

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme de
Master académique en Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Thème :

Etude de la maintenance en vue de la
fiabilisation d'une machine de
découpe à plasma

Présenter par :

BOUDIB Smail

BAHMED Salah

Encadrer par :

Mme. TEKLAL Fatiha

Mr. BENCHERIF Mokhtar

Devant le jury d'examen compose de :

Mr. BELAID Kamel

président

Mr. MEZIANE Tarik

Examineur

Mr. TEKLAL Fatiha

Encadreur

Mr. BENCHERIF Mokhtar

Co encadreur

Promotion 2025-2026

Remerciements

Nous tenons, avant tout, à exprimer notre profonde gratitude envers le Tout-Puissant Le Bon Dieu, qui nous a insufflé la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent à notre promoteur Madame TEKAL Fatiha, pour avoir accepté de nous encadrer avec autant de bienveillance, ainsi que pour ses précieux conseils qui ont grandement guidé nos pas.

Nous tenons également à exprimer toute notre reconnaissance à Monsieur BENCHERIF Mokhtar, pour le temps précieux qu'il nous a consacré et pour la patience infinie dont il a fait preuve à notre égard.

Un grand merci à toute l'équipe de l'entreprise FLUIDEX, à sa tête Monsieur HAMDAD Chabane, ainsi qu'à l'ensemble des ingénieurs et des opérateurs. Nous remercions spécialement Monsieur FELLAH Allel, ainsi que Monsieur MESSAOUDI Lamine pour son aide précieuse et son soutien technique indispensable à la réalisation de ce projet.

Nous exprimons notre profonde gratitude aux membres du jury qui ont honoré notre travail en acceptant de l'évaluer, ainsi qu'à l'ensemble des enseignants du département de Génie Mécanique pour la qualité de leur formation.

Enfin, que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire, ne serait-ce que par un mot d'encouragement ou un sourire, trouvent ici l'expression de notre vive gratitude.

Dédicace

*C'est avec une immense fierté, une joie profonde et un honneur indicible que je dédie
ce travail :*

*À mon cher Père, qui a cru en moi dès mon plus jeune âge, qui s'est sacrifié pour moi
et m'a donné tout ce qu'il avait de plus précieux afin que je puisse continuer sur la
voie qu'il avait tracée pour moi.*

*À ma chère Mère, lumière de mes jours, qui est à veillé à mes côtés et dont les
pensées m'ont constamment porté.*

Je vous dédie ce fruit de mes efforts avec toute ma gratitude et tout mon amour.

*À mes chers frères et sœurs : Zohra, Bachir, Amina, Aya et le petit Zaki. Que ce
travail soit pour vous une source d'aspiration*

À tous mes amis et amies, et à tous mes amis de CVL

*À mon camarade Smail, avec qui j'ai partagé les moments de doutes et les joies de
cette aventure académique.*

Salah

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents, qui ont toujours été à mes côtés par leur amour, leurs sacrifices et leurs encouragements. Leur soutien indéfectible m'a permis de surmonter les difficultés et d'avancer vers la réussite.

À mon frère, mon compagnon de vie depuis le premier jour, pour tous les souvenirs, les moments partagés et le soutien mutuel qui nous unit.

À mon collègue Salah, pour sa collaboration, son sérieux et les efforts fournis tout au long de la réalisation de ce mémoire. Ce travail est également le fruit de notre engagement commun.

À ma famille, pour sa confiance et son appui tout au long de mon parcours.

À mes amis et à toutes les personnes qui ont cru en moi et m'ont encouragé à poursuivre mes objectifs.

Enfin, je dédie ce mémoire à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Avec toute ma gratitude et mon profond respect.

Smail

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

I.1 Introduction.....	3
I.2 Localisation de l'entreprise.....	4
I.3 Secteur d'activité de l'entreprise	4
I.4 Organigramme de l'entreprise	5
I.5 Chaîne de production de l'entreprise	5

Chapitre II

II.1 Introduction	12
II.2 Les Procédés de Fabrication Industrielle.....	12
II.2.1 Définition et classification des procédés	12
II.2.2 Enjeux de la fabrication.....	13
II.3 Procédés de découpage	14
II.3.1 Découpage Laser	14
II.3.2 Découpage au Jet d'Eau	15
II.3.3 Découpage Plasma.....	16
II.4 Fondements de la Maintenance Industrielle	17
II.4.1 Définition et évolution normative (Norme NF EN 13306)	17
II.4.2 Les types de maintenance	19
II.4.2.a Maintenance Corrective	19
II.4.2.b Maintenance Préventive (Systématique et Conditionnelle).....	20
II.4.3 Indicateurs de Sûreté de Fonctionnement.....	21
II.5 La Transition vers la Maintenance 4.0	22
II.5.1 Le paradigme de l'Industrie 4.0.....	22
II.5.2 Les piliers technologiques de la maintenance intelligente	23

II.5.2.a IoT et Capteurs Intelligents.....	24
II.5.2.b Big Data et Analyse de données	25
II.5.2.c Intelligence Artificielle (IA)	26
II.6 L'Inspection Basée sur le Risque (Risk-Based Inspection – RBI).....	27
II.6.1 Concept du RBI	27
II.6.2 Méthodologie d'analyse	29
II.6.2.a Évaluation de la Probabilité de Défaillance (PoF).....	29
II.6.2.b Évaluation des Conséquences de la Défaillance (CoF) (économiques, environnementales, humaines)	30
II.7 Pilotage de la Performance par les Indicateurs Clés (KPI)	31
II.7.1 Définition et rôle des KPI.....	31
II.7.2 Analyse des indicateurs fondamentaux	31
II.7.2.a MTBF (Mean Time Between Failures)	31
II.7.2.b MTTR (Mean Time to Repair)	32
II.7.2.c Taux de disponibilité	33
II.7.2.d Taux de défaillance.....	34
II.7.2.e Le Taux de Rendement Synthétique (TRS).....	35
II.8 Conclusion	36

Chapitre III

III.1 Introduction et Fondements de la Technologie de découpe plasma.....	37
III.2 Cahier des charges.....	38
III.3 Principe physique (Découpe plasma).....	39
III.3.1 Avantages et limites	40
III.4 Architecture et Organes Principaux	41
III.4.1 Le Générateur de courant (Source de puissance)	41
.....	41
III.4.2 La Torche de découpe (L'organe effecteur)	44

