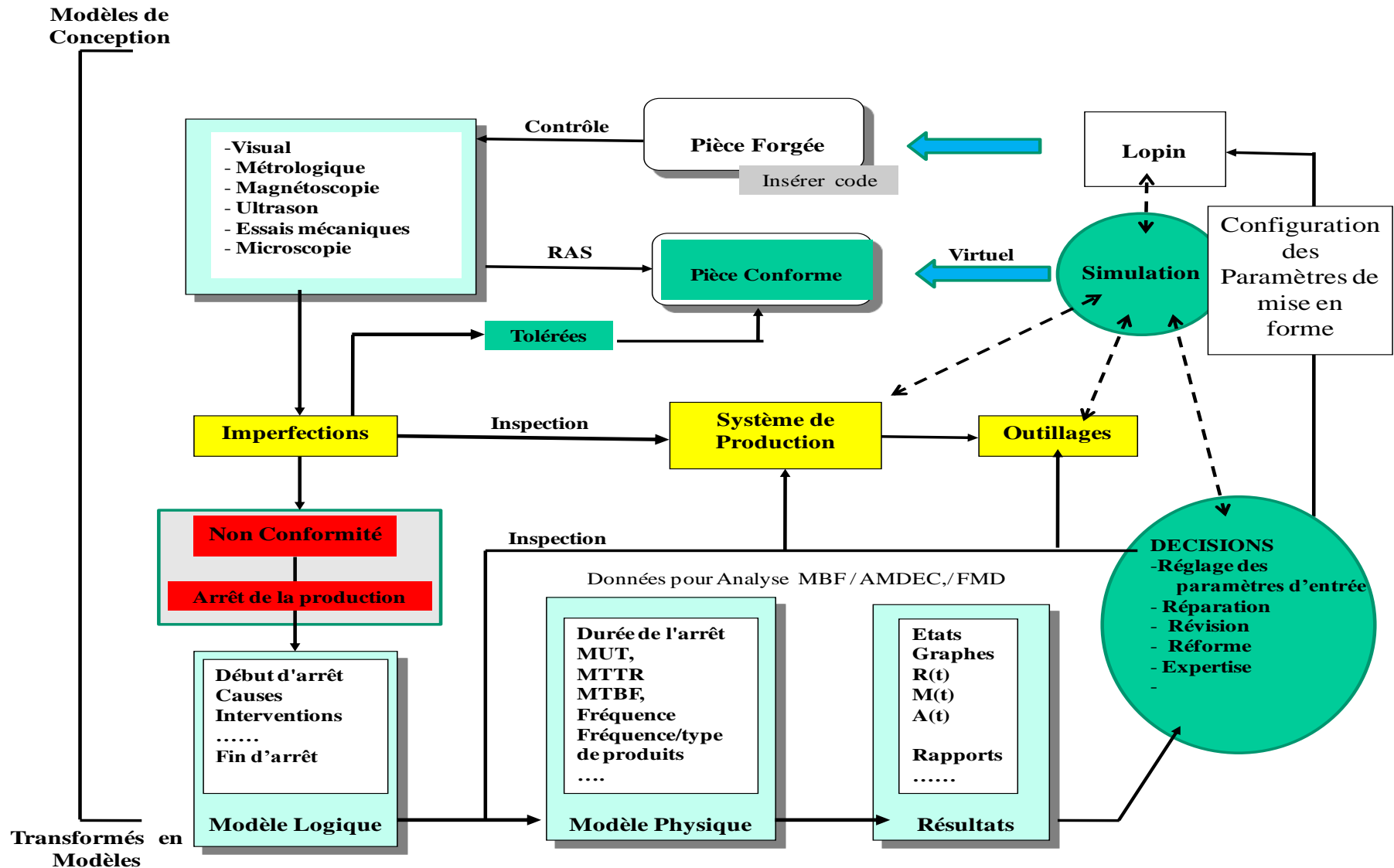


Figure 5.2 : schéma d'amélioration du plan de maintenance d'un système de maintenance d'une pièce forgée

