

REPUBLIQUE ALGERIENNE DE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes Pour
l'obtention du Diplôme de Master en
Génie Mécanique

Option : construction mécanique

Thème :

**Etude et simulation numérique d'une
pièce forgée**

Proposé et dirigé par :

Dr.KIRAD Abdelkader

Dr.MERZOUG Djamel

Jury :
.....

présenté par :

NESSAH Ouali

ADJROUD Redouane

MOKHTARI Riadh

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du département de mécanique de l'université Saad Dahlab de Blida.

Selon la tradition, et à travers cette page de remerciements nous tenons à saluer toutes les personnes qui, de près ou de loin ont contribué à la concrétisation de ce travail.

Nous remercions monsieur département BRAHIMI chef et monsieur KIRAD ABDELKADER et DJAMEL MERZOUG pour avoir accepté de diriger cette thèse et dont l'aide précieuse nous été indispensable sur le plan scientifique et humain.

Nous voudrions remercier les membres du jury pour leur précieux temps accordé à la lecture et à la critique de ce travail.

Nos très cordiaux remerciements vont aussi à tous les enseignants pour tous les efforts conjugués tout au long de notre formation.

ملخص:

اعتمد عملنا على دراسة القطع الميكانيكية بعد صهرها و طرقها (القولبة). في هذه الدراسة نحاول ان نجد التطورات الحاصلة لخصائص القطعة الميكانيكية "رأس المحراث المثلثة" و تجسيد الحسابات التي اخترناها للمحاكات عن طريق SolidWorks برنامج.

الكلمات المفتاحية الطرق . الصهر . القولبة . قيود التشوه

Résume :

Notre travail consiste à étudier le comportement de la pièce mécanique aux cours de leurs déformations par procédés de forgeage (matriçage). Dans cette étude on essaye de voir l'amélioration des propriétés mécaniques de notre pièce « soc triangulaire ». et pour faire l'étude on a opté pour la simulation numérique de la pièce par SolidWorks.

Mots clés : forge, forgeage à chaud, forgeage à froid, presses de forgeage, matrice, contrainte de déformation.

Abstract :

Our work consists in studying the behavior of the mechanical part during their deformations by forging processes (forging). In this study we try to see the improvement of the mechanical properties of our part "triangular coulter". And to do the study we opted for the numerical simulation of the part by SolidWorks.

Keywords: forging, hot forging, cold forging, forging presses, die, strain stress.

SOMMAIRE

Introduction

Chapitre I : le forgeage

I.1 Définition	1
I.2 Forgeage manuel	2
1. Etirage	2
2. Cambrage	3
3. Poinçonnage	3
4. Bigornage	3
I.3 Forgeage mécanique (libre)	4
I.4 Déformation plastique.....	7
I.5 Les procédures de forgeages industriels	8
I.5.1 L'estompage (Forgeage de pièces métalliques)	9
I.5.2 Le matriçage.....	11
I.5.3 L'emboutissage	13
I.5.4 Le refoulement en machines horizontales	16
I.6 Machine et presses de forgeage	20
I.6.1 Les pilons	21
I.6.2 Les presses mécaniques	22
I.6.2 Les presses à vis	24
I.6.4 La presse hydraulique	26
I.6.2 Presse pneumatique.....	28
I.7 Fonctionnement du découpage plasma.....	30
Conclusion	31

Chapitre II : simulation numérique de la fabrication de la pièce soc triangulaire

Introduction	32
II.1 L'histoire du labourage	32
II.2 Théoriquement	33
II.3 Mécanisation	34
II.4 Type de soc	34
II.5 Fixation.....	35
II.6 CAO	36
II.6.1 SolidWorks	37
II.6.2 pourquoi le SolidWorks	37
II.7 Traitement thermique.....	38
II.8 Le recuit.....	38
II.9 La différence entre la trempe le recuit et le revenu.....	38
II.10 La trempe.....	38
II.11 La différence entre la trempe à l'eau et à l'huile.....	39
Conclusion	40

Chapitre III : simulation numérique de soc triangulaire

Introduction	41
III.1 Les aciers utilisés	41
III.1.1 L'acier au chrome-molybdène « 4130 ».....	41
III.1.2 L'acier doux C10 1.0301 (acier ordinaire).....	42
III.1.3 Justification de choix d'acier.....	45
III.2 La méthodologie de travail.....	45
III.3 Simulation.....	46
III.4 Dessin technique de Soc triangulaire.....	47
III.5 Appliqués quelques forces pour tester résistance.....	48
III.5.1 Acier (4130).....	48
III.5.2 Acier (C10 1.301).....	51
III.6 Les étapes d'insérer la pièce sur le ANSYS	54
III.6.1 structure transitoire	54
III.6.2 Donner un matériau.....	55
III.6.3 Importer la géométrie depuis le SolidWorks	56
III.6.4 Modèle.....	56
III.6.5 Pièce réalisée	57
III.6.6 Maillage de soc	57
III.6.7 Solution	58
III.6.8 Spécification de la pièce.....	61
III.7 Interprétation.....	61
Conclusion	63

Liste des figures

Chapitre I

Fig I.1 : outils de forgeage	1
Fig I.2 : la méthode d'étirage	2
Fig I.3 : poinçonnage.....	3
Fig I.4 : forgeage mécanique	4
Fig I.5 : Les principales opérations de forgeage libre	6
Fig I.6 : les types de forgeage	8
Fig I.7 : Schéma de principes de l'estampage	10
Fig I.8 : pièces forgée par estampage	11
Fig I.9 : schéma de matriçage/estampage.....	12
Fig I.10 : l'opération d'emboutissage.....	14
Fig I.11: serrage du flan.....	14
Fig I.12 : emboutissage proprement dit.....	14
Fig I.13: L'enlèvement du poinçon puis du serre-flan.....	15
Fig I.14 : marteau pilon.....	21
Fig I.15 : presse mécanique GPH.....	23
Fig I.16 : presse à vis.....	25
Fig I.17 : Représentation schématique de la presse à vis.....	25
Fig I.18: Représentation schématique de la presse hydraulique uni-axiale.....	26
Fig I.19 : presse pneumatique GPA	29

Chapitre II :

Fig II.1 : labourage.....	32
Fig II.2 : charrue simple portée.....	33
Fig II.3 : soc triangulaire.....	35
Fig II.4 : Fixation de soc	35

Chapitre III :

Fig III.1 : la pièce réalisée.....	46
Fig III.2 : dessin technique.....	47
Fig III.3 : matriçage de la pièce.....	48
Fig III.4: force appliquée 3000 (N/mm ²).....	49
Fig III.5: le déplacement sur la force 3 KN/mm ²	49
Fig III.6: force appliquée 5000 N/mm ²	50
Fig III.7: déplacement sur la force 5 KN/mm ²	50
Fig III.8: force appliquée 10000 N/mm ²	51
Fig III.9: déplacement sur la force 10 KN/mm ²	51
Fig III.10: force appliquée 3000 (N/mm ²).....	52
Fig III.11: déplacement sur la force 3 KN/mm ²	52
Fig III.12: force appliquée 5000 (N/mm ²).....	53
Fig III.13: déplacement sur la force 5 KN/mm ²	53
Fig III.14: force appliquée 10000 (N/mm ²).....	54
Fig III.15: déplacement sur la force 10 KN/mm ²	54

Liste des tableaux :

Chapitre I :

Tableau I.1 : déformation des matériaux.....	7
Tableau I.2 : Les différents types de déformation existent.....	16
Tableau I.3: les machines mécanique.....	29
Tableau I.4: caractéristique de découpage thermique.....	30

Chapitre II :

Tableau II.1: Les différentes sections de SolidWorks.....	37
Tableau II.2: Acier 4130 formulaire d’approvisionnement et taille et tolérance.....	42
Tableau II.3: les compositions chimiques de « 4130 ».....	42
Tableau II.4: Acier 4130 propriété physique.....	43
Tableau II.5: CARACTERISTIQUES MECANQUES.....	44
Tableau II.6: Propriétés physique à température ambiante.....	44
Tableau II.7: composition chimique.....	44
Tableau II.8: comparaison de caractéristique.....	45

Chapitre III :

Tableau III.1 : spécification de la pièce.....	61
--	----

Introduction générale

Introduction générale :

En mécanique il existe plusieurs procédés et méthodes de concevoir et fabriquer une pièce et c'est une pratique très ancienne que l'être humain a pratiquée pour avoir une vie plus simple et confortable.

Parmi ces méthodes qui existent notre étude se porte sur le forgeage plus précisément le matriçage qui représente une grande partie du forgeage et l'un des plus importants et qui touche les secteurs industriels suivant l'aéronautique, l'automobile, l'armement suivis par la robinetterie et le médical.

Avec ce procédé de matriçage on fait une étude et simulation numérique sur un soc triangulaire qui est utilisé dans le domaine de l'agriculture.

Ce soc est tiré par les charrues qui labour la terre cette méthode est très ancienne qui a évolué avec le temps grâce au développement du domaine industriel.

Pour la conception l'utilisation de la CAO est primordiale car elle permet de modéliser la pièce avec précision et faire des simulations.

Et pour ça on a utilisé le SolidWorks qui a un panel très vaste.

Le choix du matériau est très important pour la conception de la pièce car ça permet de définir les caractéristiques de la pièce (dureté, élasticité...).

Après avoir choisi le matériau on procède à la simulation numérique par SolidWorks qui permet de réaliser la pièce numériquement, ainsi que la matrice (moule) de la pièce.

Il nous permet d'étudier la résistance du matériau après avoir exercé une force répartie uniformément sur la surface de la pièce « soc triangulaire »

En fin, on opère par une méthodologie de travail qui consiste à réaliser la pièce qu'on a vue dans cette étude.

Chapitre I

Chapitre I : Le forgeage

I.1 Introduction :

Le forgeage est un procédé de mise en forme de différents aciers et métaux par technique de martelage afin d'obtenir des pièces mécaniques tout en appliquant une force importante sur une barre de métal à froid ou à chaud afin de contraindre à prendre la forme voulue.

La forge ne permet pas d'obtenir la même marge de tolérance que l'usinage. En revanche, les pièces obtenues sont plus résistantes aux contraintes mécaniques (solide, ductile) que le métal coulé. En effet, le métal déforme un matériau en phase solide, donc il présente une grande résistance à la fatigue et au choc.

Il existe deux types de forgeage :

- Forgeage manuel
- Forgeage mécanique (libre)

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

On distingue :

- L'estompage
- Le matriçage
- L'emboutissage
- Le refoulement en machines horizontales.

Chapitre I

I.2 Forgeage manuel :

- **Définition :**

Le forgeage a la main utilise l'énergie musculaire de L'homme après chauffage du métal au rouge dans le feu d'une forge, puis mis en forme à coups de marteau ou marteau pilon appelé travail de forgeront, c'était l'une des premières méthodes de travail , les outillages depuis des siècles (enclume , marteau de forme, tranche poinçon, bigorne, mandrin...)

La forge se composent d'un four aux matériaux solides et réfractaire alimenter par des arriver d'air et (le charbon de bois ou le coke) sont utiliser comme combustible dans la forge.



Fig I.1 : outils de forgeage

1. Etirage :

L'allongement du métal chauffé est réalisé progressivement par martelage entre l'enclume et le marteau. Les changements importants de section sont amorcés au dégorgeoir, un planage est réalisé ensuite. La zone étirée est redressée et régularisée par martelage à l'aide d'une chasse à parer sur l'enclume.

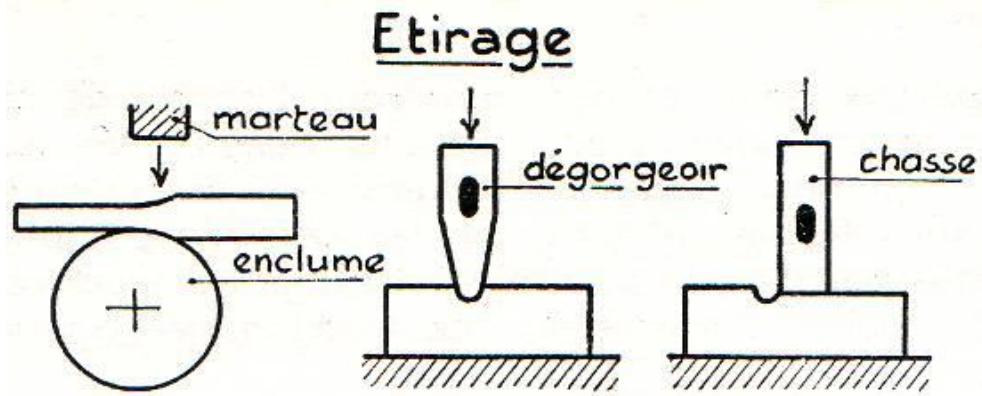


Fig I.2 : la méthode d'étirage

2. Cambrage :

La zone cambrée comportant des angles vifs est préparée par martelage et étirage pour éviter une diminution de la section de la pièce dans les zones pliées.

1 - Amorçage au dégorgeoir

2 – Étirage

3 – Cambrage

3. Poinçonnage :

Le poinçonnage est réalisé progressivement par passage d'une série de poinçons de dimensions de plus en plus grosses. Les trous peuvent être carrés ou ronds.

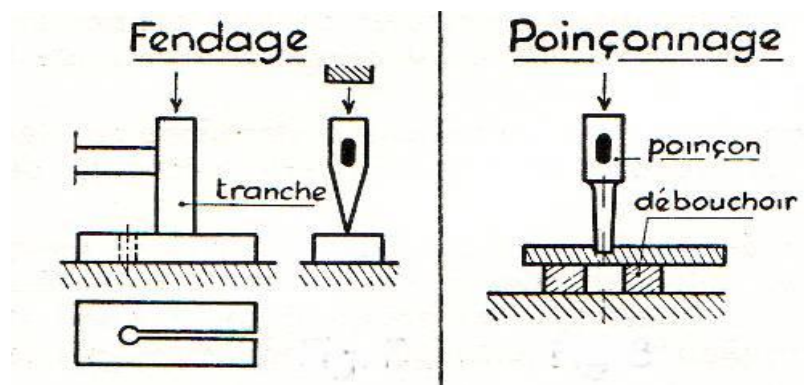


Fig I.3 : poinçonnage

4. Bigornage :

Après poinçonnage, l'alésage est mis en forme progressivement par étirage du métal sur la bigorne de l'enclume. La pièce subit un mouvement de rotation.

Chapitre I

I.3 Forgeage mécanique (libre) :

- **Définition :**

La forge libre est la plus ancienne des techniques de forgeage. Elle permet d'obtenir à chaud des ébauches ou des pièces mécaniques brutes dont la forme est atteinte au terme d'un nombre plus ou moins grand de transformations successives. Ne nécessitant pas d'outillages spécifiques, cette technique est appliquée lorsqu'il s'agit de produire, dans des délais parfois courts, des pièces à l'unité ou en très petites séries. Ces ébauches peuvent avoir des dimensions importantes et atteindre une masse de plusieurs tonnes. Elle a survécu en évoluant et occupe une place très importante dans la phase préparatoire au-matriçage.

Industriellement les marteaux sont devenus les pilons qui mettent en jeu des efforts très importants à des cadences très élevées de (50 à 100 coups /mn). L'effort nécessaire au forgeage est très élevé environ 980KN (équivalent à 100 tonnes) pour déformer un acier demi dur est chauffé à 1000°C.

Les divers marteaux et presses mécaniques sont utilisés aux places des marteaux manuels

Ces machines permettent à l'opérateur de donner des coups puissants et rapidement répéter ce qui permet d'augmenter la production des pièces forgées de grande précision qui donne un aspect de chaîne de production ce qui donne une meilleure qualité de la structure métallique dû aux lourds coups de masse

par exemple pour les pièces de monnaie forgeage par percussions de matrice le matriçage implique de placer le métal chaud et mou entre les deux matrices, une matrice supérieure et marteler sur la matrice inférieure après avoir posé le métal chaud au milieu des deux matrices afin de donner la taille près déterminée d'autres exemples (laminoir à forger...).[1]



Fig I.4 : Forgeage mécanique

Chapitre I

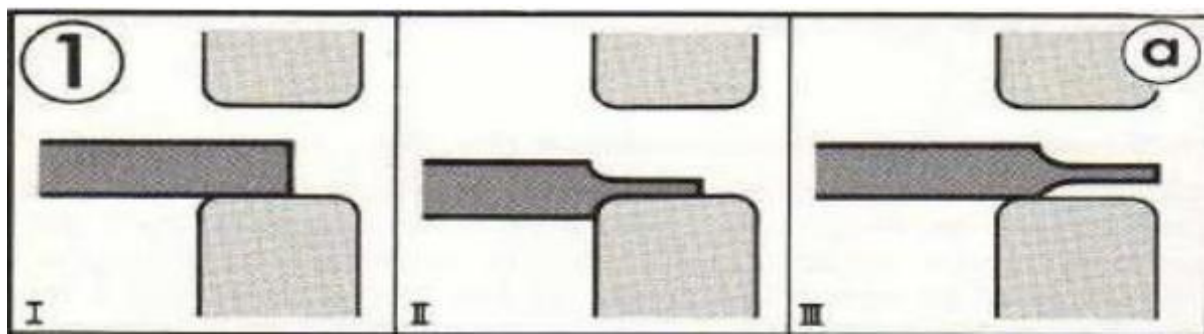


Fig I.4 : Forgeage mécanique

a- Mode opératoire pour réaliser la pièce

1- La pièce à forgée

✓ **Application :**

- S'applique à tous les métaux : acier, aluminium, cuivre, titane...
- Valable pour l'ébauche des pièces unitaires ou de petites séries (< à 50 pièces)
- Valables pour des formes simples
- Fait appel à une main d'œuvre extrêmement qualifiée
- Cadence faible
- ...

A. Avantage du procédé :

- Economie de matières.
- Grande étendue de matériaux formable.
- Pièce ayant des caractéristiques mécaniques très élevés.
- L'érouillage augmente la limite d'élasticité, la dureté, la résilience et pour certain matériau l'allongement pourcent.
- Obtention d'une direction privilégiée des fibres.
- Amélioration d'un grain fin ; les risques internes disparaissent par soudage.

Chapitre I

B. Inconvénients du procédé :

- Travail unitaire
- Prix de revient élevé (il faut au moins 2 personnes qualifiée par poste, la machine est très chères et grandes consommatrices d'énergie -Procédé difficilement automatisable
- Surépaisseur d'usinage élevée : 4 à 5 mm -Pièce de trop petite taille ou forme trop complexes => non réalisable Domaines d'application : Ce procédé est utilisés dans une multitude de domaines
- Fabrication de moteur diesel marin -Rotors de turbines
- Industrie nucléaire
- Presses industrielles
- Pièces automobiles...
- Visserie etc...

C. Les principales opérations de forgeage libre :



Fig I.5 : Les principales opérations de forgeage libre

I.4 Déformation plastique :

- **Définition :**

Le forgeage est un procédé de formage par déformation plastique, La pièce est soumise à des coups portés par un marteau ou autre outil afin d'obtenir la forme souhaitée, le forgeage rigidifie le matériau.

la déformation plastique génère un fibrage qui améliore la performance mécanique ce qui permet de réduire (les dimensions, le poids, vibration) pour les mêmes efforts.

La déformation plastique d'un agrégat polycristallin est le changement de forme extérieure de cet agrégat sans que les liaisons intermétalliques soient rompues. Ce résultat est obtenu par le déplacement et la création de défauts dans l'empilement cristallin (dislocations). La multiplication de ces défauts a pour conséquence de modifier les caractéristiques du matériau (phénomène de l'écrouissage). On obtient ainsi un matériau à énergie interne plus élevée.

Chapitre I

- **Comportement matériau métallique au cours de la déformation :**

Tous les métaux ne nécessitent pas les mêmes conditions afin d'être forgés. [2]

Tableau I.1 : déformation des matériaux

alliages	Température (c)	Ordre de grandeur de l'allongement (%)
D'aluminium	20	7 à 14
	150	17 à 31
	300	48 à 82
	400	110 à 160
De cuivre	20	35 à 65
	700	≥60
De fer	20	45 à 55
	800	65 à 105
	1000	75 à 110
De nickel	20	33 à 57
	800	42 à 95
	1000	60 à 135
De titane	20	10 à 40
	700	40 à 97
	800	65 à 130

I.5 Les procédures de forgeages industriels :

La matière première dans le secteur de service industriel du travail des métaux est le métal sous différentes formes chaque activité intervient dans le processus de fabrication d'une pièce ou la finition de celle-ci la forge transforme le métal à chaud ou à froid en pièces semi-finies de point de vue industriel, Le forgeage comporte quatre techniques dérivées :

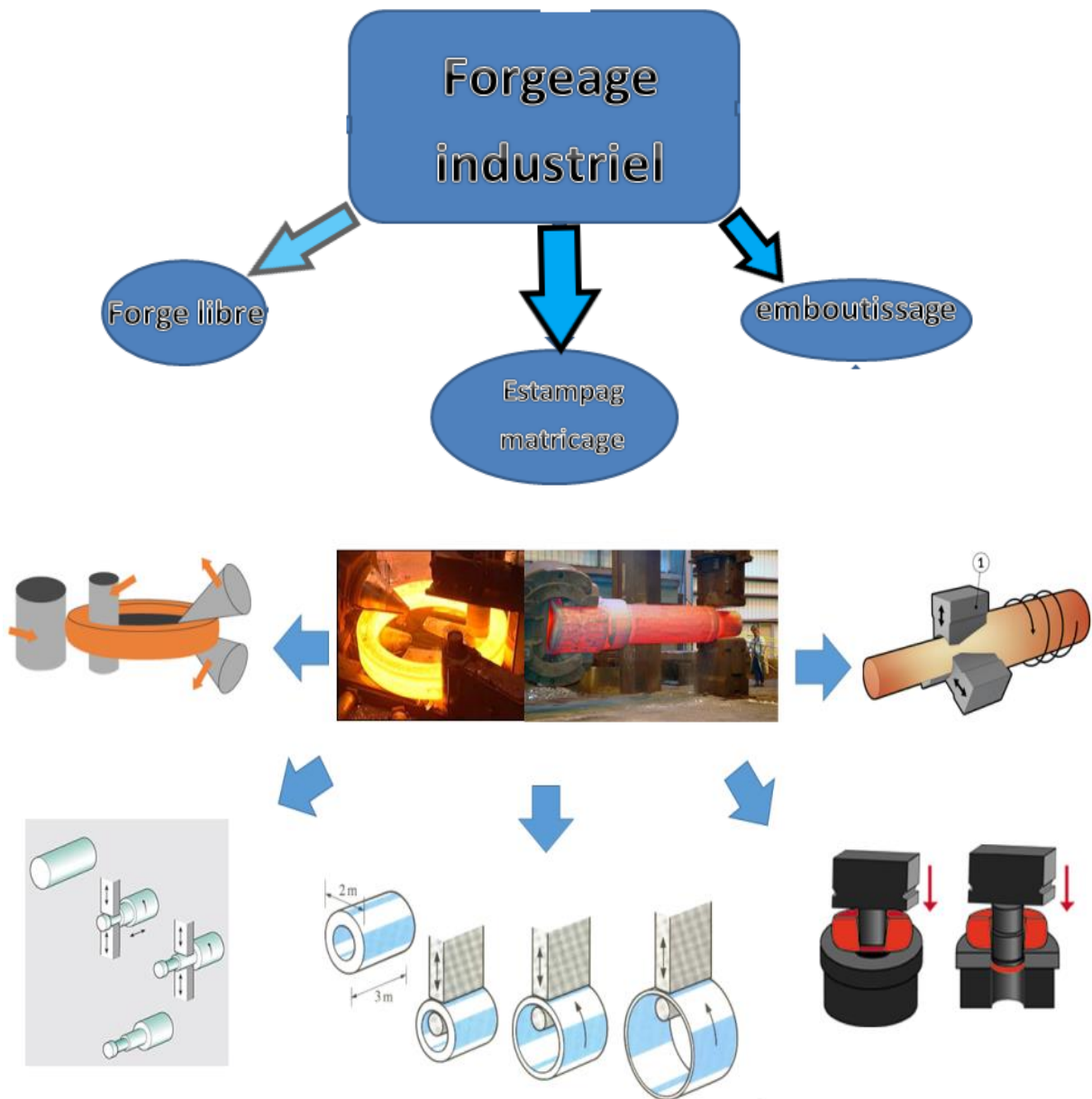


Fig I.6 : les types de forgeage

I.5.1 L'estompage (Forgeage de pièces métalliques) :

- **Définition :**

La forge par estampage consiste à former après chauffage une pièce brute par pression entre deux blocs « les matrices » portant en creux la forme exacte du produit à réaliser (moules) .ce

Chapitre I

procédés de forgeage à chaud utilise des outillages spécifiques pour fabriquer des pièces ce qui sous-entend que l'on a recourt des qu'il Ya une certaine quantité de pièces à faire :

- Les petites séries à partir de vingtaines de pièces
- La moyenne série entre 500 et 1000
- Et les grandes séries +1000

La forge par estompage met en forme uniquement des métaux ferreux à haute température avec des pilons.