III.4.2.a Torche plasma	44
III.4.2.b Torche oxycoupage	45
III.4.3 Le Système d'alimentation en gaz et air (Compresseur)	46
III.4.3.a Importance de la pression et de la déshydratation.....	47
III.4.3.b Composants responsables et fonctionnement.....	47
III.4.4 L'Unité de contrôle (Boîte électrique et CNC).....	48
III.4.5 Table de découpe plasma	50
III.4.6 Armoire électrique.....	50
III.5 Analyse Fonctionnelle et Cinématique	51
III.5.1 Processus de formation de l'arc (Amorçage).....	51
III.5.2 Eléments de transmission du mouvement	53
III.5.3 Schéma cinématique (Mouvements)	56
III.6. Vers la Gestion de la Maintenance (Transition).....	57
III.6.1 Les zones de fragilité (Consommables)	57
III.6.1.a L'Électrode : Le point d'émission	57
III.6.1.b La Tuyère (Buse).....	59
III.6.1.c Autres composants de la chaîne de fragilité	61
III.6.2 Les cause de défaillance	66
III.6.3 Objectifs de la maintenance	67
III.6.4 Analyse des pannes rencontrées et actions correctives appliquées	68
III.6.4.a Méthodologie de diagnostic des pannes	68
III.6.4.b Classification des pannes rencontrées	69
III.6.4.c Tableau d'analyse des pannes.....	69
III.6.4.d Étude détaillée des pannes.....	69
III.7 Conclusion.....	71

Chapitre IV

IV.1 Introduction	73
-------------------------	----

IV.2 Analyse des causes de défaillance	73
IV.2.1 Paramètres responsables de la découpe irrégulière	73
IV.2.2 Problème d'alimentation	74
IV.2.3 Basse pression	74
IV.2.4 Buse usée.....	76
IV.3 Stratégies de la maintenance adoptée.....	77
IV.3.1 Maintenance préventive systématique	77
IV.4 Plan de maintenance opérationnel.....	78
IV.4.1 Maintenance quotidienne	78
IV.4.2 Maintenance hebdomadaire	78
IV.4.3 Maintenance Mensuelle /Trimestrielle Semestrielle	79
IV.5 Guide de dépannage (Diagnostic) et Modélisation Ishikawa(les 5M)	80
IV.5.1 analyse systémique par le Diagramme d'Ishikawa (Les 5M).....	80
IV.5.2 Tableau logique de diagnostic.....	82
IV.6 Conseils a donné à l'Opérateur de la machine et Sécurité	82
IV.6.1 consignes d'exploitation et de réglage.....	82
IV.6.2 Protection Individuelle (EPI)	83
IV.7 digitalisation de la maintenance (Excel)	84
IV.8 Conclusion	90
Conclusion générale	91
References bibliographies	93
Annexes	99

Liste des figures :

Figure □- 1: Logo SARL FLUIDEX et ces produits.....	3
Figure □- 2: Localisation SARL FLUIDEX	4
Figure □- 3: Découpeuse plasma PL-C 2060 DURMA.....	5
Figure □- 4: Tour CNC	6

Figure □- 5: Fraiseuse CNC	6
Figure □- 6: perceuse radiale semi-automatique	7
Figure □- 7: Fraiseuse universelle à tête rotative.....	8
Figure □- 8: Tour conventionnel parallèle	8
Figure □- 9: machine à cisaillement automatique.....	9
Figure □- 10: machine de chariotage	9
Figure □- 11: Machine de découpe de joints	10
Figure □- 12: Machine GEKA Bendicrop 85 SD	10
Figure □- 13: Machine de découpe a double colonne	11

Figure □- 1: types de procédées de fabrication	13
Figure □- 2: fonctionnement d'une machine de découpe laser.....	15
Figure □- 3: Découpe par jet d'eau haute pression.....	16
Figure □- 4: principe de fonctionnement découpage plasma.....	17
Figure □- 5: conséquences de la proche réactive de la maintenance industriel	17
Figure □- 6: les piliers de la maintenance proactive dans l'industrie	18
Figure □- 7: schéma de type de maintenance préventive	21
Figure □- 8: la maintenance 4.0	23
Figure □- 9: schéma d'étapes de la maintenance intégré par IA.....	25
Figure □- 10: les types d'analytique des Big Data	26
Figure □- 11: Diagramme processus AMDEC	29

Figure □- 1: Découpeuse plasma PL-C 2060	37
Figure □- 2: Le mécanisme de séparation	40
Figure □- 3: Générateur (HPR130XD)	41
Figure □- 4: schéma des composent du générateur responsables de la transformation électrique.....	42
Figure □- 5: les composent du générateur responsables de gère le flux gazeux.....	43
Figure □- 6: entrée d'alimentation	43
Figure □- 7: redresseurs de haute fréquence.....	43
Figure □- 8: bloc onduleur (inverter).....	43
Figure □- 9: transformateur de puissance	43

Figure □- 10: PCB de contrôle	44
Figure □- 11: Torche de découpeuse plasma	44
Figure □- 12: Torche oxycoupage	45
Figure □- 13: système d'alimentation en air	48
Figure □- 14: Unité de contrôle CNC	48
Figure □- 15: Table de découpe	50
Figure □- 16: Armoire électrique	50
Figure □- 17: Processus de formation de l'arc (Amorçage)	51
Figure □- 18: Moteur pas à pas	53
Figure □- 19: rails de guidage linéaire	54
Figure □- 20: système Crémaillère et pignon	54
Figure □- 21: système vis à billes	55
Figure □- 22: courroies et poulies	55
Figure □- 23: portique mobile	55
Figure □- 24: chaine porte câbles	56
Figure □- 25: Eléments de torche de découpe	57
Figure □- 26: la dégradation d'une électrode en fonction d'usage	58
Figure □- 27: courbe d'usure de l'électrode	58
Figure □- 28: la dégradation d'une buse en fonction d'usage	59
Figure □- 29: courbe d'usure de buse	60
Figure □- 30: la dégradation du diffuseur en fonction d'usage	61
Figure □- 31: courbe d'usure du diffuseur	62
Figure □- 32: Capuchon de protection	63
Figure □- 33: courbe d'usure du capuchon de protection	63
Figure □- 34: Cartouche de démarrage	64
Figure □- 35: Courbe d'usure d'une cartouche de démarrage	64
Figure □- 36: les causes de défaillance	67
Figure □- 37: objectifs de la maintenance	68
Figure □- 38: Capteur de pression à turbine – Vue interne après démontage et inspection	70
Figure □- 39: capteur fin de course usé	71
 Figure □- 1: Déformation de la tôle causée par une basse pression	 76

