

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

N° :...../2022



DOMAINE : MECANIQUE  
FILIERE : GENIE MECANIQUE  
OPTION : FABRICATION  
MECANIQUE & PRODUCTION

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par: Marwane AIDJOULI**

Saleh ZIAM

**Intitulé**

**Etude d'usinage d'une ailette de ventilateur de  
tirage ciment**

**Soutenu le / /2022 devant le jury composé de:**

Moussa ZAOUI	Pr	Université de msila	Président
Noureddine MENASRI	MCA	Université de msila	encadreur
Salah AMROUNE	MCA	Université de msila	co-encadreur
Chouki FARSI	MCA	Université de msila	Examineur

**Année universitaire : 2021/2022**

## REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé au département de Génie  
Mécanique

En premier lieu, je remercie **ALLAH** le tout-  
puissant de  
m'avoir donné le courage, la volonté et la patience  
démener à terme ce présent travail.

Je remercie vivement mon Encadreur

*Noureddine*

*Menasri et Salah Amroune* pour m'avoir  
dirigé au  
cours de ce travail.

Je remercie également l'ensemble du jury

*Pr.Moussa*

*Zaoui et Chaoki Farsi* pour le temps et  
l'énergie qu'ils  
ont dédiés à la lecture et à la correction de mon  
manuscrit

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents,

À mes frères,

À mes soeurs,

À toute ma famille

Je tiens à remercier l'ensemble de tous les étudiants  
et étudiantes de ma promotion,

En fin je dédie cette mémoire à mes collègues et  
tous ceux qui me sont chers.

Aidjouli Marwane

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents,

À mes frères,

À mes soeurs,

À toute ma famille

Je tiens à remercier l'ensemble de tous les étudiants  
et étudiantes de ma promotion,

En fin je dédie cette mémoire à mes collègues et  
tous ceux qui me sont chers.

Ziam Saleh

## sommaire

Introduction General.....	3
chapitre I: etude sur la découpe.....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Procédé de découpage.....	3
I.2.1. Définition.....	3
I.2.2. Principe du découpage des tôles minces.....	3
I.2.3. Différentes phases d'une opération de découpe.....	5
I.2.5. Opération de découpage.....	7
I.2.6. Influence des paramètres de l'opération de découpage.....	7
I.2.7. Techniques de découpe.....	7
I.3. Usinage Par Electroerosion.....	8
I.3.1. Définition.....	8
I.3.2. Principe.....	8
*Principe de l'usinage.....	9
I.4. Performances et Caractéristiques.....	10
I.4.1. Caracteristiques.....	10
I.4.2. Mécanisme de l'enlèvement de matière.....	11
I.5. Reproduction de formes.....	11
I.5.1. Reproduction de formes par défouçage.....	11
I.5.1.1. Principe.....	11
I.5.1.2. Usinage en plongée.....	12
I.5.1.3. Usinage par surfaçage.....	13
I.5.2. Principe de la découpe par fil.....	13
I.6. résultats.....	14
I.6.1. Précision de l'usinage et rugosité.....	14
Plus la précision est élevée, plus la rugosité est faible, comme indiqué dans(Tableau 1).....	14
I.6.2. Production.....	14
I.7. Principe physique de l'électroérosion.....	15
I.8. Caractéristiques électriques des étincelles.....	17
I.9. Découpe laser.....	17
I.9.1. Fonctionnement d'une découpe laser.....	17
I.9.2. Processus de fabrication.....	17

I.9.3. Paramétrage.....	18
I.9.4.3. Refroidissement du tube laser.....	18
I.9.4.4. Ventilation de la tete.....	18
I.9.4.5. Extraction des fumées.....	18
I.9.6.Règles d'utilisation de la découpe laser à OF.....	19
I.10. La projection plasma.....	19
I.10.1. Pistolets plasma.....	19
I.10.1.1. La projection plasma atmosphérique (APS).....	20
I.11. Propriétés.....	21
I.12. Outils de mise en oeuvre.....	22
I.12.1. Oxycoupage.....	22
I.12.1.1. Leschalumeaux coupeurs.....	22
2. Type de mélange des gaz de chauffe.....	23
I.12.1.2. Les têtes de coupe( <i>Figure I-13</i> ).....	24
I.12.2. Coupage plasma.....	24
I.12.2.1. Torches à électrodes pointues.....	24
I.12.2.2. Torches à électrodes plates.....	25
I.12.3. Coupage laser.....	27
I.12.4. Coupage au jet d'eau ( <i>Figure I-18</i> ).....	27
I.13. Fluides utilisés.....	29
I.13.1. Oxycoupage.....	29
I.13.2. Coupage plasma.....	30
Pour les aciers non alliés ou faiblement alliés, on utilise.....	31
I.13.3. Coupage laser.....	32
I.13.4. Coupage au jet d'eau.....	32
I.14. Déformations en coupage thermique.....	32
I.14.1. Phénomène de base des déformations.....	33
I.14.2. Oxycoupage et coupage plasma.....	33
I.14.3. Coupage laser.....	34
I.14.4. Précision de coupage.....	34
I.15. Mise en oeuvre des outils de coupage.....	35
I.15.1. Coupage manuel.....	35
I.15.2. Coupage mécanisé (Machines de mise en œuvre).....	35

I.16. Domaines d'emploi.....	37
Référence.....	38
chapitre II: etude sur la technique de pliage des tôles.....	40
II.1. Introduction.....	40
II.3. Préparation Avant Pliage.....	40
II.4. Instructions De Pliage.....	42
II.5. Instructions De Pliage Pour L'atelier.....	43
II.6. Force De Pliage.....	43
II.7. Rayon Minimum De Pliage.....	45
II.8. Ecartement de latôle à plier.....	45
II.9. Principe du pliage.....	46
II.10. Modes de déformation.....	47
II.10.1. Le pliage en vé (en l'air ou en frappe) (presse-plier).....	47
II.10.2. Le pliage par encastrement (plier à sommier).....	47
II.10.3. Pliage par cambrage en U (emboutissage).....	47
II.11. Principales différences entre le pliage en l'air et le pliage en frappe.....	47
II.11.1. Le pliage en l'air.....	47
II.11.2. Le pliage en frappe.....	47
II.12. Le retour élastique.....	48
II.13. Effort de pliage.....	49
II.14. Le pli.....	50
II.15. La cotation en pliage.....	51
II.16. Les paramètres de pliage.....	51
II.17. Sécurité Au Travail.....	52
Referance.....	53
Chapitre III : Partie expérimentale ( simulation sur Mastercam(.....	55
III.1 Introduction.....	55
III.2 Géométrie 2D et 3D de la pièce mécanique:.....	57
III.3. Simulation des Géométrie de la pièce.....	58
III.4 Lancement du logiciel MasterCam version x5.....	59
III.5 Créer une référence.....	59
III.6 La création des line.....	60
III.7 Création des Arc.....	61

III.8 Extrusion du la pièce:.....	62
III.9 Définition du brut.....	63
III.10 Génération du programme CN d'usinage.....	69
III.11 Conclusion.....	73
Conclusion General.....	73
Resume.....	73

# La liste des figures

## **Chapitre 01**

Figure I-1 :exemples de découpage,(a) découpe à longueur,(b) découpe de pièces.....	03
Figure I-2: Schématisation du principe du découpage mécanique des tôles.....	04
Figure I-3: Représentation d'une ligne de découpage et de ses périphériques [Meunier 2005].....	04
Figure I-4 : Les différentes phases de la découpe.....	06
Figure I-5: Représentation de la forme générale de la courbe effort / déplacement [Maillard 1991].....	06
Figure I-6: Représentation schématique de la nucléation, de la croissance et de la coalescence de cavités en traction [Goijaerts 1999].....	08
Figure I-7:Principe du procédé.....	10
Figure I-8:Principe de la machine.....	10
Figure I-9: schémade principe.....	13
Figure I-10: aréalisation d'une de découpage de matrice de forgeage b : réalisation d'une empreinte c ; Electrode en plongée	
Figure I-11: Exemple d'usinage par surfacage.....	15
Figure I-12:Schéma de principe d'un pistolet plasma.....	25
Figure I-13: schéma du chalumeau coupeur manuel.....	29
Figure I-14:Têtes de coupe: exemples de technologie de construction.....	31
Figure I-15: Torche monogaz à électrode pointue avec injection axiale du gaz.....	31
Figure I-16: Torche monogaze à électrode plate avec injection tangentielle du gaz.....	32
Figure I-17: Coupage plasma: torche à électrode plate avec injection tangentielle du gaz et dispositif de post-injection d'eau.....	32
Figure I-18: Tête de focalisation laser .....	34
Figure I-19: Tête de découpe avec abrasif.....	35
Figure I-20: Principe des chaudes de retrait .....	39
Figure I-21: Exemple de déformations en oxycoupage dues aux chaudes de retrait.....	39
Figure I-22: Exemple de coupe d'une pièce rectangulaire avec un chalumeau unique.....	40
Figure I-23: Machine XY de type porte à faux.....	42
Figure I-24: Machine XY de type portique.....	42
Figure I-25: Machine mixte poinçonnage-laser:schéma de principe.....	43

# La liste des figures

## **Chapitre 02**

Figure II.1.Méthodes Et Outils De Pliage .....	41.
Figure II.2.NOUS Recommandons De Plier Perpendiculairement Au Sensdu Laminage	42
Figure II.3.Écartement De La Tôle À Plier.....	46
Figure II.4 .La Déformation De Largeur Du Véaprès Le Pli.....	46
Figure II.5. Outil De Pliageen Frappe .....	48
Figure II.6.Outil de pliage en l'air .....	48
Figure II.7.Pliage sur unepresse-plier .....	49
Figure II.8. Pliage sur plieuse universelle ou a sommier.....	49
Figure II.9.la pression entre les zone de compression et d'étirement.....	50
Figure II.10.schéma de dessin de la pièce .....	52

## **Chapitre 03**

Figure III.1:les etape de mastercam.....	55
Figure III.2 : Dessin de définition en 2D de la pièce.....	57
Figure III.3: Dessin de définition en 3D de la pièce.....	58
Figure III.4:Interface utilisateur MasterCam.....	59
Figure III.5:photo Créer une référence.....	60
Figure III.6:Une illustration montrant la création de lignes.....	61
Figure III.7:Une illustration montrant la création de Arc.....	61
Figure III.8: La barre des onglets.....	62
Figure III.9: Menu Chaining.....	62
Figure III.10:Extrusion du pièce.....	63
Figure III.11:Menu Toolpaths.....	64
Figure III.12:Saisie des paramètres du brut.....	64
Figure III.13: La barre des onglets.....	65
Figure III.14: Menu Chaining.....	66
Figure III.15:Présentation du la Tools.....	66
Figure III.16: Présentation du laCut Parameters.....	66
Figure III.17:Présentation du laDepthCut.....	67

# La liste des figures

Figure III.18:Présentation du la Multi Passes.....	68
Figure III.19:Présentation du la LinkingParameters.....	68
Figure III.20: Présentation du menu Post processing.....	69
Figure III.21:Programme d'usinage en G-code.....	70
Figure III.22: plieuse.....	71
Figure III.23:plier la pièce.....	71
Figure III.24:la pièce pliée.....	72

# Introduction Générale

## Introduction générale

Les pales de l'éolienne sont la partie la plus importante du système. La performance de l'éolienne dépend de la configuration et de la géométrie des pales car elle est responsable de l'extraction de l'énergie cinétique du vent. Comme les pales ont une forme de voilure et que cette forme de voilure donne certains coefficients de portance et de traînée, une certaine puissance peut donc être extraite du vent.

Dans ce travail, nous intéressons à **étude d'usinage d'ailettes d'un ventilateur de tirage ciment.**

Ce mémoire comprend trois chapitres.

- ❖ Le premier chapitre est consacré au Procédé de découpage, les différents types de découpage.
- ❖ Le deuxième chapitre est consacré au pliage, méthodes, Préparation, Effort et Modes de déformation.
- ❖ Finalement le troisième chapitre, nous abordons les résultats et discussions à base de logiciels de fabrication assistée par ordinateur (Mastercam).

Les détails de nos résultats concernant sont exposés dans le dernier chapitre.

On termine par une conclusion où tous les résultats sont mentionnés.

# Chapitre I

## Étude sur la découpe

## Introduction General

### I.1.Introduction

Pour la mise en forme des matériaux, il existe de nombreux procédés permettant soit d'aboutir à des produits finis soit à un produit sur lequel viendront s'ajouter d'autres étapes de formage. Parmi ceux-ci : le découpage de produits plats (produit dont l'épaisseur est faible devant leur largeur et leur longueur). Ils ont une épaisseur allant de quelques dixièmes à 300mm. Il est principalement utilisé, pour l'obtention de préformes. Par exemple, la découpe de flans dédiés à l'emboutissage, ou des développés pour le pliage.

### I.2. Procédé de découpage

#### I.2.1. Définition

Le découpage de tôles est une opération courante réalisée par les entreprises de la mécanique pour produire des pièces métalliques à partir de tôles. Son but est de séparer partiellement ou complètement des zones de la tôle de façon à obtenir la forme voulue et/ou de les préparer pour d'autres opérations comme le pliage ou l'emboutissage [1, 2].



Figure I-1: exemples de découpage, (a) découpe à longueur, (b) découpe de pièces

#### I.2.2. Principe du découpage des tôles minces

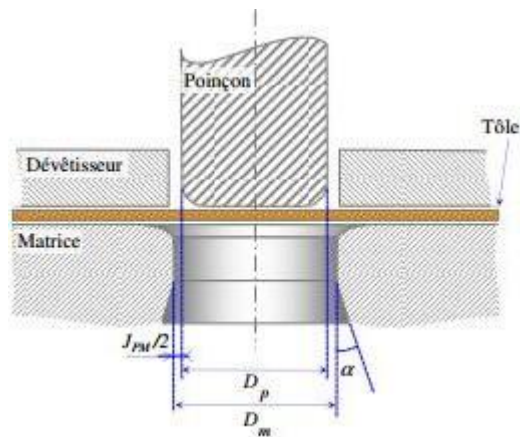
Le découpage consiste à obtenir des pièces par cisailage de tôles. Plus particulièrement il consiste à séparer en deux parties une tôle ou une bande de matière généralement suivant un profil fermé. L'organe principal du procédé est un outil constitué de deux

éléments (a) :

- ☞ Une matrice, qui a un évidement correspondant à la forme de la découpe souhaitée,
- ☞ Un poinçon, avec une forme complémentaire, généralement animé d'un mouvement de translation.

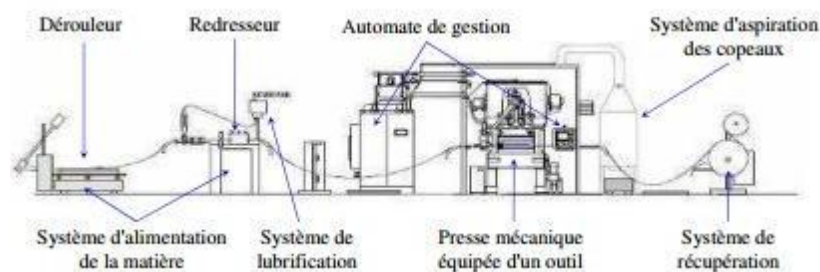
Deux autres éléments principaux entrent en jeu lors du découpage (a) :

- ☞ Une tôle ou bande de matière à découper,
- ☞ Un dévêtisseur (serre flan), qui a pour fonctions le maintien de la bande au cours du découpage, le guidage précis des poinçons par rapport aux matrices et le dévêtissage des poinçons de la matière découpée.



**FigureI-2:**Schématisation du principe du découpage mécanique des tôles

En fonction de la complexité géométrique de la découpe, un outil de découpe peut contenir plusieurs postes de découpe. Il fait partie d'un ensemble d'éléments et d'équipements spécifiques qui assurent la réalisation de la découpe. Cet ensemble est appelé communément une ligne de découpe (Fig.3)



**FigureI-3:**Représentation d'une ligne de découpe et de ses périphériques

[Meunier 2005]

Donc, en plus d'un outil de découpe, une ligne de découpe est composée principalement :

- ☞ D'une presse, qui à chaque coup, transmet à la partie supérieure de l'outil de découpe, fixée sur le coulisseau de la presse, un mouvement vertical alternatif permettant sa descente et sa remontée, la partie inférieure de l'outil étant fixée sur la table de la presse. La presse fournit également l'énergie mécanique nécessaire au découpage (effort de découpage),
- ☞ D'un système d'amenage mécanique, couplé au mouvement du coulisseau de la presse, qui permet l'avance de la bande à découper d'une valeur fixe appelée « pas »,
- ☞ D'un système d'alimentation constitué : d'un dérouleur de bande et d'un redresseur

l'unique fonction est de réduire, avant l'entrée de la tôle dans l'outil, les défauts de courbure, tuilage, torsion, [Meunier 2005],

D'un système de récupération constitué d'un enrouleur / récupérateur de bande découpée.

Généralement la matrice est la partie de l'outil qui est bridée sur la table de la presse, et le ou les poinçons sont animés d'un mouvement alternatif transmis par le coulisseau, l'organe mobile de la presse. A chaque course, un ou plusieurs découpages sont effectués. Le métal nécessaire à la fabrication alimente l'outil qui associe poinçons et matrices. Il se présente sous la forme de bandes de largeur constante ou sous forme de flans pour les pièces de grandes dimensions. Suivant les applications, c'est la tôle percée ou bien la partie enlevée de la tôle qui constituera la pièce finale [4, 3].

## I.2.3. Différentes phases d'une opération de découpe

Sous l'action de la contrainte imposée par la partie active du poinçon, il se produit une déformation élastique puis un glissement avec décohésion du métal. Le poinçon poursuit sa course, et provoque la rupture complète de la tôle (figure 4)

Ainsi, le mouvement de découpe qui correspond à un coup de presse et à la pénétration du poinçon en vue de la découpe (un aller-retour du coulisseau entre le point mort haut et le point mort bas) peut être décomposé en quatre phases principales. Cette pénétration du poinçon doit être minimale afin d'éviter sa détérioration.

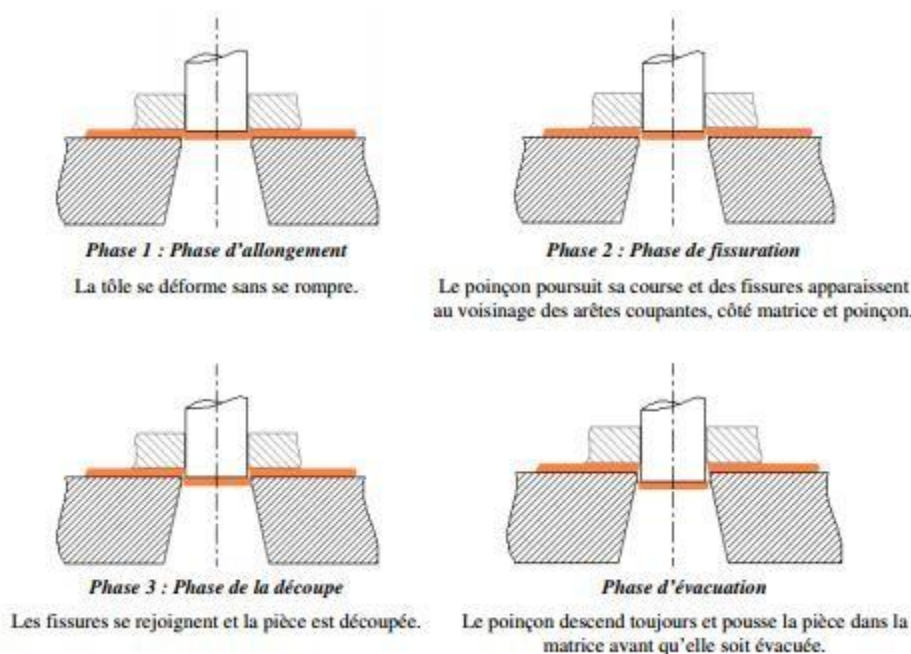
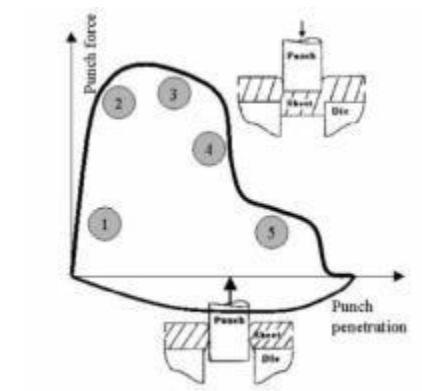


Figure 4: Les différentes phases de la découpe

Ces différentes phases d'une opération de découpage ont été associées à la courbe effort/déplacement qui caractérise la découpe. Maillard [Maillard 1991] présente une définition des phases principales de la courbe effort / déplacement du procédé de découpage dans la



**Fig.5** Représentation de la forme générale de la courbe effort / déplacement

[Maillard 1991]

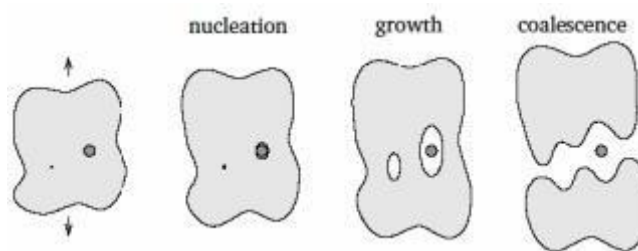
Sur cette courbe on observe généralement les phases suivantes ; [Maillard 1991] :

- ☞ Portion 1 : Dans cette partie, l'effort du poinçon évolue de façon linéaire. Le comportement du matériau découpé est élastique.
- ☞ Portion 2 : Il s'agit d'une phase non linéaire correspondant à la déformation plastique de la tôle, avec un écrouissage plus ou moins prononcé suivant le type de matériau.
- ☞ Portion 3 : Il s'agit d'une phase de décroissance non linéaire de l'effort. Parallèlement à la poursuite de la déformation plastique du matériau, l'endommagement se développe progressivement et provoque une perte des caractéristiques mécaniques, donc une diminution de l'effort. Maillard [Maillard 1991] précise que la diminution de l'effort du poinçon observée est consécutive à la diminution de la section en cisaillement.
- ☞ Portion 4 : Dans cette partie, une (ou des) fissure(s) s'amorce(nt) au niveau des arêtes poinçon et matrice. Elle(s) se propage(nt) rapidement, entraînant une chute importante de l'effort enregistré.
- ☞ Portion 5 : La rupture complète de la tôle est effective. La pénétration correspondant à ce point est donc généralement appelée « pénétration à rupture ». Celle-ci est la plupart du temps inférieure à l'épaisseur de la tôle. Cette partie correspond aux efforts de frottement dus à la poussée du copeau dans la matrice lors de la descente du poinçon. Il y a essentiellement frottement entre le poinçon et la tôle ajourée, et entre la matrice et le copeau.

Johnson et Slater [Johnson 1967] utilisent également le diagramme présentant l'effort vertical exercé sur le poinçon en fonction de sa pénétration dans la tôle pour décrire le comportement du matériau au cours de la découpe.

Par ailleurs, Goijaerts et al. [Goijaerts 1999] [Goijaerts 2000], indiquent que la rupture

des tôles en découpage est inévitablement une rupture ductile. Elle est causée par la nucléation, la croissance et la coalescence de micro cavités (cupules). La croissance et la coalescence de ces cavités aboutissent à la formation de cupules sur le faciès de rupture, la particule responsable de la formation de la cupule est parfois visible en fond de cupule.



**Figure I-6:** Représentation schématique de la nucléation, de la croissance et de la coalescence de cavités en traction [Goijaerts 1999]

### Ⓔ Opération de découpage.

On peut distinguer trois types d'opération de découpage :

- Découpage simple : on utilise deux outils de découpage sur deux presses et la pièce est obtenue en deux opérations (exemple obtention d'une rondelle).
- Découpage consécutif : on utilise une presse et on fixe sur son coulisseau deux ou plusieurs poinçons. La pièce est obtenue après deux pas d'avance de la bande.
- Découpage simultané : la pièce est obtenue après une opération de découpage et poinçonnage simultanément[5].

### Ⓕ Influence des paramètres de l'opération de découpage

L'étude des efforts développés au cours de l'opération de découpage a fait l'objet de nombreux travaux. Les différents travaux mettent en évidence l'influence des paramètres du procédé sur les efforts de découpe et la qualité du produit fini. Les travaux de plusieurs auteurs ont permis de recenser les paramètres qui influencent la qualité du profil découpé [6]:

- Jeu entre le poinçon et la matrice (jeu de découpage),
- Paramètres liés au réglage de l'outil et de la presse,
- Paramètres liés à l'usure de l'outil.