A. Machines utilisées : sont de deux types :

- Des engins (machines) de choc.
- Des engins de pression.

B. Applications :

- ✓ S'applique aux métaux ferreux : Acier.
- ✓ Valable pour des pièces en petites séries renouvelables, ou pour des moyennes ou grandes séries à cause du grand investissement.
- ✓ Meilleure caractéristiques mécaniques de la pièce estampée.
- ✓ Meilleure précision dimensionnelle et géométrique.
- ✓ Cadence élevée.
- ✓ ...

C. Schéma de principes de l'estompage :

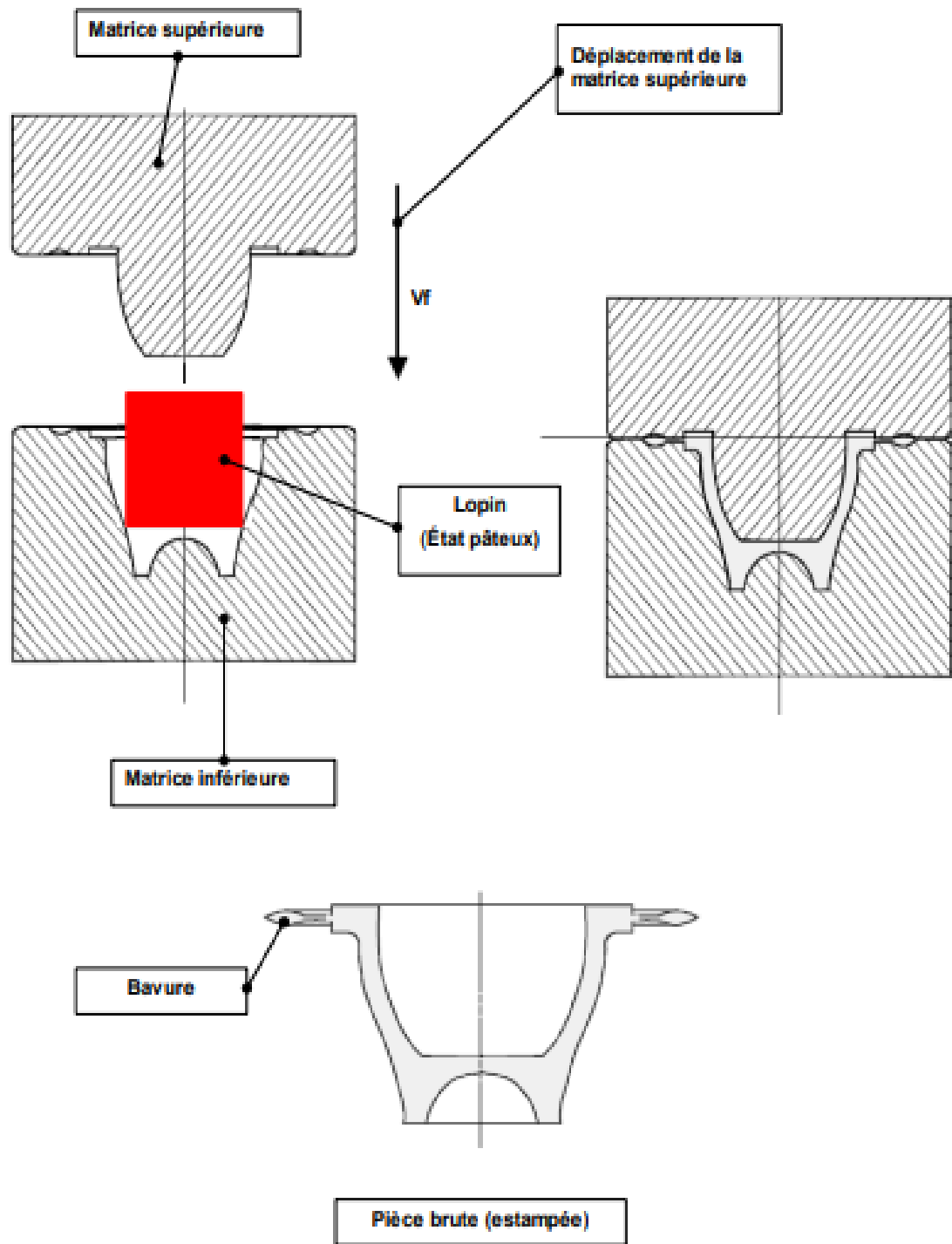


Fig I.7 : Schéma de principes de l'estampage

D. Pièces forgées par estampage :

Chapitre I

Ce processus est typiquement utilisé pour les composants dans :

- Énergie et électricité : pièces forgées pour éoliennes, pompes et vannes pour le secteur nucléaire.
- Pétrochimie offshore et onshore : corps de vanne, pompes, brides.
- Engins de construction, grues, camions et équipements de mines : pièces de transmission, arbres pivots, composants de grues, fusées de roue.
- Ferroviaire : disques de freins, pièces de liaison structurelle, moyeux.
- Défense, militaire, marine : Accouplements d'arbre ; lance-torpilles, pont d'atterrissage d'hélicoptères.



Fig I.8 : pièces forgée par estampage

I.5.2 Le matriçage :

- **Définition :**

La forge par matriçage consiste comme l'estompage à former après chauffage des pièces brute réaliser en alliage non ferreux tel que (alliage d'aluminium, de cuivre, de titane, de nickel,...).

Donc les deux termes sont synonymes cependant

Estompage : forgeage mécanique des aciers.

Chapitre I

Matriçage : forgeage mécanique des métaux non ferreux.

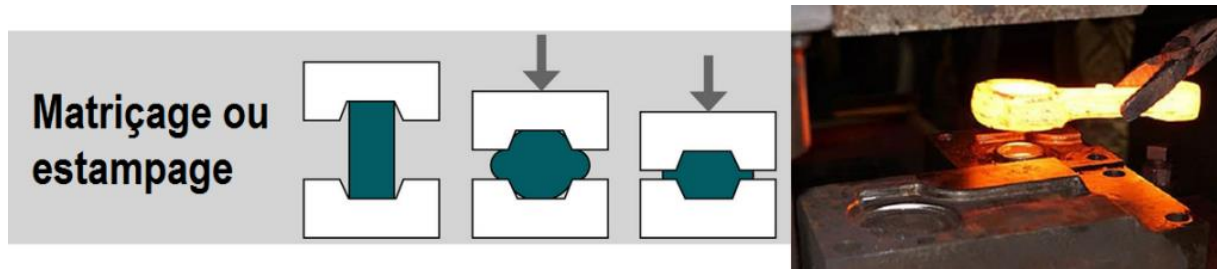


Fig I.9 : schéma de matriçage/estampage

A. Les avantages du matriçage :

On distingue trois avantages primordiaux :

- Les pièces forgées avec le matriçage ont une résistance mécanique supérieure à celle de la même pièce obtenue par la méthode d'enlèvement de matière du fais défilage consécutive au forgeage.
- Obtention d'une grande précision dimensionnelle qu'avec les autres procédés de forgeage.
- Formage des produits à grande vitesse afin d'obtenir un maximum de métal par l'affinage de son grain.

B. Les inconvénients :

- Le matriçage est utilisé sauf si les nombres de pièces à produire est trop élevé.
- La création d'outillages spécifiques pour la confection.
- La masse des pièces produites ne dépasse pas les 250 kilogrammes.

C. Machines utilisées : Un seul type :

- Des engins de **pression**.

D. Applications :

- S'applique aux métaux non ferreux : Alliages légers, alliages cuivreux, titane, ...
- Valable pour des pièces petites séries renouvelables, ou pour des moyennes ou grandes séries à cause du grand investissement.
- Hautes caractéristiques mécaniques de la pièce matriçée.
- Cadence élevée.
- Meilleure précision dimensionnelle et géométrique.

Chapitre I

- Meilleur aspect géométrique.

E. Caractéristiques du matriçage à chaud :

- aciers (entre 1 kg et env. 120 kg)
- alliages d'aluminium (entre 0,5 kg et env. 50 kg)
- alliages de titane (entre 1 kg et env. 25 kg)
- alliages de nickel (entre 1 kg et env. 20 kg)

Tolérances selon EN 10243 qualité de forgeage F et E

Pièces forgées de précision avec une tolérance de +/- 0,1 mm (IT8-9)

(EN 10243 -1 décembre 1999 Norme En vigueur Pièces forgées par estampage en acier - Tolérances dimensionnelles - Partie 1 : pièces exécutées à chaud sur marteaux-pilons ou presses verticales Le présent document spécifie les tolérances dimensionnelles des pièces estampées en acier exécutées à chaud sur marteaux-pilons ou sur presses verticales).

I.5.3 L'emboutissage :

- **Définition :**

L'emboutissage est une technique de fabrication permettant d'obtenir, à partir d'une feuille de tôle plane et mince.

La forge par emboutissage consiste au formage des tôles par pression entre deux matrices portant en creux la forme exacte du produit à vouloir réaliser, il consiste à déformer à froid une tôle pince entre la matrice et une serre flan.

1. La préparation de l'opération d'emboutissage :

Dans la première étape, le poinçon et le serre-flan sont relevés. La tôle (ou le flan), préalablement graissée, est posée sur la matrice.

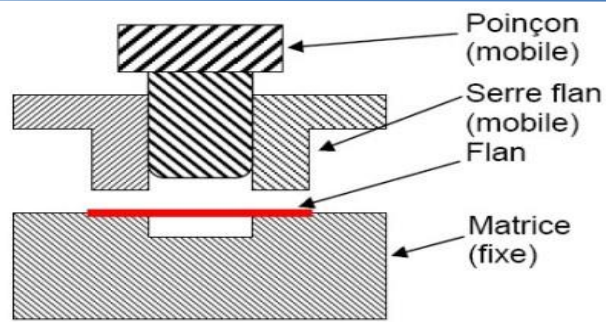


Fig I.10 : l'opération d'emboutissage.

2. Le serrage du flan :

Le serre-flan descend et vient appliquer une pression de serrage afin de maintenir le flan tout en lui permettant de se déformer plastiquement ou plastiquement sous gravité.

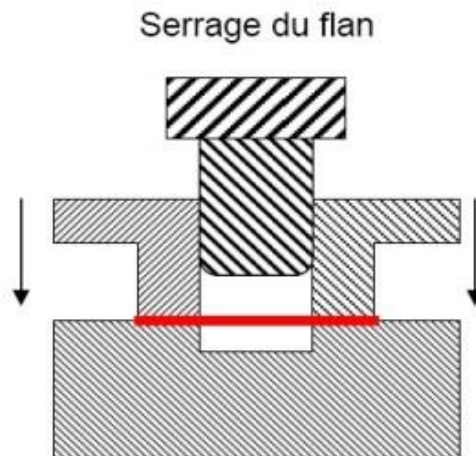


Fig I.11: serrage du flan

3. Opération d'emboutissage :

Dans la troisième étape, le poinçon descend et déforme plastiquement la tôle.

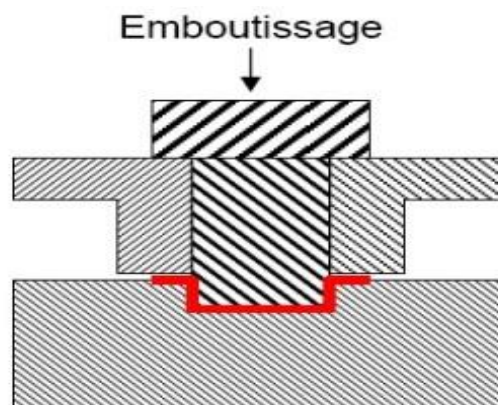


Fig I.12 : emboutissage proprement dit

Chapitre I

4. L'enlèvement des outils :

Le poinçon puis le serre-flan se relèvent : la pièce conserve la forme acquise (limite d'élasticité dépassée).

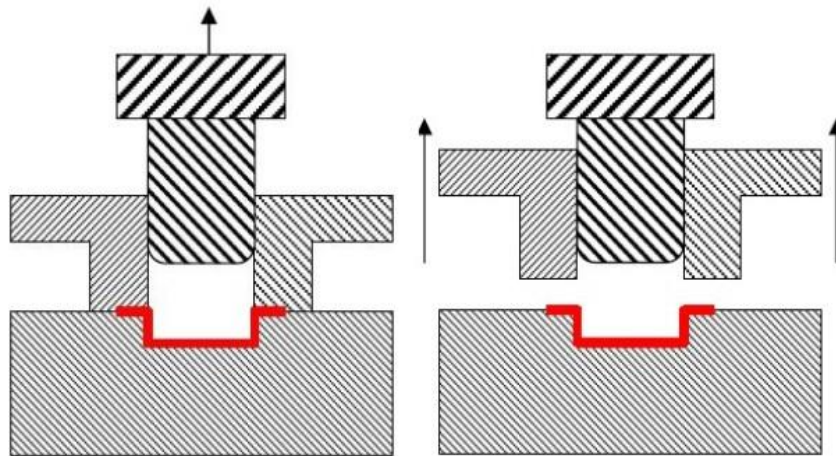


Fig I.13: L'enlèvement du poinçon puis du serre-flan .

A. Les avantages de l'emboutissage :

- Pièces minces de formes géométriques complexes.
- Bon état de surface.
- Très bonne qualité esthétique et travaux de finition de polissage moins lourds et moins coûteux.
- cadences de production très élevées est les prix raisonnable :
 - 100 à 200 pièces/heure (pièces de gros volumes : carrosserie automobile, ...)
 - 3000 à 4000 pièces/heure (petites pièces : renfort, capuchon de réservoir,...)

B. Les inconvénients de l'emboutissage :

- Les zones d'étirement subissent un amincissement important et les zones de rétreint subissent une combinaison d'effets d'épaississement et de plissement.
- Les phénomènes du retour élastique (après que le poinçon se retire) conduisent à un retrait de la matière. Il est alors nécessaire de recourir à certaines techniques pour

Chapitre I

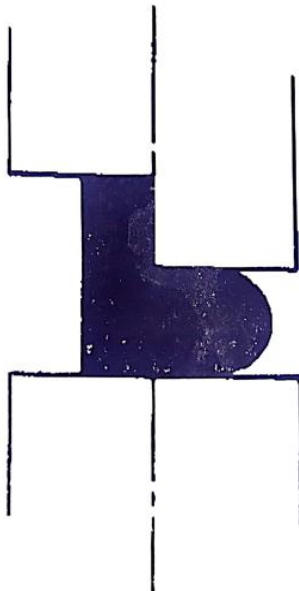
corriger ces phénomènes de retour élastique : frappe du rayon, étirage et maintien prolongé du poinçon ou modification de la forme du poinçon.

- Le rayon d'entrée de la matrice doit être très arrondi et poli pour éviter toute déchirure du métal.
- Temps de préparation important.
- Mise au point des outils (poinçon, matrice) très coûteuse et nécessite un savoir-faire de l'entreprise.

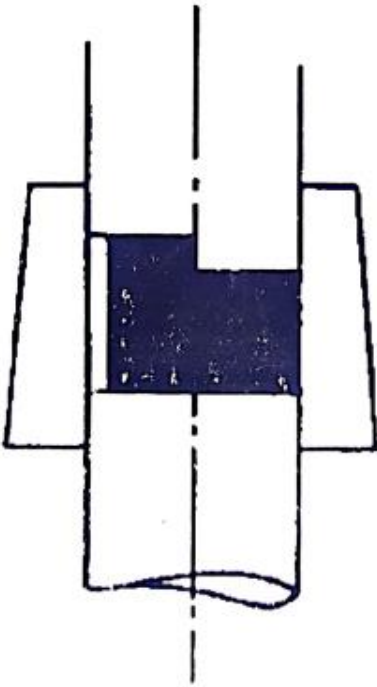
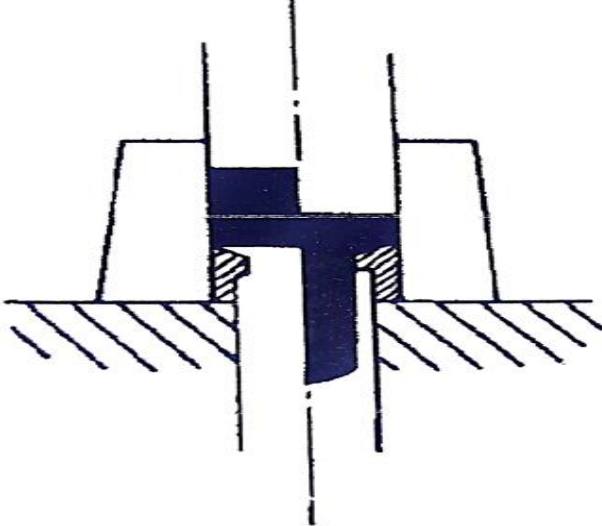
I.5.4 Le refoulement en machines horizontales :

Cette technique permet de fabriquer des pièces présentant des renflements par refoulement à partir de barres carrées, octogonales ou cylindriques. Elles permettent aussi de fabriquer des corps creux. à partir d'une barre par déplacement radial du métal On peut travailler soit sur des lopins préalablement découpés ou dans des barres (les matrices de serrage comportant alors un jeu de cisaille permettant de détacher la pièce finie de la barre).

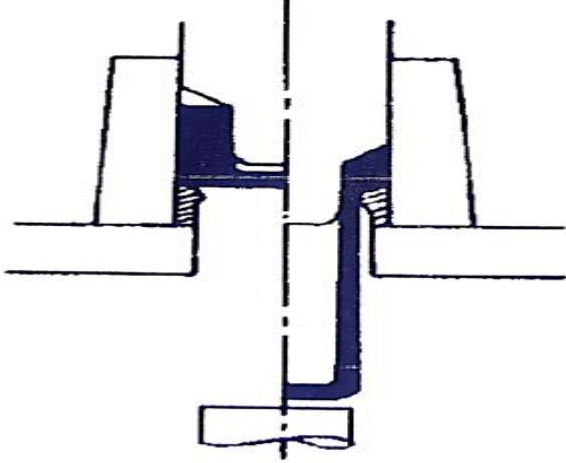
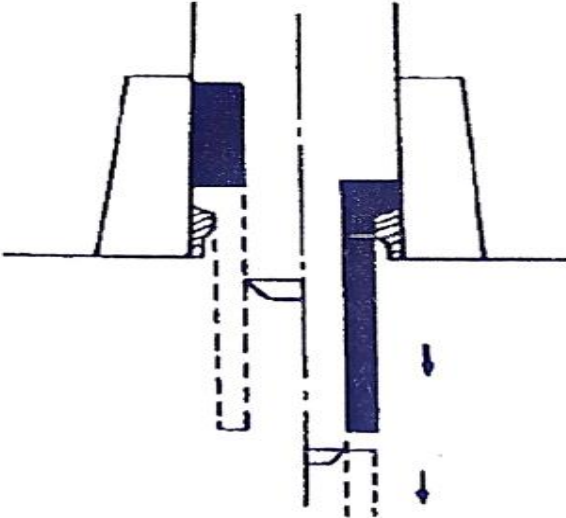
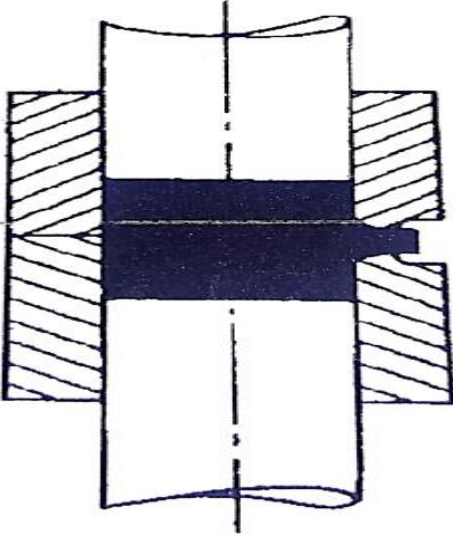
Tableau I.2 : Les différents types de déformation existent

Types	Schéma	Description
Ecrasage		Déformation d'un lopin dans la direction de son axe par compression entre deux tas plats.