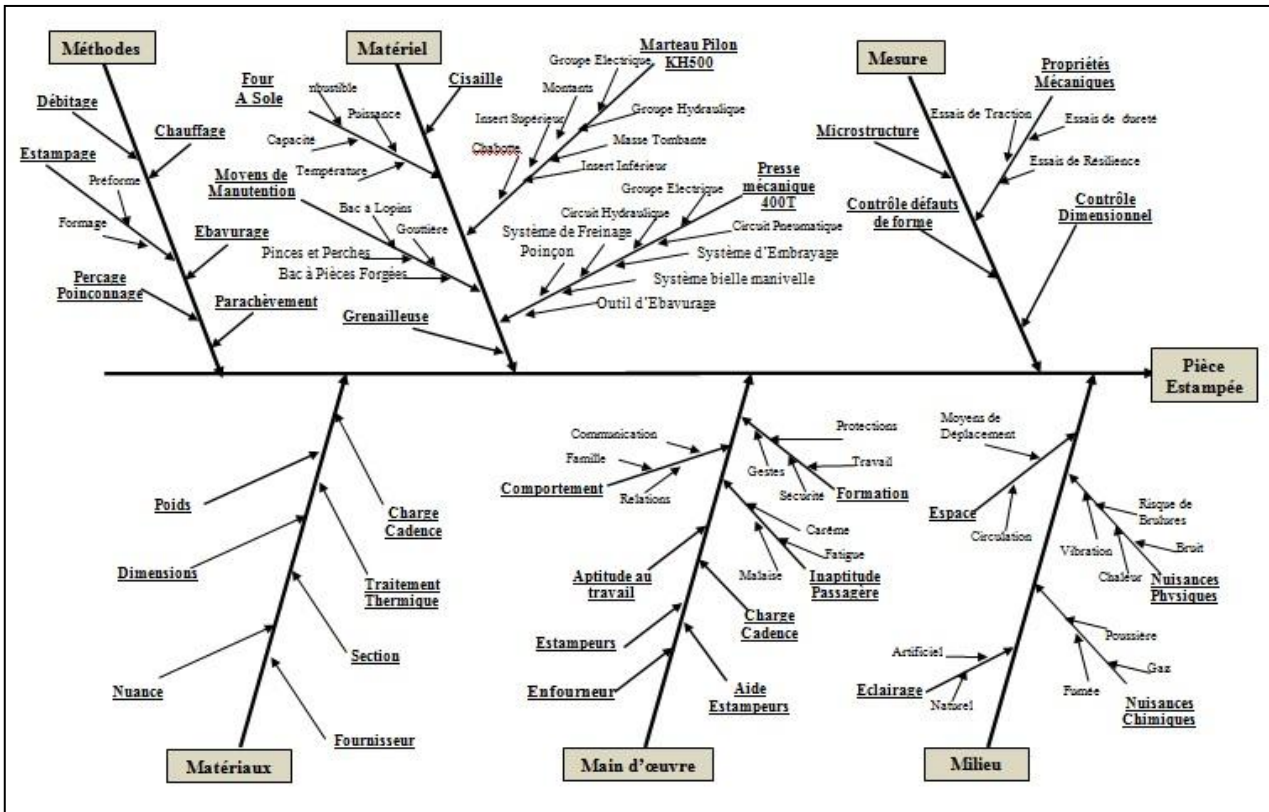


Figure 5.3: Diagramme de causes et effets du système de mise en forme à chaud d'un moyeu de roue au sein de la forge de l'E.P.E Ferroviaire, Annaba, Algérie

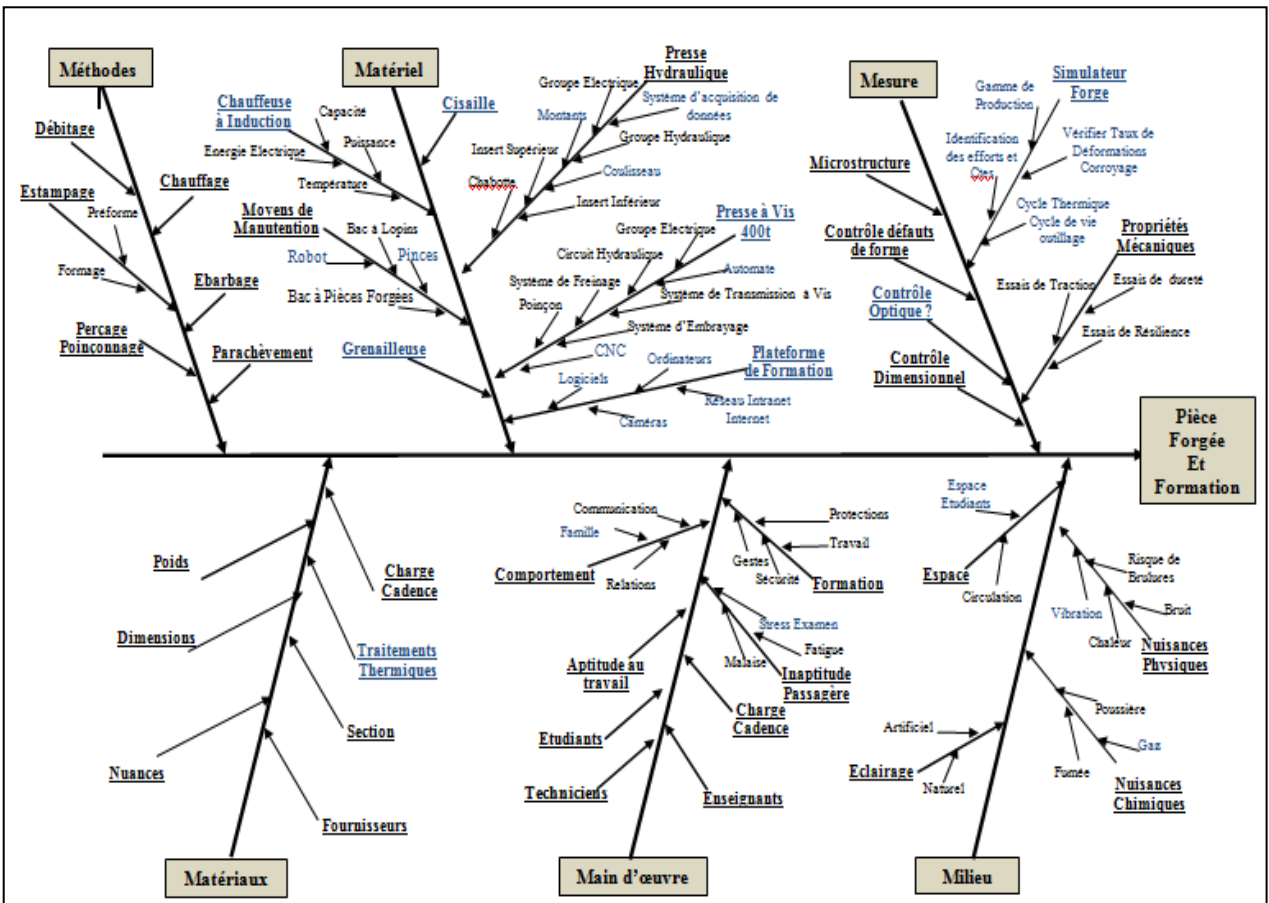


Figure 5.4 : Diagramme de causes et effets du système de mise en forme à chaud de l'ENSAM, Metz France