Figure □- 2: Diagramme d'Ishikawa.....	81
Figure □- 3: Tableau de bord (partie 1).....	85
Figure □- 4: Tableau de bord (partie 2).....	85
Figure IV- 5: Onglet du Plan de Maintenance.....	86
Figure □- 6: Axes de la méthode d'Ishikawa.....	87
Figure □- 7: Onglet Guide de Diagnostic.....	88
Figure □- 8: Onglet du Journal des Pannes & Historique	89
Figure □- 9: Onglet du Historique Interventions.....	89

Liste des tableaux :

Tableau □- 1: Synthèse de l'influence des procédés sur le QCD	14
Tableau □- 1: tableau comparatif synthétisant des avantages et limites	41
Tableau □- 2: Les gaz dans les procédés de découpe thermique	46
Tableau □- 3: Tableau récapitulatif de la coordination de la séquence de découpe par l'unité de contrôle (CNC).....	49
Tableau □- 4: tableau illustrant cette analogie fonctionnelle	51
Tableau □- 5: différences entre arc piloté et arc de transfert.....	53
Tableau □- 6: Tableau III-6 : Analyse de courbe d'usure de l'électrode.....	59
Tableau □- 7: Analyse de courbe d'usure de Buse.....	60
Tableau □- 8: Analyse de courbe d'usure de diffuseur	62
Tableau □- 9: Analyse de courbe d'usure de Capuchon de protection.....	64
Tableau □- 10: Analyse de courbe d'usure de la cartouche de démarrage	65
Tableau □- 11: Les paramètres à respecter	66
Tableau III- 12: Tableau d'analyse des pannes	69
Tableau □- 1: Maintenance quotidienne à réaliser par l'opérateur de la machine	78
Tableau □- 2: Maintenance hebdomadaire a réalisé par l'opérateur de la machine	79
Tableau □- 3: Maintenance semestrielle a réalisé par l'opérateur de la machine	80
Tableau □- 4: les cinq catégories fondamentaux de la méthode d'Ishikawa (les 5M).....	81

Nomenclatures et Symboles

MTBR	Temps moyen entre deux réparations	heure (h)
KPI	Indicateur clé de performance	Sans unité
MTTR	Temps moyen de réparation	heure (h)
RPN	Indice de criticité	Sans unité
S	Gravité	Sans unité (échelle 1 à 10)
O	Occurrence de la panne	Sans unité (échelle 1 à 10)
D	Détectabilité de la panne	Sans unité (échelle 1 à 10)
MTBF	Temps moyen entre deux pannes	heure (h)
λ	Taux de défaillance	h^{-1} (panne/heure)
P	Probabilité de fonctionnement sans panne	Sans unité (%)
C	Coût de défaillance	DA, €, \$, etc.
D	Durée d'arrêt	heure (h)
t	Temps considéré	heure (h)
S	Coût horaire de l'arrêt	DA/h
TRS	Taux de Rendement Synthétique	%
TP	Taux de Performance	%
TD	Taux de Disponibilité	%
TQ	Taux de Qualité	%
U	Taux d'utilisation basé sur la production	%
P	Production réelle	pièce, kg, m
Pmax	Production maximale théorique	pièce, kg, m
U	Taux d'usure basé sur la perte de masse	%
Mint	Masse initiale de la pièce	kg ou g
M	Masse mesurée	kg ou g
ΔM_{max}	Perte de masse maximale admissible	kg ou g
U_{buse}	Taux d'usure de la buse	%
D_{int}	Diamètre initial de la buse	mm
D_{max}	Diamètre maximal admissible	mm
M_{int}	Masse initiale de la buse	g ou kg
M	Masse de la buse	g ou kg
D_{diff}	Degré de dégradation du diffuseur	%
A_{int}	Surface (ou section) initiale du diffuseur	mm ²
A_{min}	Surface minimale admissible	mm ²
D_{cart}	Degré d'encrassement de la cartouche filtrante	%
R	Résistance (ou perte de charge)	Pa ou bar
R_{int}	Résistance initiale	Pa ou bar
R_{max}	Résistance maximale	Pa ou bar

Introduction générale

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, les progrès technologiques ont profondément transformé les procédés de fabrication mécanique. Les entreprises industrielles sont désormais confrontées à des exigences accrues en matière de précision, de productivité et de maîtrise de la consommation énergétique. Dans ce contexte, les procédés de découpe thermique occupent une place essentielle dans les chaînes de production. Parmi eux, la découpe au plasma s'impose comme une technologie performante, offrant une grande rapidité d'exécution, une excellente qualité de coupe et une forte polyvalence pour l'usinage des métaux conducteurs.

C'est dans cette dynamique d'excellence opérationnelle que s'inscrit notre projet de fin d'études. Réalisé au sein de l'entreprise Fluidex. Ce travail est le fruit d'une immersion professionnelle qui nous a permis de confronter les théories académiques de la productique aux réalités exigeantes du terrain. Fluidex, de par son expertise et ses équipements, nous a offert un cadre d'étude privilégié pour analyser une machine complexe : la découpeuse plasma. Or, le fait de disposer d'une telle technologie ne suffit pas à garantir la rentabilité. Même parfaite, une machine-outil reste soumise aux lois de l'usure, aux contraintes thermiques et aux défaillances électroniques. Un arrêt de fabrication sur une ligne de découpe peut créer des retards en cascade sur toute la chaîne de fabrication. La question de la disponibilité opérationnelle devient alors un enjeu stratégique. Comment faire en sorte qu'une machine complexe fonctionne bien tout en augmentant sa durée de vie ? La réponse se trouve dans la maîtrise de la maintenance, en passant d'une logique curative de « réparation » à une logique préventive de « gestion du patrimoine technique ».