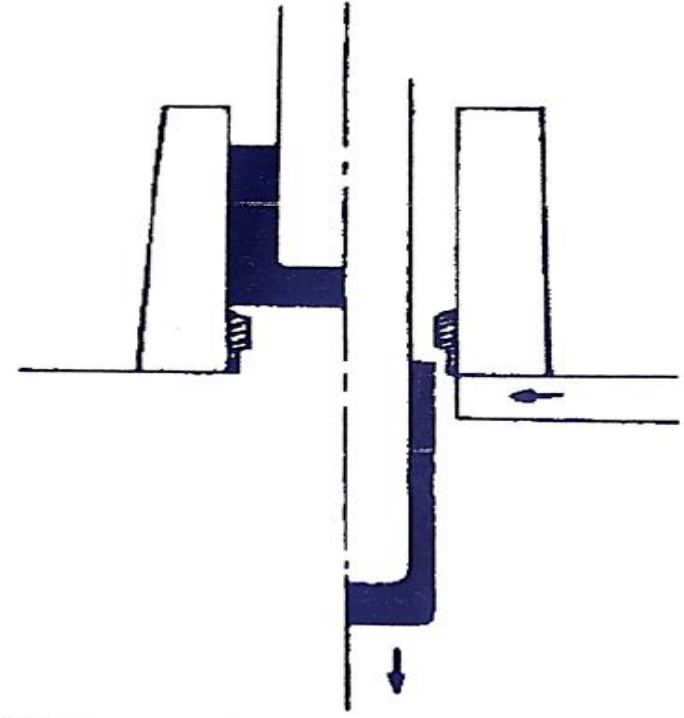
Chapitre I

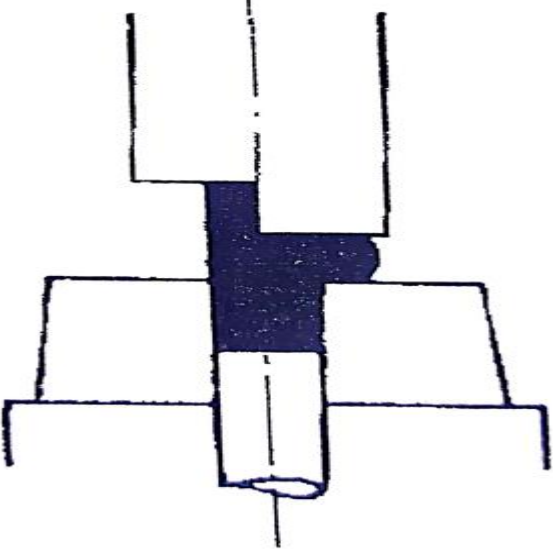
Préformage	 A schematic diagram of the preforming process. It shows a vertical dashed line representing the axis of symmetry. A dark blue rectangular block is positioned between two vertical lines representing the walls of a die. Below the block, a white cylindrical shape is shown being compressed upwards, with a curved line indicating the point of contact or the start of the deformation.	<p>Déformation d'un lopin dans un matrice par compression sous l'action d'un poinçon.</p>
Filage directe	 A schematic diagram of the direct extrusion process. It shows a vertical dashed line representing the axis of symmetry. A dark blue rectangular block is positioned between two vertical lines representing the walls of a die. Below the block, a white cylindrical shape is shown being pushed downwards through a narrow opening (the die) into a hatched area representing the extruded material.	<p>Opération qui consiste à faire s'écouler le métal au travers d'une filière, dans le sens du déplacement du poinçon l'ensemble de la matière ne traverse pas la filière.</p>

Chapitre I

Filage directe par enfilade	 A technical diagram showing a cross-section of a workpiece being threaded. A dark blue chip is being removed from the workpiece as a drill bit advances. The chip is shown being pushed through the cutting edge of the drill bit.	Opération identique au filage direct creux, mais l'ensemble de la matière traverse la filière chaque pièce étant poussée par suivante.
Filage directe creux	 A technical diagram showing a cross-section of a hollow workpiece being threaded. A dark blue chip is being removed from the inner surface of the workpiece. The chip is shown being pushed through the cutting edge of the drill bit. Dashed lines indicate the internal geometry of the workpiece.	Opération identique au filage direct, mais appliquée à des corps creux obtenus par filage inverse la pression du poinçon s'exerce sur la collerette
Filage latérale	 A technical diagram showing a cross-section of a workpiece being threaded. A dark blue chip is being removed from the workpiece as a drill bit advances. The chip is shown being pushed through a side hole in the workpiece.	Opération dans laquelle la matière est forcée de s'écouler latéralement au travers d'un orifice ménagé dans la paroi de l'outillage.

Chapitre I

Etirage	 <p>The diagram illustrates the drawing process. A punch (poinçon) is shown moving downwards, indicated by a downward arrow. It is pulling a workpiece through a die hole. The workpiece is shown in two positions: one partially inside the die and one fully drawn through. The die is represented by two vertical lines, and the punch is a shaded rectangular block.</p>	<p>Opération qui consiste à réduire l'épaisseur de paroi d'un corps creux en le forçant au travers d'une filière. la pression du poinçon s'exerce au fond du corps creux, la matière traverse entièrement la filière.</p>
----------------	--	---

Refoulage	 <p>The diagram illustrates the upsetting process. A punch is shown moving upwards, indicated by an upward arrow. It is compressing a workpiece between two die blocks. The workpiece is shown in two positions: one being compressed and one being fully compressed into a shorter, wider shape. The die is represented by two vertical lines, and the punch is a shaded rectangular block.</p>	<p>Opération qui consiste à écraser dans la direction de son axe, une partie libre d'un lopin, ou d'une pièce, afin de former une tête</p>
------------------	--	--

Chapitre I

Le forgeage est un procédé de mise en forme de fer et d'autres métaux. On distingue le forgeage manuel qui était utilisé par le forgeron et le forgeage mécanique, Le forgeage est décomposé en plusieurs procédés, estampage et matriçage, emboutissage, extrusion, le forgeage libre et le laminage.

I.6 Machine et presses de forgeage :

La presse est une machine qui permet de changer la forme d'une pièce en appliquant une pression. [3]

Les presses peuvent être classés suivant:

- Leur mécanisme : hydraulique, mécanique, pneumatique
- Leur fonction : presse de forgeage, presse d'estampage, presse plieuse, etc.
- Leur structure : presse à genouillère, presse à vis
- Leur contrôlabilité : conventionnelle, servo-presses

Le forgeage d'un lopin consiste à utiliser le types de machine appropriée qui influe sur la mise en forme. Les presses et une machine qui permet de changer la forme d'une pièce en appliquant une pression.

- Le mécanisme des presses (hydraulique, mécanique, pneumatique)
- Le fonctionnement (presse de forgeage, presse d'estampage, presse plieuses)
- La structure (presse a genouillère, presse à vis...)
- Contrôlabilité (conventionnelle, servo-presse)

Les machines utilisées classe en fonction de leurs mode opératoire :

- Les pilons.
- Les presses mécaniques.
- Les presses à vis.
- Les presses hydrauliques.

Chapitre I

- Les presses pneumatiques.

I.6.1 Les pilons :

Le marteau pilon est souvent utilisé pour forger des pièces en métal, il existe plusieurs sorte de marteau pilon :

- Le marteau pilon mécanique,
- Le marteau pilon pneumatique
- Le marteau pilon à vapeur
- Le marteau pilon motorisé

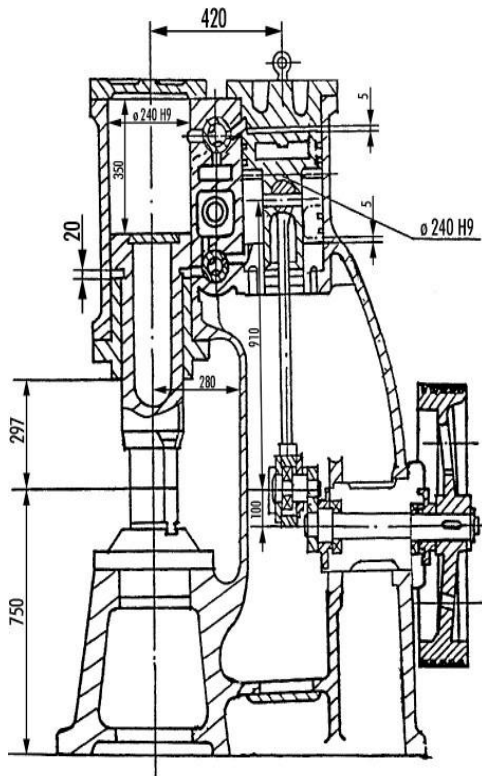


Fig I.14 : marteau pilon

Le marteau pilon est la presse la plus utilisée dans le procédé de forgeage. Cela est due à son accessibilité et son taux de production élevée, ça diversité dans les opérations effectuées. Dans un court temps de contact le pilon applique une forte charge entre la matrice et le lopin

A. Fonctionnement du pilon :

Chapitre I

Le fonctionnement d'un marteau pilon est due à une translation de la masse (outils de frappe) sur un axe OY, à une vitesse qui varie selon le matériau et la forme de la pièce forgé, et tout cela avec une grande force et une grande précision

B. Les avantages du pilon :

Le marteau pilon Connue pour sa flexibilité et diversité des opérations qui peut exécuter.

Le marteau pilon et la presse la plus polyvalente et la moins couteuse est plus économique.

C. Les inconvénients :

La durée de vie de la presse est limitée due aux chocs subits par la matrice.

Le procédé est limite dans le rendue des pièces forgé par rapport aux autres procédés cela est due à sa grande force et vitesse de frappe.

I.6.2 Les presses mécaniques :

Toutes les presses mécaniques utilisent l'énergie d'un volant. Le système de guidages le plus employée sur les presses mécaniques est base sur un mécanisme de glissière qui transforme le mouvement de rotation en mouvement de translation de vas et viens. Ce mouvement alternatif impose à un piston vertical une longueur de frappe constante.

A. Fonctionnement de presses mécanique :

La presse convertie le mouvement circulaire en mouvement linéaire, le moteur principale entraine le volant, l'embrayage entraine l'engrenage, le vilebrequin entraine la bielle, pour avoir un mouvement linéaire de course.

Elle applique une pression sur le matériau traiter pour le déformer et obtenir la forme et la précision requise, en plaçons le matériau entre les deux et la machine exerceras une pression pour la déformée

La matrice est conçue pour donner une forme à la pièce, pour façonner et répondre à la demande de la production la force et la précision sont nécessaires pour atteindre les demandes de tolérances de quantité de la pièce estampée pour garantir un bon assemblage des parties de la pièce finale.



Fig I.15 : presse mécanique GPH

B. Les types de presses mécaniques :

- Presse mécanique à volant d'inertie.
- Presse mécanique à engrenage.
- Presse mécanique à deux engrenages.
- Presse mécanique excentrique.
- Presse mécanique à double effet.

C. Les avantages des presses mécaniques :

- En peut utiliser des matrices moins massives en matériau plus dure vue que les presses mécaniques sont soumises à des forces de compression par oppositions aux impactes
- Les lopins se change facilement
- Taux de production très élevée
- Une très grande précision dans les tolérances géométriques des pièces forgées

Chapitre I

D. Les inconvénients des presses mécaniques :

- Une presse mécanique est très couteuse.
- Les presses mécaniques sont limitées dans les opérations de mise en forme à cause de leurs frappes constantes.

I.6.3 Les presses à vis :

Une presse pour le travail des métaux est une machine-outil utilisée pour façonner ou couper le métal en le déformant avec une matrice. Il est fréquemment utilisé pour percer des trous dans la tôle en une seule opération, plutôt qu'en coupant le trou ou en perçant.

S'il est utilisé comme poinçon, l'outil lui-même se compose d'un poinçon et d'une matrice correspondante, dans laquelle il s'intègre très étroitement. Les deux sont généralement usinés avec précision puis trempés. La matière est introduite entre le poinçon et la matrice, et la machine actionnée. Le poinçon coupera le matériau en un seul mouvement en le cisillant. Le poinçon et la matrice peuvent avoir n'importe quelle forme souhaitée, de sorte que des trous et des découpes de forme irrégulière peuvent être créés.

Si elles sont utilisées comme outil de forgeage, les matrices peuvent avoir de nombreuses formes différentes allant de formes plates à diverses formes qui mouleront le métal à la configuration souhaitée.

A. Fonctionnement de la presse à vis :

Une presse à vis est un type de presse à machine dans laquelle le vérin est entraîné de haut en bas par une vis. L'arbre de la vis peut être entraîné par une poignée ou une roue. Il fonctionne en utilisant une vis grossière pour convertir la rotation de la poignée ou de la roue motrice en un petit mouvement vers le bas d'une plus grande force. La poignée aérienne intègre généralement des balles comme masselottes. Les poids aident à maintenir l'élan et la poussée de l'outil pour faciliter son utilisation.

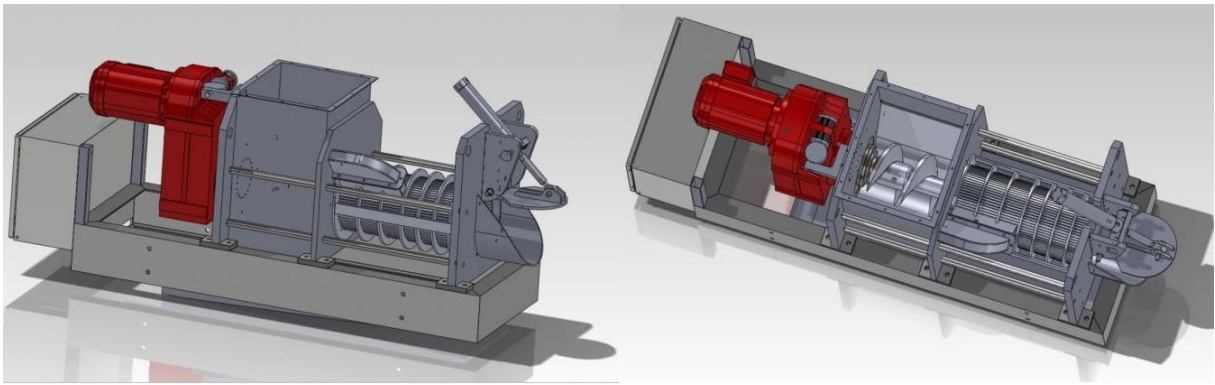


Fig I.16 : presse à vis

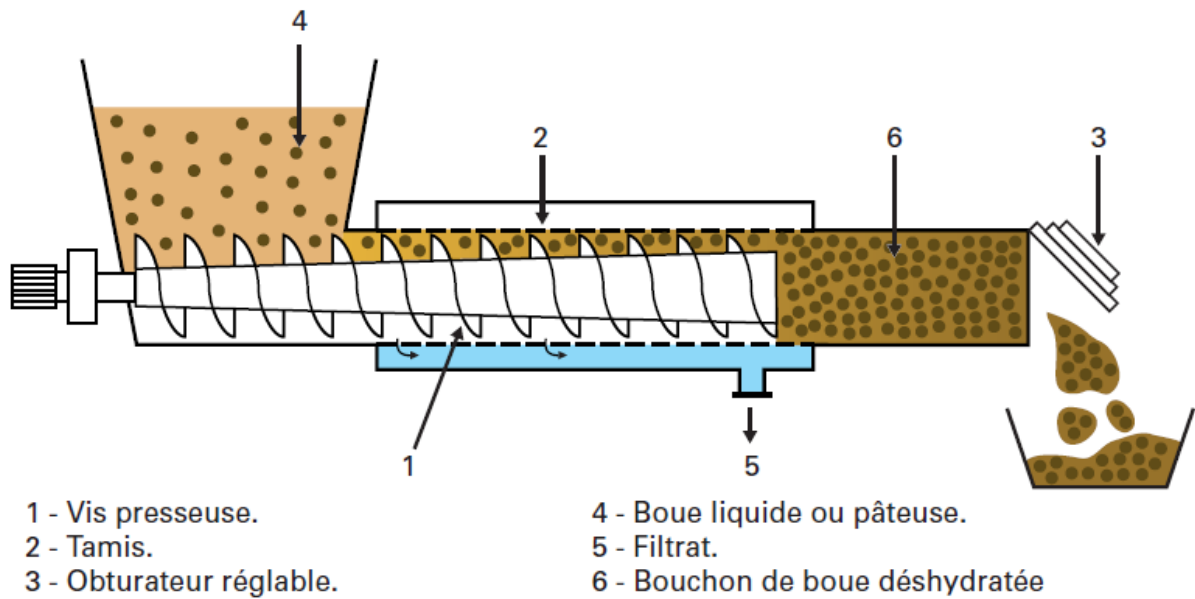


Fig I.17 : Représentation schématique de la presse à vis

B. Avantages des presses à vis :

- On obtient un plus grand travail de déformation avec la presse à vis car elle dégage une plus grande énergie.
- La presse ne peut pas se bloquer.
- L'ajustement en hauteur de la matrice n'est pas critique.
- La matrice ne se confronte pas à de fortes températures donc cela la conserve de toute déformation et augmente sa durée de vie.

C. Les inconvénients des presses à vis :

Chapitre I

- La presse à vis à un très faible taux de production cela est due à son principe de fonctionnement surtout plus la taille de la pièce est grande plus la production diminue.

I.6.4 La presse hydraulique :

La presse hydraulique est constituée d'un système équivalent à un mécanisme à bras levier qui est hydraulique qui est un circuit fermé, qui fournit une force importante de compression qui est utilisé pour la déformation des pièces forger.

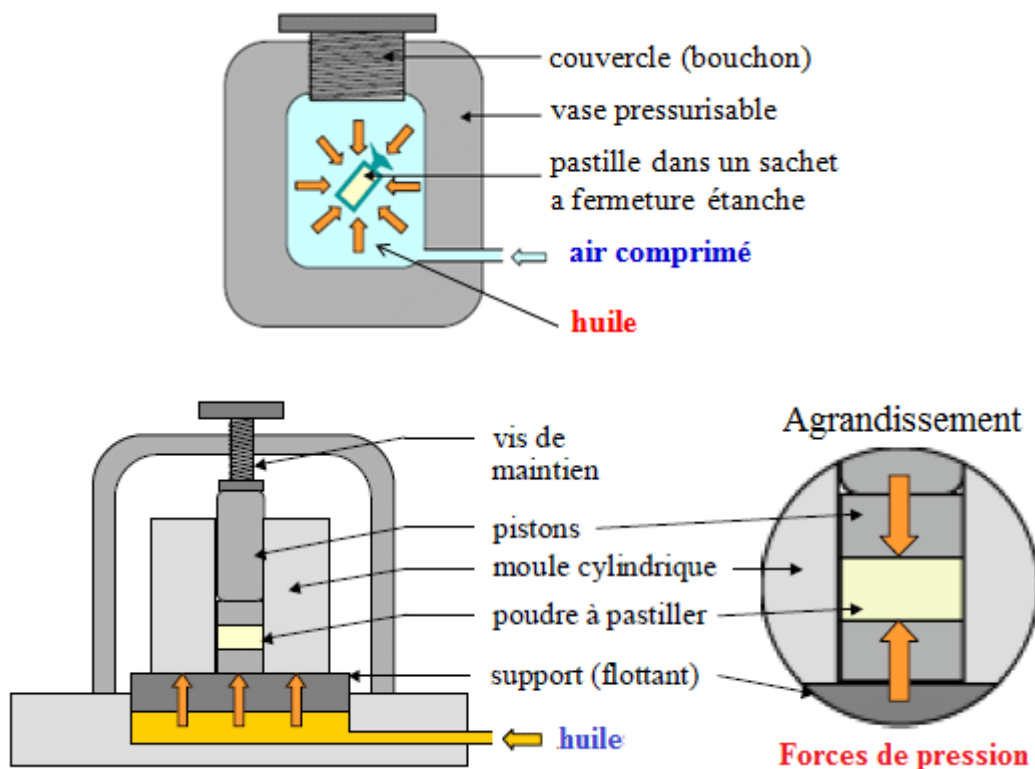


Fig I.18: Représentation schématique de la presse hydraulique uni-axiale

A. Fonctionnement des presses hydraulique :

La presse hydraulique est une machine induit d'un circuit hydraulique qui fournit une grande force de compression. Elle permet de transmettre un effort démultiplier et un déplacement servent à écraser (déformer) un objet ou de soulever une pièce lourde.

La presse est mise en mouvement grâce à un système de piston, actionner par la mise sous pression d'un fluide. la machine dispose de deux piston avec différents diamètres situés aux

Chapitre I

extrémités, a une extrémité en trouve un piston avec une petite surface nommé A, à l'autre extrémité on a un piston avec une grande surface ce qui permet d'accroître la force.

Par exemple si le rapport des sections est de 10mm, on exerce une force de 100 N sur le petit piston ce qui produit une force sur le grand piston de 1000 N, mais pour que le grand piston face une course de 10 mm il faudra que le petit piston se déplace de 100mm

La vitesse de production de la presse hydraulique sont moins que celles atteintes avec la presse mécanique.

B. Type de presses hydrauliques :

On distingue plusieurs types de presses hydrauliques tel que :

- Presse à calibrer.
- Presse à cintrer et à dresser.
- Presse à compression pour les matériaux thermoplastiques.
- Presse à forger.
- Presse à matricer.
- Presse hydraulique à arcade.
- Presses hydrauliques a bâti en col de cygne.
- Presses hydrauliques à deux et quatre colonnes.
- Presses hydrauliques à deux effets.

C. Les avantages des presses hydrauliques :

- A tout moment pendant la frappe on peut contrôler la force de frappe tout en changeant la pression grâce à une valve de pression.
- La force maximale de forgeage peut être limitée pour protéger l'outillage.

Chapitre I

- Le taux de déformation peut être contrôlé ou changer si c'est nécessaire pendant la frappe, ceci est particulièrement important dans le procédé de forgeage de matériaux sensible à la rupture sous forts taux de déformations.

D. Les inconvénients des presses hydrauliques :

- Le coût initial d'une presse hydraulique est plus élevé par rapport à une presse mécanique.
- Elle est plus lente que les presses mécaniques.
- Le temps de forgeage est plus grand ce qui augmente le temps de contact entre le lopin et la matrice.

I.6.5 Presse pneumatique :

L'utilisation des presses pneumatique dans le domaine industriel sont nombreuses comme le rivetage, le découpage ou l'emboutissage la presse pneumatique développe une force très importante ce qui la rend polyvalente.

A. Fonctionnement de la presse pneumatique :

La presse pneumatique fonctionne à l'aide de l'air comprimé cet air comprimé circule dans des tubes jusqu'à ce que la pression de l'air augmente et permet la déformation de la pièce forgée à la fin du processus on libère la pression présente dans les tubes pour récupérer la pièce forgée.

Les presses pneumatiques sont souvent utilisées en avantage car elles ont une grande vitesse et une utilisation polyvalente et on peut arrêter le processus à tout moment et son utilisation est simple.



Fig I.19 : presse pneumatique GPA

Comparaison des capacités de presses de forgeage :

Tableau I.3: les machines mécanique

Machine forgeage	Force (N)	Vitesse d'impact (m/s)	Nombre de coup par minute
Pilon	450 à 317,5.10 ³	3 à 9	45 à 100
Presse mécanique	2,2.10 ⁶ à 142,3.10 ⁶	0.6 à 1.5	30 à 100
Presse à vis	1,3.10 ⁶ à 623.10 ⁶	0,5 à 1,2	12 à 70
Presse hydraulique	2,2.10 ⁶ à 623.10 ⁶	0,03 à 0,8	20 à 70

Chapitre I

1.8 Choisir la machine de découpage :

Tableau I.4: caractéristique de découpage thermique

Type de découpage	Les caractéristiques
Laser	<ul style="list-style-type: none">• Fines épaisseurs de coupe.• Travail sur tous types de matériaux.• Grande précision.
Oxycoupage	<ul style="list-style-type: none">• Très grandes épaisseurs de coupe.• Travail sur les aciers et alliages Seulement.• Faible précision.
Plasma	<ul style="list-style-type: none">• Epaisseurs de coupe limitées.• Travail sur les matériaux conducteurs seulement.• Bonne précision.

[4]

I.7 Fonctionnement du découpage plasma :

Le découpage plasma est un procédé d'usinage en 2d spécialisé pour les matériaux conducteurs. Il procède par fusion localisé à l'aide d'un jet de plasma en forçant le passage d'un gaz tel l'azote, l'oxygène, l'argon (ou même l'air) à travers une buse étroite. Un courant électrique produit par une source de courant externe ajoute suffisamment d'énergie au débit de gaz afin de l'ioniser, le transformant en un arc plasma avec des températures avoisinant les 20000°C. L'arc plasma coupe la pièce en la faisant fondre et en soufflant le métal fondu.