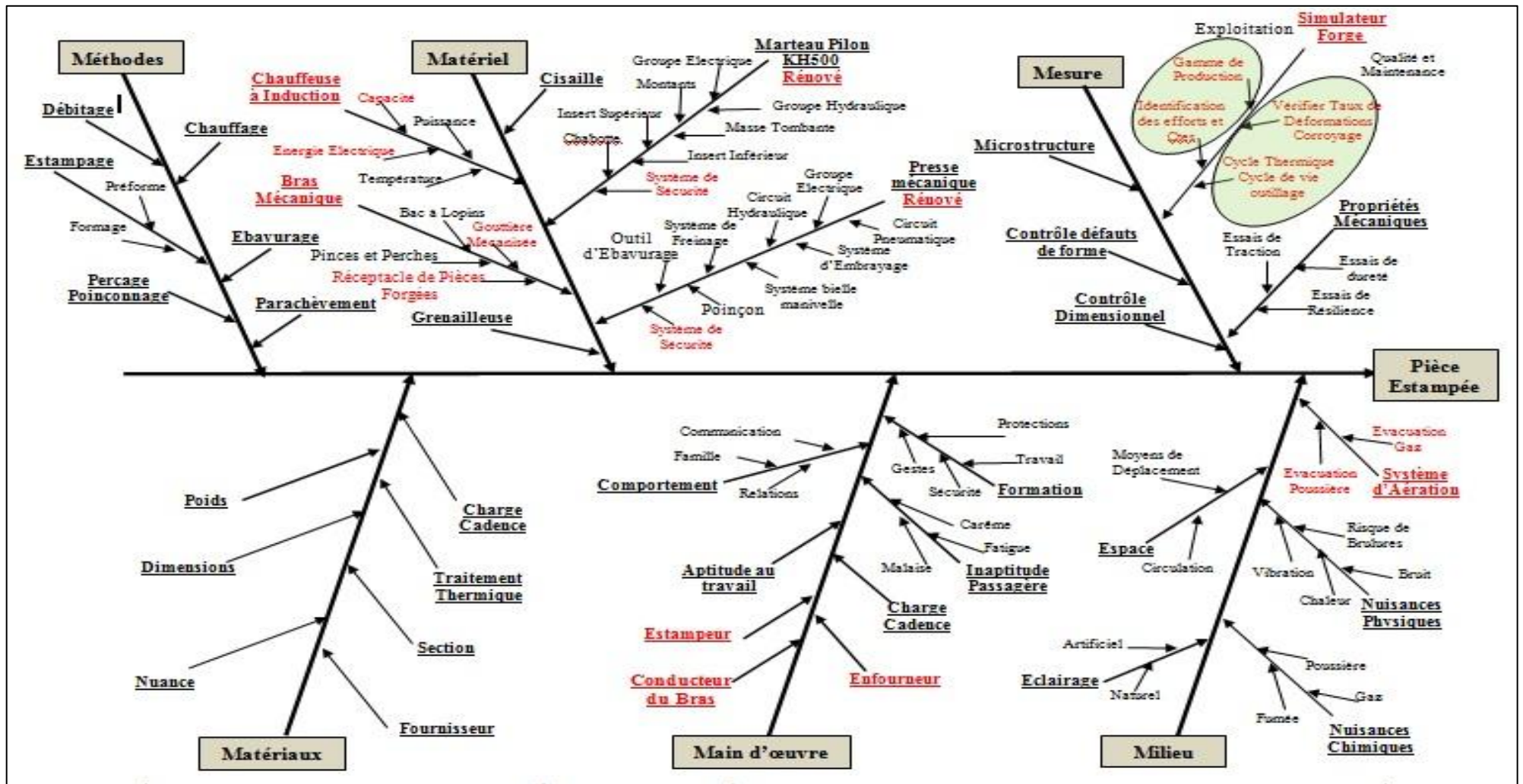


Figure 5.3 : Diagramme Ishikawa pour l'amélioration de la production et du plan de maintenance de L'EPE Ferroviail

## Conclusion Générale

### Conclusion générale :

Identifiée comme étant une importante entreprise de production de mise en forme en Algérie, l'E.P.E Ferroviaire est appelée à rénover ces équipements pour ce mettre à niveau dans le marché national et international. En partenariat avec Alstom (France) et Metro d'Alger pour devenir CITAL, une entreprise nouvellement créée, pour le montage et la maintenance des tramways, aujourd'hui elle cherche à gagner d'autres partenaires comme les constructeurs de voitures, Renault qui va s'installer en Algérie. Elle se doit d'améliorer son système de production tant en exploitation qu'en maintenance.

Les conclusions de cette étude sont orientées pour apporter des solutions :

- Avoir les connaissances nécessaires en mise en forme par estampage, permet de connaître les différentes étapes d'obtention d'une pièce par ce procédé, depuis le débitage jusqu'à la phase du parachèvement, avec les différentes techniques pouvant être utilisées pour chaque étape.
- Définir les différents paramètres à contrôler, assurer une bonne productivité.
- Consulter les experts en forgeage est important pour définir les différentes anomalies de la gamme de production. Dans cette étude l'expert a été d'une aide précieuse pour déterminer les problèmes liés à la gamme de production du moyeu.
- Utiliser les outils de simulation numériques est important pour élaborer un plan d'expertise et d'évaluer les gammes de productions qui posent problèmes de défaut sur pièce, et de déterminer les zones d'usure de l'outillage. La simulation permet de déterminer les paramètres d'entrée et de connaître quels sont les facteurs causant l'usure de l'outillage afin d'éviter d'endommager les équipements par une utilisation excessive.
- Adapter les moyens de production modernes aux moyens existants est essentiel pour l'amélioration de la performance du système de production
- Améliorer le plan de maintenance en se basant sur les outils de simulations et l'historique des pannes, permet l'amélioration de la fonction maintenance.
- Evaluer la production d'une manière régulière, met en évidence les actions préventives de la maintenance et le rôle de l'intégration de moyens technologiques avancés afin de rester compétitif dans un marché de plus en plus exigeant et concurrentiel.

Le manque d'information et l'absence d'un historique des pannes, ont été un véritable obstacle pour pouvoir faire une analyse FMD ou AMDEC, la mise en place d'une base de données maintenance est fortement recommandée afin de pouvoir par la suite faire des calculs des indicateurs de la maintenance (TTR, TBF, UT,...), et avoir une référence des actions faites par le passé. Une GMAO est donc indispensable.

Donc toute entreprise voulant améliorer son service production ou maintenance, se doit de moderniser ses équipements et se mettre à niveau de l'échelle internationale.

### 1. L'outil de simulation FORGE 2011® :

FORGE® est la solution logiciel pour la simulation des procédés de mise en forme à chaud et à froid. Il est le produit phare de TRANSVALOR depuis près de 30 ans et installé chez des clients dans le monde entier. FORGE® répond aux attentes des industriels produisant des pièces forgées pour des secteurs industriels variés : automobile, aéronautique, défense, pétrole, énergie, construction, médical. [43] (www.transvalor.com)

L'outil FORGE® recouvre tout les procédé de mise en forme tel que :

- Matriçage à chaud
- Forgeage libre (ou grosse forge)
- Laminage
- Laminage transverse
- Laminage retour
- Laminage circulaire
- Fluotournage
- Extrusion
- Filage
- Emboutissage
- Cisaillage
- Perçage
- Ébavurage
- Chauffage par induction
- Traitement thermique
- Cémentation

FORGE 2011® est équipé d'un pré processeur « GLPre » pour la mise en donnée des outils et des éléments de forgeage pour la simulation, leur maillage et la définition des différents paramètres de mise en forme tel que la presse utilisé, le nombre de coups la température de forgeage ...etc.