L'objectif de ce mémoire est donc double : réaliser une analyse technique approfondie de la machine afin d'en comprendre chaque organe, et concevoir un plan de maintenance structuré et adapté aux besoins de production de Fluidex. Pour aborder cette problématique, nous avons scindé notre mémoire en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'entreprise **FLUIDEX**. Nous y présenterons son historique, son organisation à travers son organigramme, ses différents secteurs d'activité ainsi que les principales productions qu'elle réalise. Nous décrirons également le parc des machines et équipements de production utilisés au sein de l'entreprise. Ce chapitre permettra de situer le cadre industriel dans lequel s'inscrit notre étude et de mieux comprendre l'environnement de travail de la machine de découpe plasma CNC. Le deuxième chapitre est consacré aux généralités : procédés de fabrication mécanique. Là, nous tracerons un tableau de l'état actuel de l'art technologique, en remplaçant la découpe plasma par rapport

aux autres méthodes de transformation de la matière. Ce chapitre posera les bases théoriques nécessaires à la compréhension de l'indispensabilité de cette technologie dans le secteur de la productique moderne. Nous pénétrerons, au troisième chapitre, dans le fond technique de la machine. À partir des observations faites lors de notre stage chez Fluidex, nous décrirons en détail le fonctionnement intrinsèque de la découpeuse à plasma. Nous allons décomposer l'équipement selon ses organes principaux, de la source de courant à la torche en passant par le système de commande numérique(CNC), les circuits de gaz plasma et d'assistance et les guidages cinématiques. Cette compréhension systémique est indispensable pour identifier les points critiques de la machine. Enfin, le dernier chapitre sera la finalité opérationnelle de notre travail. Après avoir analysé les modes de défaillance possibles, nous vous proposerons une stratégie de maintenance adaptée. Nous détaillerons les différents types d'interventions (correctives et préventives) et nous proposerons un plan de maintenance spécifique. Ce dernier intégrera des gammes opératoires, des fréquences d'inspection et des indicateurs de suivi, dans l'objectif de faire de la maintenance un levier de productivité pour l'entreprise. Enfin, nous terminons par une conclusion générale et des perspectives.

***Chapitre I : présentation de
l'entreprise FLUIDEX et
cadre du stage***

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons et nous mettons en évidence une entreprise de droit algérien unipersonnelle à responsabilité limitée qui représente un label international. Nous sommes particulièrement fiers de l'avoir choisie comme organisme d'accueil pour notre étude, car depuis sa création cette entreprise a su s'imposer comme leader régional dans le domaine de l'industrie mécanique, grâce à la haute qualité de ses produits nous présenterons également les différents départements qui la composent ainsi l'organisation générale de la chaîne de production.



Figure □- 1: Logo SARL FLUIDEX et ces produits

La société Algérienne SARL FLUIDEX créée en 2006 par Mr HAMDAD Chabane, est le représentant officiel et exclusif de SARL FLUIDEX en Algérie, spécialisée dans la fourniture, l'installation et la maintenance d'équipements hydrauliques et industriels, notamment les pompes, réseau de fluides robinetterie industrielle et système anti-incendie .

Ce projet d'investissement a été réalisé dans un cadre légal et réglementaire et ce bien avant même l'élaboration du cahier des charges par le Ministère de l'Industrie et des Mines portant réglementation de l'activité de la SARL FLUIDEX spécialisé dans le montage et la fabrication des flexibles hydrauliques et équipement industrielles. Les infrastructures construites sont conformes aux normes internationales et les ateliers de fabrication sont équipés de machines-

outils de haute technologie et de dernière génération. Les responsables ont tracé un plan d'action qui porte sur l'extension et la diversification des activités de leur entreprise.

I.2 Localisation de l'entreprise

FLUIDEX est situé en Algérie dans la wilaya de Boumerdés, plus précisément au lotissement Benadjal, commune de Boudouaou (Code postal 35400).



Figure □- 2: Localisation SARL FLUIDEX

I.3 Secteur d'activité de l'entreprise

FLUIDEX évolue dans le domaine de l'industrie et des services techniques liés aux systèmes de fluides et aux équipements industriels. Ses activités couvrent plusieurs secteurs essentiels qui contribuent au fonctionnement et à la maintenance des installations industrielles.

- Industrie hydraulique et systèmes de fluides Pompage industriel et transfert de fluides
- Robinetterie industrielle (vannes, brides, raccords)
- Réseaux de tuyauterie et installation de pipelines
- Maintenance des équipements mécaniques et hydrauliques
- Systèmes de protection anti-incendie
- Fourniture et installation d'équipements industriels
- Services techniques et assistance industrielle

I.4 Organigramme de l'entreprise

L'objectif premier de l'entreprise est la réalisation d'un chiffre d'affaires important ou d'une production de plus en plus grande. Pour atteindre cet objectif, ils ont développé une organisation rationnelle de manière à mobiliser l'ensemble de ses moyens humains et matériels :

- Direction commerciale
- Direction technique
- Service approvisionnement et logistique
- Direction administrative et financière
- Service QHSE (Qualité, Hygiène, Sécurité, Environnement)

I.5 Chaine de production de l'entreprise

- **Découpeuse plasma**

La découpeuse à plasma est un outil industriel qui se sert d'un jet de gaz ionisé (plasma) à haute température. Ce procédé thermique permet de fondre et de souffler les métaux conducteurs avec une grande vitesse et une très bonne précision.



Figure □- 3: Découpeuse plasma PL-C 2060 DURMA

- **Tour CNC (GSK 928TD-L)**

Le GSK 928TD-L est un système CNC pour tour qui permet de contrôler automatiquement les axes et la broche à partir de programmes G-code, afin de réaliser avec précision et efficacité des opérations d'usinage.



Figure □- 4: Tour CNC

- **Fraiseuse (FORTEX FTX-45-TFS)**

La FORTEX FTX-45-TFS est une fraiseuse-perceuse industrielle de conception robuste, destinée à l'usinage précis des métaux. Elle permet d'effectuer des opérations telles que le perçage, le fraisage et le surfacage grâce à une broche motorisée et à une table mobile selon les axes X, Y et Z. Sa construction en fonte lui donne une grande rigidité, et son mécanisme d'engrenages fournit plusieurs vitesses pour accommoder les diverses natures de travail.



Figure □- 5: Fraiseuse CNC

- **Perceuse radiale semi-automatique (OPTIMUM OPTIDRIU 200 MT)**

La perceuse industrielle OPTIMUM OPTI 200 MT est équipée d'un bras radial mobile qui facilite le positionnement de la broche sur la pièce sans avoir à la déplacer. Elle est en mode semi-automatique avec des avances contrôlées pour mieux travailler, améliorer la précision et la productivité. Sa structure robuste et sa grande capacité de déplacement (axes X, Y, Z) la rendent apte au perçage de pièces volumineuses et lourdes.



Figure □ - 6: perceuse radiale semi-automatique

- **Fraiseuse universelle à tête rotative(X6436 Universal Rotary Head Milling Machine)**

La X6436 est une fraiseuse conventionnelle polyvalente munie d'une tête orientable (rotative) de fraisage, qui permet d'effectuer des opérations de fraisage vertical et horizontal. Elle permet d'obtenir des surfaces planes, inclinées, des rainures, des engrenages et des pièces de formes complexes. Sa table mobile et sa tête multi-angles lui confèrent une grande flexibilité, ce qui la rend adaptée aux ateliers de fabrication et de maintenance mécanique.