Après avoir choisir l'acier on a opté pour le découpage plasma pour lui donner une préforme vouliez.

Chapitre I

Conclusion :

On à vue tous les types de presses de forgeage et déduit que il y a une grand diversité de machine, et chaque machine à des qualités spécifique qui l'a rond unique pour effectuer une tâche précise selon (la force et la vitesse, la cadence), et pour cela toutes les machines sont importantes pour forgées une pièce précise.

Chapitre II : analyse fonctionnel de la pièce et traitement thermique

Introduction :

Le soc triangulaire est une pièce d'usures qui est fixé sur un araire qui est elle-même accroché à la charrue ce qui constitue la technique de labourage.

II.1 L'histoire de labourage :

Depuis l'âge de pierre le labourage existe et on utilise des outils en silex pour labourer. « Silex est une roche chimique siliceuse très dure formée par précipitation chimique et constituée de calcédoine presque pure et d'impuretés telles que l'eau ou des oxydes, ces derniers influant sur sa couleur ».

Au Moyen Âge central, la charrue est connue dans l'Europe occidentale d'IXe siècle mais elle y est très rare, l'outil principal étant l'araire, voire encore la houe. La productivité augmente sensiblement à partir du XIe siècle qui voit développement de la charrue lourde à versoir.

En 1849, le tableau de Rosa Bonheur décrit le premier labour, appelé s'ombrage, que l'on effectue au début de l'automne et qui ouvre la terre afin de l'aérer pendant l'hiver. Deux attelages de bœufs tirent de lourdes charrues et retournent un champ dont on aperçoit les sillons déjà éventrés. L'attelage est composé de bœufs du Charolais-Nivernais.[4]



Fig II.1 : labourage

Chapitre II

II.2 Théoriquement :

Sous l'action d'avancer, la partie travaillante de la charrue effectue deux coupes, une coupe verticale par le soc et une coupe horizontale par le soc. Les bandes de terre ainsi séparées, appelées bandes de labour, qui sont de section parallélépipédique, sont entraînées sur un coffrage qui les soulève et les retourne dans les sillons formés lors du passage précédent. Cette inversion provoque la rupture des barres de labour en mottes.

Cette opération crée un sillon formé par un sillon ouvert et une bande de labour retournée. Les sillons sont délimités par des parois verticales, des parois et des fonds de sillons horizontaux, qui sont créés par découpage. L'autre côté, marqué par une crête plus ou moins irrégulière, est délimité par la bande qui vient d'être retournée. La tranchée sera remplie en retournant l'autre bande lors du prochain passage. La première tranchée, appelée l'enrayure, laisse une bande retournée dans le sol non labouré, créant un relief. Le dernier sillon tracé restera ouvert formant en limite de parcelle ou de planche de labour une « dérayure » qui sera aplanie ultérieurement par des façons culturales superficielles.

Le rapport entre la largeur de la bande (espace entre deux murs continus) et la profondeur du sillon (hauteur du mur) varie généralement de 1 (labour profond) à 1,6 (labour superficiel). Pour un travail du sol de profondeur moyenne, jusqu'à 30 cm, ce rapport est généralement égal à 1,4. Dans ce cas, la bande est retournée par une rotation d'environ 135° et se positionne à un angle de 45° sur la bande qui a été retournée lors du passage précédent.[4]

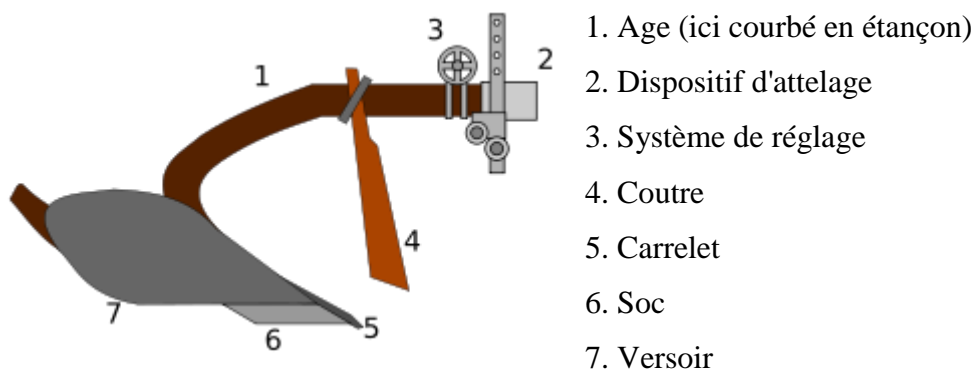


Fig II.2 : charrue simple portée

Le degré d'émiettement de la bande de labour dépend de plusieurs facteurs, dont les plus déterminants sont les suivants :

Chapitre II

- Le rapport largeur-profondeur : les bandes proportionnellement plus larges sont soumises à de plus fortes sollicitations mécaniques du fait de l'augmentation de l'angle de retournement.
- La forme du versoir : un versoir hélicoïdal accompagne la bande de labour dans son mouvement de retournement tandis qu'un versoir cylindrique provoque un basculement plus brutal et donc une fragmentation plus forte.
- La vitesse d'avancement : les sollicitations augmentent avec la vitesse.
- La texture du sol : elle détermine sa cohésion, celle-ci est plus faible pour les sols sableux et plus forte pour les sols argileux. Dans le cas limite d'un terrain sableux, à structure incohérente, le labour ne fera qu'un simple travail de mélange sans retournement. Dans les sols bien pourvus en argile, le degré d'émiettement dépend de l'humidité.
- État plastique des sols colloïdaux (lié à l'humidité) : un sol sec, à cohésion forte, subit un faible taux d'émiettement et il se forme des mottes plutôt grandes. Au-delà d'un certain taux d'humidité, la bande de labour tend à être moulée par le versoir sans se désagréger. À un niveau d'humidité intermédiaire, on obtient un certain degré d'émiettement.

II.3 Mécanisation :

Avec le développement la mécanisation des charrues est arrivée avec les tracteurs qui tractent les charrues de la même façon que les animaux après ça était innové et avec des roues pour avoir un meilleur contrôle et glissement et moins de frottement. Il y est adjoint un contrôle mécanique automatique de la profondeur de travail ou de l'effort. [5]

II.4 Type de soc :

Il existe plusieurs types de soc

- Sans aile (simple renfort du bout du soc). Ce sont en général de simples renforts du soc fixés par un œil ou une douille.
- Avec aile. Le soc peut être plus large que le soc (versoir). Dans ce cas il affecte souvent la forme d'un triangle allongé, dont la pointe est dirigée vers l'avant de l'aire.
- Dissymétrique. Ce sont des socs « à aile » dont les ailes sont dissymétriques. Une des ailes est beaucoup plus grande que l'autre, qui peut même être inexistante.

Chapitre II

Pour notre travail on a pris le deuxième type de soc le soc avec aile triangulaire.



Fig II.3 : soc triangulaire.

II.5 Fixation :

Il est fixé sur l'araire à l'aide de deux boulon et écrous sur la partie supérieure sur la partie inférieure de l'araire.



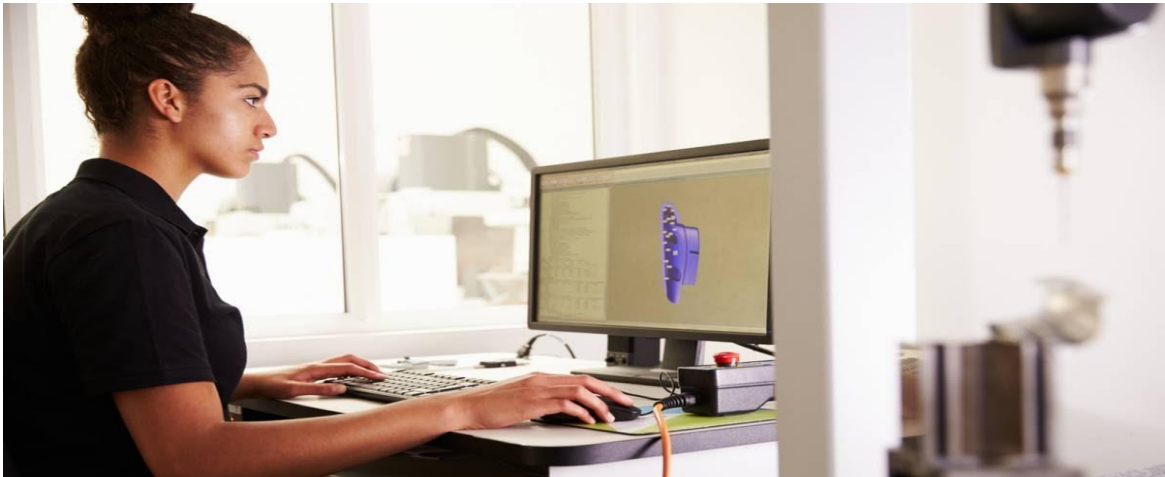
Fig II.4 : Fixation de soc

Chapitre II

II.6 CAO :

Définition :

La conception assister par ordinateur est un outil qui permet à un ingénieur à concevoir et faire des simulations d'UN projet et cela grâce à un ensemble de logicielle de technique de modélisation géométrique qui permet à le faire.



La CAO est là pour accomplir des tâches qui dépassent la capacité humaine par exemple les trucs qui se passent au micro ou nanoélectronique. Et là pour permettre de réaliser des pièces sans avoir à dépenser beaucoup d'argent et de voir la pièce en 3D et faire dessus des simulations adéquates à son utilisation qui permettent d'avoir une idée sur le comportement de la pièce et faire le bon choix de matériaux. [5]

La CAO est là pour permettre à l'ingénieur de faire :

- modélisation numérique
- simulation mécanique et calcul des matériaux
- représentation graphique
- dessin de plan
- manipulation d'objets 3D
- gestion de grands assemblages

Tout ça sur un pc.

Chapitre II

II.6.1 SolidWorks :

Concepts :

Les pièces constituent les éléments de base du logiciel SOLIDWORKS. Les assemblages contiennent des pièces ou d'autres assemblages, appelés des sous-assemblages.

Un modèle SOLIDWORKS est constitué de géométrie 3D qui définit ses arêtes, faces et surfaces. Le logiciel SOLIDWORKS vous permet de concevoir rapidement des modèles précis. Les modèles SOLIDWORKS sont :

- basés sur la modélisation 3D
- basés sur les composants

Tableau II.1: Les différentes sections de SolidWorks

Section	Titre	Sujets couverts
1	Fonction de base	Présente les principes de conception, la terminologie de SolidWorks et les options d'aide.
2	Pièces	Explique les méthodes, outils et fonctions les plus utilisées dans la conception de pièces.
3	Assemblage	Explique comment ajouter des pièces dans un assemblage, définir des contraintes et utiliser les méthodes de conception dans le contexte.
4	Mises en plan	Présente les fonds de plan de mise en plan, les vues, les cotes, les annotations et les nomenclatures.
5	Taches technique	Passe en revue les applications complémentaires, les utilitaires et les autres ressources qui permettent d'accomplir des tâches avancées.

II.6.2 Pourquoi le SolidWorks ?

Le SolidWorks est un logiciel CAO parmi les tant d'autre qui permet de modéliser dessiner une pièce en 3d et avoir tous les vue (face, gauche, droit...) et faire des assemblages des pièces et même après choix du matériau faire des simulations dessus pour avoir toutes les donnes possibles pour la conception de cette dernière.

Il est très utilisé dans le domaine de la mécanique à cause de sa fiabilité et la facilite de son utilisation (intuitivité) et ses outils.

La lise en plan et l'une des qualités qui le rendent unique.

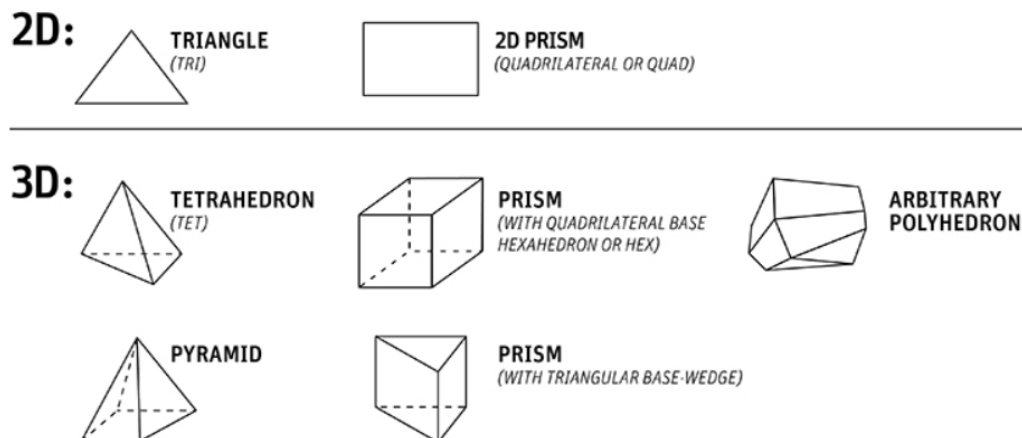
Chapitre II

II.7 Le maillage :

Le maillage, également connu sous le nom de génération de maillage, est le processus de génération d'une grille bidimensionnelle et tridimensionnelle; il divise des géométries complexes en éléments qui peuvent être utilisés pour discrétiser un domaine. Les capacités d'Ansys Mesh sont souvent désignées comme l'étalon-or pour la modélisation et la simulation de flux de travail pour le maillage de pièces complexes.

Ce processus consomme généralement une partie importante du temps dans l'acquisition des résultats de simulation. En conséquence, Ansys Maillage a créé des outils avancés de génération de maillage automatisés peuvent fournir des solutions plus rapides et plus précises pour CFD (fluide) et FEA Meshing , Plus un maillage est détaillé, plus le modèle CAO 3D sera précis, ce qui permettra des simulations hautes fidélité.

II.7.1 les Différents Types de Maillage :



II.7.2 Utilisation du maillage :

La forme d'élément idéale pour une analyse est généralement déterminée par la géométrie représentée dans l'analyse. En général, il est plus facile d'utiliser des éléments têt que des éléments hexadécaux sur une géométrie très complexe.

II.8 Traitement thermique :

Le traitement thermique d'un matériau est un groupe de procédés industriels utilisés pour en modifier les propriétés physiques, mécaniques et parfois chimiques. De tels traitements sont utilisés lors de la fabrication des aciers.

Chapitre II

Le traitement thermique implique l'utilisation du chauffage et du refroidissement, normalement à des températures extrêmes, pour obtenir le résultat souhaité. Il induit la modification de la dureté, de la ductilité, de la fragilité, de la plasticité, de l'élasticité ou de la résistance du matériau. [1]

II.9 Le recuit :

Le recuit d'une matière est un procédé correspondant à un cycle de chauffage. Celui-ci consiste en une étape de montée graduelle en température suivie d'un refroidissement contrôlé, il permet de modifier les caractéristiques physiques du métal ou du matériau étudié. Le recuit est un processus de traitement thermique utilisé pour réduire la dureté, augmenter la ductilité et faciliter l'élimination des contraintes internes.

En effet, ils ont pour objectif de réduire la dureté afin de simplifier la suite du travail de l'acier dans la forge et les différentes chauffées entraînent de fortes déformations et cela de manière hétérogène. Ainsi, le procédé du recuit permettra à l'acier d'être plus tendre et la dureté plus homogène.

II.10 La différence entre la trempe, le recuit et le revenu :

La trempe et le revenu sont des traitements thermiques améliorant notamment la dureté des pièces tout en diminuant la fragilité. Ils peuvent être suivis d'une phase de recuit et de stabilisation afin d'en faciliter l'usinage ou la soudure.

II.11 La trempe :

- **Définition :**

La trempe ou traitement thermique qui consiste à plonger le métal chauffé au rouge dans un bain froid, pour conserver à température ambiante est une modification de la structure moléculaire qui augmente ainsi la dureté des aciers. Les opérations métallurgiques de trempe et de recuit ont une grande influence sur ces modifications de structure, ce qui explique les propriétés physiques spéciales qu'elles confèrent à l'alliage.

Le but de la trempe est d'améliorer la qualité de dureté, d'élasticité que l'acier acquiert par cette opération métallurgique et de plonger le fer rouge brusquement dans l'eau ou l'huile froide. [1]

Chapitre II

- **Les avantages de la trempe :**

La trempe bain-tique est un processus de durcissement des métaux qui permet d'obtenir des propriétés mécanique tel que :

- la solidité (dureté) de l'acier.
- Une très grande ductilité.
- Une grande résistance à la corrosion
- Résistance à l'oxydation.

- **Les inconvénients de la trempe :**

Si le traitement thermique est mal applique, les pièces deviennent des rebuts inutilisables à cause de :

- Variation de dureté de l'acier non homogène sur la surface.
- La pièce ne résistera pas à la corrosion.
- La surface de la pièce noircie et oxydé.

II.12 La différence entre la trempe à l'eau et à l'huile :

Le bain de l'huile à tendance de refroidir le fer en rouge 4 fois plus rapidement que le bain d'eau froide. Donc la trempe à l'huile génère moins de risque et de tapures que l'eau.

Chapitre II

Conclusion :

Le soc triangulaire est un outil qui permet un bon labourage de la terre et a son importance dans ce processus.

La réalisation de la pièce a été faite sur SolidWorks pour sa précision et pour optimiser du travail.

Le traitement thermique est nécessaire pour obtenir une pièce qui est plus résistante plus ductile et qui est plus résistante à la corrosion.

Chapitre III

Chapitre III : Simulation numérique du soc triangulaire

Introduction :

Après avoir fait le dessin technique et défini les propriétés mécaniques des matériaux, on passe à la simulation numérique pour faire un choix de matériaux définitif et pour cela on fait des simulations à différentes forces pour savoir laquelle des deux matériaux va céder en premier et pour cela on a fait une simulation sur le SolidWorks.

On fait celle des déformations Von Mises et de déplacement.

On compare les deux résultats on fait notre choix de matériaux.

Après avoir fait notre choix après la simulation SolidWorks on procède à la simulation dans ANSYS sur avoir une meilleure idée sur les déformations et déplacement.

III.1 Les aciers utilisés :

Choix des aciers (comparaison théorique) :

III.1.1 L'acier au chrome-molybdène « 4130 » :

L'acier 4130 est un type d'acier faiblement allié à haute résistance, est connu sous le nom de CHROMOLY qui est le nom de l'américain Iron and steel Institute (AISI), peut être utilisé dans des applications où les charges importantes sont courantes tel que « le forgeage en agriculture ».

Le 4130 a une faible teneur en carbone et l'ajout de chrome et de molybdène aide à prévenir la formation de magnétite. Cela rend le 4130 moins sensible à la corrosion et améliore la dureté de l'acier. Le 4130 n'est pas magnétique, ce qui le rend idéal pour le soudage et le formage sans créer d'effets nocifs sur l'acier.

Il peut être forgé entre 850°C et 1200°C, plus la température de fin de forgeage est basse, plus la taille du grain est fine. Il doit être refroidi aussi lentement que possible après avoir été forgé.

Pour augmenter sa dureté et sa résistance on a opté pour un traitement thermique qui doit être effectué entre 850 et 890°C on obtiendra une structure martensite. [6]

Chapitre III

Tableau II.2: Acier 4130 formulaire d'approvisionnement et taille et tolérance

Formulaire d'approvisionnement	Taille (mm)	Traiter	Tolérance	
Rond	Ø6-Ø100	Etire à froid	Noir brillant	Meilleur H11
	Ø16-Ø350	Laminé à chaud	Noir	-0/+1
			Pelé / moulu	Meilleur H11
Plat / carré / bloc	Ø90-Ø100	Forgé à chaud	Noir	-0/+5 mm
			Rugueux tourné	-0/+3 mm
	Epaisseur : 120-800	Forgé à chaud	Noir	-0/+8 mm
	Largeur : 120-1500		Rugueux usiné	-0/+3 mm

[6]

Remarque : la tolérance peut être personnalisée selon les demandes.

Tableau II.3: les compositions chimiques de « 4130 »

Eléments	% mini	% max
Carbone	0.28	0.33
Silicium	0.15	0.35
Magnésium	0.4	0.6
Phosphore		0.035
Soufre		0.04
Chrome	0.8	1.1
Molybdène	0.15	0.20
Fer	Le reste	

Tableau II.4: Acier 4130 propriété physique

Densité (g/cm ³)	7.85
Point de fusion (°C)	1432
Coefficient de poisson (S.O)	0.285
Usinabilité (AISI 1212 comme usinabilité 100%)	70%
Limite de traction (N/mm ²)	560
Conductivité thermique (W/m.k)	42.7
Module de tension	29
Limite d'élasticité (N/mm ²)	460
Module d'élasticité (N/mm ²)	205000
Module de cisaillement (N/mm ²)	80000
Masse volumique (kg/m ³)	7850
Module de Yong	210

III.1.2 L'acier doux C10 1.0301 (acier ordinaire) :

Acier non allier pour emplois généraux, est un acier ordinaire avec une teneur en carbone nominale de 0,10%. C'est un acier relativement peu résistant mais il peut être trempé et devenue résistance.

Les aciers à faible teneur en carbone, tels que C10, sont utilisés pour des applications telles que les attaches à tête froide et les boulons

La relaxation des contraintes pour éliminer les contraintes d'usinage doit être effectuée par chauffage à environ 540 ° C, maintien pendant 1 à 2 heures à la chaleur, suivi d'un refroidissement à l'air. Cette opération est effectuée pour réduire la distorsion lors du traitement thermique. Formage à chaud à une température qui varie entre 950°C et 1200°C.

L'acier 1.0301 est un acier exposé à la rouille sans protection à cause de son carbone ordinaire.

Il s'agit d'un acier au carbone ordinaire et n'a aucune résistance à la corrosion. Il rouillera à moins d'être protégé .L'acier C10 1.0301 peut être soudé par toutes les techniques de soudage standard. [6]

Chapitre III

Tableau II.5: CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Epaisseur mm	Laminé + écrouîté galeté (+SH)		Etiré à froid (+C)		
	dureté HB	Rm (MPa)	Rp _{0,2} valeur minimale (MPa)	Rm (MPa)	A ₅ % valeur minimale
≥5≤10			350	460 - 760	8
>10≤16			300	430 - 730	9
>16≤40	92 - 163	310 - 550	250	400 - 700	10
>40≤63	92 - 163	310 - 550	200	350 - 640	12
>63≤100	92 - 163	310 - 550	180	320 - 580	12

Remarque : Etat de fourniture est brut de laminage.