### Ⓖ Techniques de découpe

Pour découper une tôle, il existe plusieurs solutions technologiques mettant en œuvre des principes physiques différents.

**La découpe plasma** met en œuvre une énergie électrique concentrée sous forme d'un jet de plasma à très haute température (15 000 à 20 000°C) qui fond le métal. L'énergie cinétique du jet éjecte le métal fondu de la saignée. Ce jet est généré par un arc électrique qui s'établit

entre une électrode, interne à la torche de soudage, et la pièce, ce qui implique que le matériau découpé doit être conducteur. La découpe plasma ne s'applique donc qu'aux métaux. **L'oxycoupage** porte la matière de la pièce à découper en fusion par l'énergie générée par la réaction chimique d'oxydation (réaction chimique exothermique). Les oxydes sont formés par un jet d'oxygène. De ce fait, il s'applique seulement sur les aciers de construction et faiblement alliés. L'énergie de découpe est générée par la découpe même.

**La découpe laser** met en œuvre une énergie de rayonnement sous forme d'une lumière monochromatique concentrée. L'absorption de l'énergie par la pièce provoque une fusion/vaporisation du matériau. Les fumées et éléments liquéfiés sont éjectés par un souffle de gaz. Le laser est en mesure de découper tous les matériaux fusibles, volatilisables ou combustibles.

**La découpe jet d'eau** met en œuvre un jet d'eau très fin à grande vitesse provenant d'une grande pression (3 000 à 5 000 bars). L'énergie cinétique du jet est capable de découper le matériau. L'addition de produits abrasifs peut être utilisée lors de découpe de métaux[7].

**La découpe mécanique** n'est ni un procédé thermique ni un procédé abrasif. Il engage un mécanisme de cisaillement de la matière, qui est créé par l'action de deux lames en opposition l'une de l'autre, et séparées d'un jeu entre les arrêtes de coupe (Figure 3). Contrairement aux procédés précédemment cités, il n'y a pas de saignée. Ce type de découpe s'applique aussi bien aux métaux, plastiques et à certains composites.

### I.3. Usinage Par Electroerosion

#### **Ⓐ Définition**

On définit le processus d'électroérosion comme le fait de décaper du matériel à travers une série successive de décharges électriques, séparées les unes des autres par un certain temps. Ces dernières jaillissent entre deux pôles (électrode ou outil de travail et pièce à usiner). Les décharges sont créées par des générateurs à impulsions électriques[8, 9].

#### **Ⓑ Principe**

C'est un procédé d'usinage où l'enlèvement de matière est obtenu par décharges électriques entre une électrode constituée par la pièce et une électrode constituée par l'outil. L'arc électrique produit entre les deux électrodes arrache de petites particules de métal qui sont évacuées par le liquide (diélectrique) qui circule.

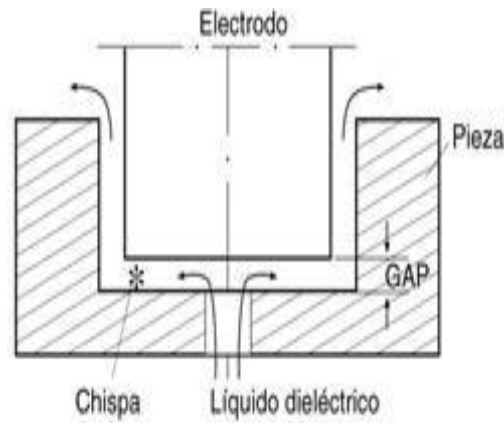


Figure 7: Principe du procédé

### \*Principe de l'usinage

L'électrode a pratiquement la forme de l'empreinte à obtenir. On réalise la forme en déplaçant cette électrode au fur et à mesure de l'usinage. Le déplacement du porte-outil est asservi pour maintenir constant l'espace pièce-outil. Il n'y a jamais contact pièce-outil.

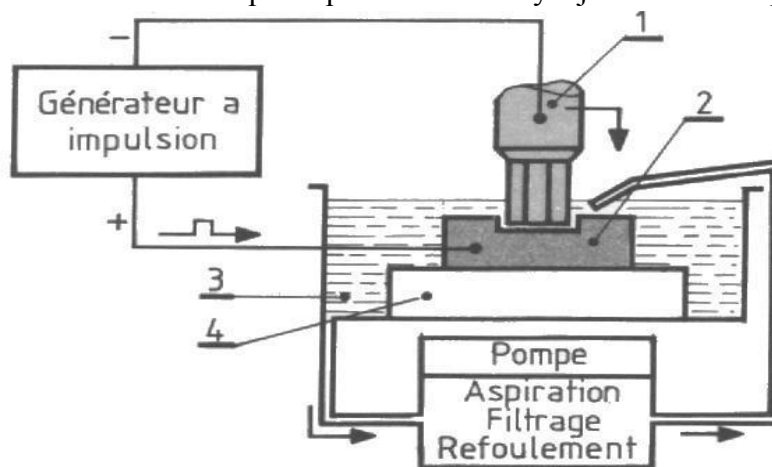


Figure 8: Principe de la machine

Les deux électrodes 1 et 2 sont plongées dans un liquide diélectrique 3 qui circule en permanence. Un générateur à impulsion fournit les décharges électriques dont la durée et la tension sont réglées en fonction du matériau constituant la pièce et de la précision du travail. La pièce est reliée à l'anode et l'outil est relié à la cathode.

A chaque impulsion, il se produit une décharge électrique (dont la température varie de 30 000 à 50 000 degrés) entre la pièce et l'outil qui provoque l'érosion de la pièce pour environ 99.5% mais également de l'outil pour environ 0.5%.

Pour les machines travaillant en plongée, l'électrode outil a la forme complémentaire de la forme à réaliser.

# Chapitre I Étude sur la découpe

---

L'avance de travail de l'outil est donnée par un servomécanisme qui permet le maintien d'une distance constante appelée **écartement** (à 0.5mm) entre le fond de la pièce et l'outil quelle que soit la vitesse d'avance.

Les particules de métal brûlé sont entraînées par le liquide. Le débit et la direction du jet doivent être réglés en fonction du travail à réaliser.

## \*Applications

- Usinage de matrices de forge et moule de fonderie.
- Découpage au fil (contour de pièces, analogie avec scie à ruban).
- Moyens pratiquement réservés à l'obtention d'outillage.

## \*Matériaux

En principe, pour l'électrode outil, tous les matériaux conducteurs conviennent : graphite, cuivre, cupro-tungstène, laiton...

Le choix de l'électrode outil dépend :

- du matériau usiné,
- de la forme usinée,
- de la productivité recherchée.

Pour leurs formes elles dépendent du type d'usinage

## **I.4. Performances et**

### **Caractéristiques**

#### **I.4.1. Caractéristiques**

Ce type d'usinage se caractérise par :

- usinage sans déformation pour l'usinage de faible diamètre puisqu'il n'y a pas de contact pièce-outil ;
- usinage de métaux durs, traités ou réfractaires ;
- précision de l'ordre de 0.01mm jusqu'à 2  $\mu\text{m}$  en finition ;
- reproduction automatique de forme ;
- obtention de surfaces complexes ;
- l'état de surface comporte de petits caractères (arc électronique) ou de picot (circulation de diélectrique) ;
- l'électrode s'use (usure difficile à contrôler) ;
- l'usinage est limité aux matériaux conducteurs et aux formes démoulables ;
- débit maximal de copeaux : ébauche ( $5\text{cm}^3/\text{min}$ ) et finition ( $0.05\text{cm}^3/\text{min}$ );
- réalisation de formes intérieures irréalizable par les moyens classiques ;
- réalisation de formes intérieures quand le temps et la précision obtenus avec les moyens classiques est trop long.

### I.4.2. Mécanisme de l'enlèvement de matière

ON peut considerer les étapes suivantes :

- .Ionisation du diélectrique : formation d'un canal de conductibilité pendant un temps aléatoire.
- .Effet di rupteur dû au début de la décharge : ceci entraîne la vaporisation du diélectrique (bulles) ; le passage du courant et la chute de tension correspondant à la chute de résistance;on remarque un faible enlèvement de matière.
- .Passage massif du courant :on a ce que l'on nomme l'effet de plasma avec des températures allant de 8000 à 12000°K. Les bulles augmentent de taille, l'énergie se disperse dans l'électrode (le fil), la pièce et le diélectrique; on observe alors un échauffement et éventuellement une vaporisation de leurs constituants (formation de gaz).
- .Interruption du courant par le générateur :on a alors l'implosion de la bulle, suivi d'un balayage des surfaces en fusion, et les sphérules (déchets) sont éjectées et vont se coller autour du cratère.
- .Circulation du diélectrique : il y a balayage des sphérules par circulation du diélectrique qui sera filtré par la machine[10].

### I.5. Reproduction de formes

Il existe deux types bien distincts de machines d'usinage par électroérosion: les machines EDM à fil et les machines EDM d'enfonçage. Les caractéristiques communes aux machines EDM sont les suivantes :

- Usinage de matériaux conducteurs
- Possibilité d'usinage de matériaux très durs – pas de limite de dureté
- Pas d'effort mécanique à l'enlèvement de matière
- Relativement lent
- Asservissement des axes mécaniques aux conditions électriques pour maintenir un gap constant.

A aucun moment l'électrode ne touche la pièce ; ce sont des mesures de grandeurs électriques qui permettent de déterminer la distance pièce

– électrode et qui sont utilisées dans les boucles de régulation de la CN.

### **E** Reproduction de formes par défonçage

#### **El** Principe

La reproduction de forme par défonçage consiste à utiliser un outil de forme et à le déplacer selon une direction. La matière est enlevée progressivement, et l'électrode outil reproduit petit à petit sa forme dans la pièce, en négatif. Cette technique nécessite la fabrication préalable d'une ou de plusieurs électrodes. Elle a été la première utilisée, et représente environ 60 % des techniques mises en œuvre dans les machines actuelles différence de cotes (figure 9).

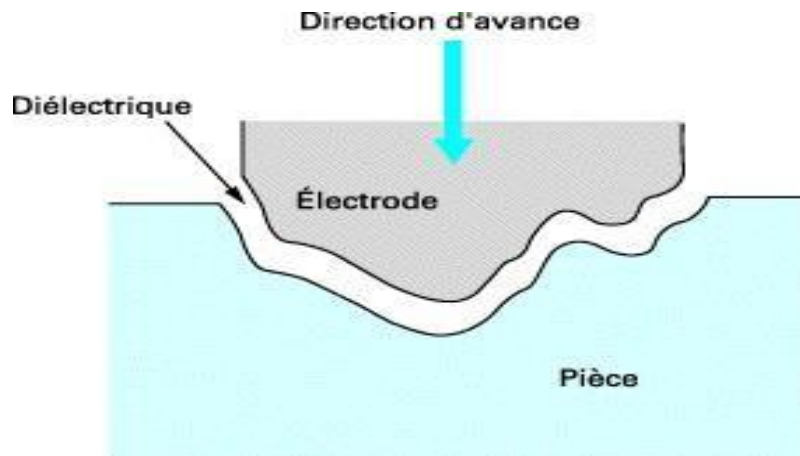


Fig 9a) principe

## ■ Usinage en plongée

L'électrode à la forme complémentaire de la forme à réaliser, on distingue les deux cas suivants :

- Les électrodes génèrent un profil, dans ce cas seul le jeu latéral d'étincelage  $J$  est à considérer pour le calcul de ses dimensions (fig9b).
- Les électrodes génèrent une empreinte, dans ce cas le jeu latéral d'étincelage  $J_1$  et le jeu latéral d'étincelage  $J_2$  sont à considérer (fig9c). Si la pièce est un moule, l'électrode a la forme de l'objet moulé (figure9c)

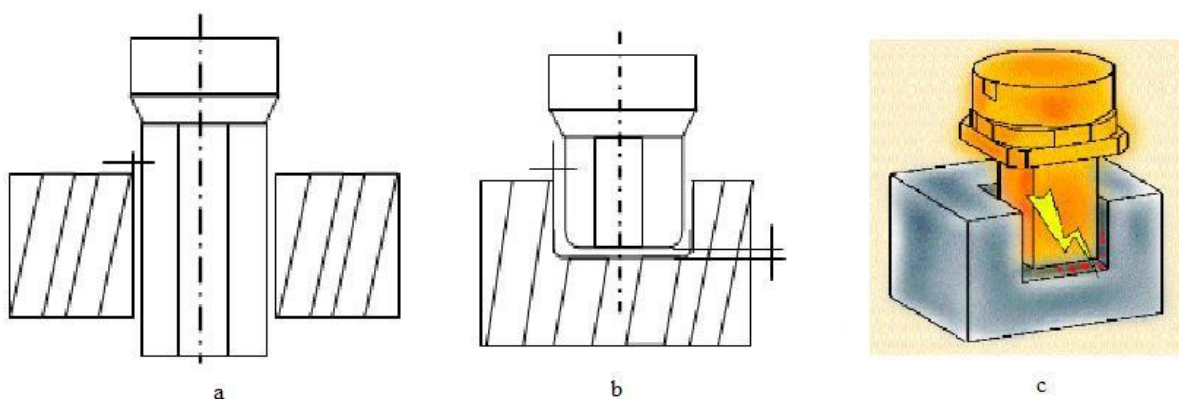


Fig 9b) et 9c) usinage en plongée

\*Caractéristiques :

- Usinage de cavités borgnes
- Electrode outil de forme en cuivre ou en graphite
- Diélectrique : pétrole, huile
- Régime à faible usure de l'électrode outil de forme

Les dimensions de l'électrode sont plus petites que celle à obtenir dans la pièce. Le jeu (Gap en anglais) est choisi en fonction: de la rugosité à obtenir dans l'empreinte, du matériau constituant l'outil, des conditions d'avance, etc.

Pour réduire les effets d'usure de l'outil, on peut :

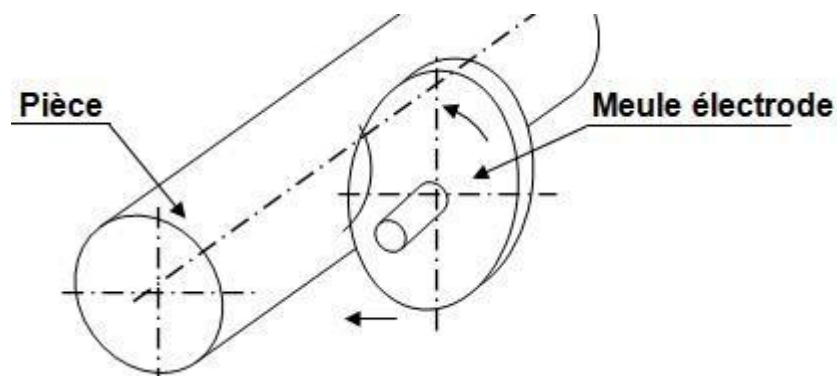
- Percer un avant trou dans l'empreinte à réaliser ;
- Réaliser la forme en plusieurs passes en utilisant plusieurs électrodes (ébauche, demi-finition, finition).

Les électrodes sont réalisées par les procédés classiques d'usinage.

## **EB** Usinage par surfaçage

Ce procédé s'apparente à la rectification des surfaces planes et cylindriques mais on utilise une meule électrode en graphite :

- Réalisation de profils extérieurs rectilignes ou de révolution.
- Affûtage d'outils en carbure.
- Tronçonnage, etc.



**Fig. 1.15 Surfaçage**

## **E** Principe de la découpe par fil

La découpe par fil consiste à utiliser un fil tendu (évite des débattements trop importants) en cuivre et à le déplacer à l'aide de mouvements gérés par une commande numérique 2 axes ou 4 axes.

# Chapitre I Étude sur la découpe

La matière est enlevée progressivement, et le fil reproduit petit à petit la forme programmée, avec une saignée un peu plus grande que son diamètre (diamètre plus deux fois la distance interélectrode).

L'avantage est que cette technique ne nécessite pas la fabrication préalable d'une ou plusieurs électrodes, et est donc naturellement flexible.

Son intérêt principal est de permettre de réaliser des découpes fines, grâce au petit diamètre du fil (0,02 à 0,3 mm ; le plus souvent 0,2 ou 0,25 mm).

La technique est utilisée pour l'usinage de formes complexes, à condition qu'elles soient formées de surfaces réglées (génératrice rectiligne).

## \*Caractéristiques de EDM à fil:

- Découpage de poinçons ou matrices traversant
- Electrode-outil : fil en laiton, laiton recouvert de zinc (consommable)
- Diélectrique : eau dé-ionisée
- Asservissement des axes mécaniques aux conditions électriques pour maintenir un gap constant.

## I.6. résultats

### I.6.1. Précision de l'usinage et rugosité

Ces paramètres sont déterminés et conditionnés par :

- La précision et la forme de l'outil ;
- Le matériau constituant l'outil ;
- Les conditions de travail (avance, intensité du courant, durée des décharges, etc.) [11]

**Tableau 1:** Les valeur moyenne fonction les précision et la rugosité.

Valeur Moyenne	Ebauche	½ finition	Normale	Finition précise	Très précise
Precision (mm)	0.5	0.1	0.06 à 0.03	0.03 à 0.01	0.01 à 0.001
Rugosité (µm)	6.3 à 3.2	3.2	3.2 à 1.6	0.8 à 0.4	0.4 à 0.2

Plus la précision est élevée, plus la rugosité est faible, comme indiqué dans (Tableau 1).

### I.6.2. Production

Elle est fonction de la puissance de la machine utilisée. Un débit important de matière par minute entraîne une grande usure de l'électrode outil.

Si la dureté du matériau le permet, une ébauche de la forme par usinage mécanique permet réduire le temps d'usinage par électroérosion.

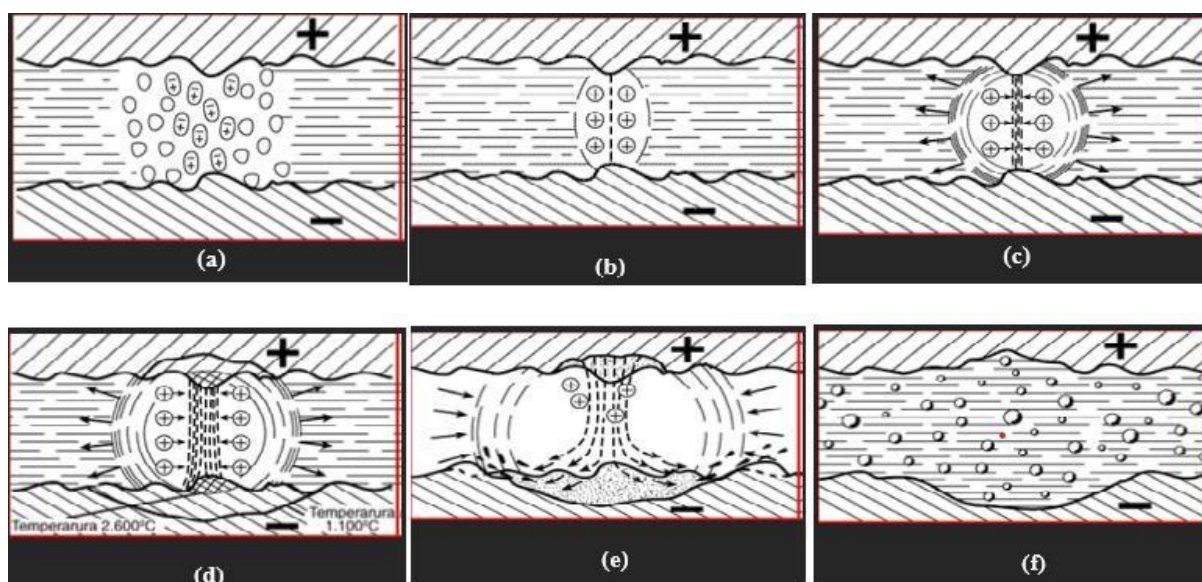
**Tableau 2:** La différence entre enlèvement de matière max et enlèvement de matière max sans usure d'électrode.

<b>Intensité max (Amp)</b>	<b>12</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>
<b>Enlèvement de matière maximum (mm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>300</b>	<b>450</b>	<b>900</b>	<b>900</b>	<b>900</b>
<b>Enlèvement de matière maximum sans usure d'électrode (mm<sup>3</sup>/min)</b>	<b>60</b>	<b>170</b>	<b>400</b>	<b>400</b>	<b>400</b>

À mesure que l'intensité augmente, le retrait de l'enlèvement de matière maximum de plus en plus par rapport au retrait enlèvement de matière maximum sans usure d'électrode, comme représenté sur la (**Tableau 2**).

## I.7. Principe physique de l'électroérosion

L'usinage par électroérosion s'effectue à travers le jaillissement d'étincelles électriques entre deux électrodes soumises à une tension électrique déterminée, toutes deux plongées dans un liquide isolant (liquide diélectrique). Sachant que les deux électrodes se trouvent dans un milieu diélectrique ou isolant, la tension que l'on applique sur les deux doit être suffisante pour créer un champ électrique (figure a) supérieur à la rigidité diélectrique du liquide.



**Figure I-12:** Champ électrique, ions libres positifs et électrons

-- Sous l'action de ce champ électrique, ions libres positifs et électrons en seront accélérés en créant un canal de décharge qui devient conducteur, c'est en ce point précisément que jaillit

## Chapitre I Étude sur la découpe

---

l'étincelle. Ce qui entraîne des collisions entre les ions (+) et les électrons (-). Il se forme alors un canal de plasma.

-- Sous l'effet des chocs, il se crée de hautes températures sur les deux pôles et autour du canal de plasma se forme une boule de gaz qui commence à grandir. Par ailleurs, les hautes températures qui se sont produites sur les deux pôles, fondent et vaporisent une partie du matériau de la pièce, en revanche l'électrode s'use tout justement très légèrement.

-- Dans cette situation (grande boule de gaz et matière en fusion sur les deux pôles), on coupe le courant électrique. Le canal de plasma se défait et l'étincelle disparaît. Le liquide diélectrique brise alors la boule de gaz en la faisant imploser (exploser vers dedans).

Ceci aboutit à ce qu'il se crée des forces qui font sortir la matière en fusion en formant deux cratères en surface. La matière en fusion se solidifie. Elle est entraînée sous forme de boules par le liquide diélectrique, pour constituer ce que l'on peut appeler "copeau du processus d'électroérosion.

La base de l'usinage par électroérosion est l'enlèvement de matière généré par une décharge électrique entre l'électrode pièce et l'électrode outil, immergées dans un liquide isolant (le diélectrique). La pièce doit donc nécessairement être conductrice.

Le diélectrique est en général de l'eau dé-ionisée pour les machines de découpage EDM à fil, du pétrole ou de l'huile pour les machines EDM d'enfonçage.

L'application d'une tension génère un champ électrique entre l'électrode et la pièce (espace appelé Gap). La tension de claquage dépend :

- de la distance pièce/électrode (le Gap)
- du pouvoirisolant du diélectrique
- de l'état de pollution du Gap

Le processus de décharge électrique commence là où le champ électrique est le plus intense, c'est à dire là où la distance pièce / électrode est la plus petite.

Schématiquement, le déroulement d'une étincelle est le suivant :

- ✓ Concentration des charges électriques (figure a-b)
- ✓ Les ions et électrons libres sont accélérés par le fort champ électrique
- ✓ Les ions et électrons libres forment un canal ionisé conducteur (figure c)
- ✓ Le courant peut alors circuler et l'intensité croit alors très vite, à la manière d'une avalanche
- ✓ Les collisions entre particules provoquent un fort échauffement et une pression importante
- ✓ Une zone de plasma se forme, atteignant une température de 7000 à 8 000 degrés (figure d) et une pression d'environ 40 bars
- ✓ Le plasma provoque la fusion locale d'une certaine quantité de matière à la surface des électrodes, formant ainsi un petit cratère
- ✓ A l'interruption du courant, la chute de la température provoque l'implosion de la bulle de plasma, projetant la matière fondue en dehors du cratère (figure e)

- ✓ La matière érodée se solidifie dans le diélectrique sous forme de petites billes (phénomène appelé pollution du diélectrique) (figure f)

## I.8. Caractéristiques électriques des étincelles

Typiquement, la tension d'amorçage des étincelles est de 80 à 200 V, l'intensité moyenne des décharges de 1 à 20 A et leurs fréquences varient entre 1 000 Hz et 1 000 000 Hz. Ces paramètres ainsi que la gestion de l'évolution, au cours du temps, de la tension et de l'intensité d'une étincelle type définissent ce que l'on nomme des régimes. De chaque régime résulte un enlèvement de matière par unité de temps, une usure de l'électrode-outil, et un état de surface (taille moyenne des cratères). Ces paramètres dépendent aussi du type de diélectrique utilisé et du type de machine EDM fil ou EDM forme[12].