Figure □- 7: Fraiseuse universelle à tête rotative

- **Tour conventionnel parallèle (FORTEX FTX-914x300-TO DCRV)**

Le FORTEX FTX-914x300-TO DCRV est un tour parallèle conventionnel destiné à l'usinage des métaux en atelier de mécanique. Il permet d'effectuer des opérations de tournage, de perçage, de filetage, de dressage et de chanfreinage sur pièces cylindriques. Cette machine-outil a une distance entre pointes de 914 mm et un diamètre admissible de 300 mm sur le banc, ce qui la rend adaptée au travail de pièces moyennes. Ce tour, équipé d'une boîte de vitesses mécanique, d'avances automatiques et d'un système de visualisation numérique (version DCRV), assure une bonne précision et une utilisation pratique pour les travaux de fabrication et de maintenance industrielle

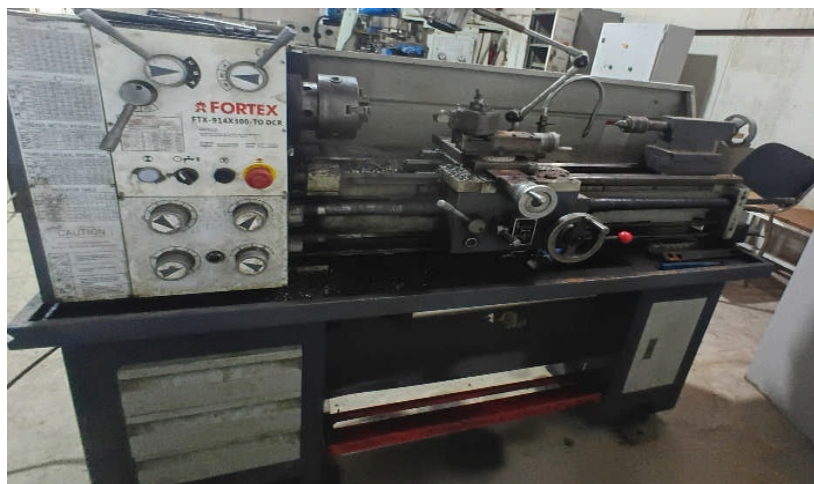


Figure □- 8: Tour conventionnel parallèle

- **Machine à cisailer (BIANGO 370 A)**

La BIANGO 370 A est une scie à ruban industrielle pour le découpage des métaux (Acier, Aluminium, Tubes et Profilés) utilisée en atelier de mécanique. It uses a continuous ribbon blade, which allows clean, fast and precise cuts, often in series.



Figure □- 9: machine à cisaillement automatique

- **La machine de chariotage (FEDA FD-300-2A)**

Cette machine est surtout utilisée pour étaler, redresser ou calibrer avec précision le diamètre des barres métalliques. La machine est équipée d'un dispositif d'avance automatique hydraulique qui autorise les travaux rapides et en série. Elle possède un système de serrage, un moteur puissant et un contrôle stable pour assurer une bonne précision d'usinage.



Figure □- 10: machine de chariotage

- **Machine de découpe JWEI Jingwei CAD/CAM**

La JWEI Jingwei CAD/CAM est une machine de découpe numérique utilisée dans l'industrie pour la transformation des matériaux souples ou semi-rigides comme le cuir, le textile, le carton, les composites ou encore le PVC. Elle associe une machine de découpe automatique à un logiciel CAD/CAM (Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur) qui permet de concevoir, programmer et exécuter avec précision les formes à découper.



Figure □- 11: Machine de découpe de joints

- **Machine multi fonctionnaire GEKA (GEKA Bendicrop 85 SD)**

La GEKA Bendicrop 85 SD est une machine à double cylindre hydraulique (85 tonnes) qui permet de réaliser plusieurs opérations sur l'acier, telles que le poinçonnage, le découpage, la coupe de fer plat, la coupe d'acier en forme de L et le pliage intégré, sur une seule machine.



Figure □- 12: Machine GEKA Bendicrop 85 SD

- **Machine de découpe à double colonne (GH42100)**

La GH42100 est une scie à ruban horizontale à double colonne (gantry), destinée à la découpe de gros blocs, barres, tubes et profilés métalliques. Elle emploie une lame en bande continue et un système hydraulique qui assure une coupe stable, précise et pouvant être automatique ou semi-automatique.



Figure □- 13: Machine de découpe a double colonne

***Chapitre II : Fondements des
Procédés de Fabrication et
Stratégies de Maintenance à
l'Ère de l'Industrie 4.0***

II.1 Introduction

L'industrie moderne repose sur trois piliers : les procédés de fabrication, l'enlèvement de matière, la maintenance industrielle. Les procédés de fabrication permettent, par des techniques contrôlées et précises, de transformer une matière brute en produit fini. L'enlèvement de matière, par opérations de tournage ou de fraisage, assure une grande précision dimensionnelle et un excellent état de surface des pièces, mais il sollicite fortement les outils et les machines.

Devant ces contraintes, la maintenance industrielle apparaît comme un pilier essentiel, garantissant la fiabilité et la disponibilité des équipements. Elle contribue à anticiper les pannes, à diminuer les arrêts de production et à garantir la continuité de la qualité. Avec la montée en puissance de l'industrie 4.0, ces trois secteurs sont de plus en plus interconnectés par le biais de capteurs et de systèmes intelligents, garantissant ainsi un contrôle plus efficace des machines et une optimisation des processus.

II.2 Les Procédés de Fabrication Industrielle

II.2.1 Définition et classification des procédés

Les procédés de fabrication se définissent comme un ensemble d'activités coordonnées transformant les matières premières en produits finis, classés principalement en trois familles majeures : **l'enlèvement de matière, le formage et l'assemblage** [1]. L'enlèvement de matière, regroupant l'usinage conventionnel comme le tournage, le fraisage et le perçage, utilise des outils tranchants pour retirer l'excédent de matière par cisaillement, permettant d'atteindre des **dimensions finales précises** et un état de surface soigné [2]. Le formage et le moulage sont des méthodes utilisées pour établir la forme générale d'un composant, le moulage permettant notamment de réaliser des **formes géométriques extrêmement complexes** par la liquéfaction du matériau suivie de sa solidification [3]. Enfin, l'assemblage constitue l'étape finale d'intégration où des composants individuels sont réunis par soudage, brasage ou fixation mécanique pour former un système complet [3].