Tableau II.6: Propriétés physique à température ambiante

Module d'élasticité (KN/mm ²)	210
Densité (g/cm ³)	7.85
Conductivité thermique (W/m.k)	58.6
Résistance électrique (Ohm. mm ² /m)	0.11
Conductivité thermique (W/m.k)	14
Coefficient de poisson (S.O)	0.28
Limite élasticité (N/mm ²)	360
Limite de traction N/mm ²)	500
Coefficient de dilatation thermique (k)	1.1 ^e -05
Module de cisaillement (N/mm ²)	79000
Point de fusion (°c)	1482
Module de Yong	210

Tableau II.7: composition chimique

Eléments	% mini	% maxi
C carbone	0.07	0.13
Si silicium		0.40
Mn manganèse	0.30	0.60
P phosphore		0.45
S soufre		0.45
Fe fer	Le reste	

Chapitre III

III.1.3 Justification de choix d'acier :

Tableau II.8: comparaison de caractéristique

	Acier 1 (4130)	Acier 2 (C10)
Module d'élasticité (KN/mm ²)	205	210
Coefficient de poisson (S.O)	0.285	0.28
Limite élastique (N/mm ²)	460	360
Limite de traction N/mm ²)	560	500
Module de cisaillement (N/mm ²)	80000	79000
Point de fusion (°c)	1432	1482

D'après les l'analyse faites des deux tableaux entre les deux aciers la comparaison a été fait en comparant les paramètres suivant :

- La limite élastique
- Limite de traction
- Module de cisaillement

En les comparant notre choix se porte sur l'acier 1 (4130) car il est supérieur sur tous les points.

III.2 Les coefficients de sécurité :

Les coefficients de sécurité sont définis par les « règles de l'art » pour chaque domaine, éventuellement codifié dans des normes. S'il sert à diviser la résistance théorique, il est supérieur ou égal à 1, et est d'autant plus élevé que le système est mal défini, que l'environnement est mal maîtrisé.

Pour le calcul :

- soit on l'utilise avant le calcul de dimensionnement :
 - en multipliant la charge en fonctionnement par s ,
 - en divisant la charge maximale admissible par s ;
- soit on l'utilise après le calcul, en multipliant ou en divisant le résultat dans le sens d'une plus grande sécurité.

Chapitre III

Si l'on note R la résistance du système et S (*stress*) les sollicitations auxquelles il est soumis, la condition de validation dit « à l'état limite ultime » (ELU) s'écrit. [7]

Coefficients de sécurité	
Coefficient de sécurité (s)	Conditions générale de calculs (sauf réglementation particulière)
1,5 à 2	Cas exceptionnels de grande légèreté. Hypothèse de charges surévaluées.
2 à 3	Construction où l'on cherche la légèreté (aviation). Hypothèse de calcul la plus défavorable (charpente avec vent ou neige, engrenages avec une seule dent en prise...).
3 à 4	Bonne construction, calculs soignés, haubans fixes.
4 à 5	Construction courante (légers efforts dynamiques non pris en compte. Treuils.)
5 à 8	Calculs sommaires, efforts difficiles à évaluer (cas de chocs, mouvements alternatifs, appareils de levage, manutention).
8 à 10	Matériaux non homogènes. Chocs, élingue de levage.
10 à 15	Chocs très importants, très mal connus (presse). Ascenseurs.

III.2 La méthodologie de travail :

Après avoir modélisé la pièce numériquement et fait des simulations dessus pour faire un choix judicieux du matériau pour avoir une pièce qui dure dans le temps et qui sera fonctionnel en passe à la fabrication de celle-ci et pour ça il faut suivre une méthodologie :

- Tout d'abord on prend notre plaque d'acier de 8 millimètres et on fait une coupe de Surface (58464 mm^2), dimension $224\text{mm} \times 261\text{mm}$.
- On utilise le découpe plasma pour découper notre tôle avec précision, une pièce à la surface de (227480 mm^2)
- On la fait chauffer jusqu'au rouge.
- Après on la pose entre les deux matrices.
- On fait descendre la matrice supérieure qui est sur la presse.
- Après avoir presser la matrice lune contre l'autre et que le métal à épouser les formes des gravures.
- On fait décoller les deux matrices pour faire sortir la pièce.
- On débarrasse la pièce des impuretés.

Chapitre III

III.3 Simulation :

Modèle de soc :

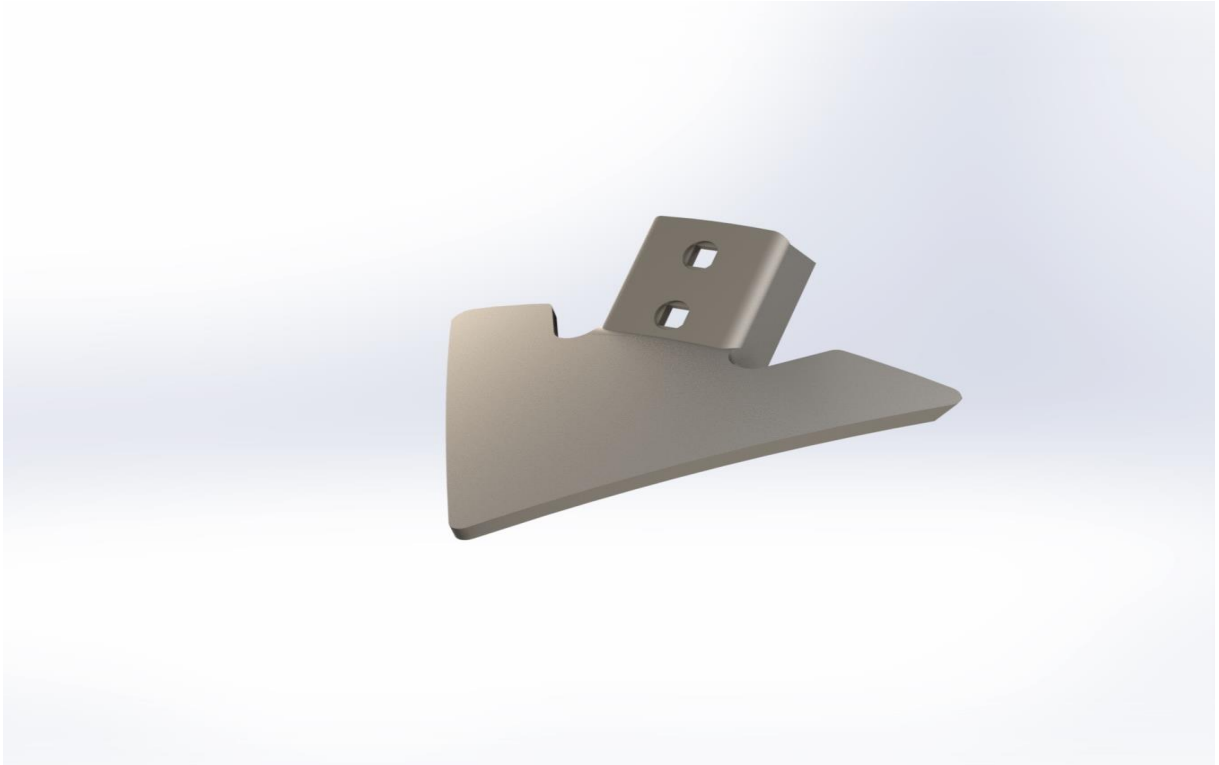


Fig III.1 : la pièce réalisée

III.5 La méthode de matriçage :

Après avoir fait une coupe de la plaque qui a les caractéristiques prédéfinies avec les dimensions de la pièce on procède au matriçage après une chauffe de notre pièce de 30% de sa température de fusion qui est d'environ 430°C.

On procède au matriçage qui est représenté dans la figure suivante :

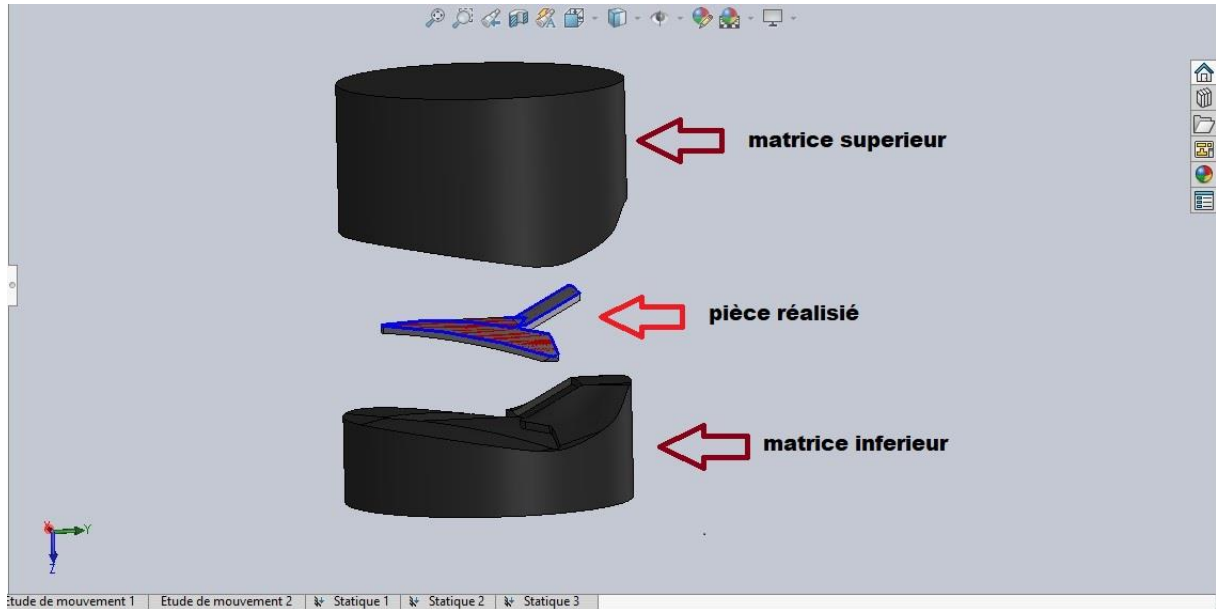


Fig III.3 : matriçage de la pièce

III.5 Appliqués quelques forces pour tester résistance :

Pour obtenir le meilleur acier pour la fabrication, on applique des forces pour tester la résistance des matériaux.

Chapitre III

III.5.1 Acier (4130) :

Appliquer une force de 3000 (N/mm²) :

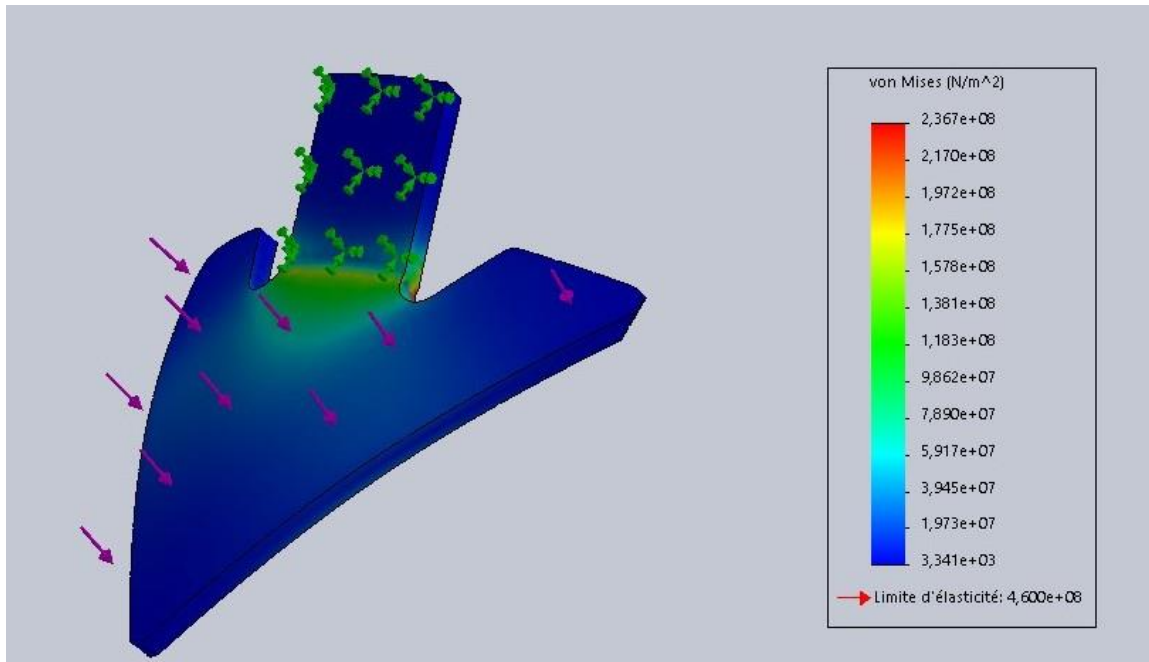


Fig III.4: force appliquée 3000 (N/mm²)

On remarque que la pièce garde sa propriété sous cette force.

Déplacement :

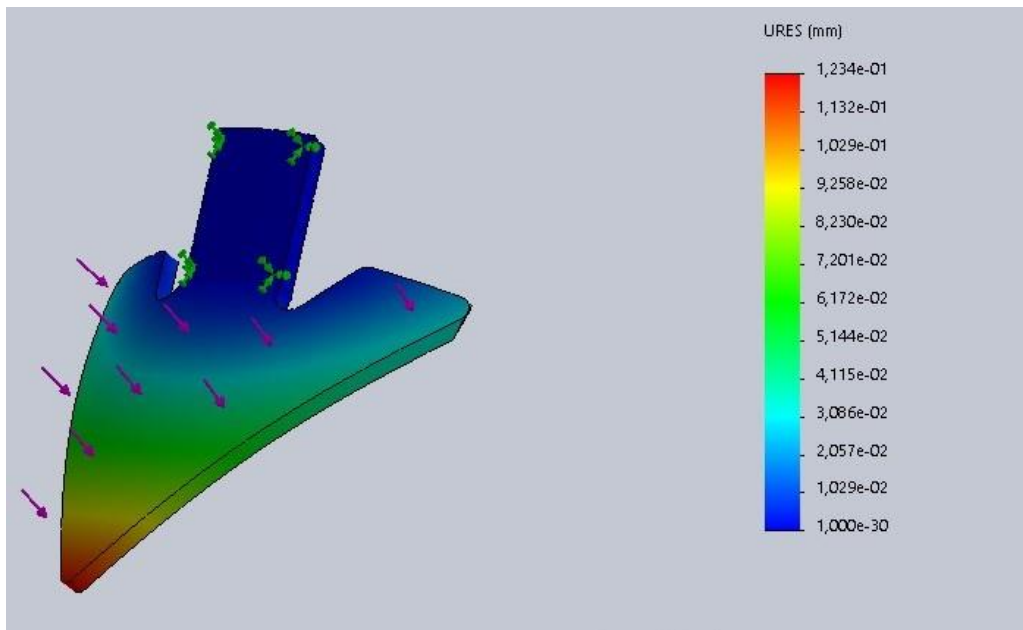


Fig III.5: le déplacement sur la force 3 KN/mm²

Appliquée une force de 5000 N/mm^2 :

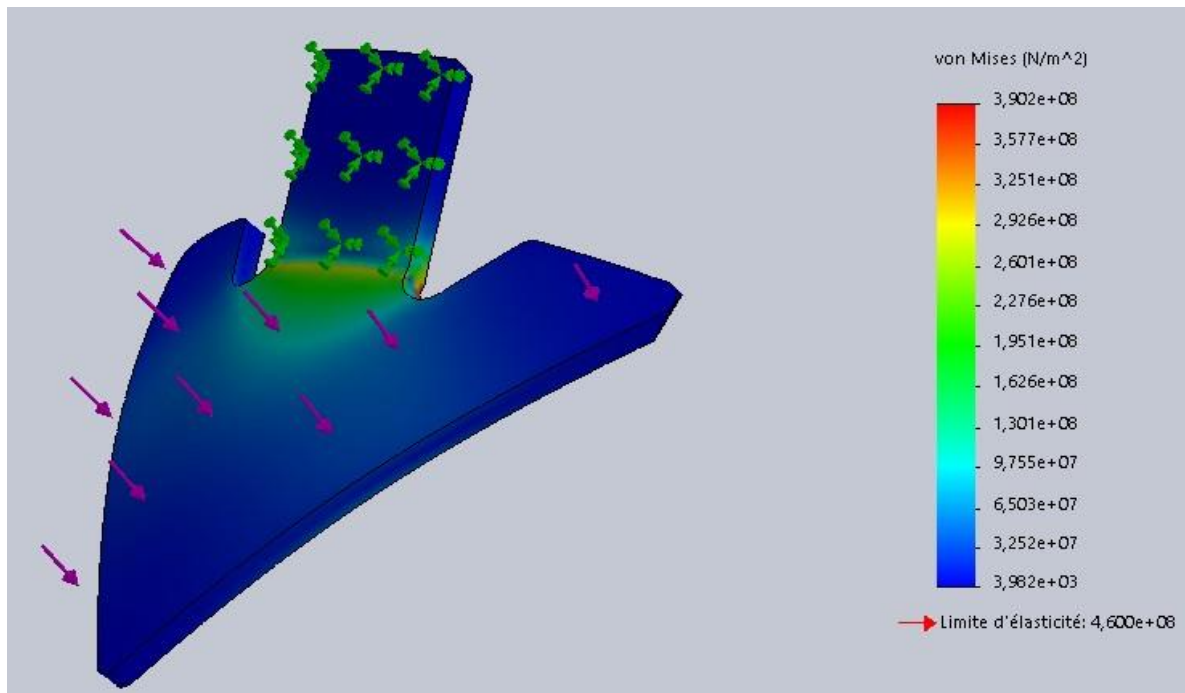


Fig III.6: force appliquée 5000 N/mm^2

On remarque que la pièce garde sa propriété sous cette force.

Déplacement :

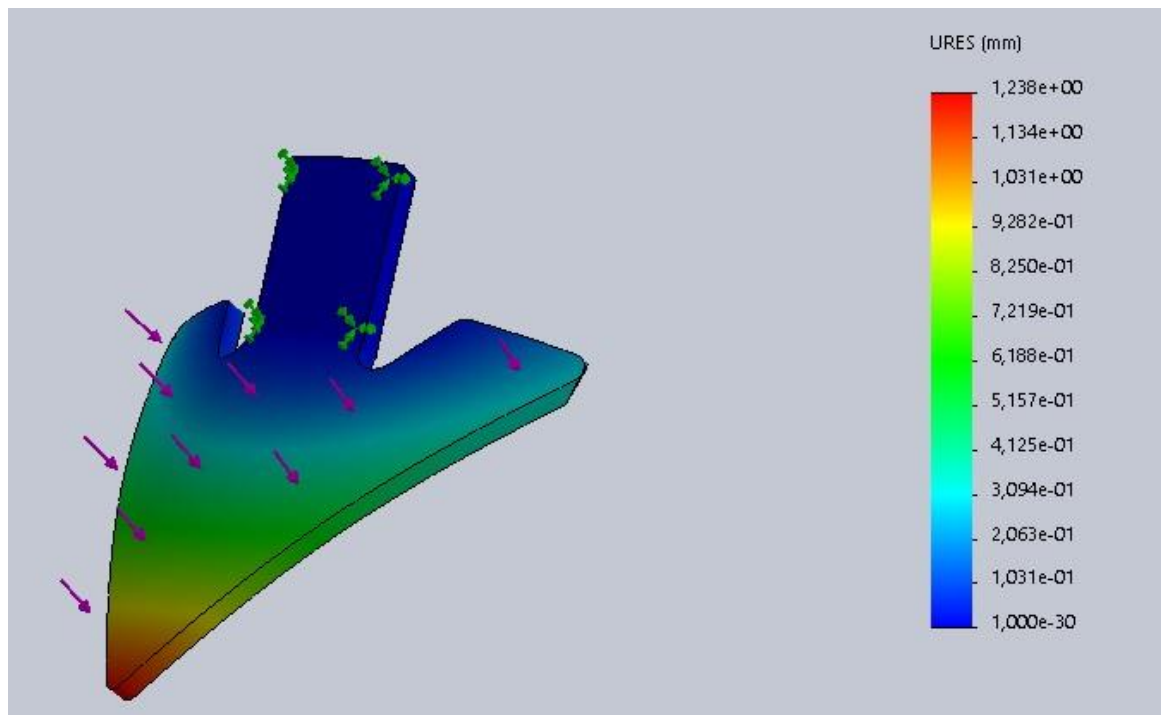


Fig III.7: déplacement sur la force 5 KN/mm^2

Appliquée une force de 10000 N/mm^2 :

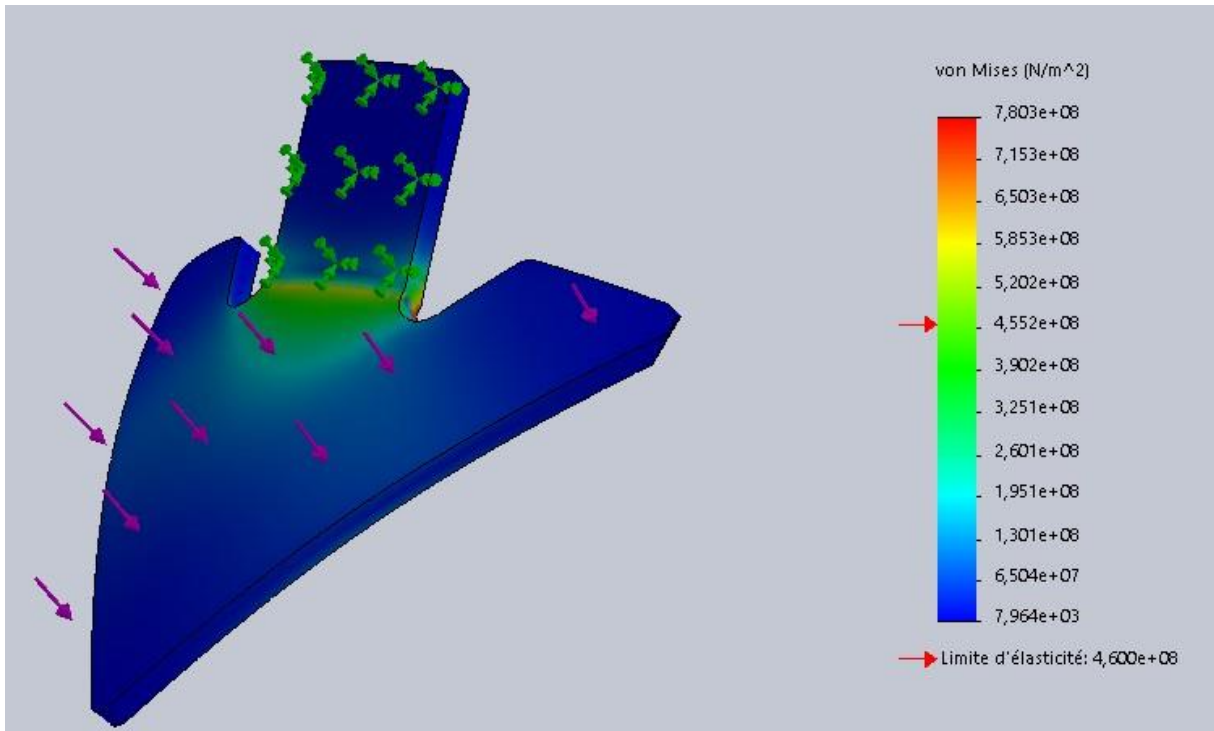


Fig III.8: force appliquée 10000 N/mm^2

On remarque que la pièce garde sa propriété sous cette force.