## I.9. Découpe laser

### I.9.1. Fonctionnement d'une découpe laser

Un tube laser génère un rayon laser

Un jeu de miroirs guide le faisceau jusqu'à la tête

Une optique concentre le rayon qui frappe la matière pour la vaporiser

L'énergie déposée dépend de la puissance du laser et de la durée d'exposition du matériau

- ◆ Si la puissance du laser est faible et la vitesse de déplacement de la tête élevée, l'énergie déposée sur le matériau sera faible
- ◆ Si au contraire la puissance du laser est élevée et que la vitesse de déplacement de la tête est faible, une plus grande quantité d'énergie sera déposée

### I.9.2. Processus de fabrication

le tracé

Les tracés sont réalisés avec un outil de dessin 2D comme **Inkscape**.

Il peut s'agir de tracés vectoriels, d'images (jpg, bmp, png) ou des deux.

On peut réaliser ses propres tracés ou récupérer des tracés existants (svg, dxf)

Une découpe laser peut réaliser trois types de travaux :

- ◆ Gravure
- ◆ Découpe
- ◆ Marquage

Par convention :

- ◆ Un tracé noir décrit une gravure
- ◆ Un tracé rouge une découpe
- ◆ Un tracé bleu un marquage

Je vous invite à un créer **un calque par type de travail**

Les textes doivent être convertis en chemins pour pouvoir être exploités

Le fichier doit être enregistré au format : **svgoupdf**

## I.9.3. Paramétrage

-Le paramétrage consiste à définir de quelle manière la machine devra réaliser chaque type de travail

-Positionnez votre document sur la zone de travail

-L'origine se trouve en haut à gauche

## I.9.4. Utilisation de la découpe laser

### I.9.4.1. Positionner son matériau

L'origine de travail de la découpe laser se situe en haut à gauche. C'est à cet endroit qu'il faut caler son matériau

### I.9.4.2. Réglage du focus

-Le plateau est réglé pour travailler des matériaux de 0 à 3mm d'épaisseur

-Si vous souhaitez graver un matériau plus épais, il faudra le caler de sorte que le rayon focalise sur sa surface

### I.9.4.3. Refroidissement du tube laser

-Assurez-vous que le circulateur d'eau fonctionne. Le fonctionnement optimal du laser est obtenu lorsque sa température est maintenue entre 20 et 30°C.

-Lorsque la température du bidon d'eau semble tiède au toucher, il faut remplacer l'eau par de l'eau froide.

### I.9.4.4. Ventilation de la tête

.Mettez en marche le compresseur.

L'injection d'air sous pression dans la tête a deux objectifs :

-Prévenir les dépôts de particules sur les lentilles

- Disperser les fumées qui noircissent les matériaux et s'enflamment

### I.9.4.5. Extraction des fumées

-Assurez-vous que l'extracteur de fumées fonctionne.

Si l'extraction ne fonctionne pas, un brouillard envahira rapidement l'enceinte de la découpe laser, puis la pièce où elle est située la découpe laser.

## I.9.5. Les risques liés à la découpe laser

La découpe laser est un équipement **dangereux**. Le principal risque est lié à un contact du faisceau laser avec la peau ou les yeux. Les conséquences peuvent être une brûlure profonde ou une découpe de la peau, ainsi que des **lésions irréversibles** de la rétine ou la cornée.

Les règles à observer :

-Ne jamais ouvrir le capot de la découpe laser pendant un travail

-Eviter de fixer le point de focalisation du rayon

-Actionner l'arrêt d'urgence au moindre doute sur un possible danger

Les numéros d'urgence sont affichés dans chaque local

### **I.9.6. Règles d'utilisation de la découpe laser à OF**

- L'utilisation des équipements est réservée aux membres d'OpenFactory
- L'utilisation des équipements en autonomie est réservée aux membres ayant acquis le statut autonome à l'utilisation de ces équipements
- Je rester à proximité de l'équipements et surveille le bon déroulement de mon travail pendant tout son déroulement afin de pouvoir intervenir en cas de problème. Le cas échéant, je demande à un autre membre d'OpenFactory d'en assurer la surveillance.
- Avant de lancer mon travail, j'en vérifie la durée estimée et m'assure qu'elle se terminera au plus tard une demi-heure avant la fermeture d'OpenFactory pour me laisser le temps de nettoyer la machine et le poste de travail
- A l'issue du travail, je décompte de ma carte de consommable le montant correspondant au temps d'utilisation de l'équipement
- Je n'oublie pas de nettoyer la machine et l'espace de travail
- Je dépose les chutes de matériaux encore utilisables dans le bac de récupération prévu à cet effet. Le reste part à la poubelle
- J'informer le FabManager de tout incident ou dysfonctionnement que j'ai pu constater.

### **I.10. La projection plasma**

#### **I.10.1. Pistolets plasma**

En 1922, Gerdien invente le générateur de plasma d'arc qui consiste à emprisonner un arc électrique dans un milieu confiné permettant ainsi d'amener les gaz à une température nettement supérieure ( entre 12000 et 20000 °C) à celle d'un arc libre (environ 6000°C). Le plasma est l'état de la matière dans lequel les composés gazeux sont dissociés et les atomes partiellement ou totalement ionisés. Cependant, l'apparition des premières torches plasma d'arc soufflé industrielles ne se fera qu'en 1951 [13].

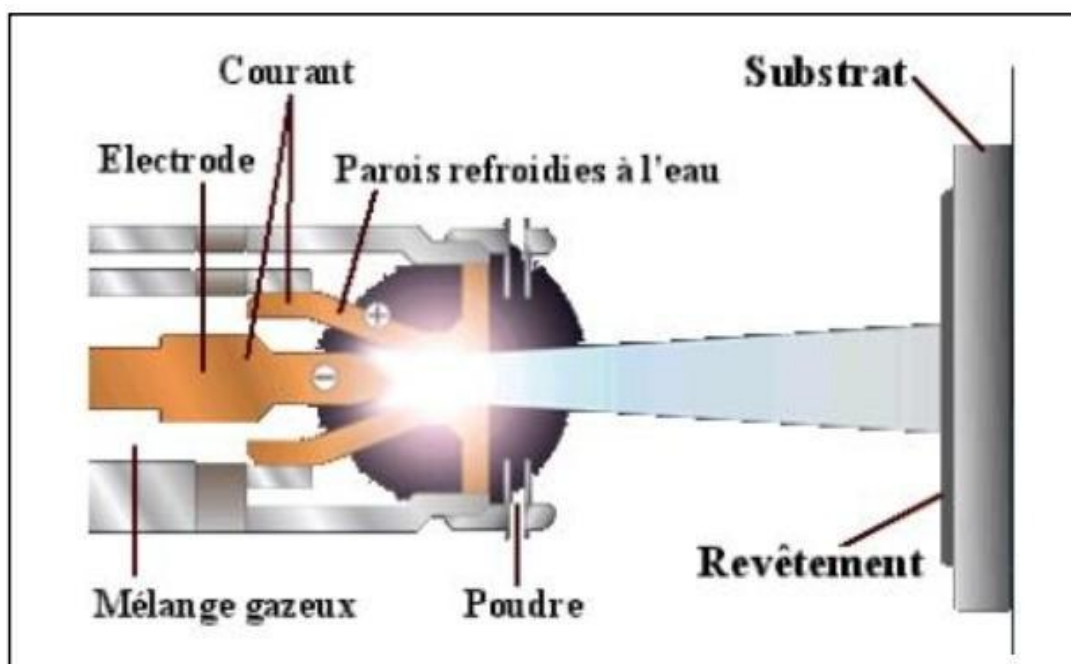


Figure I-13: Schéma de principe d'un pistolet plasma

Dans les deux cas de projection précédemment cités, on réalise la projection à l'aide d'un pistolet plasma (cf. **Figure I-11**) qui utilise la décharge d'un arc électrique capable de conduire des courants très intenses entre deux électrodes sous une faible tension. L'arc se distingue des décharges électriques par les propriétés de sa colonne positive. Le plasma qui constitue celle-ci est très proche de l'équilibre (les électrons, ions et atomes ont la même température) et ses propriétés sont les suivantes : fortes densités d'énergie, conductivité électrique, viscosité élevée. Les caractéristiques du jet de plasma en sortie de tuyère (12000 °C et 6000s<sup>-1</sup>) permettent de fondre la quasi-totalité des matériaux même les plus réfractaires.

Le pistolet à plasma est un appareil dans lequel on injecte un gaz à travers un axe étranglé par des parois froides. Il comporte généralement une cathode et une anode refroidies par une circulation d'eau. On distingue deux modes de fonctionnement pour ce type de pistolet :

- **Le pistolet à plasma d'arc interne (ou arc soufflé)** : dans ce type de pistolet, le jet de plasma ne conduit pas le courant à l'extérieur de la tuyère.
- **Le pistolet à plasma d'arc externe (ou transféré)** : dans celui-ci, le jet plasma est entièrement parcouru par le courant, le circuit électrique se refermant sur une anode extérieure (la pièce à traiter), la tuyère étant portée à un potentiel intermédiaire.

### I.10.1.1. La projection plasma atmosphérique (APS)

Ce type de projection a lieu à l'air. Le jet plasma aspire l'atmosphère ambiante : ce phénomène est d'autant plus marqué que l'on s'éloigne de la tuyère. On trouve ainsi, dans le cas des métaux, des taux d'oxydes élevés (>30%), et pour certaines céramiques, des changements de composition importants. A l'impact sur le substrat, la présence de gaz entraîne l'inclusion de porosité dans le dépôt. Enfin, la température du substrat doit être limitée pour éviter les phénomènes d'oxydation.

De ce fait, les dépôts ont une adhérence moyenne. Le taux de porosité est très variable et dépend des réglages et des matériaux. Pour certaines applications particulières comme le revêtement d'implants orthopédiques, l'augmentation de la distance de projection permet d'obtenir une porosité pouvant aller jusqu'à environ 20%. Ce pourcentage voulu est nécessaire pour l'ancrage biologique des prothèses dans les tissus osseux. Habituellement, les valeurs du taux de porosité des dépôts obtenus par APS se situent entre 4 et 6%. Dans les meilleures conditions de projection, on peut atteindre une porosité de 2%. L'épaisseur minimale du dépôt, suivant la granulométrie de la poudre, est de 50 à 100  $\mu\text{m}$ . On peut parfois faire des dépôts de plusieurs mm

### **I.10.1.2. La projection plasma à pression réduite (LPPS)**

Lorsque la couche doit satisfaire à des exigences élevées en matière de densité, de pureté et de résistance à l'oxydation, la projection doit se dérouler en l'absence de gaz réactifs (sous basse pression résiduelle d'argon en général). Une diminution de la pression de l'atmosphère de projection entraîne la disparition des interactions indésirables entre le jet plasma, la matière projetée, le matériau de base et l'atmosphère. Cette diminution entraîne aussi l'augmentation de la longueur et du diamètre du jet, l'élévation de la vitesse des plasmas et l'homogénéisation de l'écoulement.

La formation des couches s'effectue à haute énergie étant donné que les particules, durant leur trajectoire, ne sont ni refroidies, ni freinées comme cela est le cas en milieu atmosphérique. En général, les installations de projection LPPS sont utilisées à des pressions de 5000 à 10000 Pa. Les avantages de ce type de procédé peuvent se résumer de la manière suivante :

- Obtention d'un revêtement très dense et d'une meilleure adhérence sur le substrat,
- Meilleur écrasement des particules à basse pression : d'où une très faible porosité (<1%),
- Refroidissement plus lent des particules : d'où une meilleure cohésion du dépôt,
- Absence de couches d'oxydes : donc augmentation de l'adhérence et de la cohésion du dépôt,
- Possibilité de décapage "in situ" du substrat à haute température : d'où un recuit en continu du dépôt,
- Respect de la composition de la poudre initiale.

Des applications de revêtements des métaux nobles (titane, tantale, niobium, tungstène) ont vu le jour mais c'est surtout dans la protection contre la corrosion à chaud d'aubes de turbines à gaz que ce procédé a acquis une grande notoriété.

## **I.11. Propriétés**

### **• L'oxycoupage**

Procédé très répandu, car il permet de couper simplement et proprement les ~~aciers~~  
~~aciers~~

Les équipements de mise en oeuvre peuvent être simples et légers, même pour couper des épaisseurs importantes (200 à 300 mm) ce qui contribue encore à la diffusion du procédé. Les limites à l'emploi sont :

— d'ordre chimique : présence d'oxydes réfractaires qui bloquent la combustion du fer dans les aciers inoxydables ;

— d'ordre métallurgique : formation de microfissures sur les aciers autotremnants ; pour limiter ce dernier risque, il convient de préchauffer les pièces à couper.

Pour le coupage des ~~aciers~~ une technique dite ~~oxycoupage~~ ~~de fer~~ employée en sidérurgie, pour des épaisseurs de plus de 50 mm. Elle tend à être remplacée par le coupage au plasma.

- **Lecoupage plasma**

Ici il n'est plus question de combustion du métal, mais plutôt fusion/éjection. Utilisable sur tous les ~~matériaux~~ en fait les métaux, y compris bien sûr les aciers non alliés évoqués précédemment.

- **Lecoupage laser**

Utilisable aussi bien sur de nombreux ~~matériaux~~ sur les substances ~~organiques~~ ~~non~~ tels que tissus, plastiques, bois (contre-plaqué), etc.

- **Lecoupage au jet d'eau**

Comme le coupage laser, il peut intervenir sur ~~les métaux~~, mais les vitesses de coupe de ce procédé sont très faibles sur les métaux dès que les épaisseurs dépassent quelques millimètres.

Il est surtout employé sur des métaux nobles très durs ou particulièrement sensibles à l'oxydation (titane) et difficilement accessibles aux autres procédés. Ne provoquant ni carbonisation de surface ni choc thermique (la température dans la saignée ne dépasse pas

80°C), il est particulièrement employé dans l'industrie textile pour couper des tissus, dans l'industrie aéronautique, dans l'industrie agroalimentaire, mais aussi pour la découpe de céramiques, de marbres, de plastiques ; de plus, le procédé étant insensible

aux écarts de température de fusion et de conductivité thermique des matériaux, il est particulièrement intéressant pour la découpe de matériaux composites, métal/métal, métal/céramique, métal/résines, verres blindés, etc.

## I.12. Outils de mise en oeuvre

### I.12.1. Oxycoupage

L'outil de coupe est la tête de coupe (parfois nommée ~~brûleur~~) ; celle-ci est portée et alimentée par le chalumeau coupeur (parfois nommé ~~torche~~)

#### I.12.1.1. Les chalumeaux coupeurs

se distinguent selon plusieurs critères :

— leur mode d'utilisation ;

— leur type de mélange des gaz de chauffe.

## 1. Mode d'utilisation

a) **Le chalumeau manuel** comporte, comme le chalumeau soudeur, un manche ou corps, tenu par l'opérateur, comprenant les arrivées, circuits et robinets de l'oxygène et du gaz combustible (acétylène, propane, Tétrène, Crylène, etc), et en plus, un circuit d'oxygène de coupe, dont la commande est indépendante de celle des autres circuits (Fig.12). Le manche est prolongé par les conduits de chauffe et de coupe, qui aboutissent à la pièce porte-tête, dans laquelle une tête de coupe est fixée par un écrou (ou parfois directement vissée). Un dispositif de sécurité (anti-retour pare-flamme) est installé sur chaque canalisation d'alimentation en gaz, de préférence à l'intérieur même du manche.

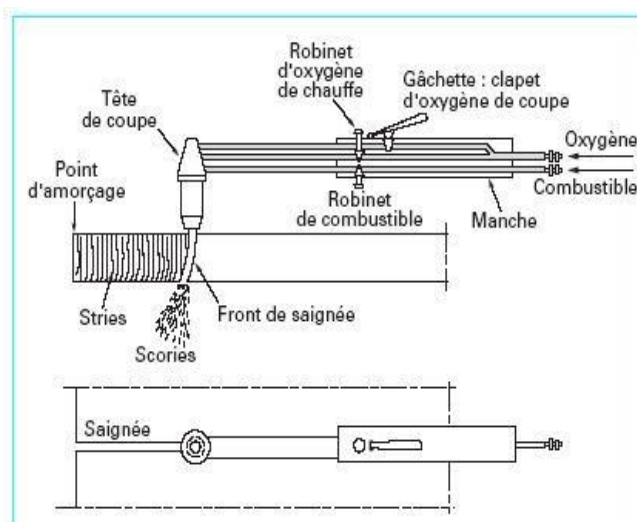


Fig.12 schéma du chalumeau coupeur manuel

b) **Le chalumeau machine** comporte les mêmes circuits de gaz, contenus dans un fût, et est terminé par une tête de coupe. Le fût est destiné au montage sur le porte-chalumeau des machines, il peut comporter une crémaillère destinée à faciliter le positionnement par rapport à la tôle. Le chalumeau doit être alimenté au travers de dispositifs de sécurité : un dispositif anti-retour pare-flamme pour l'oxygène de chauffe et pour le combustible, un clapet anti-retour pour l'oxygène de coupe.

## 2. Type de mélange des gaz de chauffe

Dans les **chalumeaux** le gaz combustible et le gaz comburant sont mélangés avant de parvenir à la tête de coupe.

Dans les **chalumeaux** le mélange ne s'opère que dans la tête.

### I.12.1.2. Les têtes de coupe (Figure 13)

A mélange préalable ou mélangeuses, elles sont aussi différentes pour les usages manuels et pour la coupe automatisée : plus précises, plus performantes et généralement chromées pour la coupe automatisée, mais aussi plus chères.

La tête de coupe est choisie en fonction :

- du chalumeau utilisé ;
- du combustible utilisé ;
- de la pression d'oxygène disponible ;
- du travail à effectuer (épaisseur à couper, coupe droite ou chanfrein) ;
- de la qualité de coupe visée ;
- de la vitesse de coupe recherchée ;
- de sa longévité et de sa facilité de maintenance.

Dans tous les cas, la tête de coupe doit être très rapidement démontable : travaillant dans des conditions très sévères, elle doit être changée assez souvent pour son entretien.

Les têtes de coupe présentent toutes sur leur face avant :

- un orifice central, bien calibré, pour le jet d'oxygène de coupe ;
- une série d'orifices placés en couronne autour du précédent et permettant la formation des flammes de chauffe.

La figure 8 fournit deux exemples de technologie de construction selon que les gaz de chauffe (ou de préchauffage) sont mélangés au préalable ou directement dans la tête.

## I.12.2. Coupage plasma

L'outil de base est la torche de coupage et sa technologie se rapproche de celle des torches de soudage plasma. Les torches peuvent se classer dans deux familles distinctes selon la nature des gaz plasmagènes utilisés.

### I.12.2.1. Torches à électrodes pointues

Elles sont équipées d'une électrode en tungstène usinée en pointe (Figure 14) et utilisent des mélanges argon + hydrogène, azote + hydrogène, azote + argon + hydrogène ou parfois de l'azote (pour les torches à faible puissance) comme gaz plasmagène. Ces gaz sont injectés parallèlement à l'électrode qui ne subit pas de contraintes d'oxydation susceptible de la

détruire, puisque argon et azote sont inertes et que l'hydrogène - lui - est réducteur (en présence d'oxygène il se forme des oxydes de tungstène à faible température de sublimation, par exemple :  $W_3O_8 = 800^\circ C$ ).

### I.12.2.2. Torches à électrodes plates

Elles sont équipées d'un corps d'électrode en cuivre ou alliage de cuivre à l'extrémité duquel est inséré un petit élément cylindrique en métal très émissif (du zirconium, plus souvent de l'hafnium, voire d'autres matériaux) destiné à recevoir la racine de l'arc plasma. Ces matériaux ne supportant pas de densité de courant très élevée, la cathode ainsi constituée est généralement usinée à extrémité plate, mettant à niveau l'insert émissif et le support en cuivre

(Fig15)

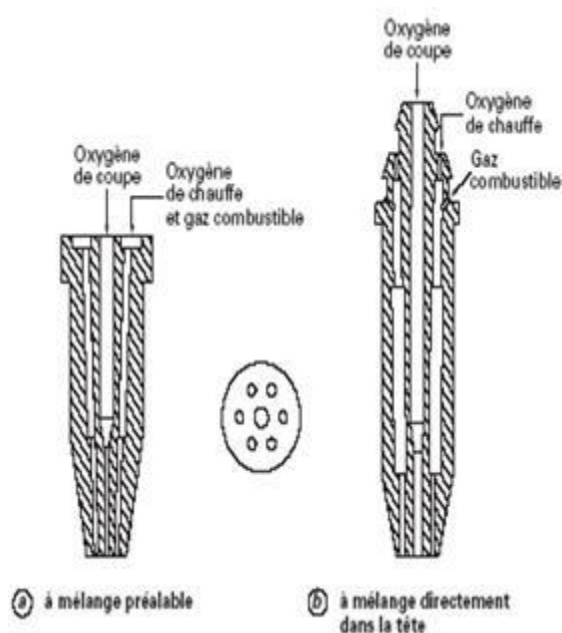
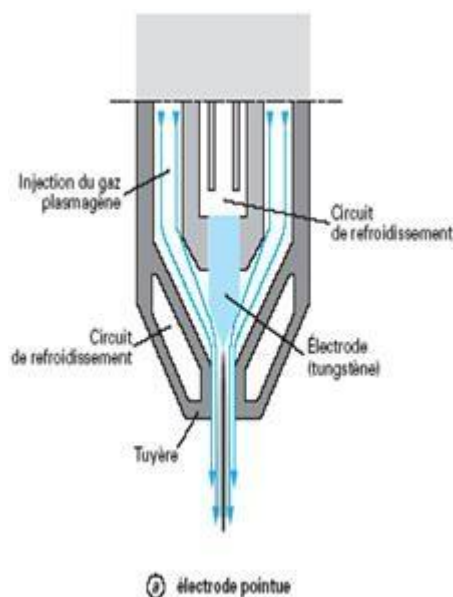
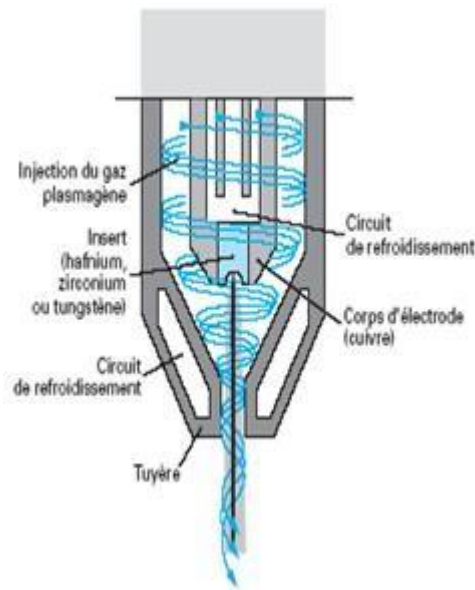


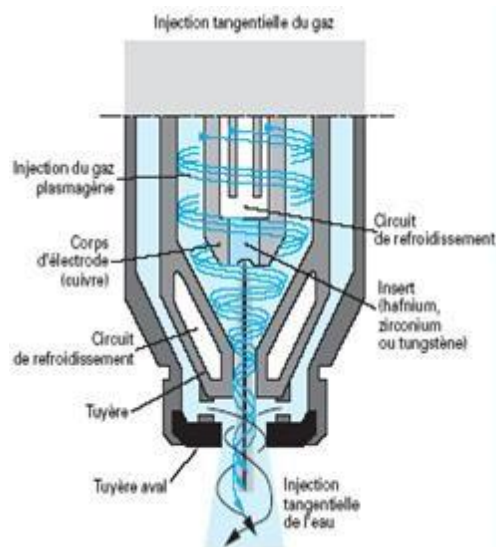
Figure I-15: Têtes de coupe: exemples de technologie de construction



**Figure I-16:** Torche monogaz à électrode pointue avec injection axiale du gaz



**Figure I-17:** Torche monogaz à électrode plate avec injection tangentielle du gaz



**Figure I-18:** Coupage plasma: torche à électrode plate avec injection tangentielle du gaz et dispositif de post-injection d'eau

Ce type de torche est surtout destiné à mettre en oeuvre :

- l'oxygène, comme gaz plasmagène pour les applications de découpe sur machines automatiques ;
- également, l'air comprimé, mais plutôt pour des opérations de découpe manuelles;

— parfois, l'azote à puissance élevée, mais dans ce cas, l'insert émissif est réalisé en tungstène.

Les puissances en jeu pour le coupage plasma s'échelonnent de quelques kilowatts à 100 kW, voire un peu plus :

- air comprimé : ~1,3 à 17 kW ;
- oxygène : ~ 1,5 à 35 kW ;
- argon + hydrogène : ~ 9 à 90 kW ;
- azote + vortex eau : ~3,5 à 110 kW.