Ces méthodes de transformation dictent la **valeur ajoutée** d'un produit en lui conférant des propriétés physiques, une précision dimensionnelle et une fonctionnalité qu'il ne possède pas à l'état brut [3]. La valeur ajoutée se manifeste techniquement par la capacité de l'usinage à fournir des détails géométriques critiques, tandis que le formage **optimise l'utilisation des matériaux** en minimisant les déchets sous forme de copeaux et en réduisant le besoin d'opérations de finition secondaires [1]. Stratégiquement, le choix du procédé influence cette valeur dès la phase

de conception, car il structure environ **70 % du coût final** de fabrication et définit la capacité du produit à répondre aux exigences de qualité du marché [4]. L'adoption de technologies avancées, telles que la découpe laser ou le **jet d'eau abrasif (AWJM)**, accroît cette valeur ajoutée en garantissant l'intégrité microstructurale des matériaux fragiles et en accélérant le délai de mise sur le marché grâce à la réduction des cycles de production [5].

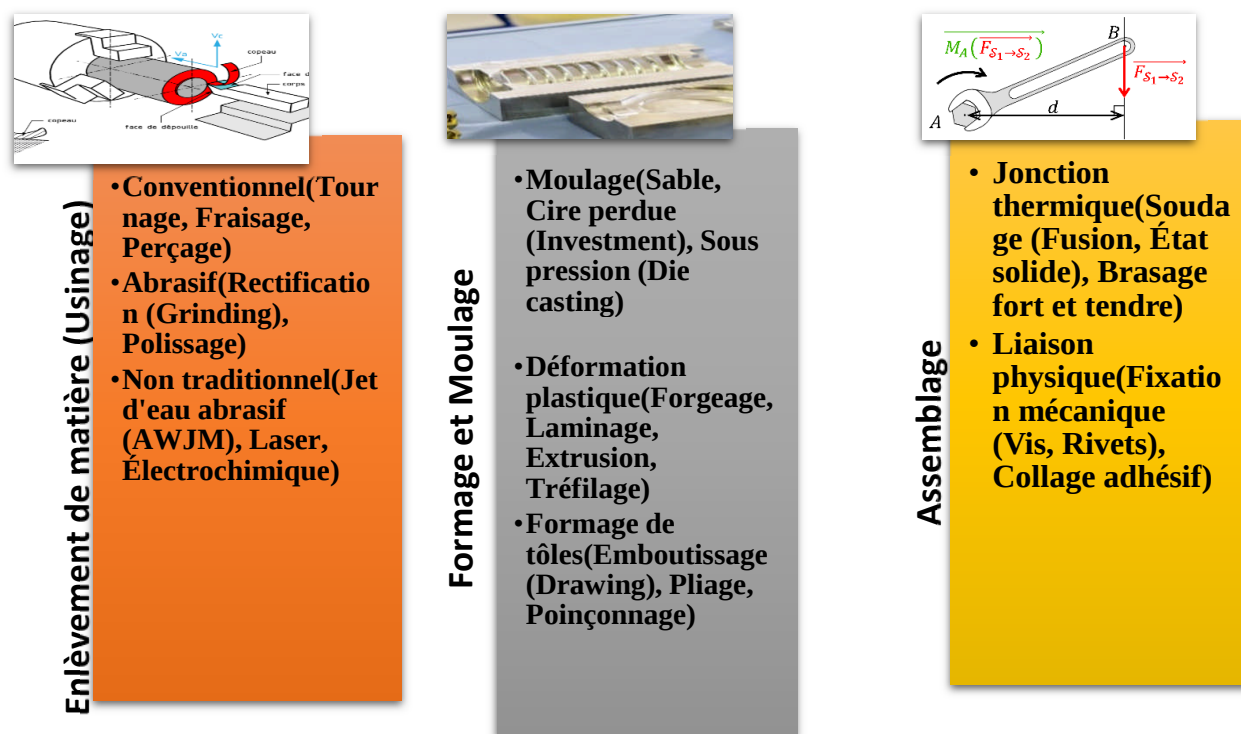


Figure □- 1: types de procédées de fabrication

II.2.2 Enjeux de la fabrication

Le choix du procédé de fabrication dès la phase de conception est une décision stratégique majeure puisqu'il détermine environ **70 % à 80 % des coûts totaux** de production et définit les limites de performance du produit. [6], l'influence sur la **qualité** se manifeste par la capacité intrinsèque d'une méthode à respecter les tolérances dimensionnelles et l'état de surface requis, chaque technologie possédant une signature propre qui impacte l'intégrité de la pièce. Une mauvaise maîtrise des paramètres, comme la vitesse de coupe ou la distance de travail en découpe plasma, entraîne des défauts critiques tels que la formation de **dross** (scories) et de projections. [8], à l'inverse, l'usinage par jet d'eau abrasif (AWJM) permet d'atteindre une haute qualité sans induire d'effets thermiques ou mécaniques néfastes sur la matière. [9], sur le plan des **coûts**, l'adoption de technologies automatisées comme le laser CNC, bien que coûteuse

initialement, offre une rentabilité accrue grâce à une production continue, une consommation d'énergie optimisée et l'élimination d'opérations secondaires comme l'ébavurage. [10,10], enfin, l'influence sur les **délais** est dictée par la flexibilité du procédé, où les technologies comme la fabrication additive accélèrent considérablement le **time-to-market** en permettant de produire des prototypes ou des petites séries sans outillage spécifique. [11], cette réactivité est renforcée par l'approche **Lean Production**, qui vise à réduire les temps de cycle et les gaspillages au sein des flux de transformation pour garantir une livraison optimale.

Tableau □- 1: Synthèse de l'influence des procédés sur le QCD

Dimension	Pondération décisionnelle	Critères et impacts clés
Qualité	20 - 35 %	Déterminée par la précision dimensionnelle et l'état de surface. L'AWJM, par exemple, garantit l'intégrité sans effets thermiques. Les défauts (dross en plasma) dépendent du réglage des paramètres.
Coût	25 - 40 %	Structure 70 % à 80 % du coût total dès le design. Inclut l'investissement (CAPEX) et l'opérationnel (énergie, maintenance). Le laser CNC réduit le coût par pièce via l'efficacité énergétique.
Délai (Lead Time)	15 - 25 %	Dépend du temps de cycle et de la configuration. L'automatisation et la fabrication additive réduisent le time-to-market. Le Lean élimine les gaspillages pour accélérer les flux.