Le pré processeur permet de créé la mise en donnée des projets le plus intuitivement possible il permet donc de définir :

- Une ou plusieurs simulations représentant les différentes étapes d'un procédé de mise en forme.
- Des variantes d'une même étape
- Une arborescence pour la réalisation de l'expérience voulue

Le pré processeur utilise dans un projet des modèles souvent appelés « templates ». On peut utiliser des templates 2D pour la simulation des pièces axisymétriques (roues, jantes, annaux, disques,...), ou pour les pièces dont on peut limiter l'étude en déformation planes (raille, barre, bielle,...). Et pour ce qui est des pièces réellement tridimensionnels, des templates 3D sont a disposition (vilebrequins, levier de direction, bras de suspension...). L'utilisation de la symétrie est aussi possible pour facilité la simulation des pièces symétrique. (Moyeu, poutre,...).Le développement de ces modèles a été fait pour faciliter la mise en donnée de chaque procédé.

Le pré processeur a un lien direct avec les outils de CAO (SolidWorks®,Catia®...) d'où on peut importé des fichiers qu'on appelle « fichier de maillage » 2D et 3D.

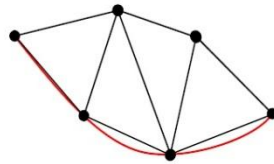
Après la mise en donnée sur le pré processeur et le lancement du calcul s'effctue par un solveur qui permettra de résoudre le calcul thermomécanique, les résultats à obtenir peut être ouvert a partir d'un post processeur GLview. [44](Guide forge partie1 généralité).

**2. Conditions de simulation :**

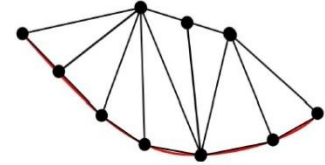
Il ya certaine règle a respecter pour avoir un bon calcul et un bon résultat de la simulation faite, autrement la résolution du problème ne pourra pas ce faire.

**2.1 Le maillage**

La discrétisation géométrique ou « maillage » est la représentation d'un model CAO a l'aide d'éléments géométrique de manière aussi fidele que possible. Le maillage est nécessaire pour la résolution d'un problème numérique de façon continue. Plus le maillage est définit avec finesse plus le résultat à obtenir sera précis figure A.1.1, cela dépend de la complexité du modèle utilisée et de la variation géométrique de la pièce.



Discrétisation avec des éléments triangulaires linéaires



Discrétisation **plus fine** avec des éléments triangulaires

Figure A.1.1 : difference de la taille de maillage

Deux type de maillage sont utilisable, le maillage volumique pour permettre la résolution des éléments dit « déformable » pour l'étude des déformations d'un objet sur le quel des forces sont appliqué (ex : lopin ou outils déformable). Le maillage surfacique est souvent utilisé pour les outils rigides (non déformable).

Dans la gamme de production étudié on considérera que l'outillage est rigide et que seul le lopin est déformable. [45](Guide forge partie 2 maillage)

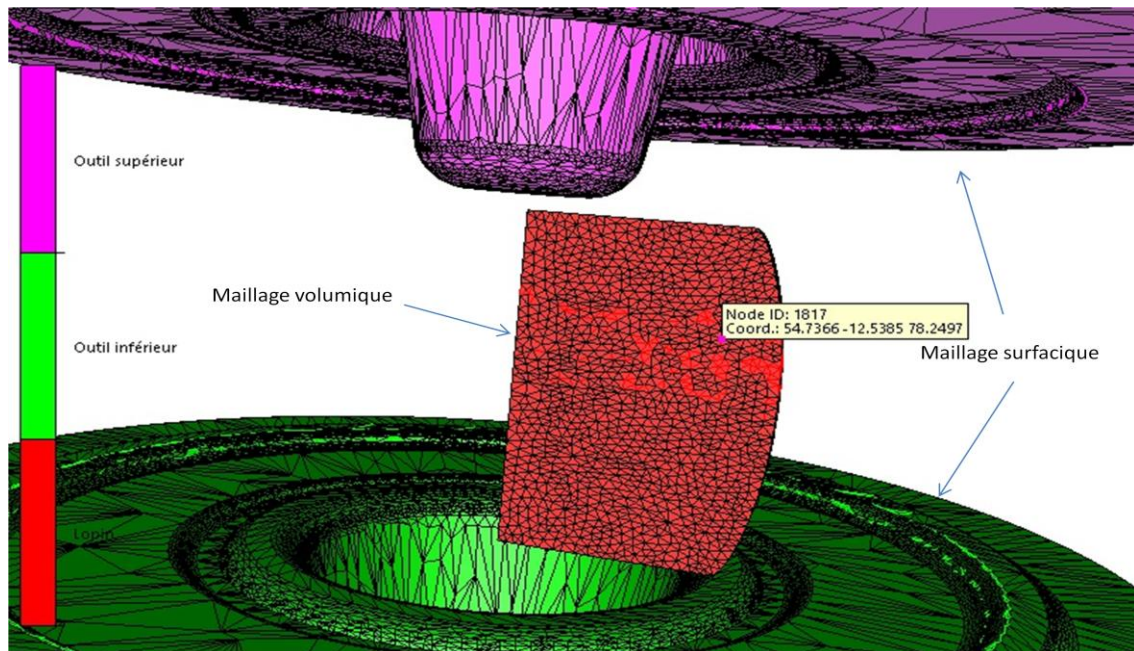


Figure A.1.2 : exemple de maillage surfacique et volumique

**2.2. Définition de la presse :**

L'outil FORGE2011® propose tout les types de presses, le paramètres de la presse a utiliser reste a faire entrer. Tout dépend de la presse. L'étude établie est sur un marteau pilon 500T. Un tableau simplifie la définition de la presse en entrant toutes les données de la presse. Figure []

## Annexe 1 : l'outil forge

The image shows a software dialog box titled "Fichier de presse". At the top, there is a file path "D:\simulation\mise\_en\_forme\_" and an "Effacer" button. Below this is a tab labeled "Données générales". The dialog contains several input fields and checkboxes:

Paramètre	Valeur
Hauteur initiale (mm) *	130
Hauteur finale (mm) *	3
Direction *	-Z
Energie max (kJ) *	6.25
Utiliser l'énergie potentielle	<input checked="" type="checkbox"/>
Masse tombante totale (kg) *	525
Nombre de coups max *	20
Arrêt sur course finale	<input checked="" type="checkbox"/>
Réglage énergie par coup (%)	Prévisualisation du tableau
Temps d'attente initial par coup (s)	Prévisualisation du tableau

Figure A.1.3 : tableau de donnée pour la définition de la presse

Pour les simulations ou on utilise des plans de symétrie, il est nécessaire de diviser les caractéristiques de la presse par le nombre de symétrie. Par exemple si on simule une pièce en un huitième il faut donc diviser les caractéristiques de la presse par huit.