### I.12.3. Coupage laser

On considère toujours que «l'outil» est l'ensemble placé à proximité de la pièce à couper et assurant les fonctions suivantes :

- à partir d'un faisceau faiblement divergent émis par la source laser, une ~~fen~~ obtenue par lentille ou miroir, permettant de concentrer sur une surface aussi petite que possible le rayonnement reçu ;
- à partir d'une alimentation en gaz sous pression, un soufflage énergétique dans la saignée pour dégager cette dernière des produits de fusion / vaporisation / combustion du matériau coupé.

(Fig.17) On prend deux exemples de réalisation technologique d'une telle tête de coupage, l'élément fondamental restant la source laser elle-même.

La puissance en jeu se situe entre 50 et 100 kW environ, pour une puissance utile au niveau de la tête de 1 500 à 3 000 W (rendement très faible).

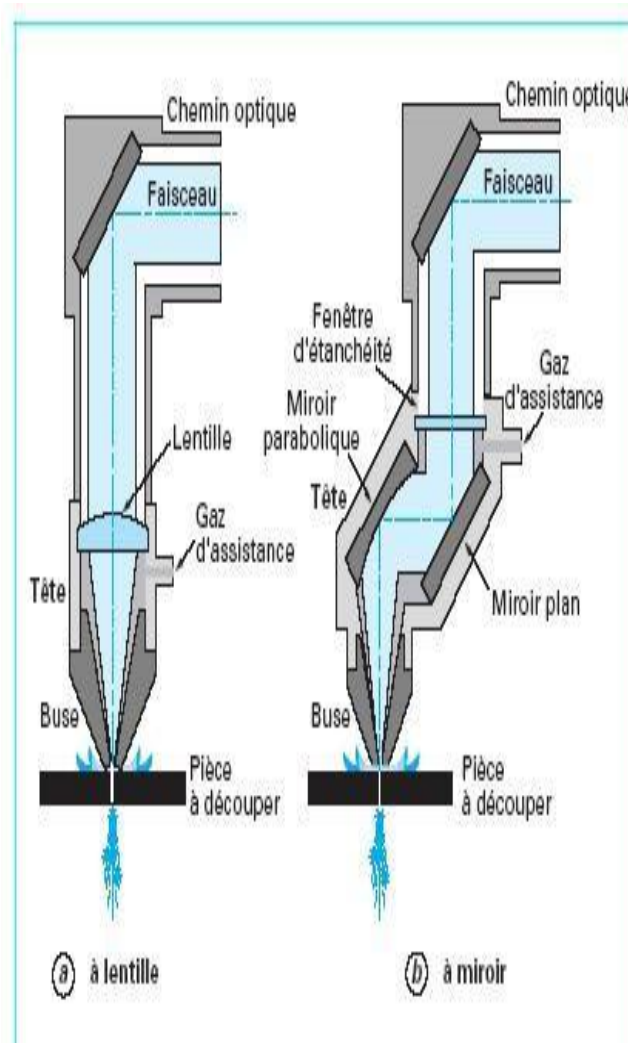
### I.12.4. Coupage au jet d'eau (Fig.18)

Dans ce cas l'outil de coupage est relativement simple et comporte une buse de sortie, généralement en saphir, raccordée à la tuyauterie d'arrivée d'eau sous pression.

L'ensemble est parfois complété par un dispositif d'injection d'abrasif en poudre, surtout pour le coupage des métaux ou plus généralement des matériaux durs.

Comme pour le coupage laser, l'élément fondamental reste l'ensemble générateur d'eau sous pression qui doit, rappelons-le, délivrer des pressions de 3 000 à

5 000 hPa.



**Figure 19.13** Méthode de focalisation laser :  
exemples de réalisation technologique

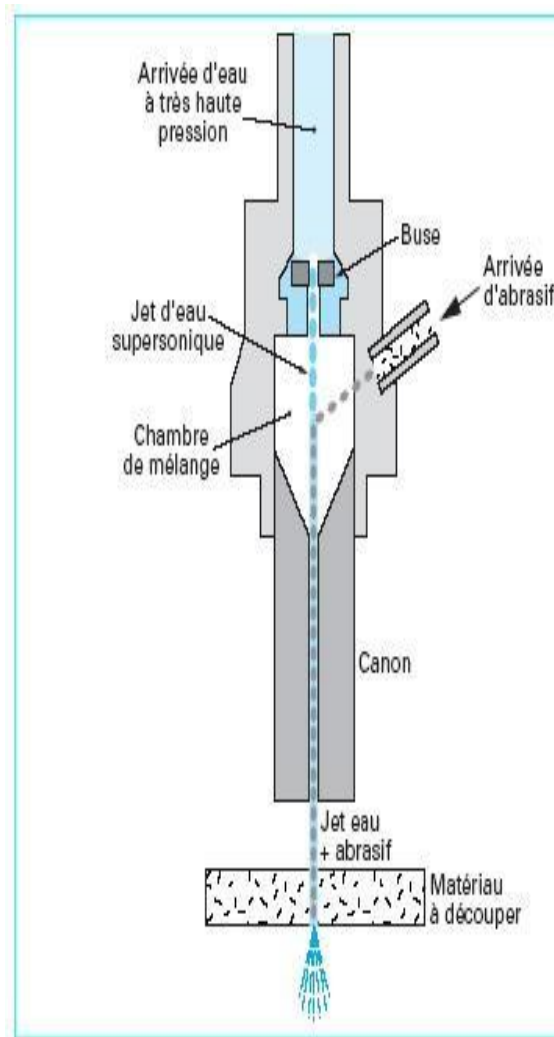


Fig. 2.11. Procédé de découpe avec abrasif

### I.13. Fluides utilisés

#### I.13.1. Oxycoupage

- **Oxygène (de coupe)**

Ce gaz est livré en général avec une teneur en impuretés garantie inférieure à 0,5 % (teneur en oxygène > 99,5 %), ce qui est suffisant pour le procédé. Une teneur en oxygène supérieure améliore la vitesse opératoire et la qualité. L'utilisation d'un oxygène de qualité

« laser » a fait ses preuves chez des utilisateurs exigeants. L'utilisation d'oxygène titrant moins de 98 % entraîne une réduction de la vitesse opératoire ; descendre au-dessous de

96 % ne permet plus un oxycoupage industriel propre et à vitesse acceptable.

Une pureté constante est une garantie de la constance des résultats [14].

- **Gaz de chauffe**

La flamme de chauffe a trois rôles fondamentaux :

- porter localement le métal à une température suffisante (de l'ordre de 1 300°C) pour que la réaction fer-oxygène puisse s'initier et ensuite s'entretenir ;
- assurer la stabilité de la coupe, en particulier sur des tôles calaminées ou grasses ou revêtues ou peintes ;
- autoriser les meilleurs compromis entre vitesse et qualité de coupe.

Si tous les gaz combustibles permettent d'obtenir la température nécessaire à l'amorçage de la réaction, tous ne le permettent pas aussi rapidement. Bien entendu, ils sont associés à l'oxygène comme gaz comburant, mais à partir d'une alimentation séparée de celle de l'oxygène de coupe.

Les températures de flamme maximales calculées (au niveau du dard) des principaux combustibles sont données au (**Tableau 3**).

**Tableau 3:** Températures de flamme des principaux combustibles utilisés en oxycoupage.

Combustible	Température maximale (°C)	Remarque
acétylène C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	3 170	gaz très performant, mais nécessitant quelques précautions d'emploi
propane C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2 840	gaz d'emploi plus sûr, mais de performances plus modestes

### I.13.2. Coupage plasma

Le choix du gaz, du mélange gazeux ou éventuellement d'un fluide additionnel (eau en général), utilisé pour la génération du plasma se fait en fonction de la nature des travaux envisagés et, plus particulièrement, de la nature des matériaux à couper ainsi que de leur épaisseur (**Tableau 4**).

## Chapitre I Étude sur la découpe

**Tableau 4:** Combinaisons de fluides pouvant être utilisées pour le coupage plasma des aciers inoxydables et des alliages légers.

Fluide plasmagène	Fluide d'assistance en post-injection	Épaisseur minimale (mm)	Épaisseur maximale (mm)
azote		0,5	25
azote + hydrogène		0,5	10
azote + argon + hydrogène		0,5	10
argon + hydrogène		8	130 à 150
azote	azote	0,5	3
azote + hydrogène	azote	2,5	8
argon + hydrogène	azote	8	25
azote	azote + méthane	0,5	6
azote	dioxyde de carbone	0,5	6
air comprimé	méthane	0,5	6
azote	eau	0,5	50 à 60

Pour les aciers non alliés ou faiblement alliés, on utilise :

- + l'oxygène, principalement en découpe automatique jusqu'à des épaisseurs de 25 à 30mm;
- + l'air comprimé pour la découpe manuelle ou automatique jusqu'à des épaisseurs de 40 à 50 mm, mais surtout lorsque le prix de revient est prépondérant par rapport à la qualité ;
- + l'azote, avec post-injection d'eau, jusqu'à des épaisseurs de 50 mm.

1. Par contre, pour le coupage des ~~aciers~~ ~~inoxydables~~ les mélanges argon + hydrogène, azote + hydrogène, azote + argon + hydrogène sont généralement utilisés avec des torches monoflux. Des torches à double injection de flux :

- un gaz ou un mélange gazeux pour former la colonne plasma,
- un gaz ou un mélange gazeux, distribué autour de celle-ci,

pour isoler la saignée, en cours de formation dans la pièce, de l'influence de l'air ambiant, afin d'éviter l'oxydation des faces coupées, donneront généralement des coupes de qualité supérieure notamment dans le domaine des faibles épaisseurs.

L'azote et post-injection d'eau est également utilisé pour le coupage de ces matériaux pour des épaisseurs de 50 à 60 mm, pour les raisons déjà évoquées pour les aciers non alliés ou faiblement alliés, mais aussi pour les bonnes qualités de coupe procurées par ce procédé.

### I.13.3. Coupage laser

- Pour couper les ~~aciers~~ on utilise de l'oxygène, ce qui, compte tenu de la teneur en fer de ceux-ci, ajoute un effet « oxycoupage » à l'effet laser. Cet effet est d'autant plus marqué que la pureté de l'oxygène est élevée, toutefois, au-delà d'une pureté de 99,95 % (garantie de pureté minimale du LASAL 2003 de Air Liquide), les gains de productivité deviennent négligeables.

- L'oxygène est également utilisé pour le coupage du ~~cuires~~ ainsi que pour les ~~aluminium~~ Rappelons, néanmoins, que le cuivre et l'aluminium sont difficiles à couper à cause de leur pouvoir réfléchissant élevé.

- Les ~~aciers~~ dans leurs différentes nuances c'est-à-dire avec des teneurs en nickel et en chrome variées, peuvent être coupés avec :

- de l'oxygène pur, lorsque les critères économiques occupent le premier rang des préoccupations (vitesse de coupe élevée, consommation de gaz d'assistance faible, mais qualité de coupe médiocre notamment par formation importante d'oxydes de chrome sur les faces coupées) ;

- de l'azote pur (exemple : LASAL 2001 de Air Liquide), lorsque le critère de qualité de coupe est prépondérant (qualité maximale, mais vitesse de coupe plus faible et consommation de gaz d'assistance plus élevée).

### I.13.4. Coupage au jet d'eau

L'eau doit être déminéralisée et surtout soigneusement filtrée afin de limiter les problèmes de l'unité de pompage. L'eau peut être additionnée, lorsque l'application le permet, d'un polymère soluble qui augmente la cohérence du jet à la sortie de la buse.

Si l'on a recours à une post-addition d'abrasif dans l'eau, on peut adopter :

- un laitier (pulvérisé) de silicate ;

- de l'olivine (roche volcanique) en poudre ;

- de la poudre de grenat, de corindon, de carbure de silicium.

### I.14. Déformations en coupage thermique

Il est certain que la mise en oeuvre d'un procédé thermique, quel qu'il soit, sur une pièce métallique ne peut que provoquer des déformations qui seront plus ou moins importantes et plus ou moins gênantes au niveau opératoire.

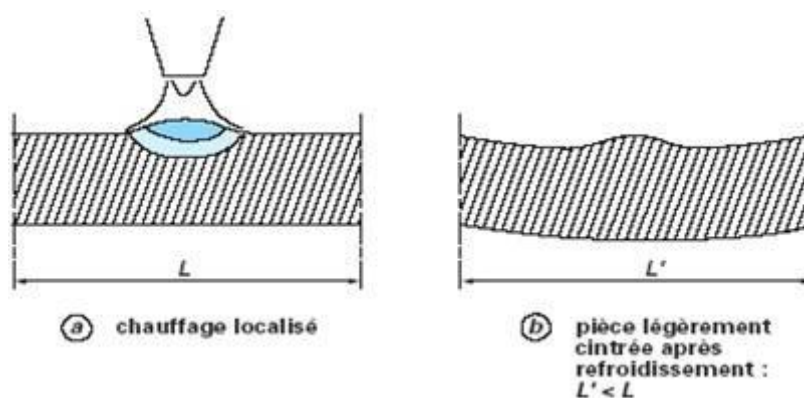


Figure I-21: Principe des chaudes de retrait

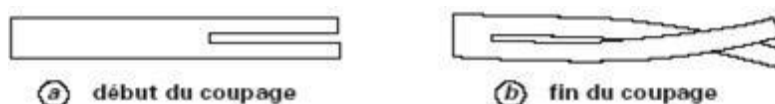


Figure I-22: Exemple de déformations en oxycoupage dues aux chaudes de retrait

## I.14.1. Phénomène de base des déformations

Le phénomène de base est très proche de ce que les chaudronniers appellent une **caudai** si l'on chauffe rapidement une tôle de 2cm d'épaisseur par exemple, on obtient une zone rouge sur la face supérieure alors que la face inférieure est beaucoup moins chaude (Figure I-19). Le métal porté au rouge est contraint de se dilater mais, bridé par le métal environnant plus froid, il ne peut que se gonfler (légèrement bien sûr).

Au refroidissement, surtout si ce dernier est assez rapide, le « gonflement » ne peut pas se résorber et provoque des tensions internes déformant légèrement la tôle et provoquant un « retrait » (Figure I-19).

## I.14.2. Oxycoupage et coupage plasma

-En **plasma** l'énergie de coupage est apportée directement sous forme électrique et thermique combinées dans le jet plasma.

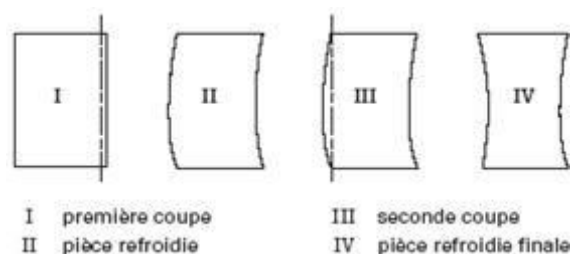
-En **oxycoupage** provient de deux sources distinctes :

- la **flamme**
- le jet **oxygène**

Ces deux procédés vont nécessiter des **précautions** atténuer ou même éliminer les effets de déformations, par libération des contraintes thermiques, qui sont minimales pour le coupage plasma et plus notables pour l'oxycoupage.

Les précautions opératoires sont très variables et dépendent étroitement de la forme des pièces à découper.

Nous citerons un exemple à titre d'information. Supposons que nous désirions couper un rectangle de 1m x 4m (**Fig21**)



**Fig21 Exemple de pièce à découper manuelle**

Nous couperons une première rive (pièce I), mais après refroidissement, la coupe, droite au moment de son exécution, va se cintrer (pièce II). Sur cette pièce cintrée, nous allons exécuter la seconde coupe, droite également pendant l'exécution (pièce III), mais après refroidissement définitif, la tôle (pièce IV) sera plus large à ses extrémités qu'au centre.

Les différences, notamment dans le cas de l'oxycoupage, vont facilement atteindre plusieurs millimètres, ce qui peut être incompatible avec une utilisation ultérieure de ces pièces, notamment en soudage automatique (qui nécessite une bonne précision d'accostage pour s'exécuter sans incidents).

Le remède consiste à exécuter simultanément les deux coupes longitudinales en mettant en oeuvre deux chalumeaux. Les contraintes internes dues au retrait ne seront certes pas éliminées (ce qui est impossible), mais équilibrées et la pièce ne se déformera pas.

### I.14.3. Coupage laser

L'énergie thermique résultant de l'absorption du faisceau laser par le matériau à couper, juste au point d'impact, est distribuée sur une surface extrêmement petite (environ 0,1 mm<sup>2</sup>), il en résulte que le volume de métal fondu par unité de temps est très faible (la saignée de coupe mesure entre 0,3 à 0,4 mm de large) et donc l'échange thermique par conduction (métal fondu vers métal froid) dans une direction transversale à la saignée est extrêmement limité. Cela fait que les déformations sont généralement négligeables avec ce procédé et ne posent pas de problème au niveau opératoire.

### I.14.4. Précision de coupage

Cette notion ne peut être évoquée que dans le cadre du coupage machine, car, en coupage manuel, elle ne dépend que de l'habileté de l'opérateur à suivre son tracé.

Pour une machine en bon état d'entretien déplaçant des outils eux-mêmes bien entretenus, on peut espérer rester en deçà des chiffres d'erreurs de cote suivants :

- oxycoupage : 1 à 2 mm ;
- coupage plasma : 0,5 à 1 mm ;
- coupage laser : 0,1 à 0,2 mm.

On voit ainsi que le coupage laser permet d'obtenir un niveau de précision inaccessible aux deux autres procédés.

### **I.15. Mise en oeuvre des outils de coupage**

#### **I.15.1. Coupage manuel**

Pour l'oxycoupage et le coupage plasma on utilise les outils (chalumeaux ou torches) manuels, alors que le coupage laser CO<sub>2</sub> et le coupage au jet d'eau ne sont jamais - du moins actuellement - mis en oeuvre à la main.

L'opérateur déplace son outil de coupage au-dessus de la pièce à une vitesse convenable et selon une trajectoire en général repérée par un tracé préalable directement exécuté sur la pièce ou définie par un guidage sommaire (règle, compas, etc.). Il lui suffit de prendre garde aux projections de scories ou de métal fondu, d'une part, et aux différentes pollutions éventuelles, d'autre part.

#### **I.15.2. Coupage mécanisé (Machines de mise en oeuvre)**

Une machine de coupage thermique a pour fonction de déplacer un outil (chalumeau d'oxycoupage, torche plasma, faisceau laser ou jet d'eau) à une vitesse donnée sur une trajectoire donnée au-dessus de la pièce à découper.

La vitesse doit équilibrer exactement la vitesse de propagation - sur la pièce - des phénomènes physicochimiques, physiques ou thermiques mis en oeuvre. Elle doit donc être fixée en fonction des paramètres d'utilisation de l'outil de coupe et être maintenue aussi constante que possible par une régulation d'avance appropriée.

La trajectoire de l'outil détermine la forme et la précision dimensionnelle de la pièce à découper ; son « suivi » correct est assuré par un dispositif de guidage.

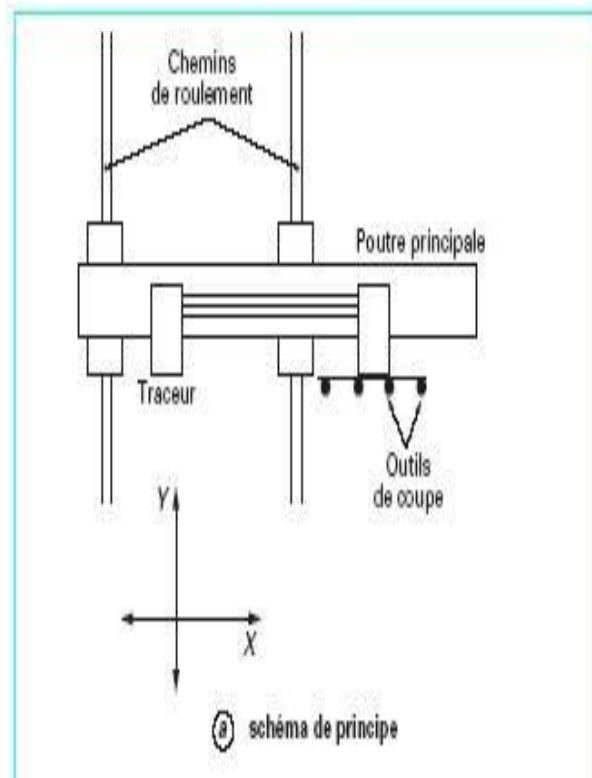


Figure I-24: Machine XY de type porte à faux

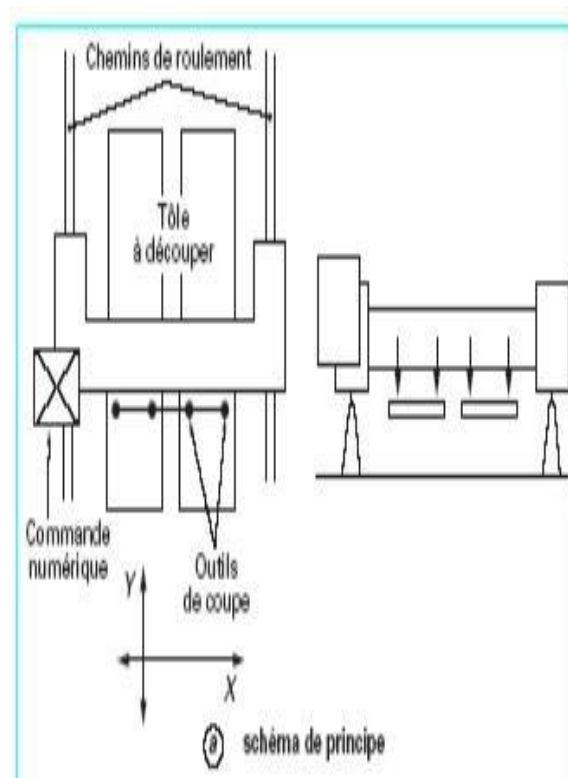
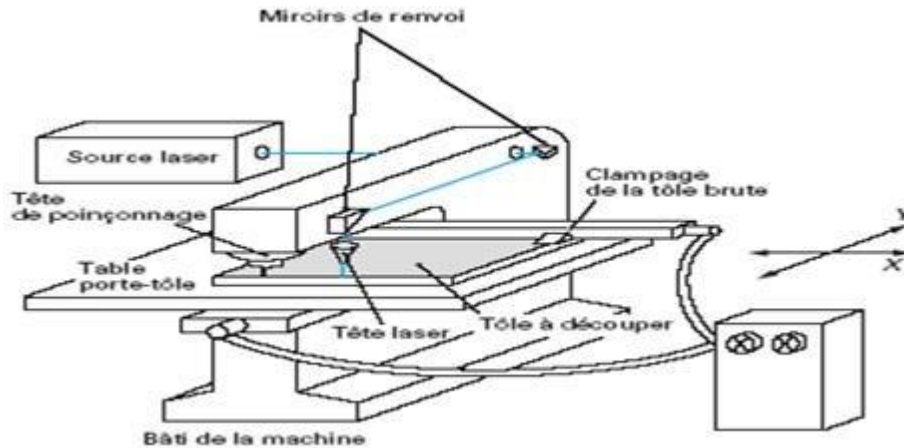


Figure I-25: Machine XY de type portique



**Figure I-26:** Machine mixte poinçonnage-laser: schéma de principe

### I.16. Domaines d'emploi

Historiquement, l'oxycoupage fut longtemps le seul procédé envisageable.

Coupages au plasma, puis au laser, puis au jet d'eau ne sont apparus qu'ensuite, procurant des avantages fort intéressants en élargissant l'éventail des métaux (et des matériaux) et des épaisseurs pouvant être découpés. Enfin, oxycoupage et coupage plasma autorisent des précisions de l'ordre du millimètre, alors que le coupage laser permet d'atteindre le dixième de millimètre sans trop de problèmes.

On peut ainsi se rendre compte que la comparaison entre les différents procédés de coupage donne des résultats fort variables selon le critère considéré comme « majeur » pour effectuer cette comparaison (tableau 3). L'ensemble de ces critères est le suivant :

- vitesse de travail et montant des investissements acceptés ;
- précision et déformations ;
- épaisseurs possibles et nature du matériau.