II.3 Procédés de découpage

II.3.1 Découpage Laser

Le principe du découpage laser repose sur la génération d'un faisceau de lumière cohérente et monochromatique, lequel est dirigé par des miroirs ou des fibres optiques vers une lentille de focalisation qui concentre l'énergie sur une surface extrêmement réduite, typiquement de l'ordre de 0,0254 mm [12]. Cette concentration extrême permet d'atteindre des densités de puissance supérieures à 10⁴ W/cm², provoquant la fusion, la vaporisation ou la combustion immédiate de la matière en un point focal précis [12]. Le laser s'impose comme le standard de la précision industrielle grâce à sa capacité à maintenir une largeur de saignée (kerf) extrêmement étroite, souvent inférieure à 0,1 mm, associée à des systèmes de commande numérique (CNC) et des moteurs linéaires offrant une répétabilité de l'ordre du micromètre [9]. Pour garantir cette excellence sur l'intégralité de la zone de travail, des technologies avancées de compensation de la longueur du chemin optique et des optiques adaptatives sont impératives ; elles assurent que le diamètre du spot et la position du foyer restent constants malgré les mouvements de la tête de coupe, évitant ainsi toute dégradation de la qualité transversale [13] ;

[¹⁴]. Enfin, l'intégration de l'intelligence artificielle pour la détection du foyer en temps réel permet aujourd'hui d'atteindre une précision supérieure à 95 % dans le positionnement, ce qui est crucial pour les procédés ultrarapides où tout décalage focal pourrait avoir des effets destructeurs sur la pièce [¹⁵].

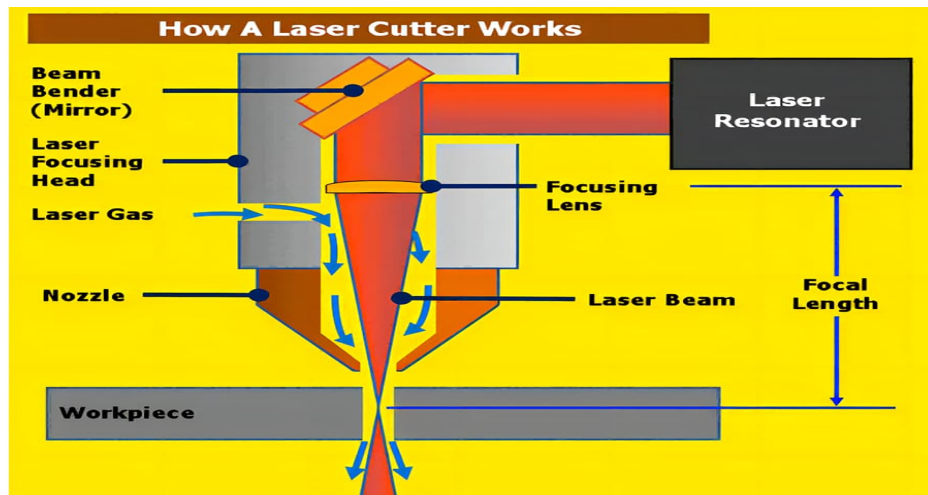


Figure □ - 2: fonctionnement d'une machine de découpe laser

II.3.2 Découpage au Jet d'Eau

Le découpage au jet d'eau abrasif repose sur la conversion de l'énergie hydraulique en énergie cinétique, où de l'eau pressurisée jusqu'à 600 MPa propulse des particules abrasives, telles que le grenat, à des vitesses supersoniques pour éroder la matière par impact microscopique. [¹⁶], l'absence de contrainte thermique s'explique par le fait qu'il s'agit d'un procédé de coupe à froid, où l'eau agit comme un agent de refroidissement continu qui extrait instantanément la chaleur produite lors de la déformation mécanique de la pièce. [¹⁷], outre sa fonction de vecteur d'énergie, le fluide assure une lubrification entre les particules et le matériau tout en évacuant les débris et les particules usées de la zone de travail, garantissant ainsi qu'aucune zone affectée thermiquement (HAZ) ne vienne altérer les propriétés de la cible. [¹⁸], cette caractéristique fondamentale permet de découper presque n'importe quel matériau, des métaux durs aux composites fragiles, sans induire de zones de fragilisation, de brûlures ou de distorsions microstructurales communes aux méthodes de découpe thermique comme le laser ou le plasma [¹⁹]. Bien que l'énergie du jet soit dissipée à travers la formation de débris d'érosion, le frottement sur les parois de la saignée et l'amortissement du film fluide, la présence constante de l'eau maintient l'intégrité structurale de la pièce en prévenant toute accumulation de chaleur significative au cœur de la zone de coupe.