**Dessin des outils sous Solidworks :**

L'outil Solidworks est un logiciel de conception assisté par ordinateur (CAO), la conception des outils et des lopins utilisés dans ce travail ont été réalisés sous solidworks.

Moyeu :

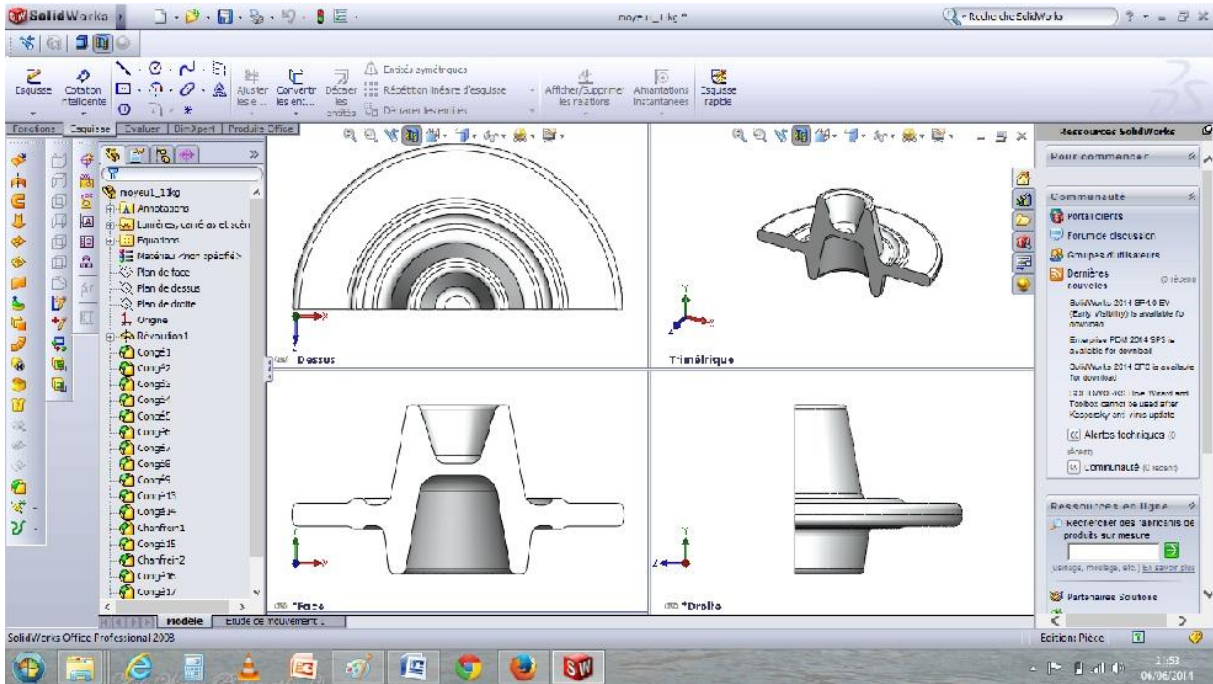


Figure A.2.1 : conception du moyeu sous Solidworks®

Outil supérieur :

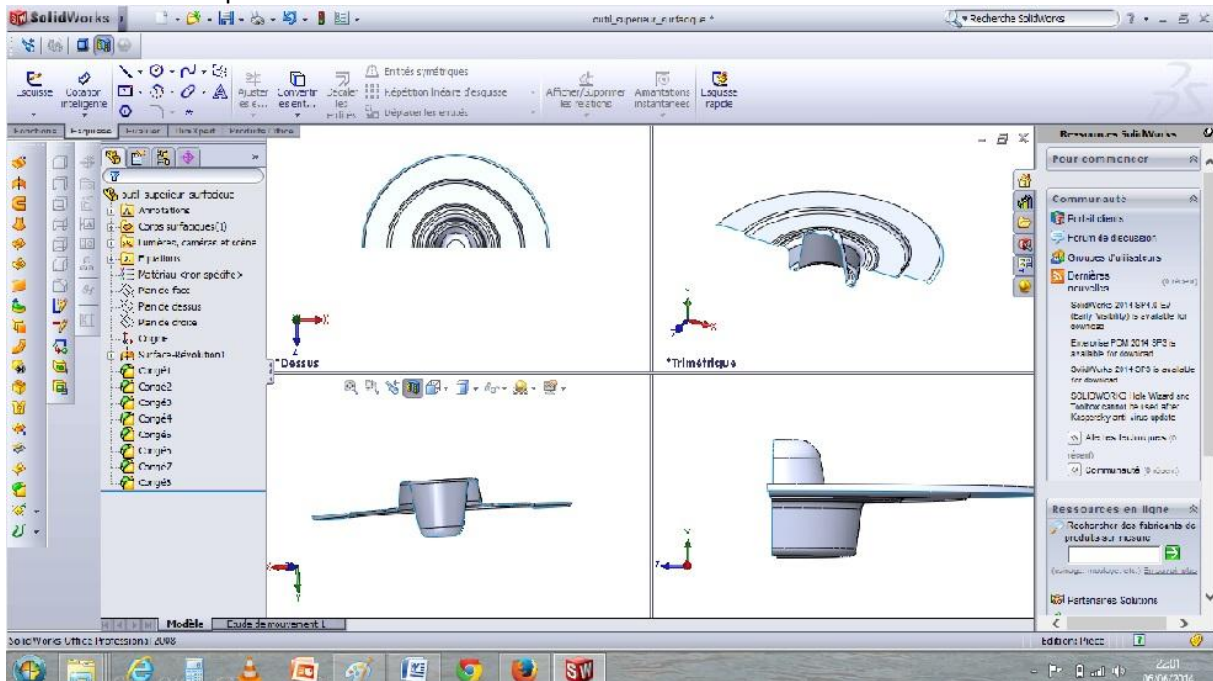


Figure A.2.2 : conception de l'outil supérieur sous Solidworks®

## Annexe2 : Dessin des outils sous Solidworks

Outil inferieur :