## Référence

1. Addoum, A. and A. Bahloul, *Conception d'un outil de découpage de la bande élastique pour la cage à roulements du moteur électrique-ENEL*. 2018, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
2. Belhadj, L., *Etude Et Conception D'un Outil D'emboutissage Pour La Table De Travail D'une Cuisinière ENIEM*. 2018, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
3. Touache, A., *Contribution à la caractérisation et à la modélisation de l'influence de la vitesse et de la température sur le comportement en découpage de tôles minces*. 2006, Université de Franche-Comté.
4. Touache, A., et al. *Découpage de tôles minces en alliages cuivreux avec ou sans recristallisation dynamique*. in *18ème Congrès Français de Mécanique, Session MS2" Mécanique & Matériaux"*. 2007.
5. Husson, C., *Simulation numérique de la mise en forme des tôles métalliques appliquées à la connectique: Etude de la découpe*. 2004, Université Louis Pasteur (Strasbourg)(1971-2008).
6. Makich, H., *Etude théorique et expérimentale de l'usure des outils de découpe: influence sur la qualité des pièces décollées*. 2011, Université de Franche-Comté.
7. Ferrendier, S., *Influence de l'évolution granulométrique des abrasifs sur l'enlèvement de matière lors de la découpe par jet d'eau abrasif*. 2001, Paris, ENSAM.
8. Kremer, D., *Usinage par électroérosion*. 2000: Ed. Techniques Ingénieur.
9. Maillat, A., *L'usinage par électro-érosion, procédés Séléromat-Languépin*. La Pratique des Industries Mécaniques, 1963. **46**(12): p. 353-356.
10. Chincholle, L., *Nouvelle théorie visant à définir le mécanisme de l'enlèvement de matière en électroérosion*. 1975.
11. Ghanem, F., et al., *Prédiction par calcul de la rugosité totale d'une surface usinée par électroérosion*. 2006. **94**(6): p. 419-428.
12. Proust, C. and M.J.p.o.C.d.G.d.P. Boudalaa, Nancy,, *Inflammation des nuages de poussières par des étincelles et des surfaces chauffées*. 2001.
13. Valetoux, H., *Approche expérimentale des phénomènes impliqués dans la découpe par plasma d'arc transféré: Contribution à l'étude des instabilités et du transfert thermique*. 1998, Limoges.
14. LE SOUDAGE, E.L.O., *Soudage et oxycoupage*.

Chapitre II  
Étude sur la  
technique de pliage  
des tôles

### II.1. Introduction

produit à partir de matières premières soigneusement sélectionnées via des processus intégrés étroitement contrôlés. Il en résulte un acier performant d'excellente qualité offrant une dureté, une aptitude au pliage, une qualité de surface et une planéité exceptionnelle. Les aciers sont livrés en tôles fortes et tôles découpées en longueur, avec une dureté de 300 à 500 HB. est particulièrement apprécié dans les ateliers, pour ses facilités de découpe, de soudage et de pliage. Il prolonge la durée de vie des machines, élargit les possibilités de conception et permet de créer des produits légers avec un meilleur rendement énergétique.

Ce manuel décrit les principes du pliage libre et du pliage en frappe et fournit des recommandations pratiques spécifiques. Vous y apprendrez notamment que la force de pliage et le niveau de retour élastique requis sont généralement proportionnels à la limite d'élasticité de l'acier. Pour tirer pleinement partie de l'aptitude au pliage des aciers, il convient d'adopter des pratiques de travail rigoureuses. Des outils usés, une mauvaise lubrification, une surface endommagée ou des bavures sur les arêtes peuvent altérer la qualité du pliage.

Les tôles stockées au froid doivent être portées à température ambiante avant d'être formées à froid. Cette brochure fournit également des informations et des recommandations relatives à l'usinage des aciers

, notamment :

- Le perçage,
- Le filetage,
- Le sciage,
- Le fraisage et le tournage.

### II.2. Méthodes De Pliage

Dans la presse, la tôle est placée entre le poinçon et la matrice. Elle est pliée selon l'angle prévu ou selon un rayon de pliage libre. Lors du pliage libre, la plaque repose sur les arêtes supérieures de l'interstice de matriçage pendant toute la durée de la passe. Vous pouvez ajuster la longueur de la course pour régler le rayon de pliage (figure 1). Vous pouvez aussi régler l'interstice de matriçage. Lors du pliage en frappe, la longueur de course est réglée de manière à ce que le poinçon pousse la plaque jusqu'au fond de la matrice. Une arête se forme au niveau du contact entre la plaque, le poinçon et la matrice (figure 1). L'interstice de matriçage (Vé) a une largeur fixe, qui n'est pas réglable[1].

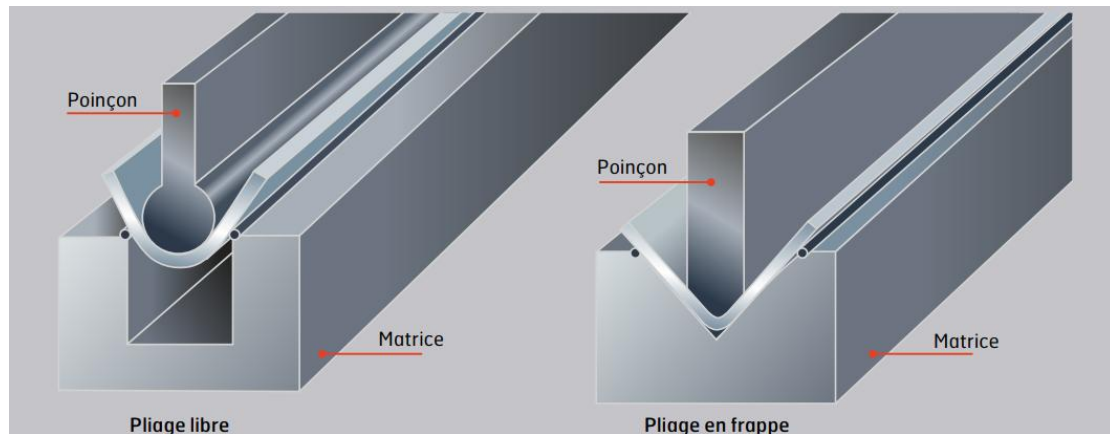
### II.3. Préparation Avant Pliage

- La température de la tôle doit être au moins à +20 °C.
- Nous vous recommandons de rentrer les tôles stockées au froid dans l'atelier, au moins un jour avant le pliage.
- Vous pouvez, si besoin, chauffer la zone à plier à l'aide d'une flamme au gaz.
- Le préchauffage réduit la force de pliage nécessaire et améliore l'aptitude générale au formage. Il doit être maintenu entre +100 et +200 °C.

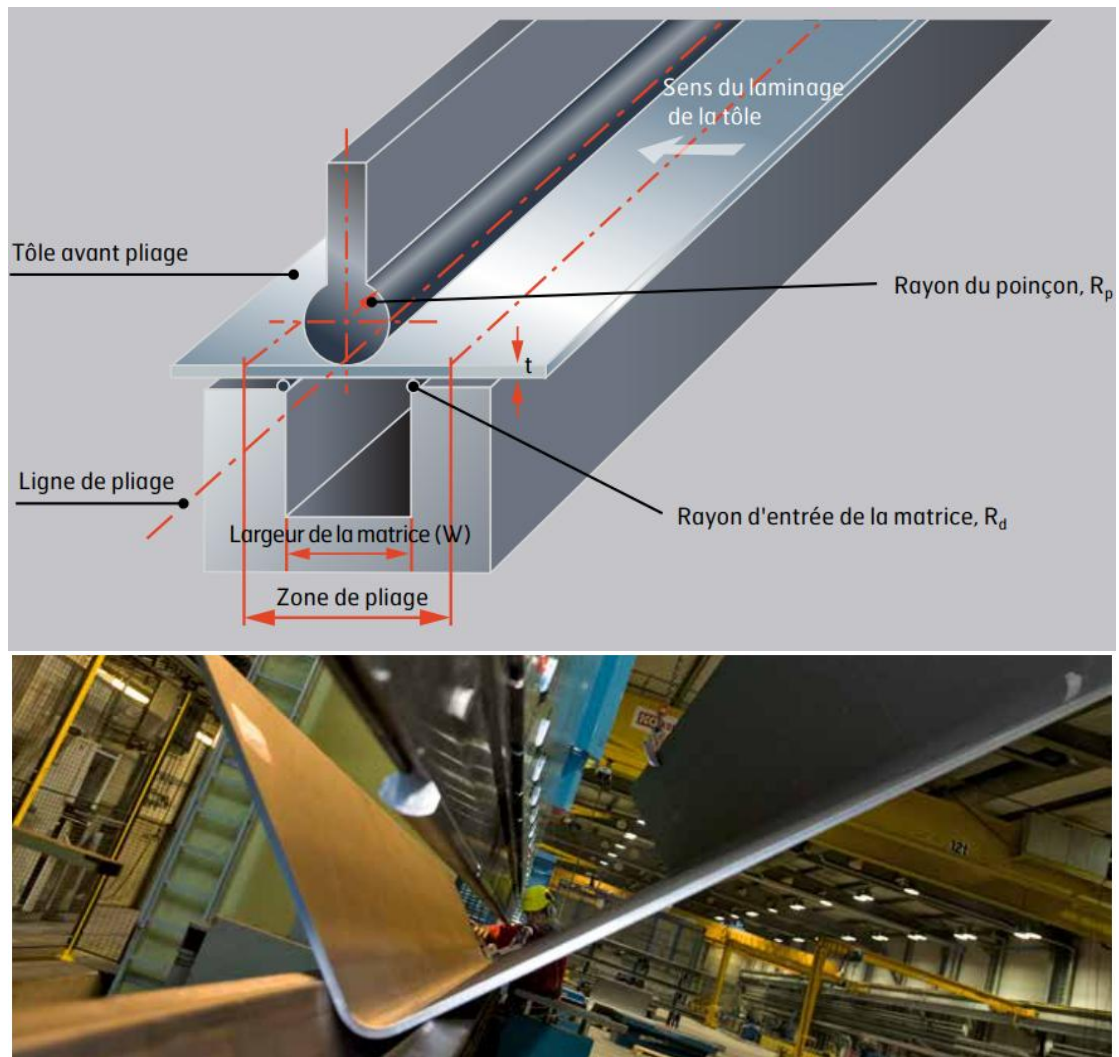
## Chapitre II Étude sur la technique de pliage des tôles

---

- Identifiez le sens de laminage de la plaque.
- Les éventuels défauts de surface pouvant apparaître sur la face exposée aux tensions doivent être éliminés.
- Après une découpe thermique ou mécanique, meulez les défauts sur l'arête de la plaque, au moins sur la partie qui sera pliée.
- Un sablage excessif peut avoir un effet négatif sur l'aptitude au pliage. La recommandation pour les produits s'applique en fonction d'essais sur une surface non sablée.



***Figure II.1. Méthodes et outils de pliage.***



**FIGURE II.2.** NOUS RECOMMANDONS DE PLIER PERPENDICULAIREMENT AU SENS DU LAMINAGE.

### II.4. Instructions De Pliage

- Lors de chaque pliage, respectez les consignes de sécurité.
- Augmentez la force de pliage, le niveau de retour élastique et le rayon de pliage proportionnellement à la limite d'élasticité de l'acier.
- Utilisez le rayon de pliage le plus large possible.
- Effectuez le bordage en une seule passe.
- Servez-vous à la fois de vos connaissances théoriques et empiriques pour optimiser votre pratique.
- Pour déterminer les valeurs de pliage, faites un pliage d'essai et prenez en compte l'angle de retour élastique.
- L'angle de retour élastique varie en fonction du réglage des outils. Pour la nuance 400, il est

compris entre

8° et 25° et pour la nuance 500, il est compris entre 15° et 35°. Plus l'interstice de matricage est large, plus

l'angle de retour élastique est grand.

• Faites, si possible, des essais préalables[2].

### II.5. Instructions De Pliage Pour L'atelier

Lors du pliage ou du bordage, le diamètre du poinçon sera choisi en fonction de la nuance d'acier, de l'épaisseur de la tôle et du rayon de pliage. Le tableau 1 indique le diamètre du poinçon (D), l'épaisseur de la tôle (t) et le rayon de pliage interne (R) pour les nuances 400, 450 et 500.

### II.6. Force De Pliage

Pour estimer la force de pliage (P, en tonnes métriques) nécessaire au pliage des tôles d'acier, utilisez la formule suivant:

$$P = b \cdot t^2 \cdot R_m / (W - R_d - R_p) \cdot 9800$$

P = Force de pliage, tonnes métriques

t = Épaisseur de la plaque, mm

W = Largeur de la matrice, mm (figure 2)

b = Longueur de pliage, mm

R<sub>m</sub> = Résistance à la traction, MPa (tableau 2)

R<sub>d</sub> = Rayon d'entrée de la matrice, mm (figure 2)

R<sub>p</sub> = Rayon du poinçon, mm

## Chapitre II Étude sur la technique de pliage des tôles

**Tableau 5:** Aciers Anti-Abrasion . Instructions de pliage pour l'atelier

Diamètre du poinçon D (mm)	Rayon de pliage R (mm)	RAEX 400		RAEX 450		RAEX 500	
		Épaisseur de la tôle t (mm) à plier perpendiculairement <sup>1)</sup>	Épaisseur de la tôle t (mm) à plier dans le sens longitudinal <sup>1)</sup>	Épaisseur de la tôle t (mm) à plier perpendiculairement <sup>1)</sup>	Épaisseur de la tôle t (mm) à plier dans le sens longitudinal <sup>1)</sup>	Épaisseur de tôle à plier t (mm) perpendiculairement <sup>1)</sup>	Épaisseur de tôle t (mm) à plier dans le sens longitudinal <sup>1)</sup>
12	6	2					
16	8		2				
18	9	3					
24	12	4	3	3			
30	15	5			3	3	
36	18	6	4	4			3
40	20		5	5	4	4	
50	25	8	6	6			4
56	28	9	7	7	5	5	
60	30	10					5
72	36	12	8	8	7	7	6
80	40	13	10	10			
100	50	16	12	12		10	8
110	55	18			10		
120	60	20	15	15			10
140	70				14	14	
170	85		20	20			14
200	100				20	20	
240	120						20

Choisissez le diamètre de poinçon le plus petit autorisé pour , en fonction de l'épaisseur de la tole et du rayon de pliage

<sup>1)</sup> ligne de pliage par rapport au sens de laminage de la plaque.

Dans le cas d'un pliage en  $v\acute{e}(90^\circ)$ , le rapport recommandé entre la largeur de la matrice et l'épaisseur de la plaque est  $w/t=15$  (**Tableau 6**) indique la résistance classique à la traction des aciers

**Tableau 6:** Aciers Anti-Abrasion .valeurs classiques de résistance ala traction et de dureté.

Nuance Raex	Résistance à la traction $R_m$ (MPa)	Dureté (HBW)
Raex 300	1000	300
Raex 400	1250	400
Raex 450	1450	450
Raex 500	1600	500

### II.7. Rayon Minimum De Pliage

Le tableau 3 indique les rayons minimum de pliage des aciers anti-abrasion . En production, pour le pliage ou le bordage il est recommandé d'utiliser des rayons de pliage intérieurs supérieurs aux rayons de pliage minimum requis. La qualité du pliage dépend non seulement de la tôle d'acier, mais aussi des techniques et des outils utilisés. Pour réussir votre pliage, il est important d'adopter les bonnes technologies et bonnes pratiques de transformation. Des outils usés, une mauvaise lubrification, une surface endommagée ou des rayures sur la surface de l'acier peuvent altérer la qualité du formage à froid[2].

**Tableau 7:** Aciers Anti-Abrasion . Rayon minimum de pliage r, angle de pliage  $\leq 90$ .

Nuance Raex	Forme du produit	Épaisseur (mm)	R/t minimum transverse	R/t minimum longitudinal	Largeur d'ouverture de la matrice W/t minimum
Raex 300	Tôle	2-8	3	3	12
Raex 400	Tôle	2-8	3	4	12
	Plaque	6-20	3	4	14
Raex 450	Tôle	2,5-8	3	4	12
	Plaque	6-20	4	5	14
Raex 500	Tôle	3-6,5	3,5	4	14
	Plaque	6-20	5	6	14

### II.8. Ecartement de latôle à plier

La figure 3 illustre l'écartement (A) entre la tôle à plier et le diamètre du poinçon (D). Lorsque vous travaillez des aciers à haute limite d'élasticité, vous devez prendre en compte cet écartement. Il est important de régler un angle de pliage final précis. Le rayon du poinçon a moins d'importance. Pour vous assurer de la précision du rayon de pliage, procédez à un pliage d'essai. Ensuite, sélectionnez le rayon de poinçon qui vous permettra d'obtenir l'angle de pliage final, selon le résultat souhaité. Le rayon du poinçon est en général légèrement supérieur au rayon de pliage prescrit[3].

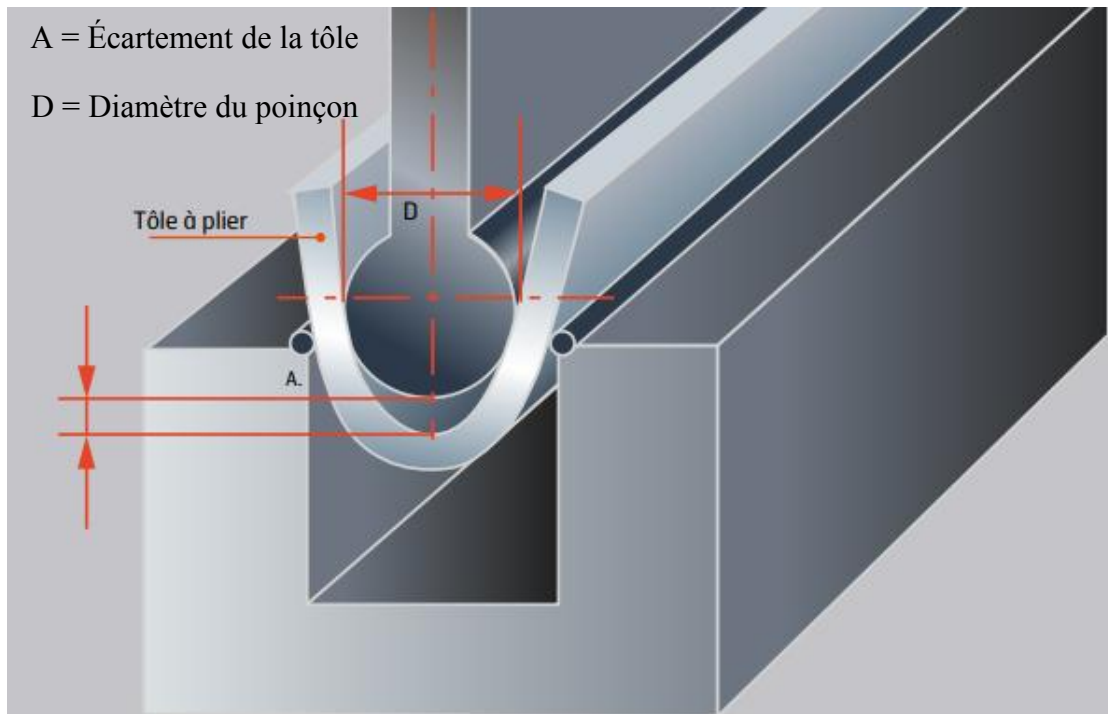


FIGURE II.3.ÉCARTEMENT DE LA TÔLE À PLIER.

### II.9. Principe du pliage

Le pliage est une déformation obtenue grâce à une force appliquée sur la longueur de la pièce. Celle-ci sera en appui sur 2 lignes d'appuis et s'apparente à la flexion. Il faudra dépasser la limite élastique pour obtenir l'angle voulu.

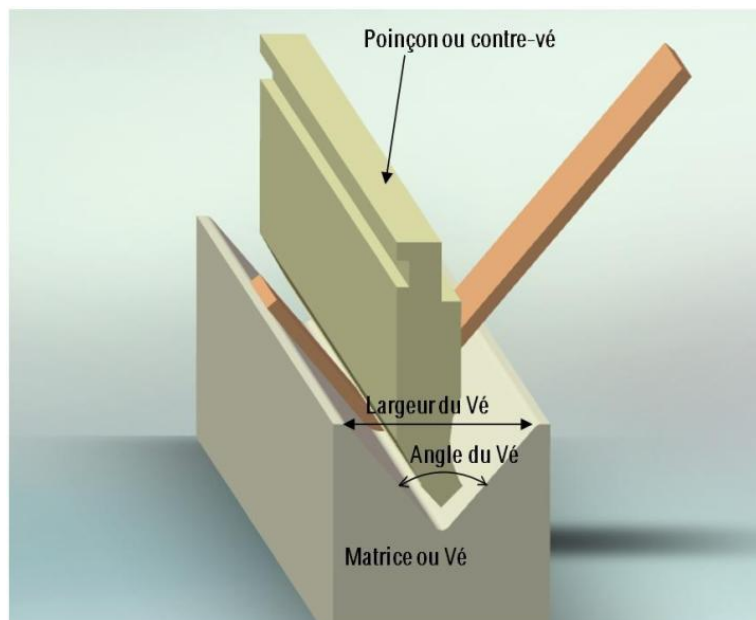


FIGURE II.4 .la déformation de largeur du véaprès le pli

### II.10. Modes de déformation

#### II.10.1. Le pliage en vé (en l'air ou en frappe) (presse-plieuse)

Le schéma de pliage pour ces deux méthodes est assimilé à un schéma de flexion comme celui ci-dessous. Les points d'appuis du schéma représentent les arêtes du vé, et une flèche symbolise une force. C'est le réglage de la descente du poinçon qui donnera l'angle final du pliage[4].

#### II.10.2. Le pliage par encastrement (plieuse à sommier)

Cette méthode un peu moins usitée utilise le serrage de la pièce à plier, entre le sommier et la table, puis la déformation par « bras de levier » grâce à un sabot. On utilise la force manuelle ou une force mécanique pour cette méthode.

#### II.10.3. Pliage par cambrage en U (emboutissage)

Le principe est voisin de celui du pliage en vé. Seuls les outils (poinçons et matrices seront différents). Cela ressemble cependant à de l'emboutissage. On peut obtenir avec cette méthode une infinité de formes pliées, si les outils sont disponibles.

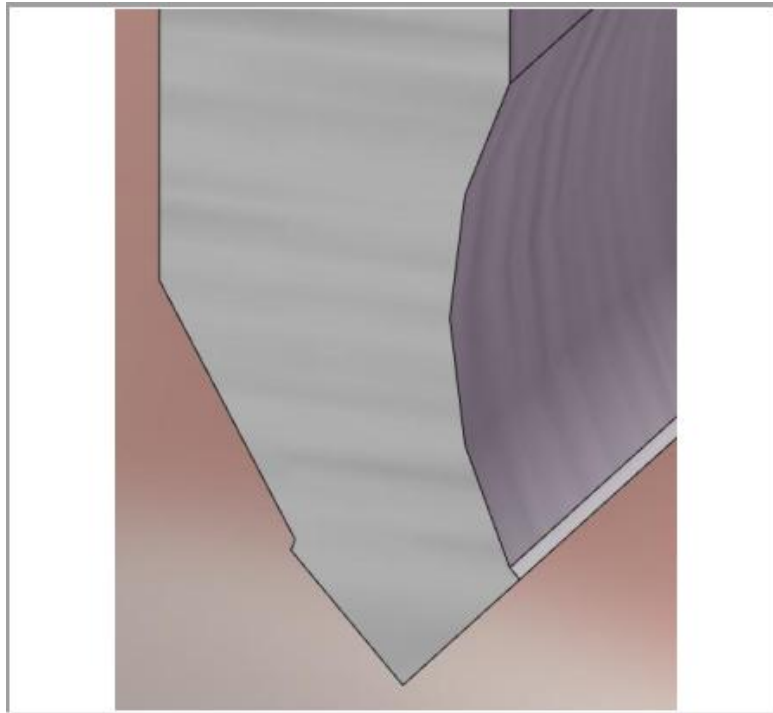
### II.11. Principales différences entre le pliage en l'air et le pliage en frappe

#### II.11.1. Le pliage en l'air

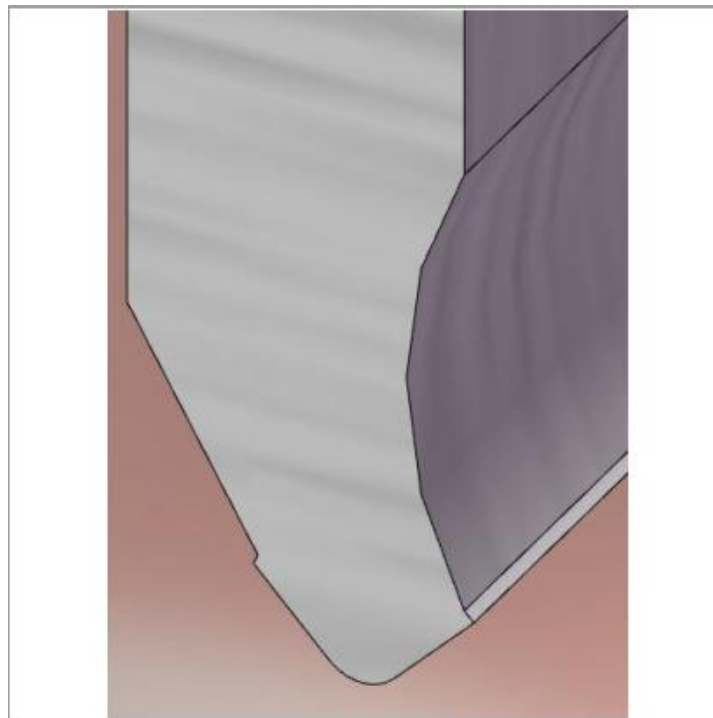
L'effort de pliage cesse lorsque la tôle arrive à fond de vé. L'angle final est celui du vé, augmenté du retour élastique, environ **2 à 3°**. Ce mode de pliage est couramment utilisé car les forces appliquées sont environ 5 fois moins importantes que pour du pliage en frappe. L'angle du poinçon est généralement de 88° pour obtenir des angles de 90° à 180°.