Déplacement :

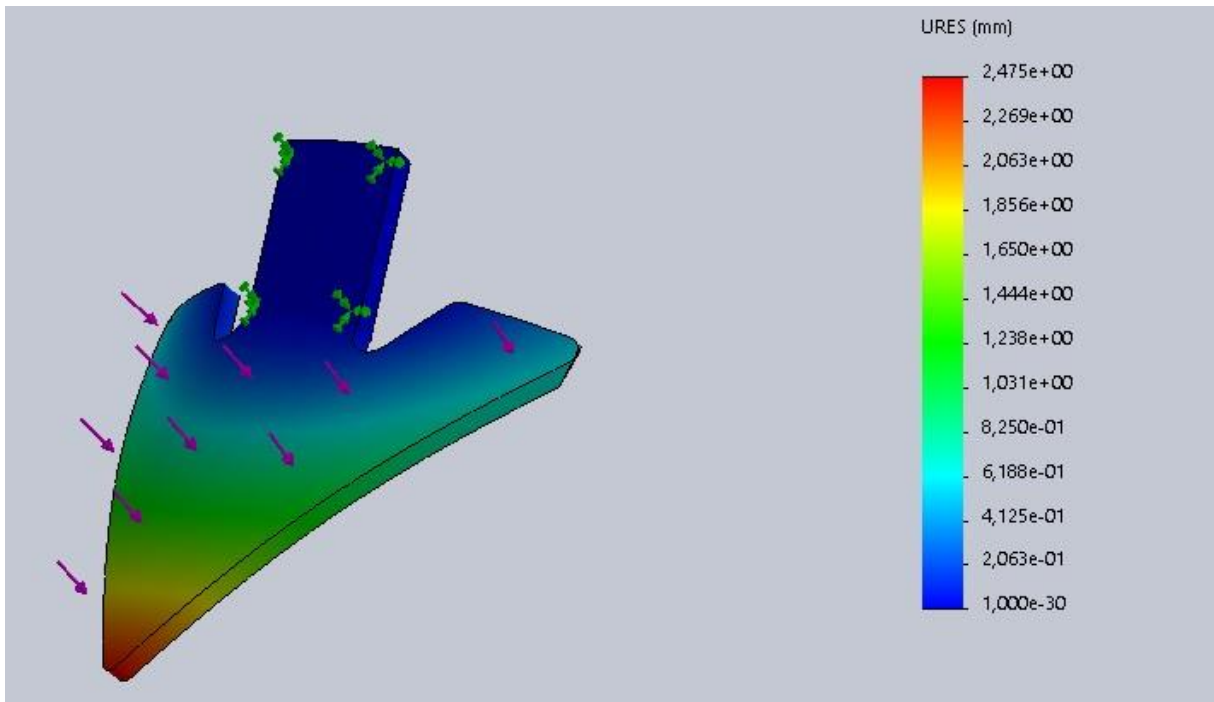


Fig III.9: déplacement sur la force 10 KN/mm^2

III.5.2 Acier (C10 1.301) :

Appliquer une force de 3000 (N/mm²) :

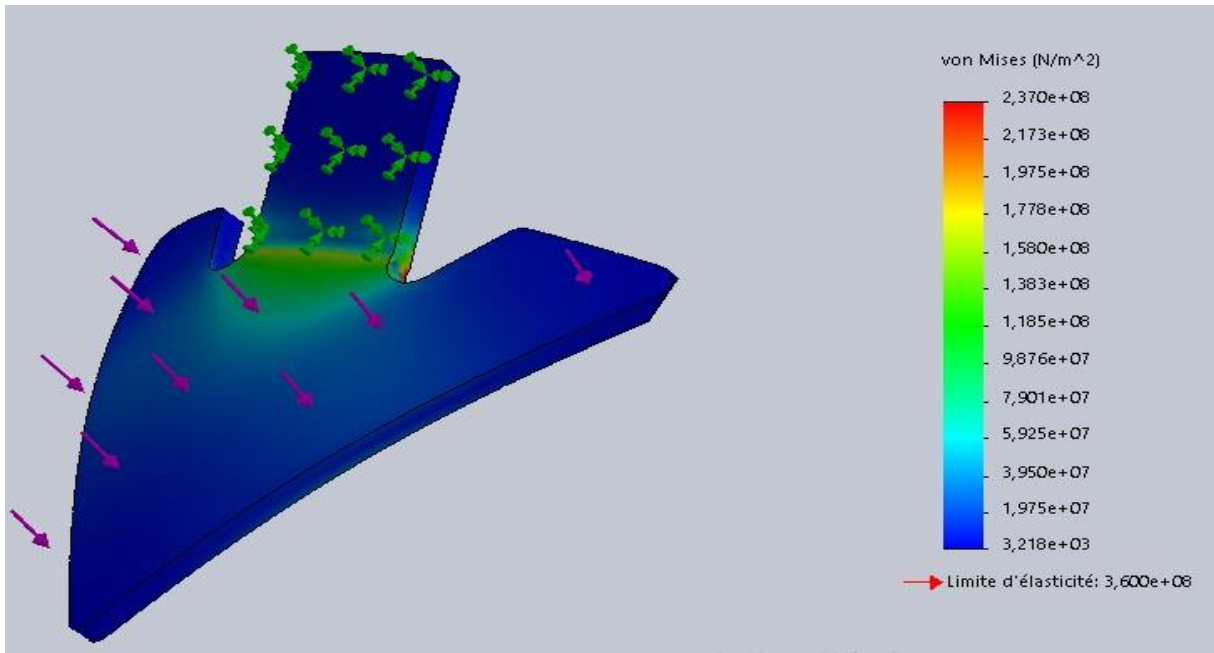


Fig III.10: force appliquée 3000 (N/mm²)

On remarque que la pièce garde sa propriété sous cette force.

Déplacement :

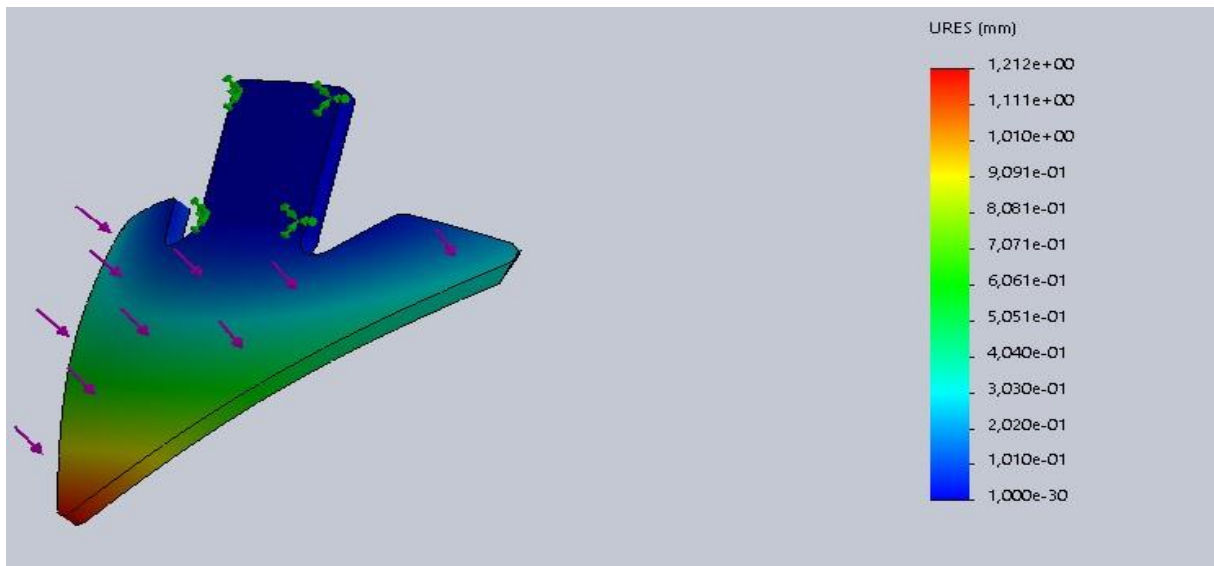


Fig III.11: déplacement sur la force 3 KN/mm²

Appliquée une force de 5000 N/mm^2 :

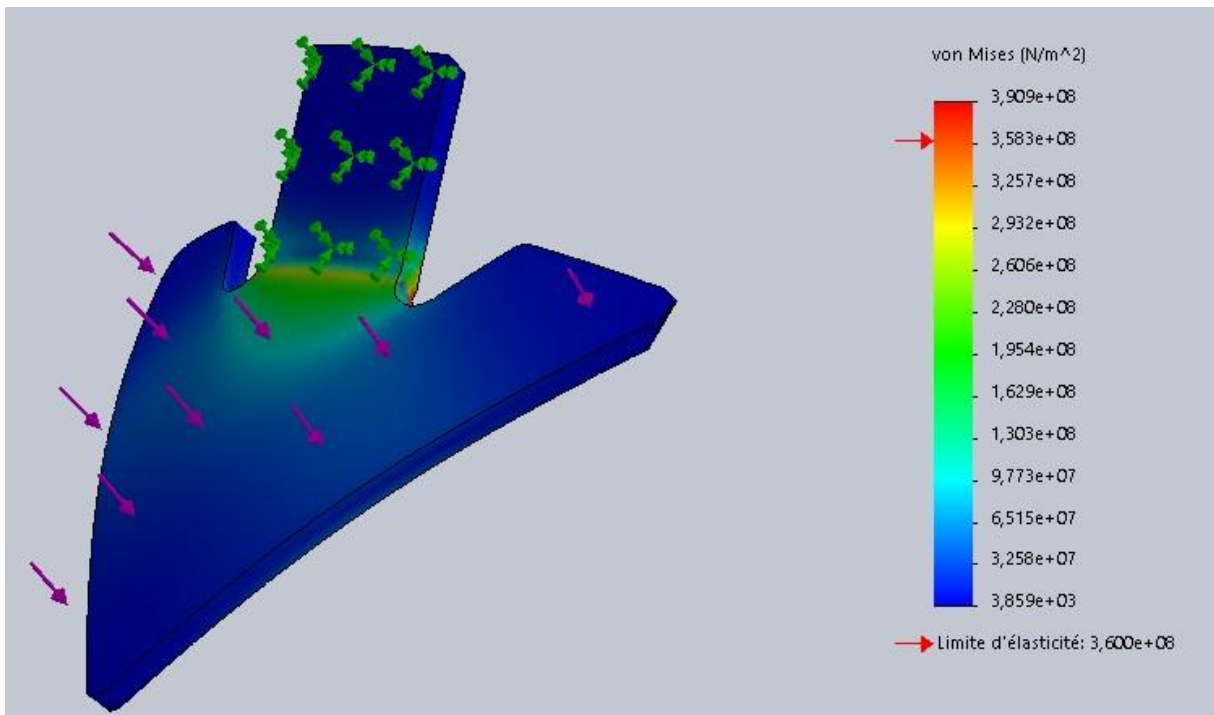


Fig III.12: force appliquée $5000 \text{ (N/mm}^2)$

On remarque que la pièce ne résiste pas sous cette force.

Déplacement :

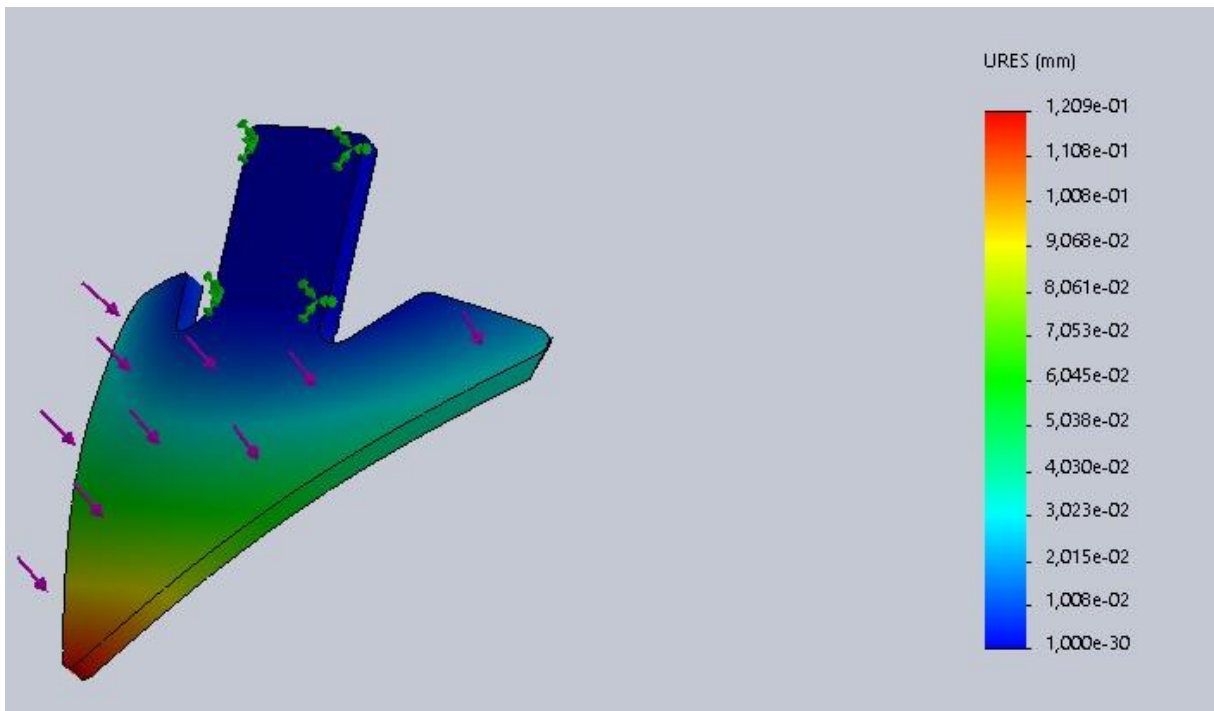


Fig III.13: déplacement sur la force 5 KN/mm^2

Appliquée une force de 10000 N/mm^2 :

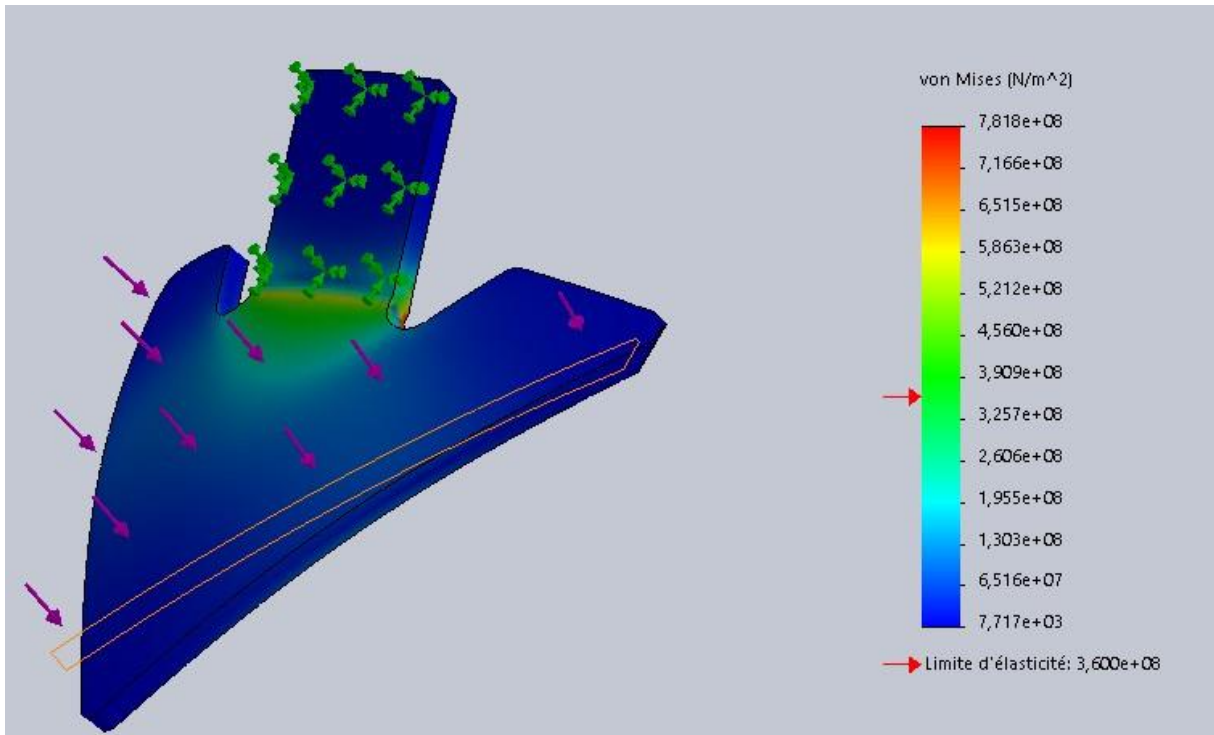


Fig III.14: force appliquée $10000 \text{ (N/mm}^2)$

On remarque que la pièce ne résiste pas sous cette force.

Déplacement :

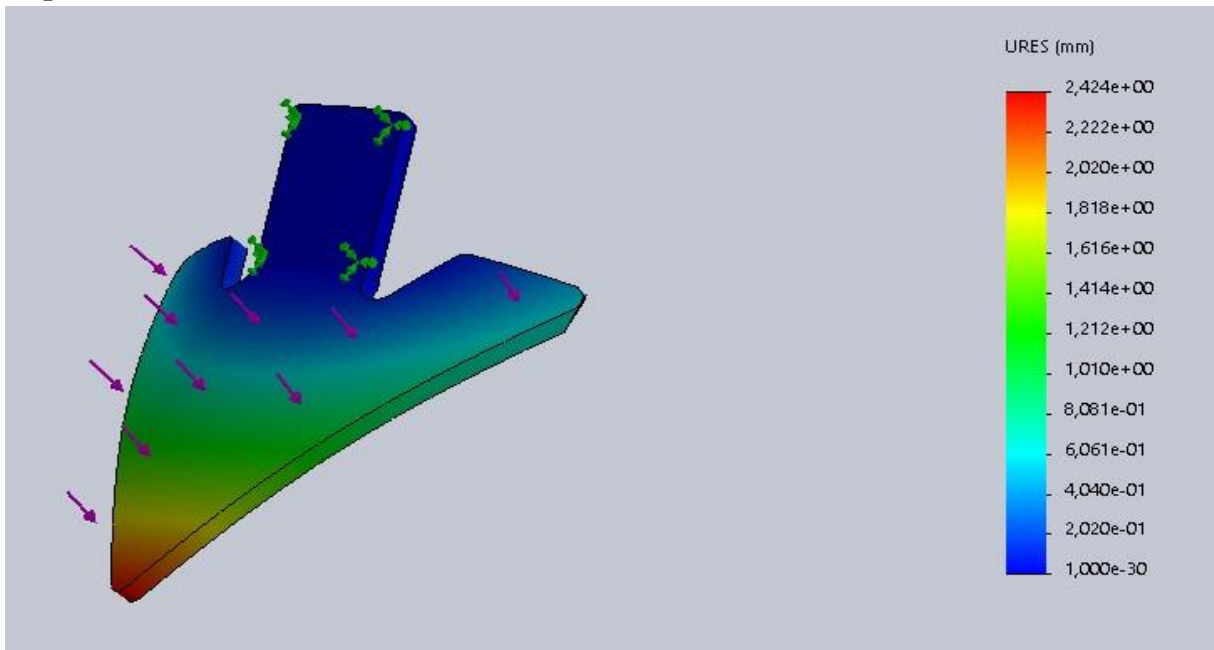
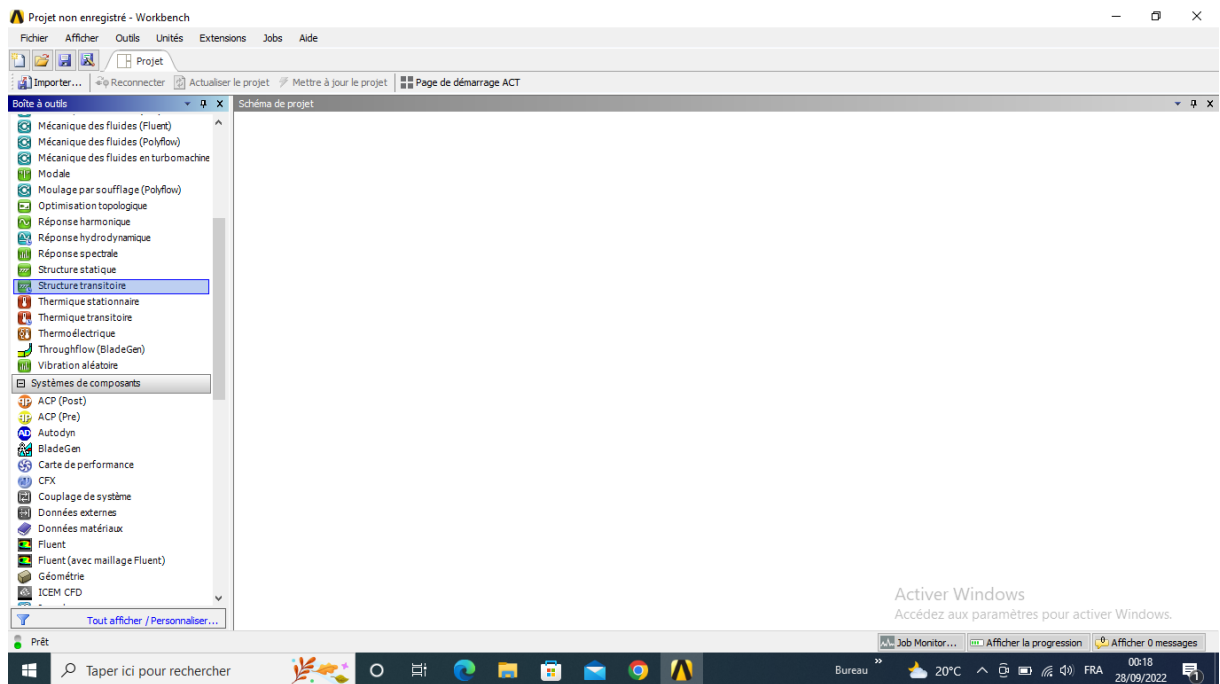


Fig III.15: déplacement sur la force 10 KN/mm^2

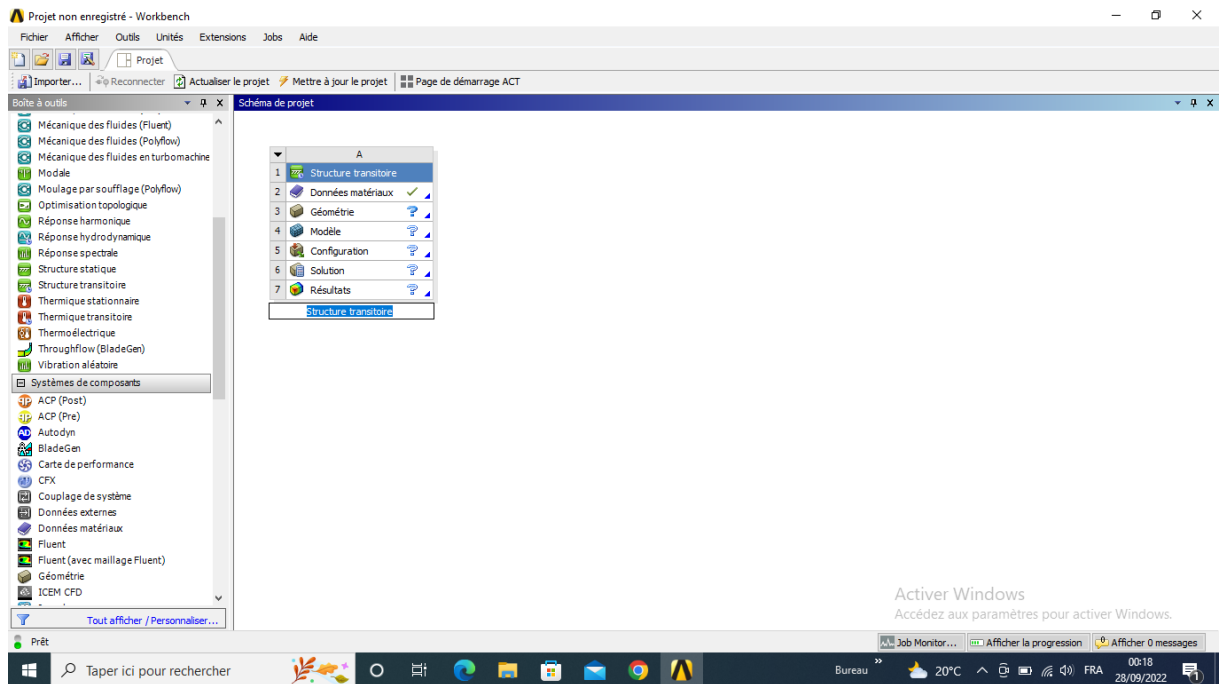
Chapitre III

III.6 Les étapes d'insertion de la pièce sur le ANSYS :

III.6.1 Structure transitoire :



III.6.2 Donner un matériau :



Chapitre III

The screenshot displays the SolidWorks interface with the 'Propriétés de Ligne d'arborescence 3 : Acier standard' table open. The table lists various material properties and their values.