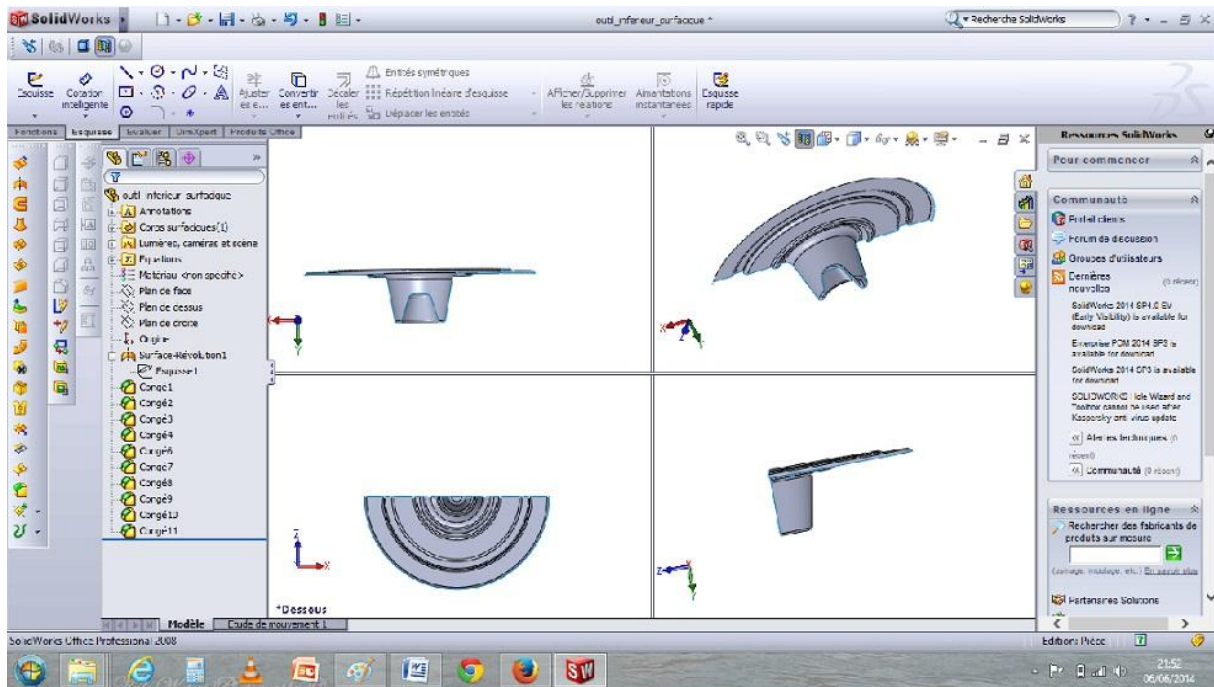
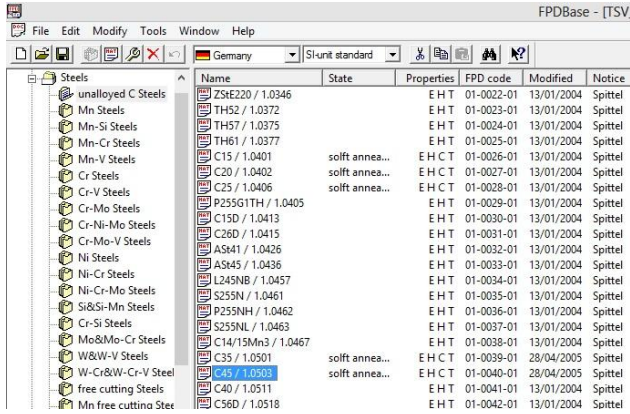
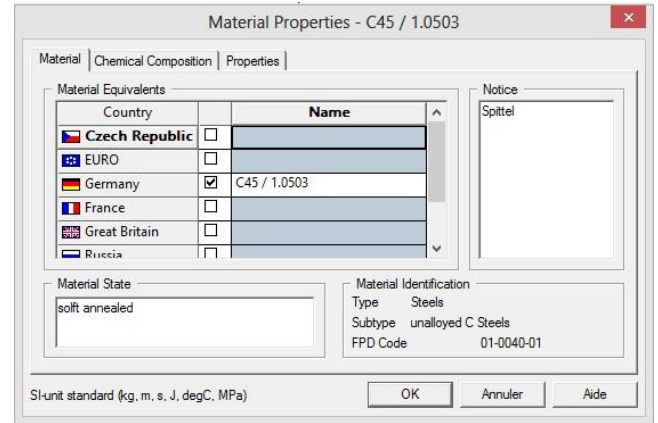


Figure A.2.3 conception de l'outil inferieur sous Solidworks®

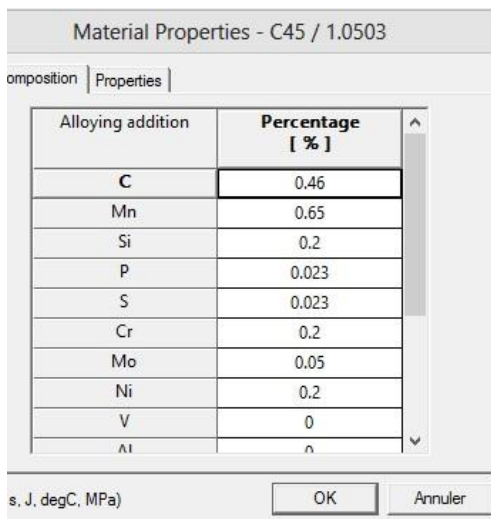
## Annexe 3 : Base de données des matériaux