#### II.11.2. Le pliage en frappe

On réalise un « emboutissage » de la pièce en imprimant une force importante dans la pièce. L'angle du poinçon et de la matrice sont égaux à l'angle à obtenir. **Cette méthode est réservée à des tôles d'épaisseurs inférieures à 2 mm.** Le fait de matricer l'intérieur du pli permet d'obtenir des angles très précis ( $\pm 0,5^\circ$ )[5].



**FIGURE II.5. Outil de pliage en frappe**



**FIGURE II.6. Outil de pliage en l'air**

### **II.12. Le retour élastique**

(Spring-back en anglais), lors du pliage en l'air.

Lorsque l'on relève l'outil, la force appliquée à la pièce redevient nulle. A ce moment, **les matériaux étant élastiques, la pièce s'ouvrira légèrement**. Il faut donc obtenir un angle inférieur à l'angle voulu, pendant

le pliage, pour obtenir un angle final exact au relâchement de l'outil.

Il faut bien sur effectuer un ou des essais pour connaître le comportement exact du produit que l'on travaille. Il faut veiller au sens de laminage des tôles, car le retour élastique est plus important si l'on plie perpendiculairement au sens de laminage[6].

**Nota :**Le phénomène de retour élastique est quasi **inexistant lors du pliage en frappe** car on imprime avec force le poinçon dans la pièce, pour dépasser la limite d'élasticité.

### II.13. Effort de pliage

On peut déterminer l'effort nécessaire en pliage grace au tableau suivant, qui dépend de l'épaisseur, du vé choisi. Les forces ci-après sont données en

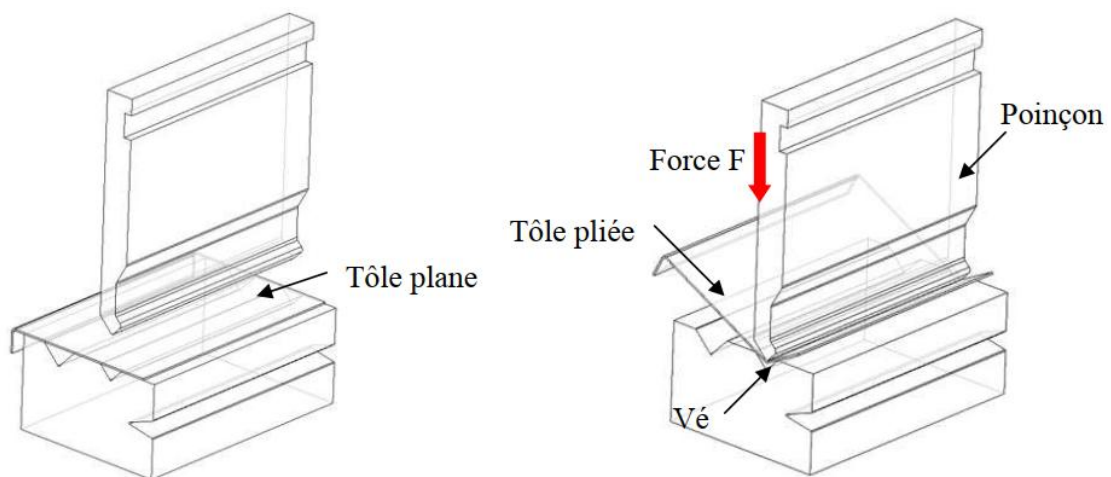


FIGURE II.7. Pliage sur une presse-plier

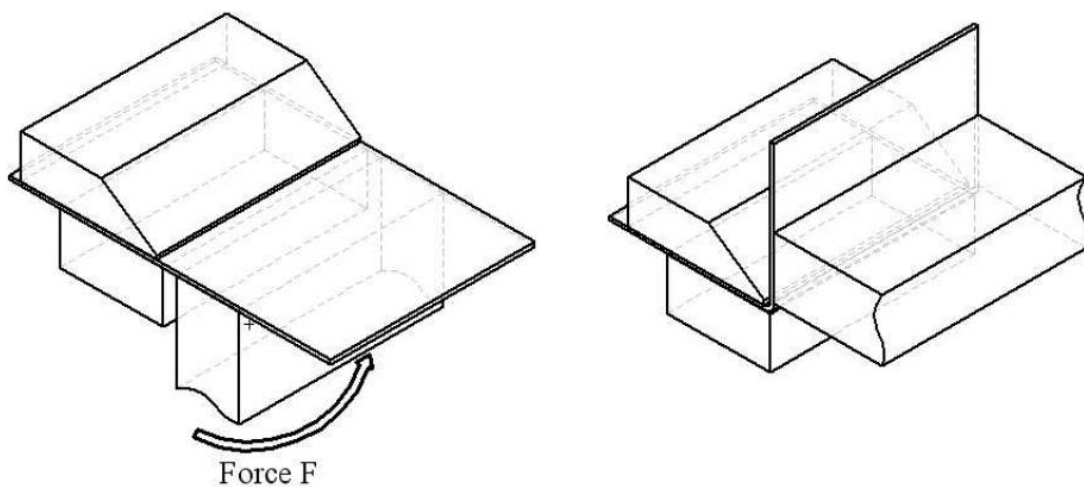
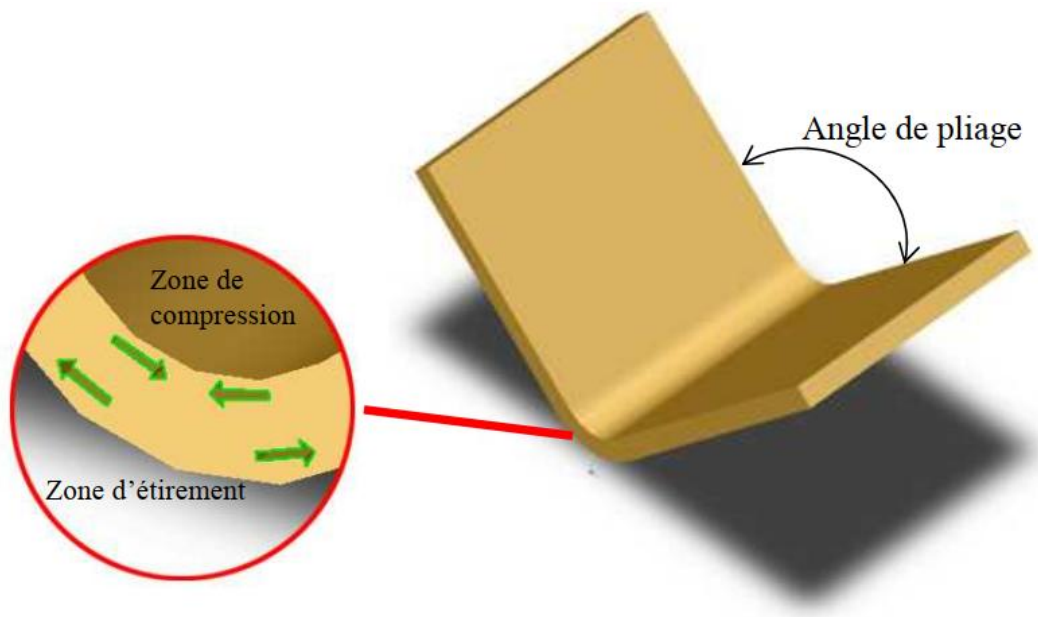


FIGURE II.8. Pliage sur plieuse universelle ou à sommier.

### II.14. Le pli

Au niveau des fibres, que se passe-t-il ?

Lors du pliage, la tôle subit une pression qui change l'orientation des fibres. Les fibres intérieures sont comprimées alors que celles extérieures subissent un étirement. L'angle obtenu est appelé « angle de pliage ».



**FIGURE II.9. la pression entre les zone de compression et d'étirement**

entre les deux zones de déformations, la fibre neutre qui ne subit aucun allongement ni raccourcissement sera la base de notre calcul de la *longueur développée*.

En effet, si nous savons déterminer la longueur de cette fibre qui ne subit aucune déformation après pliage, nous trouverons la longueur de la tôle avant pliage[7].

Tableau du positionnement de la fibre neutre.

Elle se situe à la distance  $a$  du bord intérieur. Suivant le rapport  $R_i/e$ ,  $a$  varie comme suit:

Tableau 8 : le rapport  $R_i/e$  en fonction de  $a$ .

$R_i / e$	environ 1	environ 2	environ 3
$a$	$e/3$	$2 e / 5$	$e/2$

### II.15. La cotation en pliage

En pliage, plusieurs cotations apparaissent : la longueur d'un bord plié, le rayon de pliage, l'angle de pliage, la longueur de pliage, etc. ... Nous allons passer en revue tous ces paramètres.

#### -La cotation d'une pièce pliée.

La cotation d'un bord plié se fait en intérieur ou extérieur ou même suivant des cotes mixtes entre l'intérieur et l'extérieur, cela en fonction du dessinateur ou des contraintes à respecter pour certaines pièces (contraintes d'ajustement par exemple).

#### -Le rayon de pliage appelé aussi rayon intérieur de pliage ou Ri.

Le rayon de pliage est défini selon la machine employée et les contraintes du dessin de la pièce. La plupart du temps, le dessin n'impose pas de rayon. C'est la machine utilisée qui définira à ce moment sa valeur.

**-Sur une presse plieuse** : le rayon intérieur dépend du V<sub>é</sub>. On admettra :

$$R_i = V_{\text{é}}/6$$

A noter que le rayon intérieur possible varie aussi en fonction de la matière et de son coefficient d'allongement. Retenons que plus la matière est malléable, plus le rayon intérieur pourra être petit, sans que l'on observe des défauts de criquage (cassure à l'extérieur du pli).

**-Sur une plieuse universelle** : le rayon de pliage est défini par l'opérateur (ou le plan de définition) durant le réglage du tablier de la machine. Dans ce cas, nous travaillerons avec le rayon extérieur du pli, le tablier parcourant l'extérieur du pli.

#### -L'autre paramètre, essentiel en pliage : l'angle de pliage ou l'angle du pli.

Il est défini par le dessin de définition de la pièce et peut être réalisé suivant les capacités machine.

L'angle le plus travaillé est celui de 90° (entreprises de tôlerie fine pour des coffrets, armoire, etc. ...)

La longueur développée d'une pièce pliée varie en fonction de l'angle de pliage (voir tableau des  $\Delta L$  (pertes au pli).

Le  $\Delta L$  peut-être comparé à la perte de longueur de matière entre l'état final (pièce pliée) et l'état initial (pièce à plat).

#### -La longueur de pliage

La longueur du pli est aussi appelé ligne de pliage. Ce paramètre fait varier la force à appliquer pour un pli. Plus la longueur est grande, plus grande sera la Force nécessaire.

### II.16. Les paramètres de pliage

Nous allons aborder les paramètres qui influencent le pliage sur presse-plieuse.

La détermination des paramètres commence par la lecture d'un abaque de pliage. Il en existe plusieurs sortes, souvent dépendants des machines utilisées (Presse plieuse Amada,

LVD, Colly, etc. ...)

L'abaque suivant est tiré d'une presse-plieruse Promécam[8].

### -Choix des paramètres

L'ordre souvent rencontré lors d'un exercice pour choisir les paramètres de pliage ainsi que de déterminer les données de fabrication est le suivant.

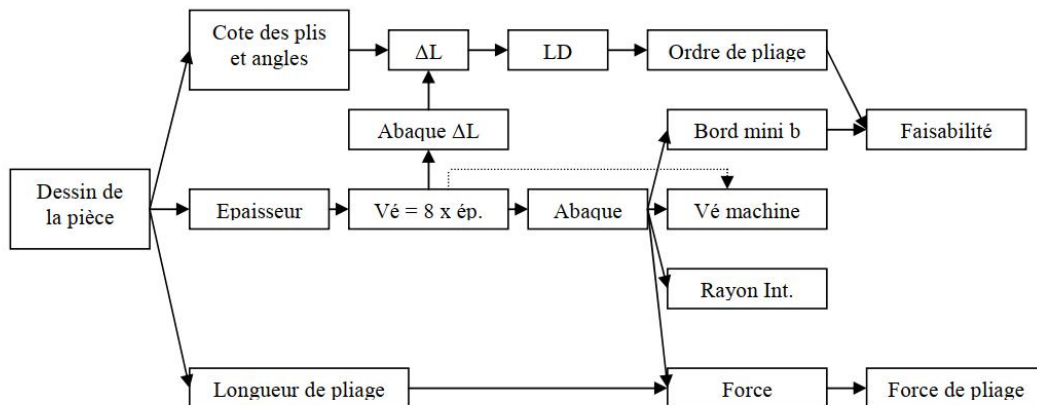


FIGURE II.10. schéma de dessin de la pièce

### II.17. Sécurité Au Travail

Soyez extrêmement prudent lors du travail et de la manipulation des aciers à ultra haute limite d'élasticité. Si vous utilisez un rayon de pliage trop petit, par exemple, une fissure peut apparaître au point de pliage et la plaque risque d'être éjectée de l'outil de pliage dans le sens de la courbure. En tant qu'opérateur chargé du pliage des plaques, vous devez prendre toutes les précautions nécessaires pour vous protéger, aucune autre personne n'est autorisée à entrer dans la zone de travail, par mesure de sécurité, restez à côté de la machine de pliage. Respectez scrupuleusement les instructions du fournisseur de l'acier et les consignes de sécurité de Patelier. Tout nouvel opérateur doit recevoir une formation adéquate avant de mettre en œuvre les aciers à ultra haute limite d'élasticité.

### Referance :

1. Crussard, C.J.B.d.M., *Les déformations des cristaux métalliques*. 1945. **68**(7): p. 174-197.
2. Gallardo, M., T. Collins, and A.J.T.d.S. Bartoli, *Utilisation de la photométrie et d'un patron pour la reconstruction de surfaces pliées et la calibration photométrique*.2017. **34**.
3. Justin, J. *Aspects mathématiques du pliage de papier*. in *Proceedings of the First International Meeting of Origami Science and Technology, Ferrara*. 1989.
4. Markiewicz, E., *Contribution au développement d'une méthodologie simplifiée d'aide au design collision des véhicules de transport pendant la phase de préconception: introduction du concept de super éléments de pliage*. 1994, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.
5. Meysoune, M. and K. MENNA, *Effet de déformation par pliage sur le comportement à la corrosion de l'acier duplex 2205*. 2019, Ecole nationale supérieure des mines et de la métallurgie.
6. Osmond, F., C. Fremont, and G.J.R.d.M. Cartaud, *Les modes de déformation et de rupture des fers et des aciers doux*. 1904. **1**(1): p. 11-45.
7. Zinbi, A., et al., *Modélisation du comportement de AISI 301 écroui et la mise en forme en pliage*. 2009: p. 21-24.
8. Jaoul, B., I. Bricot, and P. Lacombe, *Relation entre la géométrie de la déformation de monocristaux d'aluminium et leur structure après traitement thermique*.Revue de Metallurgie, 1957. **54**(2): p. 81-92.

Chapitre III  
Partie expérimentale  
(simulation sur  
Mastercam)

### III.1. Introduction

Mastercam est une série d'applications logicielles de fabrication assistée par ordinateur (FAO) et de CAO/FAO. Fondée au Massachusetts en 1983, CNC Software, LLC est l'un des plus anciens développeurs de logiciels de conception assistée par ordinateur et de fabrication assistée par ordinateur (CAO/FAO) sur PC. Elle est l'une des premières à avoir introduit des logiciels de CAO/FAO destinés à la fois aux machinistes et aux ingénieurs. Mastercam, le principal produit de CNC Software, a commencé comme un système de FAO 2D avec des outils de CAO qui permettaient aux machinistes de concevoir des pièces virtuelles sur un écran d'ordinateur et de guider les machines-outils à commande numérique par ordinateur (CNC) dans la fabrication des pièces. Depuis lors, Mastercam est devenu le logiciel de CAO/FAO le plus utilisé au monde. CNC Software, LLC est maintenant situé à Tolland, Connecticut.

### III.2. Vue générale de Mastercam

L'interface de Mastercam se compose d'éléments standard, dont des barres d'outils, une barre d'état, et une zone de travail. Elle comporte également des éléments spéciaux, tels que les barres de ruban et les Managers.

Cette section aborde brièvement les éléments qui composent l'interface de Mastercam afin de vous donner une meilleure compréhension du fonctionnement de MastercamFigure1.

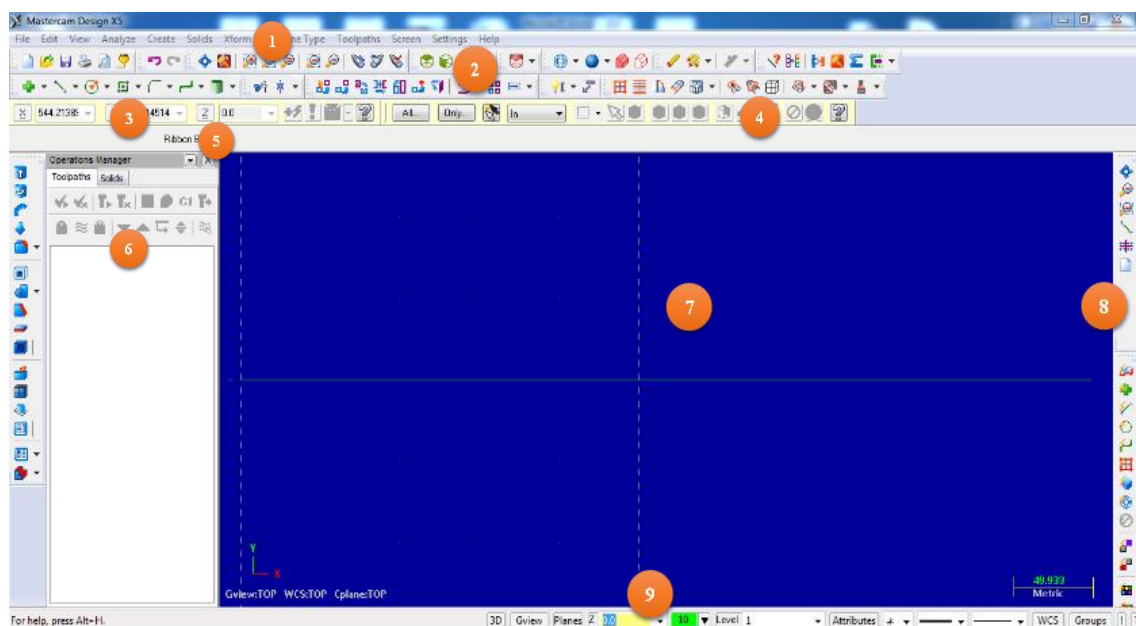


Figure III.1: Acciers de mastercam

1. **Barre de menu** Contient des menus qui vous permettent d'accéder à toutes les fonctions de Mastercam. Cliquez ou survolez le nom du menu pour afficher ses commandes.
2. **Barres d'outils** Regroupements de boutons avec des fonctions connexes.
3. **Barre d'outils AutoCursor** Vous permet d'entrer manuellement des coordonnées X, Y et Z ou de détecter et d'accrocher des points lorsque vous déplacez le curseur sur la géométrie dans la fenêtre graphique. L'AutoCursor devient actif lorsque Mastercam vous demande de sélectionner une position dans la fenêtre graphique.
4. **Barre d'outils Sélection générale** Pour la plupart des fonctions Mastercam, utilisez cette barre d'outils pour sélectionner des entités dans la fenêtre graphique. La sélection générale est active chaque fois que vous n'êtes pas déjà dans une fonction telle que Sketcher, Analyze, ou View Manipulation. Elle est également active pendant les fonctions qui vous demandent de sélectionner des entités, comme dans les fonctions de création de parcours.
5. **Rubans Utilisez** les rubans de Mastercam pour créer et modifier la géométrie. Les rubans fonctionnent un peu comme des boîtes de dialogue mais ressemblent à des barres d'outils. Vous ne pouvez pas désancrer ou déplacer les barres de ruban.
6. **Gestionnaires**
  - **Gestionnaire des parcours d'outils** : Liste les groupes de parcours et les types de machines types de machines pour le fichier actuel. Utilisez le Toolpaths Manager pour générer, trier, éditer, régénérer, et poster n'importe quelle opération.
  - **Gestionnaire des solides** : Liste chaque solide dans le fichier actuel avec fichier actuel avec l'historique de ses opérations et parcours d'outils associés. Utilisez le Gestionnaire de solides pour modifier les solides et leurs opérations.
  - **Directeur artistique** : Gère les éléments du modèle d'art en actuel.
7. **Fenêtre graphique** La fenêtre graphique est l'espace de travail dans lequel vous visualisez, créer et modifier vos pièces. La fenêtre graphique affiche également des informations sur le système de mesure actuel (pouces ou millimètres), les vues et plans dans lesquels plans dans lesquels vous travaillez (Gview, Cplane, Tplane et WCS) et les axes de coordonnées de la vue ou du plan actuel. axes de coordonnées pour la vue ou le plan actuel.
8. **Barre d'outils la plus récemment utilisée** Utilisez la barre d'outils pour accéder rapidement aux fonctions de Mastercam que vous avez utilisées précédemment. accéder rapidement aux fonctions Mastercam que vous avez

## Chapitre III Partie expérimentale (simulation sur Mastercam)

utilisées précédemment. La barre d'outils est ancrée verticalement à droite de votre fenêtre graphique par défaut. Les boutons de la barre d'outils se mettent automatiquement à jour lorsque vous utilisez les fonctions Mastercam.

9. **Barre d'état** Fournit un accès rapide aux fonctions qui vous permettent de modifier les attributs, les niveaux, les groupes et l'orientation (vues et plans) de la géométrie et des parcours d'outils dans la fenêtre graphique. Le côté gauche de la barre d'état affiche des informations sur les plans actuels

### III.3. Géométrie 2D et 3D de la pièce mécanique:

Les figures au-dessous (Figure 2 et Figure 3) présentent les dimensions de la géométrie en 2D et la présentation en 3D de la pièce mécanique de notre projet.