Propriété	Valeur	Unité
Table		
Masse volumique	7850	kg m ⁻³
Coefficient isotrope sécant de dilatation thermique	1,2E-05	C ⁻¹
Elasticité isotrope		
Dérivé de		
Module de Young	2E+11	Pa
Coefficient de Poisson	0,3	
Module d'élasticité	1,6667E+11	Pa
Module de cisaillement	7,6923E+10	Pa
Paramètres de fatigue basés sur les déformations		
Afficher le type de courbe	Basé sur les déform...	
Coefficient de résistance	9,2E+08	Pa
Exposant de résistance	-0,106	

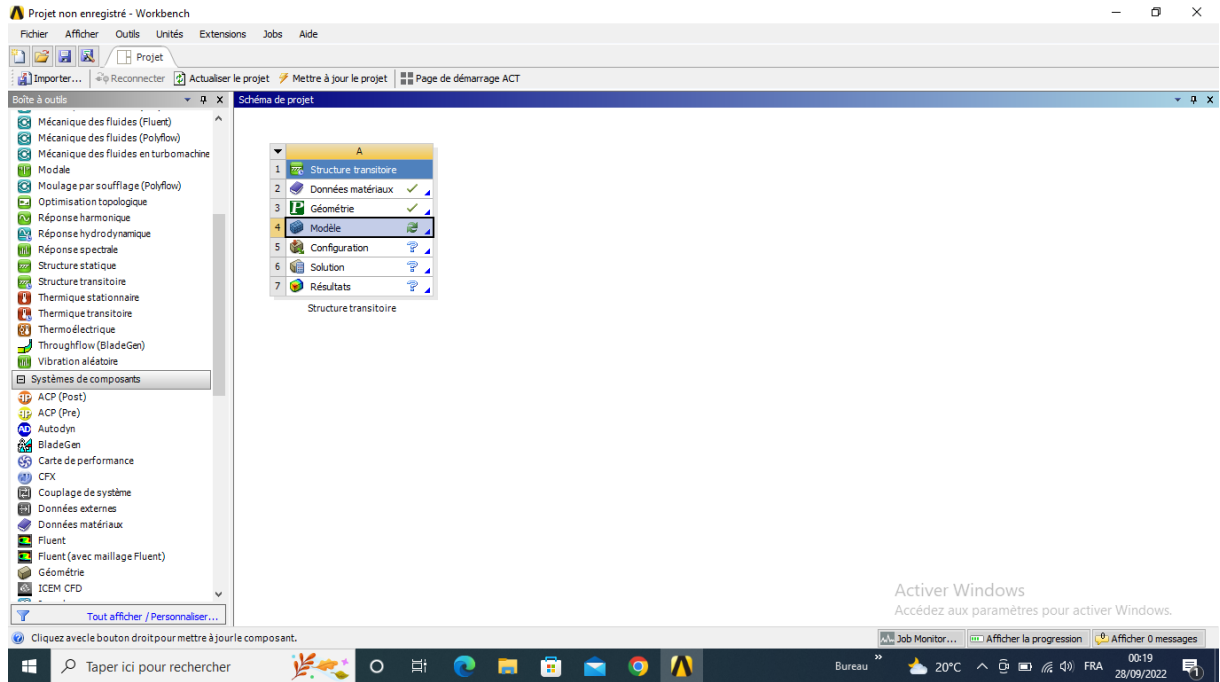
III.6.3 Importer la géométrie depuis le SolidWorks :

The screenshot shows the SolidWorks interface with the 'Importer la géométrie' context menu open over the 'Géométrie' component in the project tree. The menu options include:

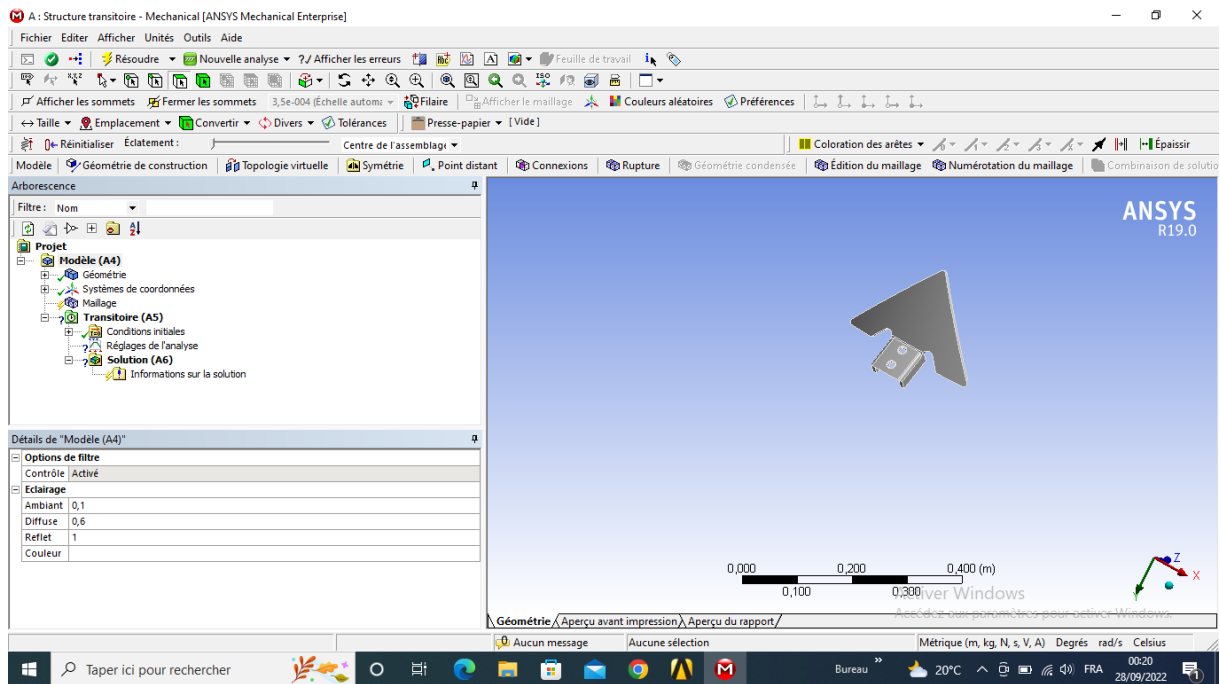
- Nouvelle géométrie SpaceClaim...
- Nouvelle géométrie DesignModeler...
- Importer la géométrie
- Parcourir...
- Dupliquer
- Transférer les données depuis un nouveau
- Transférer les données vers un nouveau
- Mettre à jour
- Mettre à jour les composants amont
- Actualiser
- Réinitialiser
- Renommer
- Propriétés
- Aide rapide
- Ajouter une note

Chapitre III

III.6.4 Modèle :



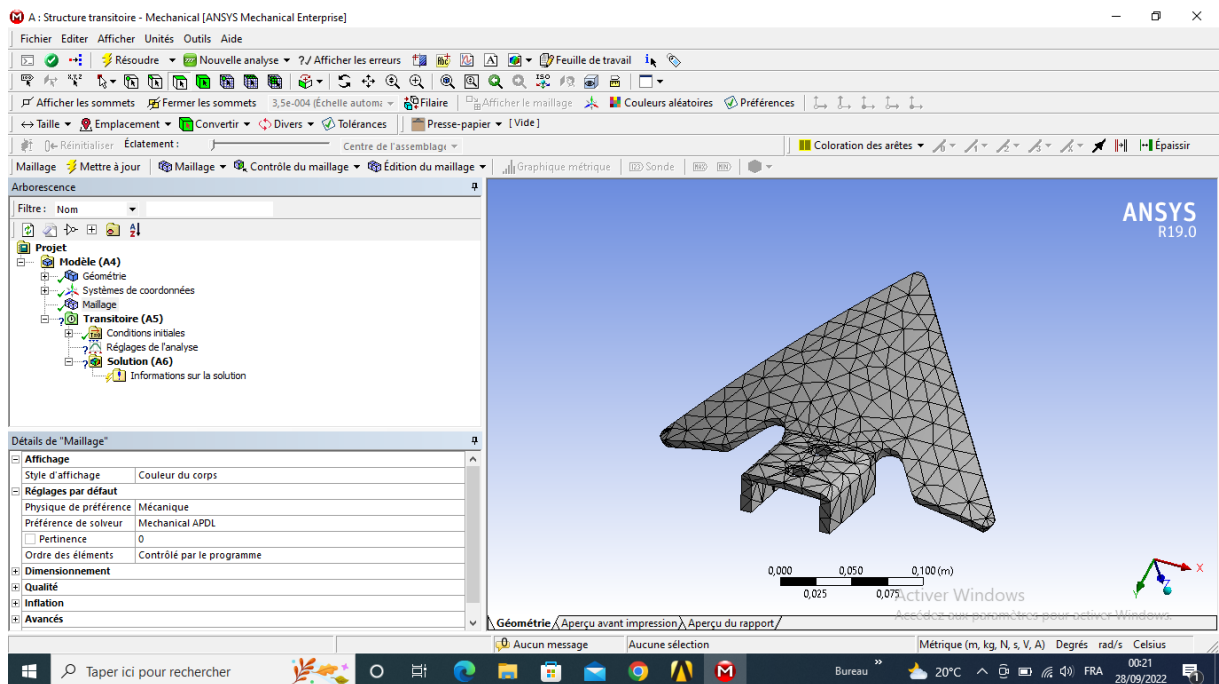
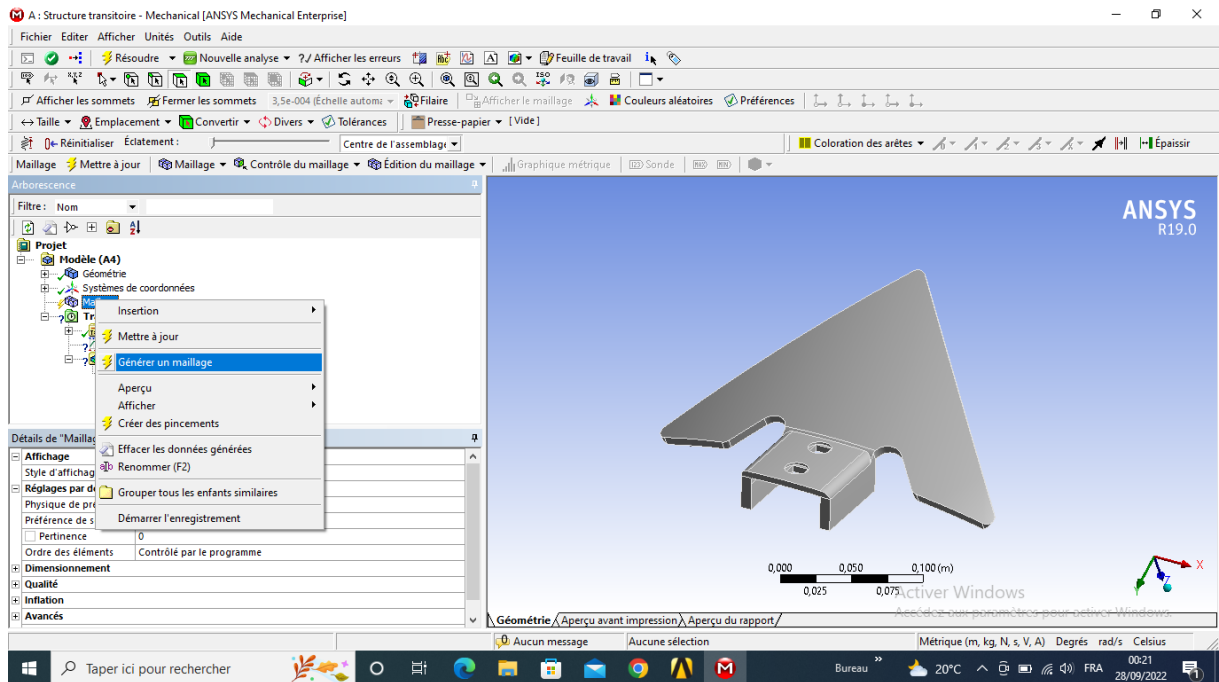
III.6.5 Pièce réalisée :



Chapitre III

III.6.6 Maillage de soc :

Gérer un maillage automatique.



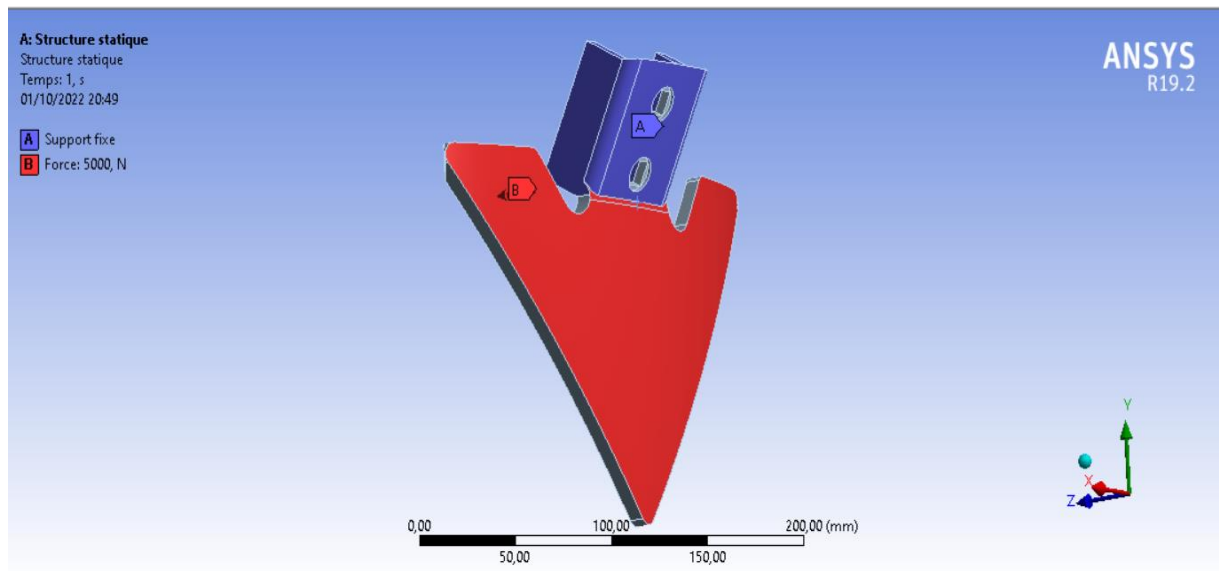
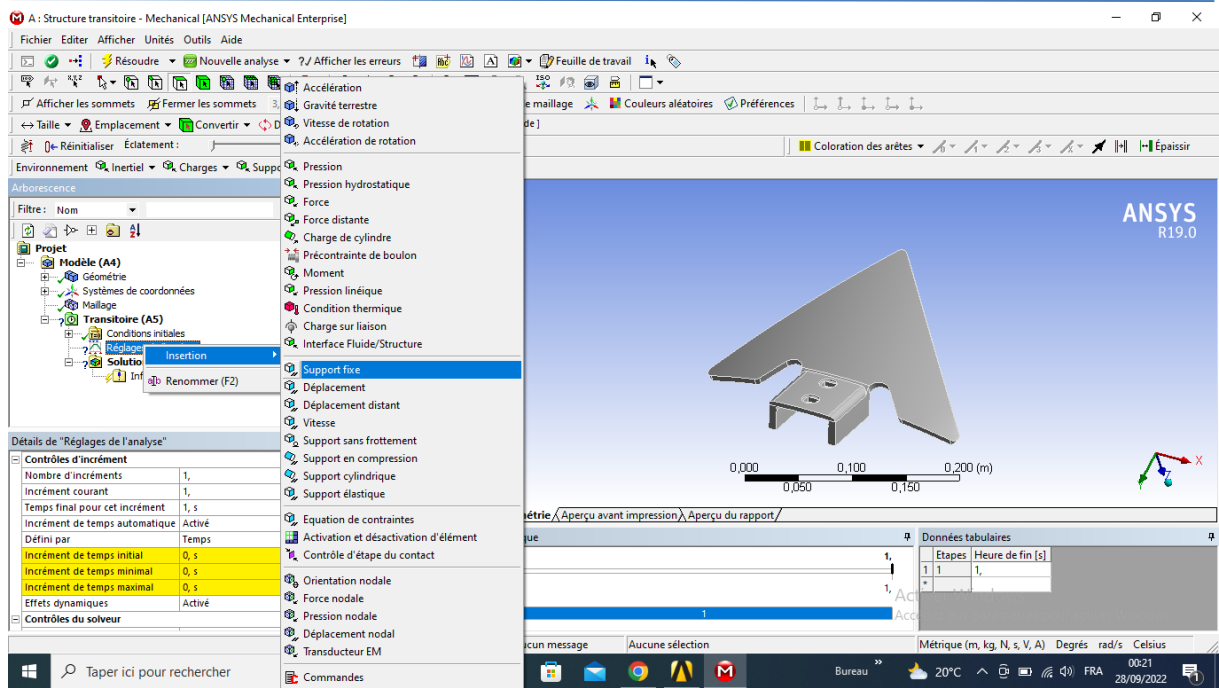
III.6.7 Solution :

Après régler l'analyse et sélectionner les parties fixes et appliquer une pression sur la pièce on trouve les solutions :

- **Fixation :**

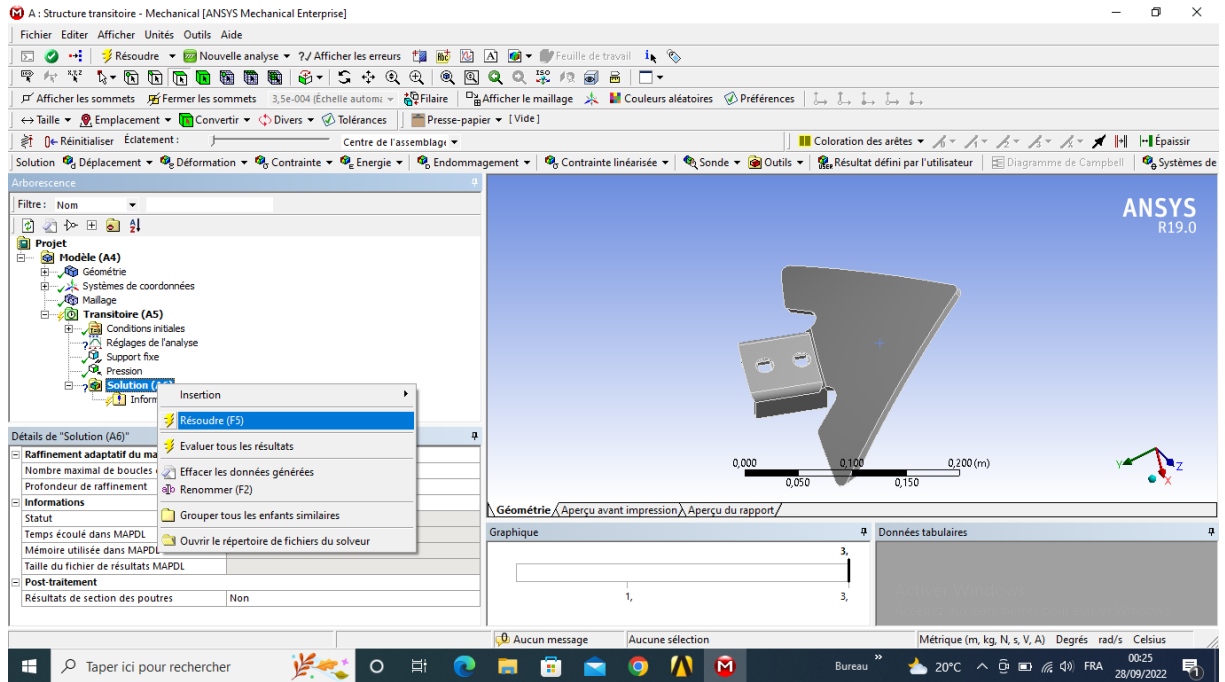
Donnés les conditions limite :

Chapitre III



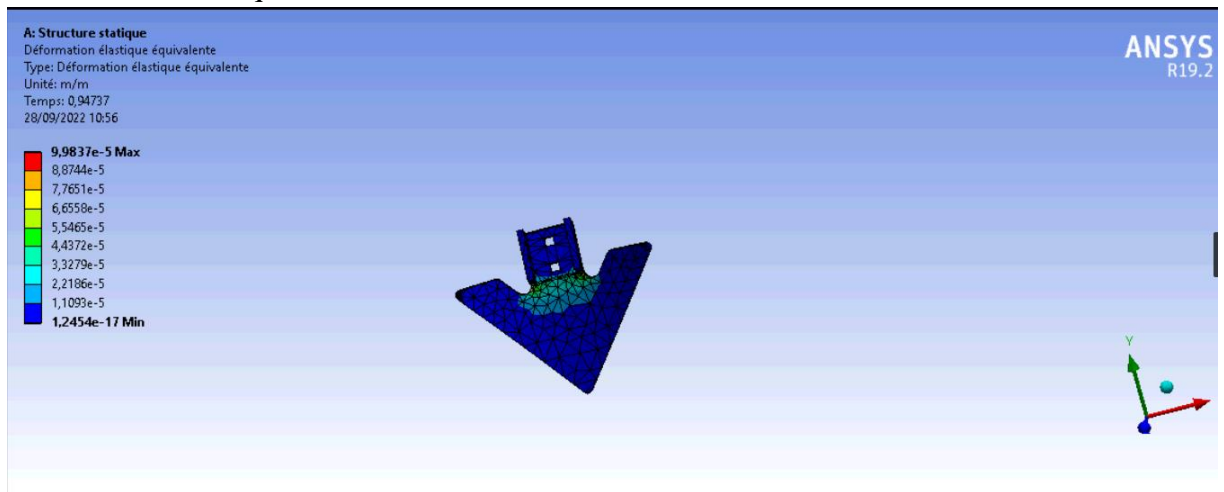
Chapitre III

- Résoudre :