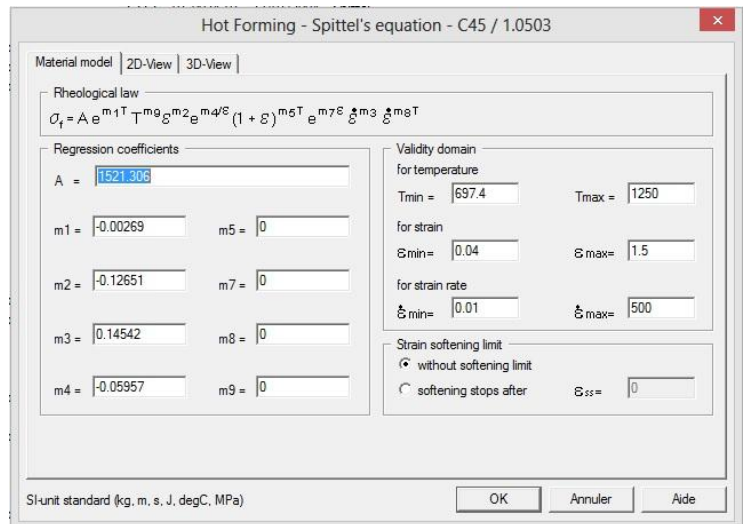
A



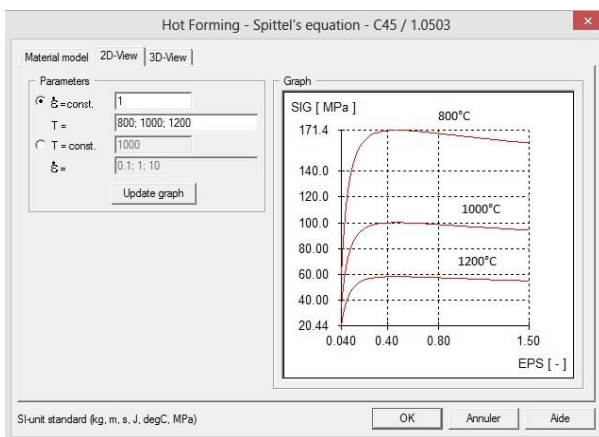
B



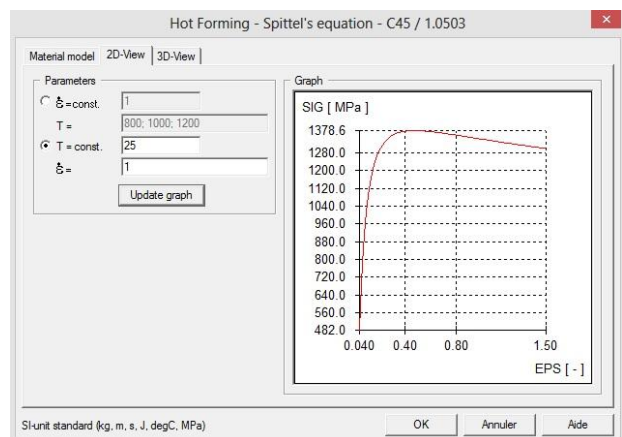
C



D



E



F

- Annexe 3 : A) Base de donnée des matériaux  
 B) Sélection du matériau (C 45)  
 C) Composition chimique du C45  
 D) Loi de Spittel  
 E) Contrainte d'écoulement a 800, 1000, et 1200 °C  
 F) Contrainte d'écoulement a 25°C

## Références Bibliographiques Chapitre 1

- [1] Marcel GAUCHERON Mise en forme de l'acier par estampage Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M3 200, 2007
- [2] Peddinghaus Anlagen & Maschinen GmbH:  
www.peddy.de/francais/wzm/peddibasic\_no1.htm
- [3] Machining Data Handbook. 3eéd., Institute of Advanced Manufacturing Sciences Inc., Cincinnati, Ohio (USA) (1980).
- [4] Guy BOSTBARGE, Henri FAURE et Yann GOBARD , Choix de l'acier et procédés, Forgeage à froid de l'acier, Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, M3 085 2007
- [5] Forging Handbook, FIA Forging Industry Association, 2014
- [6] Centre for Material Forming (Centre de Mise en Forme) – CEMEF ,Mines Paris Tech
- [7] Encyclopédie des Sciences Industrielles : Fours à Flammes M1 : p. 656 1983
- [8] Encyclopédie des Sciences Industrielles : Fours électriques M1 : p. 657 1983
- [9] EDF Electricité et Gaz de France
- [10] Claude OBERLIN, Fours électriques à résistances, Applications industrielles. Techniques de l'Ingénieur, , D5 912, 2007
- [11] Progrès et essor des fours à résistances. Note EDF HE 15/W2656, 18 août 1988
- [12] Isidore JACUBOWIEZ, Fours industriels, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique, BE 8 842, 1998
- [13] Gérard DEVELEY, Chauffage par induction électromagnétique : technologie, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D5 936, 2000
- [14] ORFEUIL (M.). – Électrothermie Industrielle. Dunod - 1981 - (p. 431-562) ISBN 2-04-012179-X
- [15] DAVIES (E.-J.). – Conduction and Induction heating. Peter Peregrinus Ltd - 1990
- [16] GOSSE (J.). – Guide technique de thermique. Dunod – 1980
- [17] Les applications industrielles récentes et innovantes dans le domaine des fours électriques. Journée d'étude de la Société Française des Thermiciens, 6 octobre 1999.
- [18] SNEF : Syndicat national de l'estampage et de la forge
- [19] CETIM : Centre Techniques des Industries Mécaniques, France
- [20] Bigot. R, Course, Manufacturing Engineering, Chapter IV: Die Design and Equipment, Arts et Métiers ParisTech CER Metz, May 2013
- [21] Encyclopédie des sciences industrielles, Mécanique généralités applications, Formage mécanique ; estampage ; p 547, 1974
- [22] Baudouin, C., , Contribution à la qualification d'un processus de fabrication par une approche dimensionnelle. Application au pignon conique forgé dit "net shape". Thesis, ENSAM, Metz 2006.
- [23] Berviller, L, Bigot. R, and Martin, P. "Contribution à la mise en place de la traçabilité technologique. Illustration dans le cadre du processus de conception et fabrication de pignons forgés de différentiels," 8ème Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée, AIP-PRIMECA, 31 mars-2 avril, La Plagne pp 2003,.
- [24] Berviller, L. Conception et fabrication intégrées de pièces Net Shape. Application aux différentiels forgés, Thesis, ENSAM, Metz, 2005,
- [25] Brahy. A, Voltaire. B, Bastien. A, and Bigot, R.,: étude du forgeage sans bavure d'une bielle ; "Conception intégrée et étude du forgeage sans bavure d'une bielle, Rapport n°1," SERAM, Metz, Contrat de Recherche, CETIM, n° 80201, 117 p., 2008.
- [26] Handbook : Metals Forming vol 14