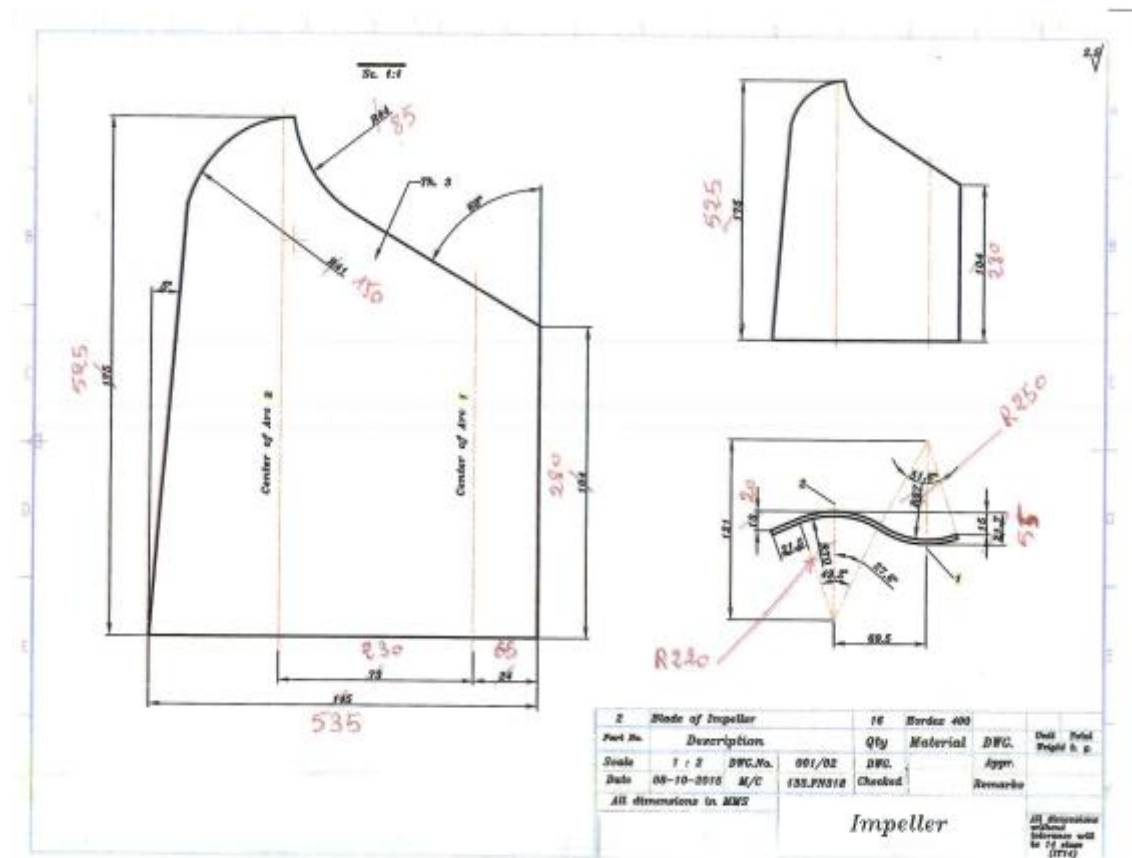
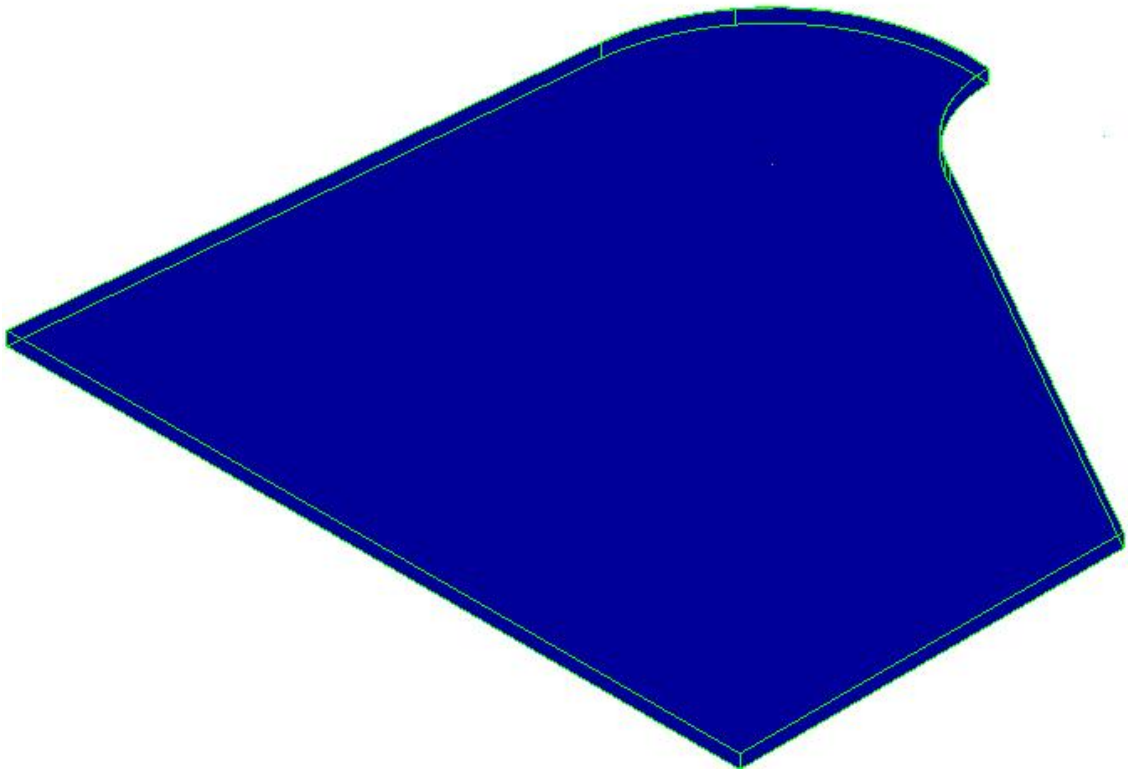


Figure III.2 : Dessin de définition en 2D de la pièce



**Figure III.3:** Dessin de définition en 3D de la pièce

#### **III.4. Simulation des Géométrie de la pièce**

Pour la conception de la pièce de notre projet sous MasterCam version x5 2010 on va suivre les étapes suivantes:

- Lancement du logiciel MasterCam version x5;
- Créer une référence;
- La création des line ;
- Création des cercle:
- Extrusion du la pièce;
- Définition du brut;
- Génération du programme CN d'usinage:

### III.4.1.Lancement du logiciel MasterCam version x5



Pour accéder au MasterCam version x5 en double cliquant sur cette icône l'interface présenté à la Figure 3 s'affiche.

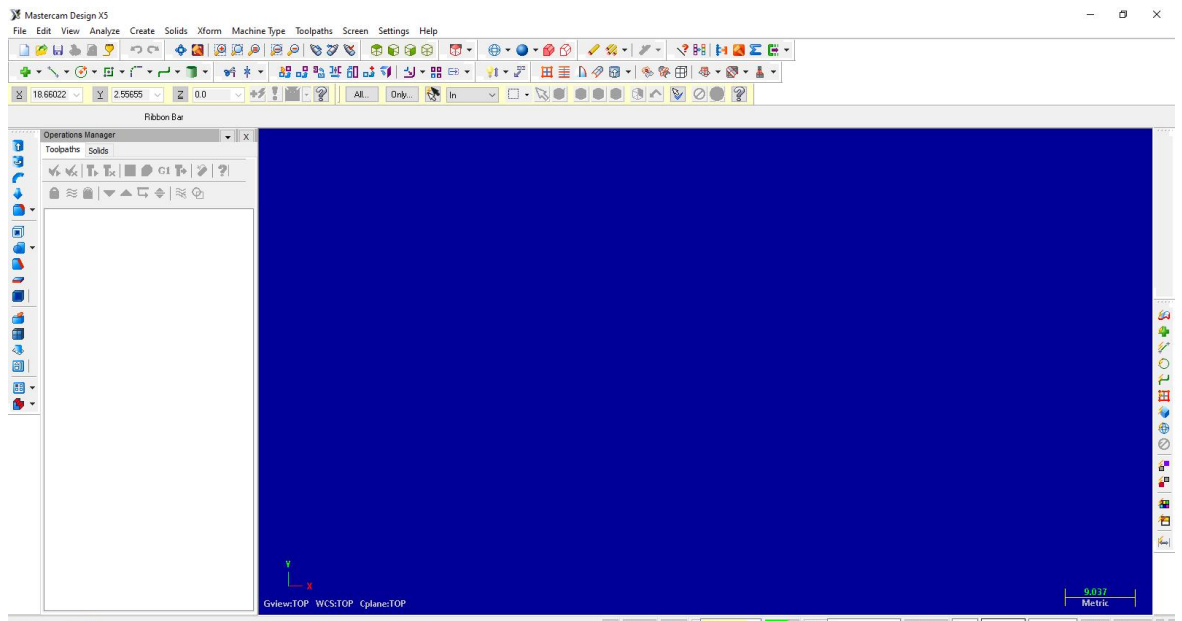



Figure III.4:Interface utilisateur MasterCam

### III.4.2.Créer une référence:

Afin de créer une référence, nous suivons les étapes suivantes:

- ✓ Allez dans la barre de menu et cliquez sur **screen**;(Figure 5)
- ✓ nous choisissons **Grid setting**;
  - ✓ Nous marquons ✓ chacun de **activegrid** et **visible grid** ;
  - ✓ Remplacez la valeur de X et Y par le nombre 50 dans le champ **spacing**
  - ✓ Valider la configuration en cliquant sur le bouton: 

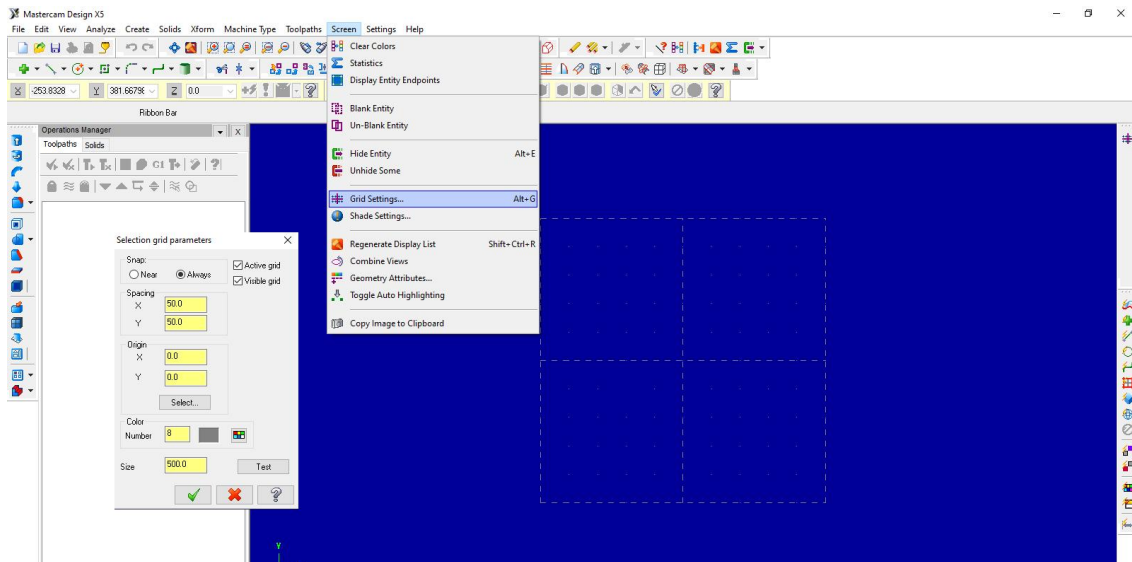



Figure III.5:photoCréer une référence.

### III.4.3.La création des line :

Pour créer des lignes, suivez ces étapes:

- ✓ Afin de créer la première ligne, qui représente la base, Nous allons dans la barre de menu, choisissez **Create, Line**, puis **Endpoint..**( **Figure6**)
- ✓ Pour la deuxième ligne, nous la dessinons à partir du côté droit de la première ligne, et elle lui est perpendiculaire, et elle est créée avec les mêmes étapes précédentes.
- ✓ Pour la troisième ligne, nous la dessinons à partir du côté gauche de la première ligne et elle est inclinée de 85 degrés par rapport à la ligne de base.
- ✓ Pour la quatrième ligne, nous la dessinons à partir du haut de la deuxième ligne et elle est inclinée de 60 degrés.
- ✓ Enfin, nous entrons les valeurs des longueurs des quatre lignes, et puis en cliquant sur  le bouton pour valider la sélection.

## Chapitre III Partie expérimentale (simulation sur Mastercam)

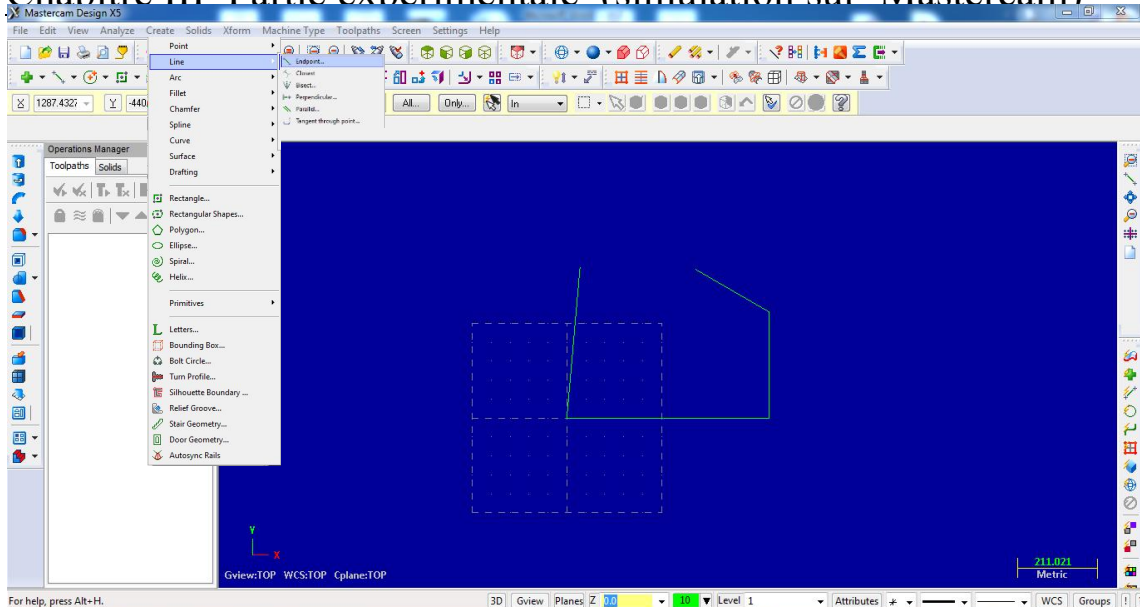



Figure III.6: Une illustration montrant la création de lignes

### III.4.4. Création des Arcs:

Afin de créer des arcs, suivez ces étapes (Figure 7):

- ✓ Dans le premier créez un quart de cercle sur le côté gauche afin d'aller à la **Create, Arc**, puis **Arc Endpoint**.
- ✓ Pour créer le deuxième anneau avec un diamètre extérieur, procédez de la même manière que les étapes précédentes, en respectant les dimensions dans un dessin en 2D (Figure 3).
- ✓ Enfin, cliquant sur le bouton  pour valider la sélection.

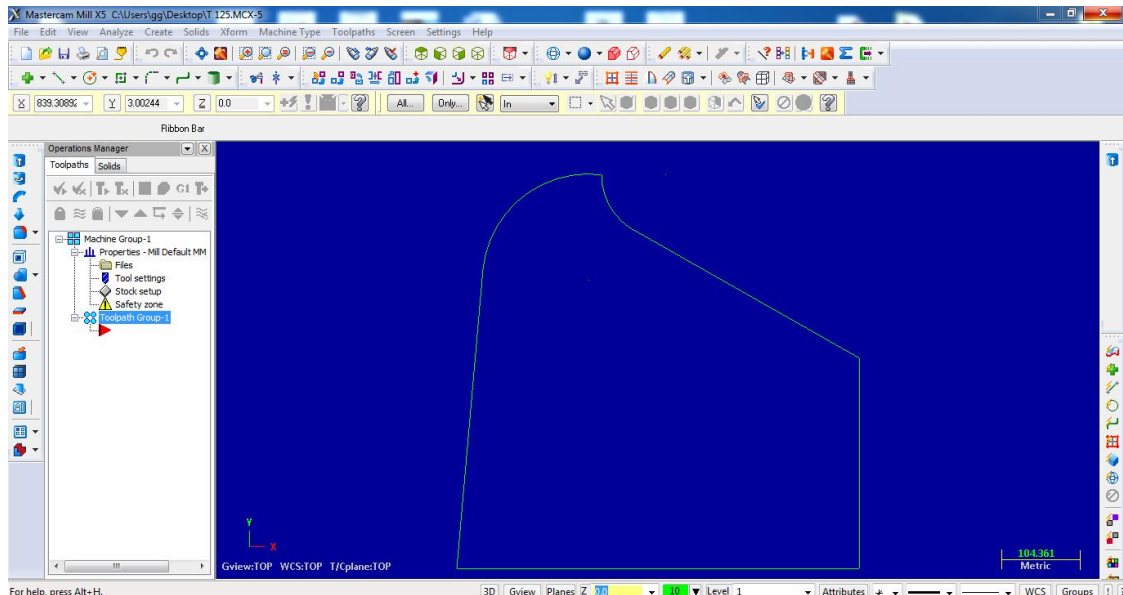




Figure III.7: Une illustration montrant la création de Arc

### III.4.5.Extrusion du la pièce:

À ce stade, nous allons convertir la conception d'un dessin en deux dimensions en une figure en trois dimensions, en suivant les étapes suivantes :

- ✓ Cliquer sur l'onglet **SOLIDS** puis choisir la commande **Extrude (Figure 8)**, la fenêtre sur la **Figure 9**s'affiche;
- ✓ Sélectionner le pièce, en cliquant sur son circonférence à l'aide du bouton gauche de la souris, et puis en cliquant sur le  bouton pour valider la sélection.
- ✓ Après validation, la fenêtre sur la **Figure 10**s'affiche Saisir la distance de l'épaisseur du pièce(dans notre cas l'épaisseur du rectangle est de 10 mm), et puis en cliquant sur  bouton valider l'extrusion,

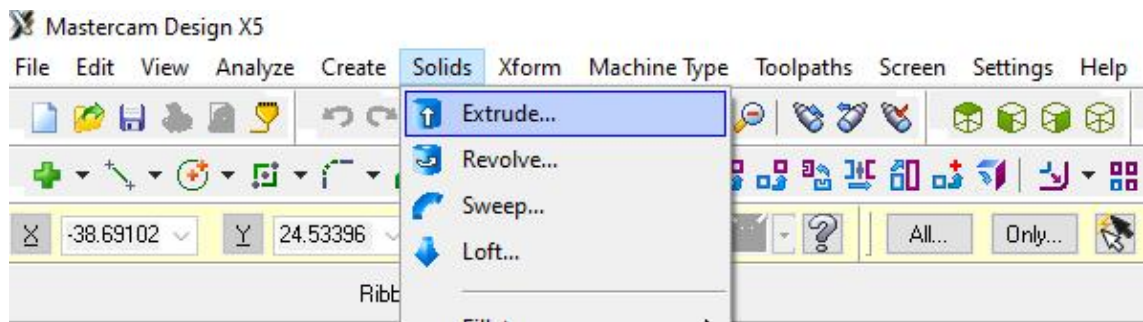


Figure III.8: La barre des onglets.

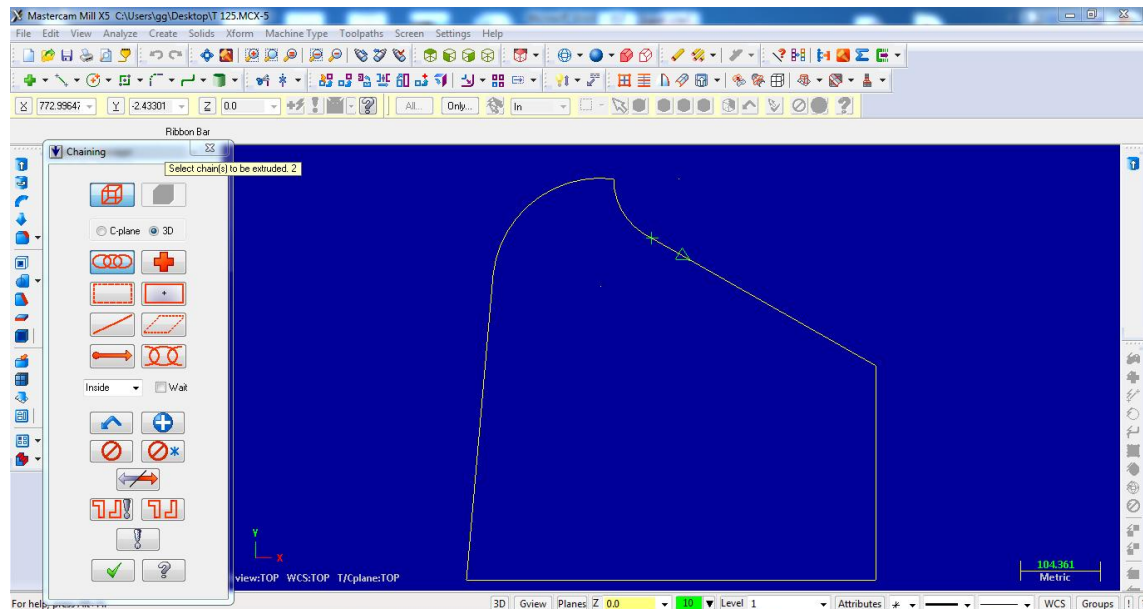


Figure III.9: Menu Chaining

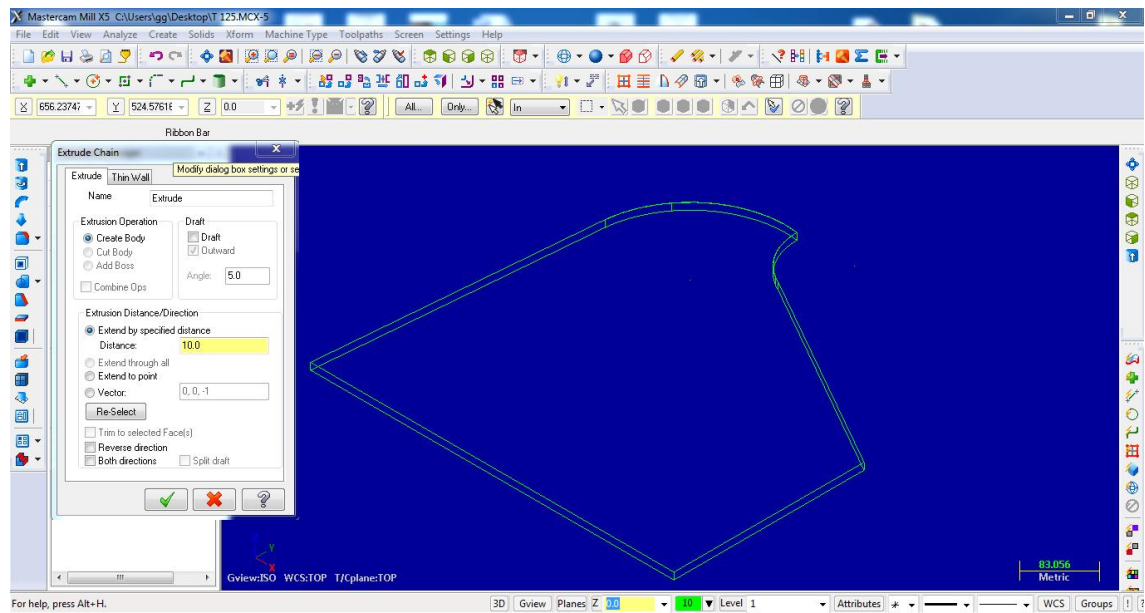



Figure III.10:Extrusion du pièce.

### III.4.6.Définition du brut:

Le brut dans notre cas c'est un bloc de longueur 536 mm, de largeur 526 mm et d'hauteur 10 mm .

Pour définir le brut de la pièce , on suivre les étapes suivantes:

- ✓ du menu des onglets, en cliquant sur l'onglet Machine, puis la fonction Mill ensuite la fonction Defaulte, la fenêtre montrée sur la **Figure 11** s'affiche.
- ✓ De l'arborescence sur le **menu Toolpaths(Figure 11)**, en cliquant sur **Stock setup**, la fenêtre montrée sur la **Figure 12** s'affiche, et puis en cliquant sur la fonction **All Solids** sur la **Figure 12** afin de montrer les dimensions réelles de votre pièce;
- ✓ Saisir les paramètres du brut (**Figure 12**), et puis cliquer sur le  bouton validation. Après la validation on obtient le brut représenté sur la **Figure 12 (lignes rouges)**.