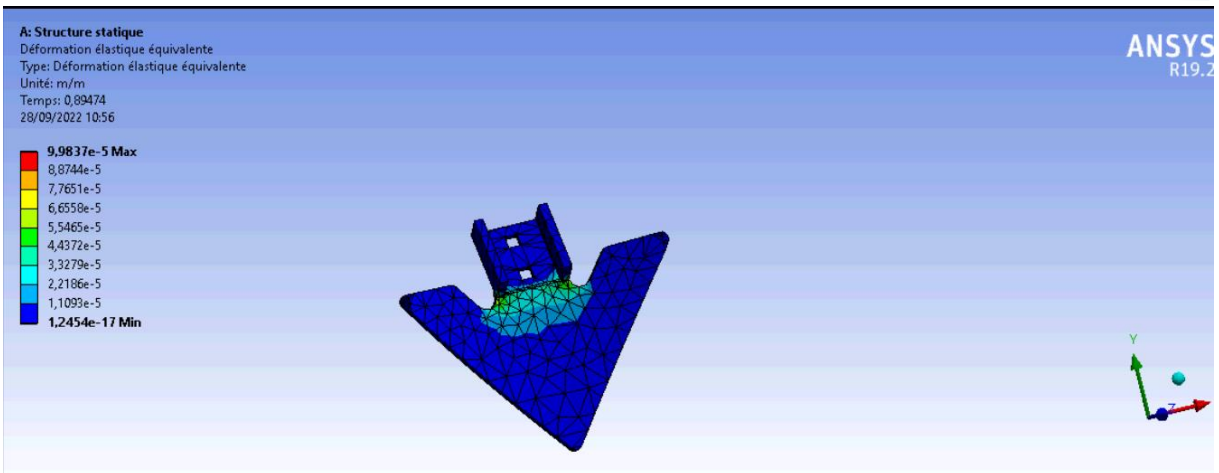


- La solution :

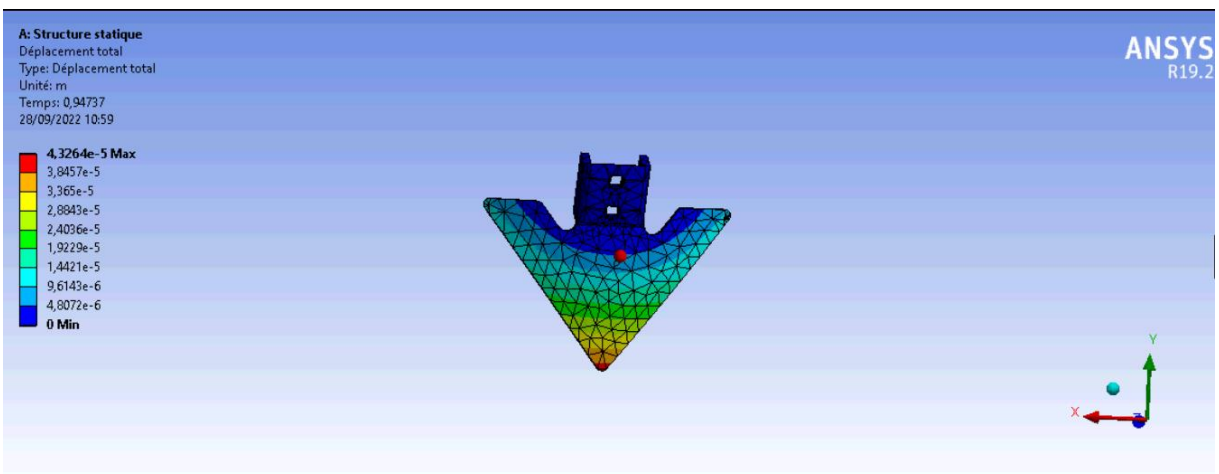
Déformation élastique :



Chapitre III



Déplacement total :



B: Structure transitoire - Mechanical [ANSYS Mechanical Enterprise]

Fichier Edit Afficher Unités Outils Aide

Résoudre Nouvelle analyse ?/ Afficher les erreurs Feuille de travail

Afficher les sommets Fermer les sommets 0 (Échelle automatique) Filaire Afficher le maillage Couleurs aléatoires Préférences

Taille Emplacement Convertir Divers Tolérances Presse-papier [Vide]

Réinitialiser Éclatement: Centre de l'assemblage Coloration des arêtes Épaisseur

Résultat 4,6e+002 Échelle aut. Sonde Affichage Corps d'application

Arborescence

Projet

- Modèle (B4)
 - Géométrie
 - Systèmes de coordonnées
 - Maillage
 - Transitoire (B5)
 - Conditions initiales
 - Réglages de l'analyse
 - Support fixe
 - Pression
 - Solution (B6)
 - Informations sur la solution
 - Déplacement total

Détails de "Déplacement total"

Champ d'application

Méthode de champ d'application	Sélection de géométrie
Géométrie	Tous les corps

Définition

Type	Déplacement total
Par	Temps
Temps d'affichage	Dernier
Calculer l'historique des temps	Oui
Identificateur	
Désactivé	Non

Résultats

B: Structure transitoire
 Déplacement total
 Type: Déplacement total
 Unité: m
 Temps: 0,68421
 28/09/2022 10:16

3,8381e-5 Max
 3,4116e-5
 2,9852e-5
 2,5587e-5
 2,1323e-5
 1,7058e-5
 1,2794e-5
 8,5291e-6
 4,2645e-6
 0 Min

Géométrie Aperçu avant impression Aperçu du rapport

Graphique

Animation 20 Séquences 2 Sec (Aut)

Temps [s]	Minimum [m]	Maximum [m]	Nodal moyen
1	0	3,8381e-005	5,1473e-006

Métrique (m, kg, N, s, V, A) Degrés rad/s Celsius

Aucun message Aucune sélection

Bureau 25°C 10:16 28/09/2022

Chapitre III

III.6.8 Spécification de la pièce :

Tableau III.1 : spécification de la pièce

Boîte englobante	
Longueur suivant X	262,31 mm
Longueur suivant Y	223,62 mm
Longueur suivant Z	63,611 mm
Propriétés	
Volume	2,2748e+005 mm ³
Masse	1,7857 kg
Valeur du facteur d'échelle	1,
Statistiques	
Corps	1
Corps actifs	1
Nœuds	3494
Éléments	1720

III.7 Interprétation :

La limite de déformation de la pièce :

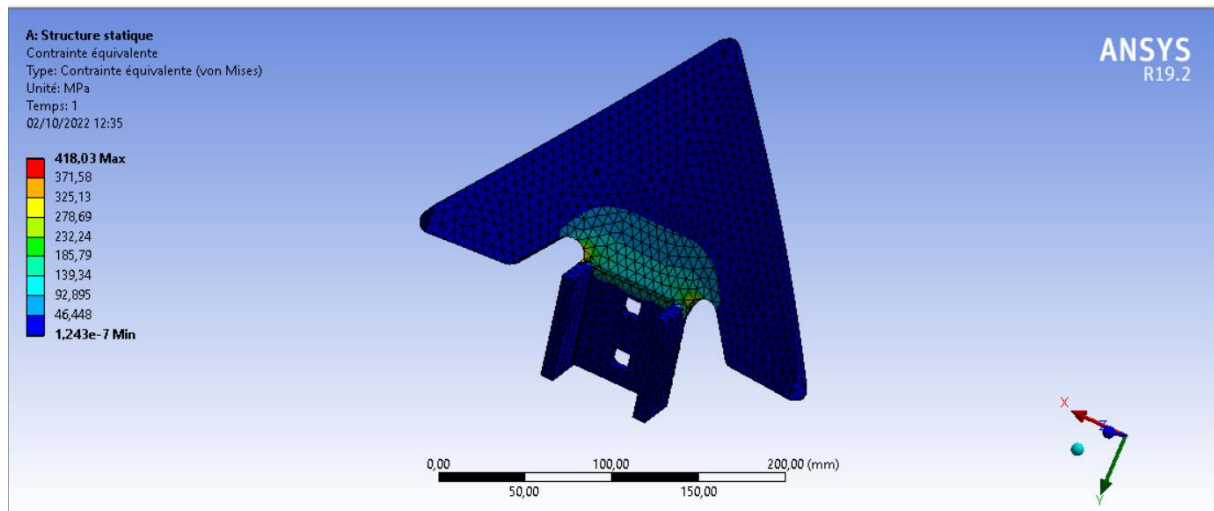
$$\sigma \leq \sigma_{adm}$$

D'après les calculs dans l'ANSYS $\sigma_{Max} = 418.03 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

$$\sigma_{adm} = Re/S$$

$$\sigma = 460 / 1.1 = 418.1818 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

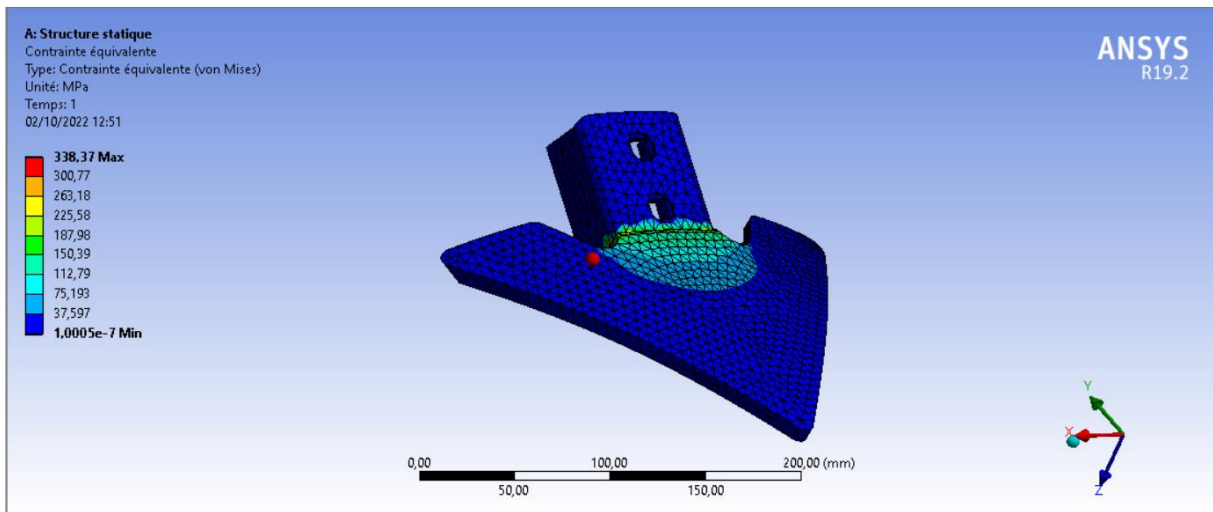
Donc la pièce va résister jusqu'au $418.1818 \text{ (N/mm}^2\text{)}$: car $418.03 \leq 418.1818$



Chapitre III

Application de la pression de la terre sur la pièce :

Après la recherche sur les types de terre et la pression qu'il peut exercer sur la pièce, on a trouvé que $P=0.15 \text{ MPa}$



Après avoir rentré la valeur de la pression appliquée par la terre sur la pièce, on trouve que la pièce va résister à cette pression.

$$\sigma \leq \sigma_{adm}$$

D'après les calculs dans l'ANSYS $\sigma_{Max} = 338.37 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

$$\sigma_{adm} = Re/S$$

$$\sigma = 460 / 1.1 = 418.1818 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Donc la pièce va résister jusqu'au $418.1818 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

$$338.37 \leq 418.1818$$

Chapitre III

Conclusion :

Le choix de l'acier de notre pièce se porte sur l'acier 4130 que l'acier c 10 après l'étude la force appliquer de 10000N sur la pièce et obtenue les déformations Von Mises et déplacements on a conclu que l'acier C10 ne résiste pas à la force exercer donc on a choisis l'acier 4130.

Après ce choix on a rentré la pièce sur ANSYS qui a permet de faire des simulations sur le soc triangulaire pour obtenir les déformations et déplacements.

On a comparé les résultats des simulations avec σ_{adm} .

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans l'industrie de l'agriculture le procédé de labourage a une grande importance pour répondre à la demande croissante pour cela la fabrication de bon outil de labourage comme le soc et primordial. Pour la fabrication du soc triangulaire on a opté pour le forgeage plus précisément le matriçage qui permet d'obtenir de meilleurs résultats avec une très bonne précision et permet d'obtenir une pièce avec une bonne résistance.

Au début notre thèse nous avons mené une étude sur le forgeage et ses principaux presses de forgeage ou il existe plusieurs types de forgeage tel que le matriçage que nous avons abordé dans le premier chapitre.

L'utilisation de la CAO a été très importante dans notre étude car elle nous a permis de faire le choix adéquat du matériau et faire des simulations dessus.

Pour les logiciels CAO on a fait le dessin technique sur le SolidWorks car il y'a plusieurs outils dessus qui permettent d'obtenir de bons résultats et on fait des simulations dessus pour bien choisir le matériau.

Après avoir choisi le matériau on a exporté notre pièce sur le logiciel ANSYS pour voir les différentes réactions de la pièce (déformation et déplacement).

Annexes :

La méthode de matriçage :

Le matriçage a pour but de façonner une pièce grâce à la force hydraulique.

Après avoir donné une préforme à Notre pièce par le procédé de découpage, on a opté pour la découpe plasma, on insert notre pièce après l'avoir chauffée (de 30% de sa température de fusion qui est d'environ 430°C) entre les deux matrice :

- **Inférieur** "qui est la partie fixe "
- **Supérieur** "qui est la partie mobile " qui exerce une force hydraulique sur la pièce.

Remarque : La force hydraulique appliquée sur la pièce est liée à la limite élastique d'acier

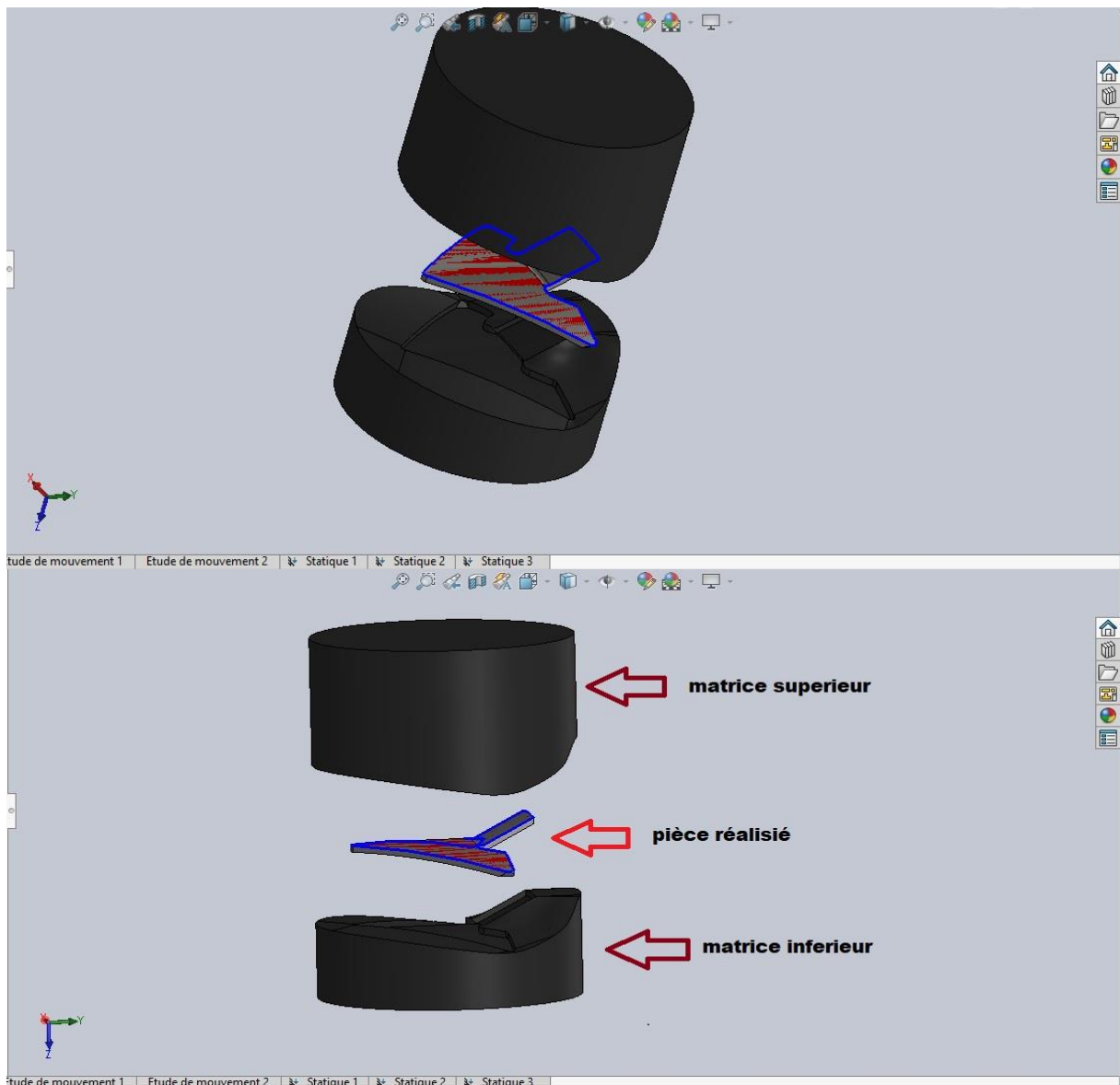


Fig III.3 : matriçage de la pièce.

L'acier utilisé dans la matrice (l'outil) :

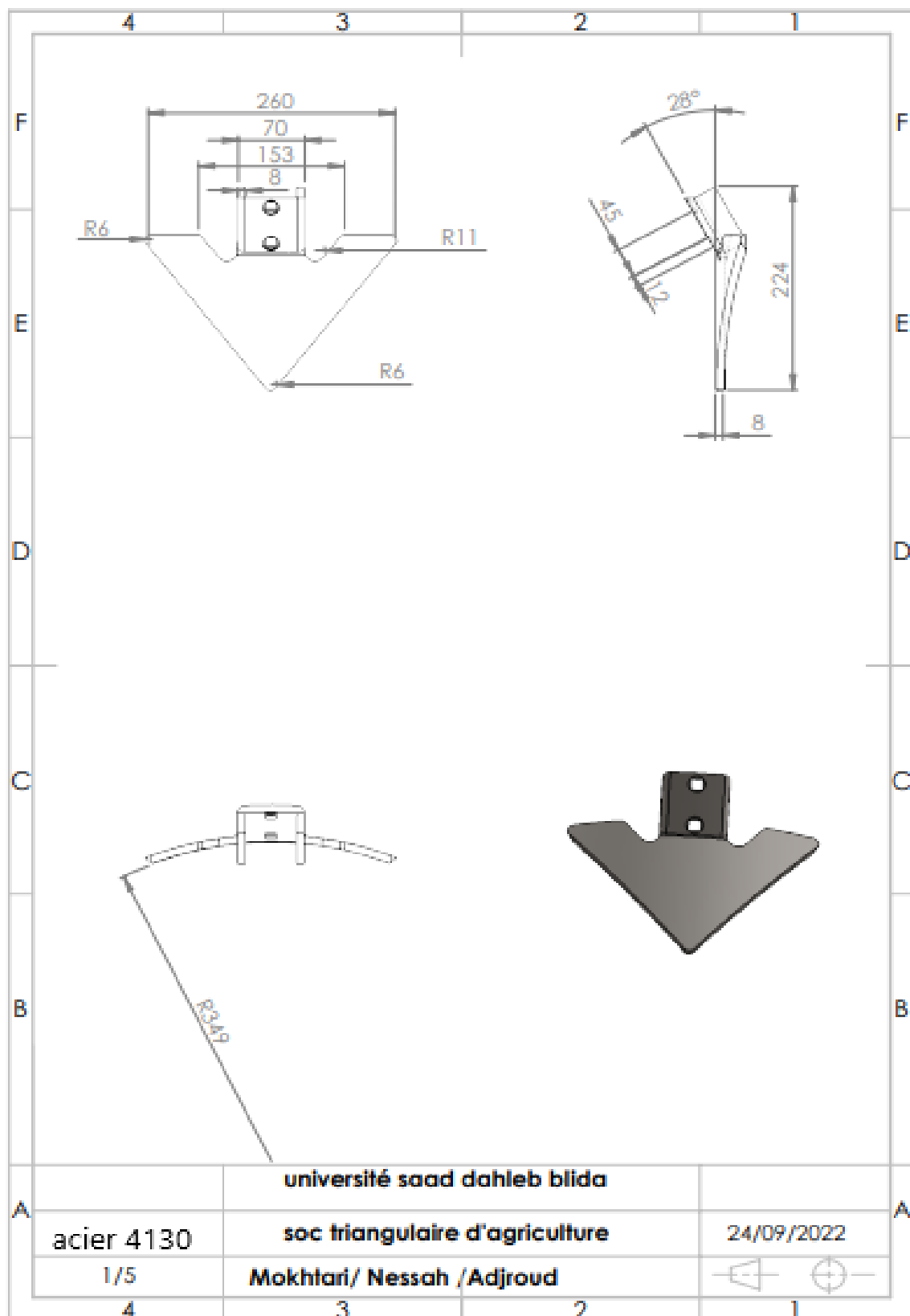
Il existe beaucoup de types d'acier avec des caractéristiques de résistance au travail à chaud (SMV3 / R6110 / TA2 / R2449), et pour notre travail en choisir l'acier « **R2449** » à 3% de molybdène et 19% chrome et 5.2 de O2 et 0.1 % de carbone.

Caractéristiques :

Superaliage base Nickel à durcissement structural présentant :

- Grande tenue à l'oxydation à chaud.
- Excellentes caractéristiques mécaniques jusqu'à des températures de 700 °C.

Dessin technique de Soc triangulaire :



Bibliographies:

- [1] « La conception des pièces de forge : du design à la simulation numérique » [archive], sur *MetalBlog*, 27 novembre 2017.
- [2] B. BOUROUGA, V. GOIZET, JP. BARDON, Le contact thermique pièce-outil iOS d'une opération. De forgeage à chaud: validation de l'hypothèse de résistance thermique de contact, l'influence de la loi de comportement de la pièce (2001), 44p
- [3] Presse hydraulique Source: Contributeurs: Cjp24, Dodoiste, Enguerrand VII, Syntex, Thielleux, Wanderer999, Xlory, Xofc, Zivax, 6 Modifications anonymes.
- [4] Ahmed Djebbar, Gabriel Gohau et Jean Rosmorduc, Pour l'histoire des sciences et des techniques, par Hachette et CNDP éditeurs, 2006, 160 pages (ISBN 2011708869 et 2240022159).
- [5] J.-L. Fanchon, Guide des sciences et technologies industrielles, Paris, Afnor, Nathan, 2010.
- [6] J. Barralis et G. Maeder, *Précis de métallurgie — Élaboration, structures-propriétés et normalisation*, Nathan/Afnor, 1991, p. 70-104, 125-127.
- [7] TonEPI.com espace pour ingénieur.