- [27] Serajzadeh. S, Mirbagheri S.M.H, Karimi Taheri A, Zebarjad S.M, Modelling of metal flow during hot forging with regard to microstructural aspects. International Journal of Machine Tools & Manufacture . Elsevier 44 (2004) 1537–1545
- [28] Barcellonal., A L. Cannizzaro. A.L, Antonelli.,D. Application of a Decision Making Method to Improve an Industrial Hot Extrusion Forging Process, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 195 (2006) 6676–6690
- [29] Tomov. B, Radev. R, Gagov. V, Influence of flash design upon process parameters of hot die forging Journal of Materials Processing Technology 157–158 (2004)
- [30] Fleming.M.C, Behaviour of metal alloys in the semisolid state, Metallurgical and Materials Transactions A, 22, 5, 1991 957-981
- [31] Rassili. A, Robelet. M, and Fischer. D, Thixoforming of Carbon Steels : Inductive heating and process control, Solid State Phenomena, Vols 116-117 (2006) pp 717-720
- [32] Lecomte-Beckers. J, Rassili. A, Robelet. M, C. Poncin. C and Koeune. R, Determination of solidification parameters used for the prediction of the thixoformability of several steel alloys, Solid State Phenomena, Vols. 116-117 (2006) pp 54-57
- [33] Robelet. M, A. Rassili. A and D. Fischer. D, Steel grades adapted to the thixoforging process : metallurgical; structures and mechanical properties, Solid State Phenomena, Vols 116-117 (2006) pp 712-716
- [34] Becker.E , *Investigations expérimentales et numériques pour l'identification des clefs du thixoforgeage de l'acier sur le produit mis en forme, Thesis, ENSAM, Metz, 2008*
- [35] Becker., Bigot. L, and Langlois. L. Thermal exchange effects on steel thixoforming Processes, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009 pp1-12
- [37] Reflexions, le site de vulgarisation de l'Université de Liège, Le thixoforgage, procédé de fabrication ami du développement durable, <http://reflexions.ulg.ac.be/> - 14 January 2014
- [38] THIXOFRANC, Vers l'industrialisation du procédé de thixoforgeage des aciers  
<http://souspression.canalblog.com/archives/2012/11/29/25565529.html>
- [39] [www.transvalor.com](http://www.transvalor.com)
- [40] Encyclopédie des Sciences Industrielles : Parachèvement M1 : p. 658 1983

## Références Bibliographiques du Chapitre II

- [1] Leila. L, Tadej. M, Goran. K & Milan. T. ‘Analysis of the main types of damage on a pair of industrial dies for hot forging car steering mechanisms’. Elsevier. Engineering Failure Analysis 18 2011 pp 1143-1152
- [2] Vactor V. & Taylan. A. ‘Die design for flashless forging of complex parts’ Elsevier Journals of Materials Processing Technology 98 2000 pp 81-89
- [3] Douglas. R & Kuhlmann. D. ‘Guidelines for precision hot forging with applications’ Elsevier Journals of Materials Processing Technology 98 2000 pp 182-188
- [4] CETIM, centre des industries mécaniques. Institut de soudur ‘rechargement par soudage des outillages de forge à chaud’ Guide : Mécanique et procédés. ‘, Forge. N° CETIM 3F16 2001
- [5] CETIM, centre technique des industries mécaniques. ‘performances, classification des défauts de forge. Code AP n° X02282 Octobre 2009.
- [6] CHRISMENT. C, Pujolle. G & Zurflusch. Bases de données orientées objets’. Techniques de l’Ingénieur. h3840. 2007.
- [7] Wallace. W. ‘Office 2010 pour les nuls’ Editions First, 2010.
- [8] <http://office.microsoft.com/fr-fr/access-help/creer-une-base-de-donnees-access>.
- [9] Gaucheron. M. ‘Mise en forme de l’acier par estampage’ Techniques de l’ingénieur. M3500, 1998.

**Références bibliographiques chapitre III**

- [1] Summerville. E, Venkatesan. K and Subraùanian. C. ‘Wear processes in hot forging press tools’ *Materials & Design*, 16 number 5, 1995 pp 289-294
- [2] Hans. K and ULF. S. ‘The influence of flash design on material flow and tool pressure in closed-die forging: A practical example. Elsevier. *Journal of Mechanical Working Technology* 9 1984 pp 37-52
- [3] Serajzadek. S, Mirbagheri. S.M.H, Karimi Taheri. A and Zebarjad. S.M. ‘Modelling of meatl flow during hot forging with regard to microstructural aspects.Elsevier. *International journal of Machine Tools & Manufacture* 44 2004 pp 1537-1545.
- [4] Bayramoglu. M, Polat. H & Geren. N. ‘ Gost and performance evaluation of different surface treated dies for hot forging process. *Journal of Materials Processing technology* 205 2008 394-403.
- [5] Lejla. L, Tadej. M, Goran. K and Milan. T. ‘Aanalysis of the main types of damage on apair of industrial dies for hot forging car steering mechanisms. Elsevier. *Engineering Failure Analysis*. 18 2011 pp 1143-1152.
- [6] Fédération Forge Fonderie & Association Française de Forge:  
[www.forgefonderie.org/l-association-francaise-de-forge](http://www.forgefonderie.org/l-association-francaise-de-forge)
- [7] Virtanen. E, Van Tyne. C.J, Levy. B.S and Brada. G. ‘The tempering parameter for evaluating softening of hot and warm forging die steels. Elsevier, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 213, Issue 8, August 2013, pp 1364-1369
- [8] Behrens. B. A, Bouguecha. A, Lüken. I, Mielke. J and Bistron. M. ‘Tribology in Hot Forging’ Elsevier. *Comprehensive Materials Processing*, Volume 5, 2014, pp 211-234.
- [9] Zhan. M, Sun. Z, and Yang. H. ‘Modelling of Hot Forging’ Elsevier. *Comprehensive Materials Processing*, Volume 5, 2014, pp 441-493
- [10] [www.transvalor.com](http://www.transvalor.com)
- [11] [www.ferrovial.com](http://www.ferrovial.com)
- [12] Rapport de stage de fin d’études pour la préparation du mémoire de Master en Maintenance Industrielle et Fiabilité Mécanique. Département de Génie Mécanique. Université Badji Mokhtar Annaba. Promotion Juin 2014
- [13] [www.ensam.fr/Centres-et-instituts/Centre-Metz](http://www.ensam.fr/Centres-et-instituts/Centre-Metz)
- [14] Avec l’aimable autorisation du département de Forge de l’E.P.E Ferroviaal Annaba Algérie
- [15] Photographies prises au mois de février 2014 avec l’aimable autorisation du département de Forge de l’E.P.E Ferroviaal Annaba Algérie.
- [16] Communication privée avec Pr Régis BIGOT, expert en mise en forme à l’ENSAM de Metz.
- [17] Photographies prises au mois de Mars 2014 avec l’aimable autorisation du laboratoire Conception-Fabrication-Conception de l’ENSAM de Metz France.