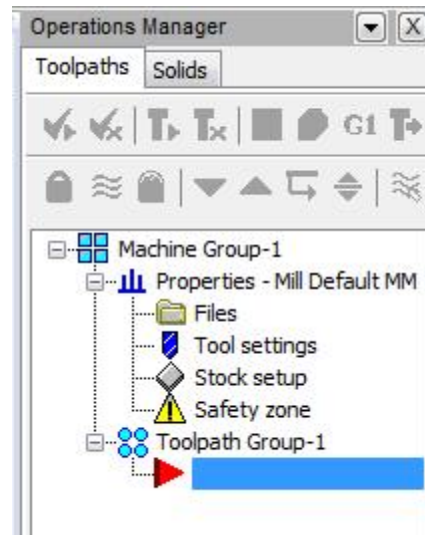


Figure III.11: Menu Toolpaths

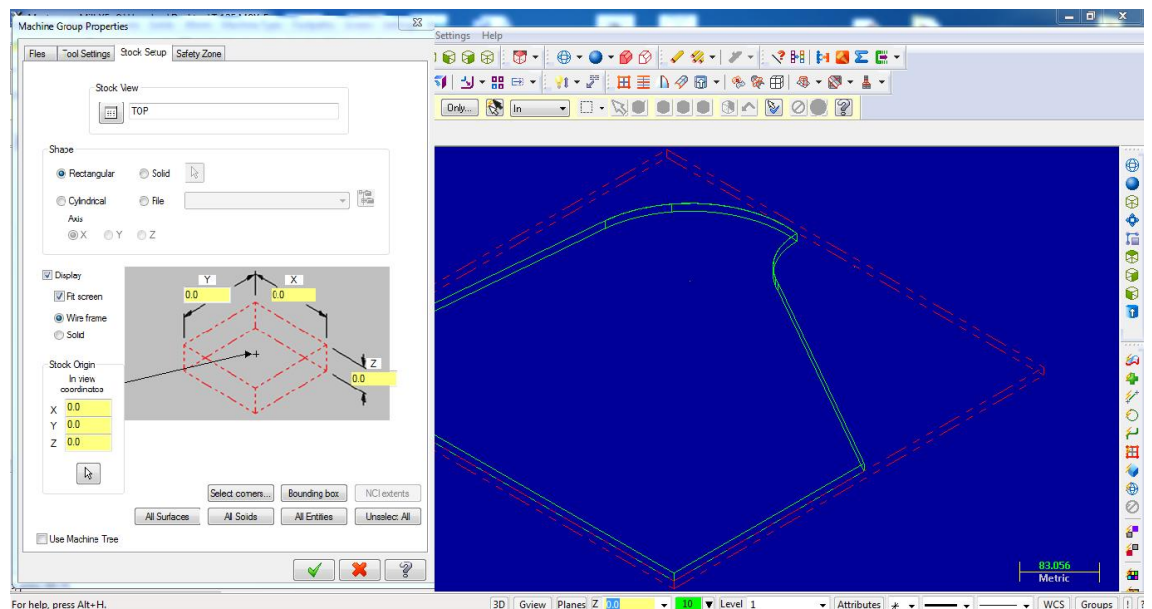



Figure III.12: Saisie des paramètres du brut

Une fois sur une définition du brut, maintenant on peut faire la première stratégie d'usinage qui est le surfacage en bout ou en face (Facing). Pour l'atteindre on suit les étapes suivantes :

- ✓ Cliquer sur la **toolpaths** , et puis cliquer sur dans le **contour (Figure 13)** , la fenêtre sur la **Figure 14**s'affiche;
- ✓ Sélectionner le pièce à surfer, en cliquant sur son circonférence à l'aide du bouton gauche

## Chapitre III Partie expérimentale (simulation sur Mastercam)

de la souris, et puis cliquer sur le bouton  pour validation, la fenêtre sur la **Figure 15** s'affiche;

- ✓ Cliquer sur la **fonction Tool (Figure 15)**, une fenêtre s'affiche puis cliquer sur la fonction **Select librarytool**, une autre fenêtre aussi s'affiche, Ensuite, nous choisissons l'outil numéro **T219**.
- ✓ Cliquer sur la fonction **Cut Parameters (Figure 16)**, une fenêtre s'affiche et choisir **leright** dans la boîte **Compensation direction**.
- ✓ Cliquer sur la fonction **DepthCut (Figure 17)**, une fenêtre s'affiche et cochez la case **DepthCut**.
- ✓ Cliquer sur la fonction **Multi Passes (Figure 18)**, une fenêtre s'affiche et cochez la case **Multi Passes**.
- ✓ Cliquer sur la fonction **LinkingParameters (Figure 19)**, une fenêtre s'affiche et modifier la valeur de **Depth** (la valeur de la profondeur de surfacage = - 40) et puis cliquer sur le bouton  de validation.

## Chapitre III Partie expérimentale (simulation sur Mastercam)

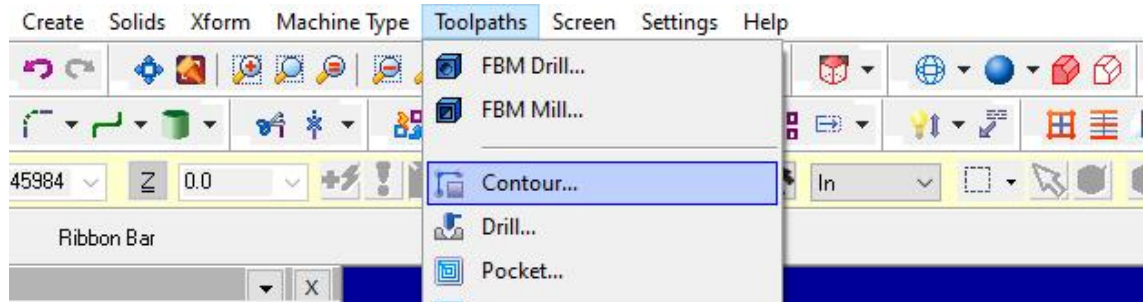


Figure III.13: La barre des onglets.

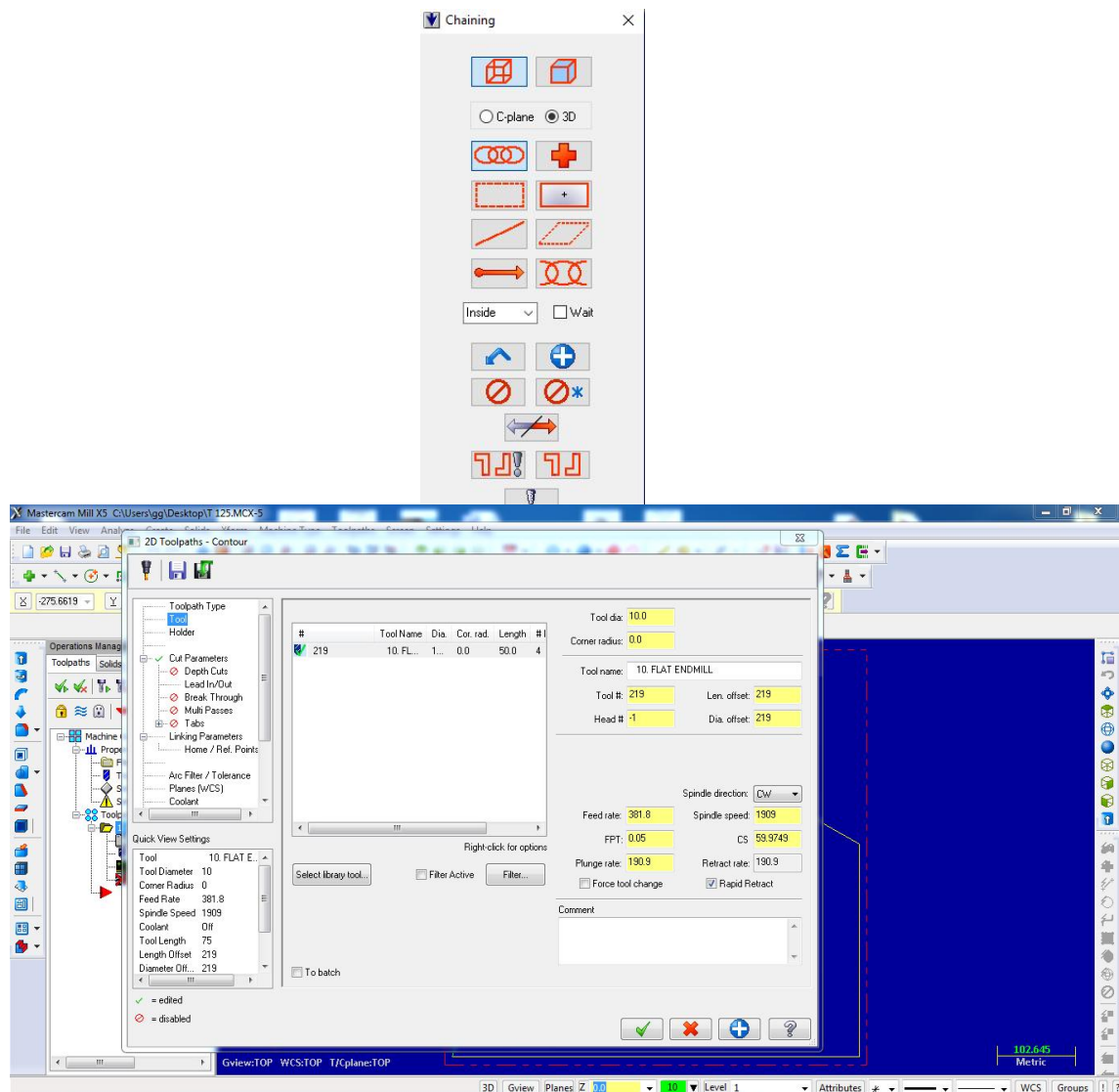


Figure III.16:Présentation du la Tools

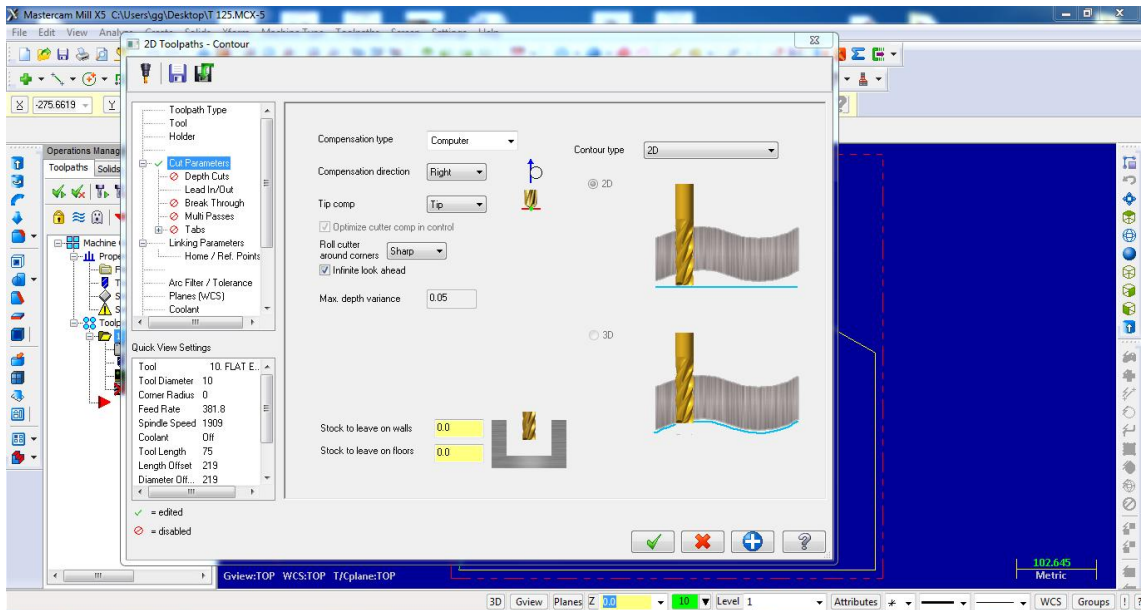


Figure III.14: Présentation du laCutParameters.

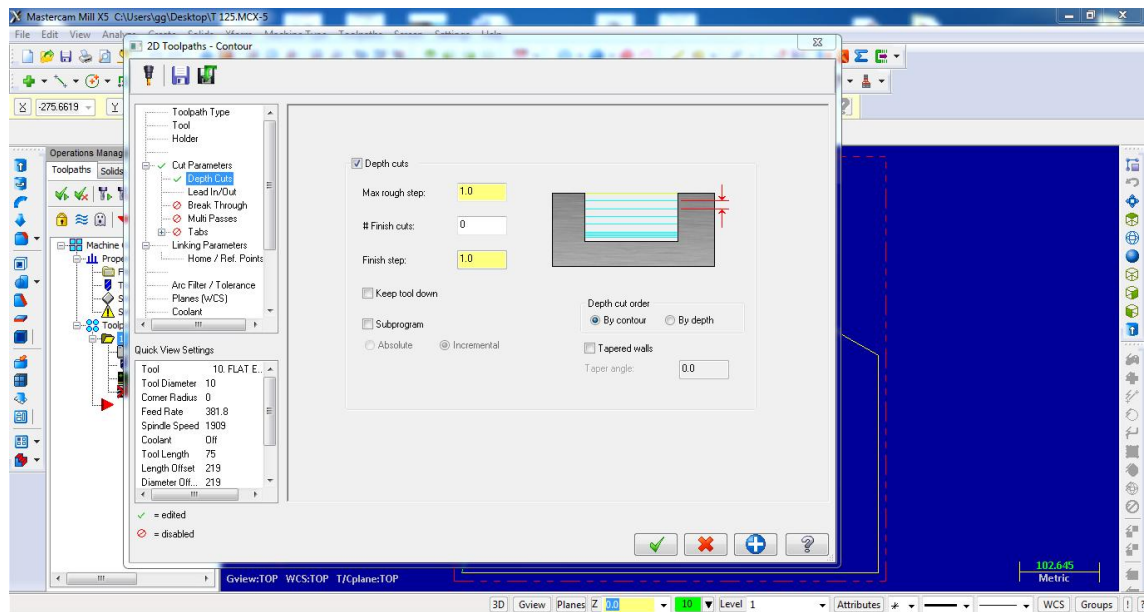


Figure III.17:Présentation du laDepthCut

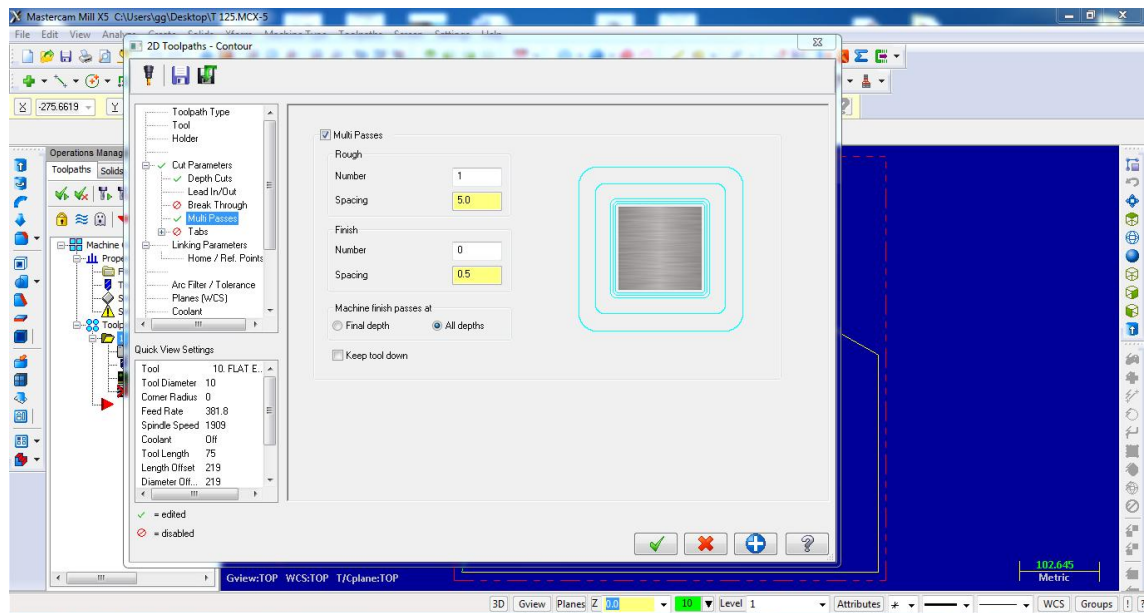


Figure III.18:Présentation du la Multi Passes.

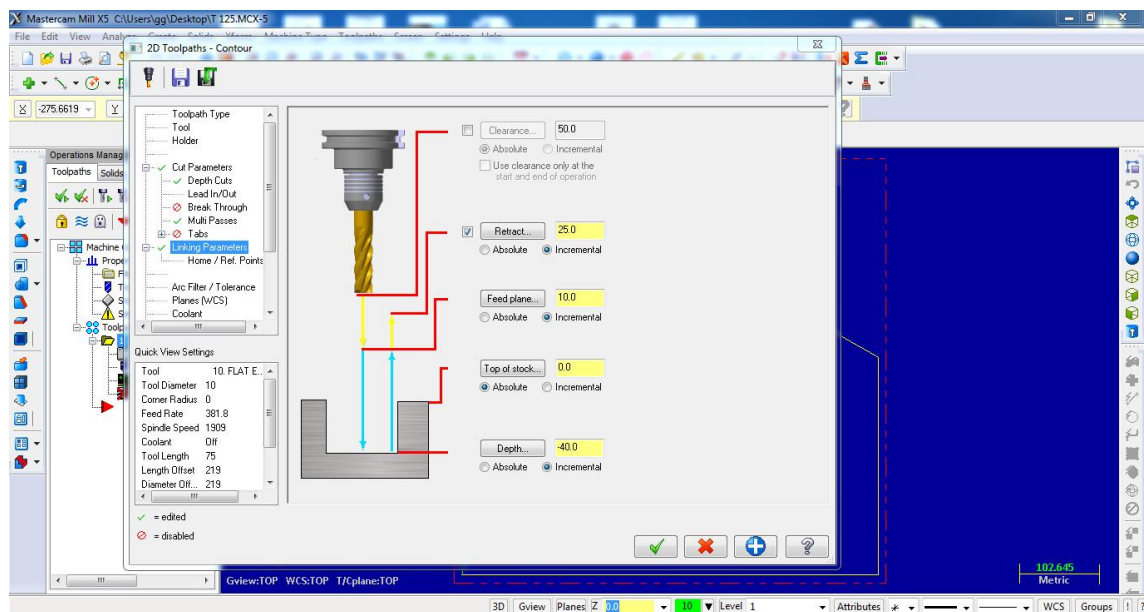


Figure III.19:Présentation du la LinkingParameters

après avoir terminé toutes les opérations de stratégies d'usinages précédentes notre pièce est maintenant à la phase finale de la CFAO avant de générer le programme d'usinage en G-code.

### III.4.7. Génération du programme CN d'usinage:

pour générer le programme CN d'usinage en G-code on suivre les étapes suivantes:

A partir de la fenêtre **lemenuToolpaths** (Figure 11), en cliquant sur la touche **G1** (Post selectedoperations), la fenêtre sur la Figure 20 s'affiche, et puis en cliquant sur le bouton pour validation, le G-code se génère (Figure 21).

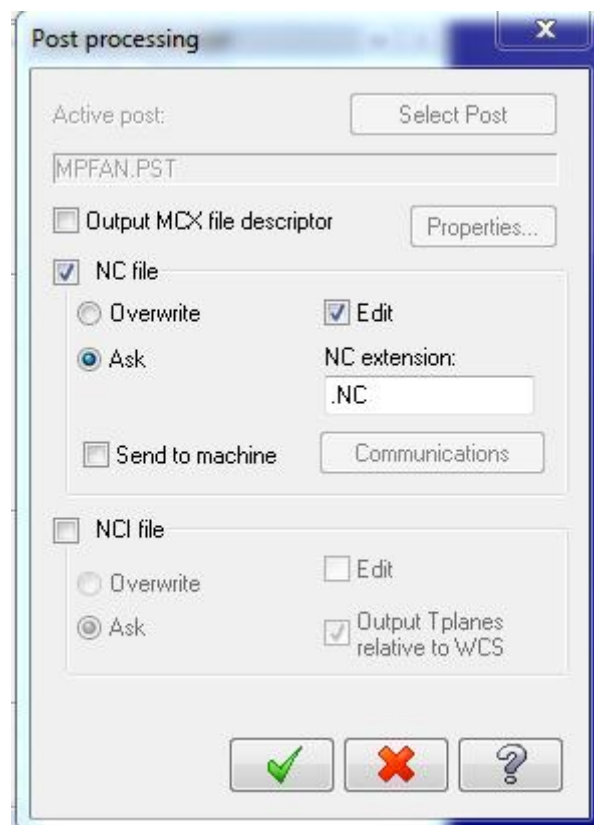


Figure III.20: Présentation du menu Post processing

```
%  
O0000 (T 125 M)  
(DATE=DD-MM-YY - 08-06-22 TIME=HH:MM - 13:38)  
(MCX FILE - C:\USERS\GG\DESKTOP\T 125.MCX-5)  
(NC FILE - C:\USERS\GG\DOCUMENTS\MY MCAMX5\MILL\NC\T 125 M.NC)  
(MATERIAL - ALUMINUM MM - 2024)  
( T219 | 10. FLAT ENDMILL | H219 )  
N100 G21  
N102 G0 G17 G40 G49 G80 G90  
N104 T219 M6  
N106 G0 G90 G54 X-6.602 Y211.38 A0. S1909 M3  
N108 G43 H219 Z25.  
N110 Z10.  
N112 G1 Z-1. F190.9  
N114 X3.36 Y210.508 F381.8  
N116 G2 X12.488 Y200.546 I-.872 J-9.962  
N118 X12.45 Y199.675 I-10. J0.  
N120 G1 X-4.981 Y.436  
N122 G3 X-5. Y0. I4.981 J-.436  
N124 X0. Y-5. I5. J0.  
N126 G1 X535.  
N128 G3 X540. Y0. I0. J5.  
N130 G1 Y280.  
N132 G3 X537.47 Y284.347 I-5. J0.  
N134 G1 X244.781 Y450.687  
N136 G3 X244.372 Y450.895 I-2.471 J-4.347  
N138 G2 X197.491 Y523.718 I33.119 J72.823  
N140 G3 X193.106 Y528.68 I-5. J0.  
N142 X175.126 Y529.791 I-17.98 J-144.923  
N144 X29.885 Y398.955 I0. J-146.034  
N146 G1 X12.45 Y199.675
```

Figure III.21: Programme d'usinage en G-code

## Chapitre III Partie expérimentale (simulation sur Mastercam)

Après avoir coupé la pièce, nous la portons à la plieuse pour la plier des deux côtés comme indiqué sur la(**figure 22.23**)

Enfin, on obtient des ailettes d'un ventilateur de tirage ciment, comme le montre la(**figure 24**)



**Figure III.22:**plieuse



**Figure III.23:**plier la pièce



**Figure III.24:**la pièce pliée

### **III.5.Conclusion**

Dans ce chapitre on a montré la procédures en détaille de conception et de fabrication d'une pièce de notre projet par l'utilisation de plusieurs stratégies d'usinage du système CFAO MasterCAM, à partir du dessin de définition jusqu'à la génération du programme d'usinage en G-code.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

La découpe de tôle a pour but de séparer partiellement ou complètement des zones de la plaque pour obtenir la forme souhaitée et les préparer pour d'autres opérations telles que le pliage ou l'emboutissage.

L'érosion par étincelles est le processus de décapage des matériaux par une série successive de décharges électriques, séparées les unes des autres par un certain temps.

Le pliage est une déformation obtenue grâce à une force appliquée sur la longueur de la pièce. Celle-ci sera en appui sur 2 lignes d'appuis et s'apparente à la flexion. Il faudra dépasser la limite élastique pour obtenir l'angle voulu

L'interface de Mastercam se compose d'éléments standard, dont des barres d'outils, une barre d'état, et une zone de travail. Elle comporte également des éléments spéciaux, tels que les barres de ruban et les Manager

Nous avons conçu une partie de notre projet sous MasterCam v5 2010 selon les étapes suivantes:

- Lancement du logiciel MasterCam version x5;
- Créer une référence;
- La création des line ;
- Création des cercle:
- Extrusion du la pièce;
- Définition du brut;
- Génération du programme CN d'usinage:

## **Résumé:**

Dans ce travail on a présenté les notions fondamentales des machines à commande numérique, leurs définition, historique, évolution classification. Structure, ainsi que les méthodes de programmations. Une présentation des logiciels de simulation CFAO MasterCAM X5, dans le but de simuler l'usinage associé à la fabrication d'une ailette de ventilateur en ciment.

**Mots-clés :** MasterCAM, ailette, usinage, pliage.

## **المخلص:**

قدمنا في هذا العمل المفاهيم الأساسية للألات التي يتم التحكم فيها رقمياً ، تعريفها ، تاريخها ، وتصنيفاتها وتطورها بالإضافة إلى طرق البرمجة . كما قمنا بطرح نظرة عامة على برنامج محاكاة MasterCAM X5 CAD / CAM ، بهدف محاكاة الآلات المرتبطة بتصنيع شفرة مروحة الأسمنت.  
**كلمات مفتاحية:** المحاكاة، الزعنفة، التصنيع، الطي.

## **Abstract:**

In this work we presented the fundamental notions of numerically controlled machines, their definition, history, evolution classification. structure, as well as programming methods. An overview of MasterCAM X5 CAD/CAM simulation software, with the aim of simulating the machining associated with the fabrication of a cement fan blade.

**Keywords:** MasterCAM, blade, fabrication, folding.