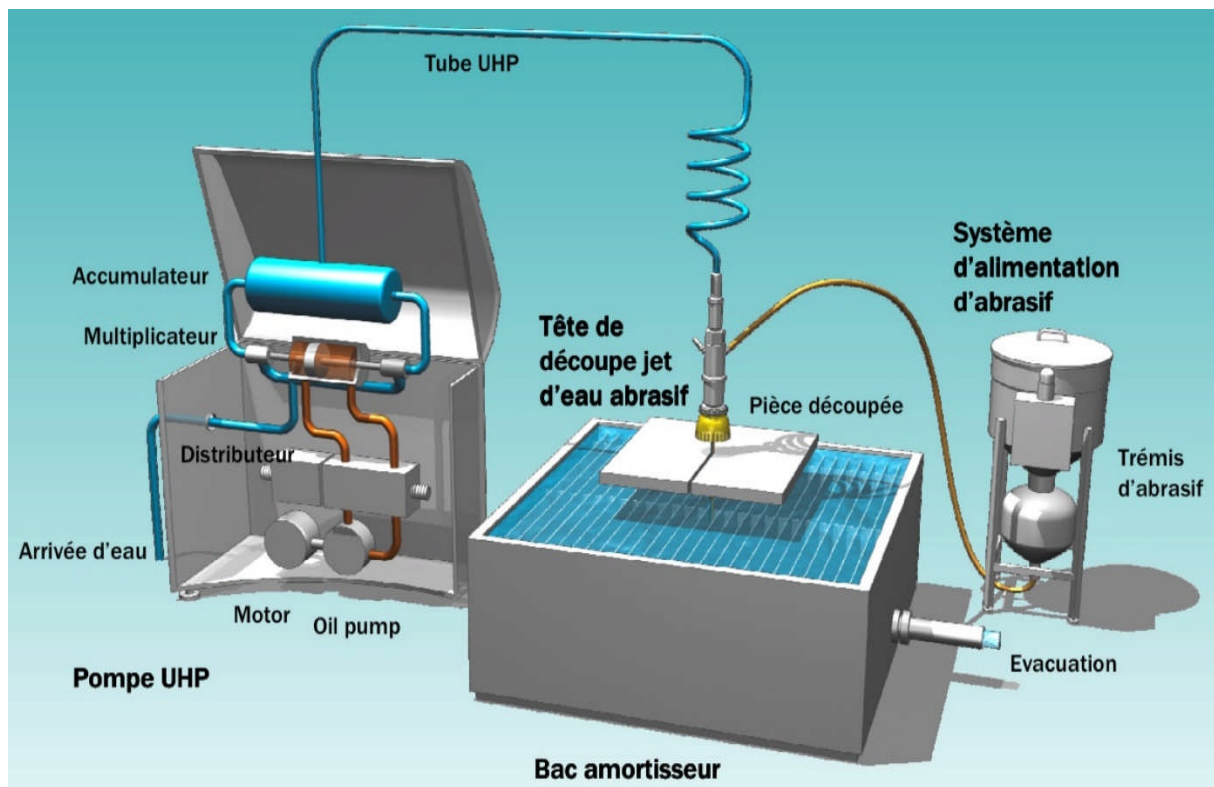


Figure □- 3: Découpe par jet d'eau haute pression

II.3.3 Découpage Plasma

Le découpage par arc plasma (PAC) repose sur la création d'un jet de gaz ionisé à haute vitesse, appelé plasma, généré par le passage d'un arc électrique à travers un mélange de gaz ou de l'air comprimé [20]. Cet arc ionisé atteint des températures extrêmes, pouvant aller jusqu'à **33 000 °C**, ce qui permet de fondre instantanément le matériau tandis que le flux de gaz à haute pression éjecte le métal en fusion hors de la saignée [20]. Ce procédé est particulièrement performant pour le débitage de tous les **métaux électriquement conducteurs**, tels que les aciers de moyennes et grandes épaisseurs, offrant des vitesses de coupe nettement supérieures aux méthodes d'usinage conventionnelles [20]. Outre sa rapidité, le plasma permet de traiter des aciers de structure à haute résistance avec un apport de chaleur localisé, tout en restant l'une des méthodes les plus rentables puisqu'elle ne nécessite aucun outil de coupe physique, la pièce étant directement reliée à la borne positive de la source d'énergie [20].

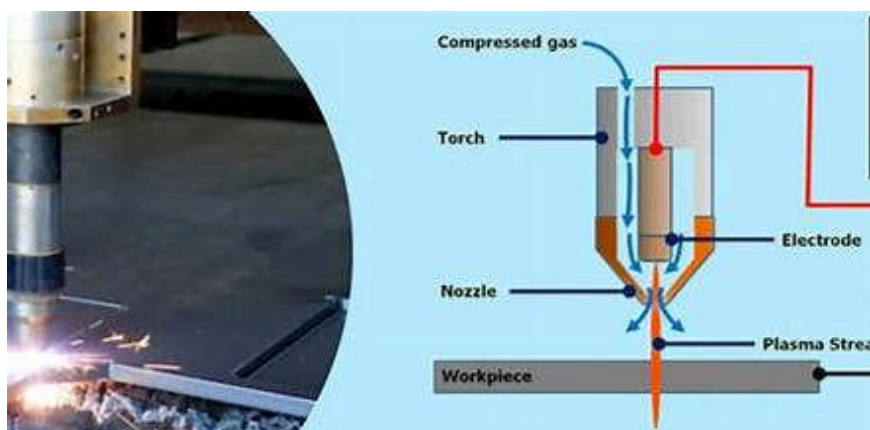


Figure 4: principe de fonctionnement découpage plasma

II.4 Fondements de la Maintenance Industrielle

II.4.1 Définition et évolution normative (Norme NF EN 13306)

L'évolution de la maintenance, illustrée par des cadres normatifs comme la norme NF EN 13306 (bien que celle-ci ne soit pas explicitement détaillée dans les sources, les principes qu'elle régit y sont omniprésents), marque le passage d'une vision de "mal nécessaire" — un centre de coût réactif — à une fonction stratégique essentielle à l'excellence opérationnelle [21].

La maintenance comme "mal nécessaire" (Approche réactive) : Auparavant, la maintenance était principalement corrective, intervenant uniquement après une panne [21]. Dans ce schéma, elle était perçue comme une charge inévitable pour plusieurs raisons :

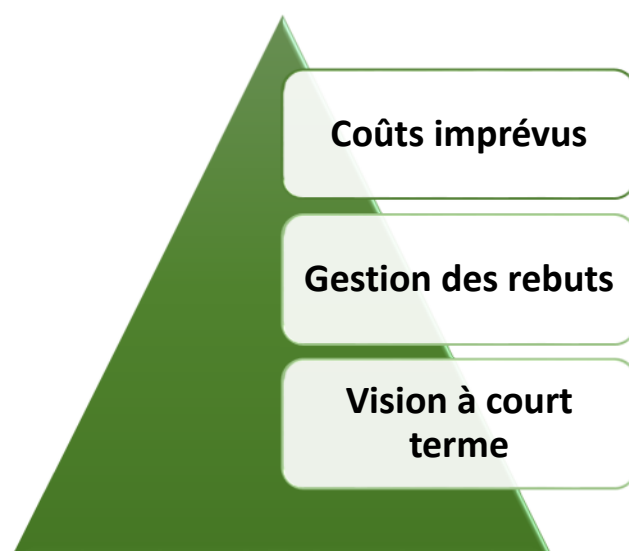


Figure 5: conséquences de la proche réactive de la maintenance industriel

Historiquement perçue comme un « mal nécessaire », l'approche réactive de la maintenance engendrait des coûts imprévus considérables, où les temps d'arrêt non planifiés

provoquaient des pertes financières directes, perturbaient les chaînes d'approvisionnement et imposaient des frais de réparation d'urgence élevés [21]. Parallèlement, la gestion des rebuts devenait un fardeau économique majeur, car une machine insuffisamment entretenue produit inévitablement des pièces de mauvaise qualité qui génèrent des déchets et des coûts de non-conformité significatifs [21]. Cette stratégie traditionnelle souffrait d'une vision à court terme, où l'accent était mis quasi exclusivement sur le coût immédiat de chaque intervention technique plutôt que sur l'optimisation de la disponibilité globale et de la fiabilité à long terme du système de production [21].

La transition vers une fonction stratégique (Approche proactive) : Sous l'influence de concepts comme le TPM (Total Productive Maintenance) et le RCM (Reliability-Centered Maintenance), la maintenance est devenue un levier de compétitivité [22]. Cette transformation repose sur :

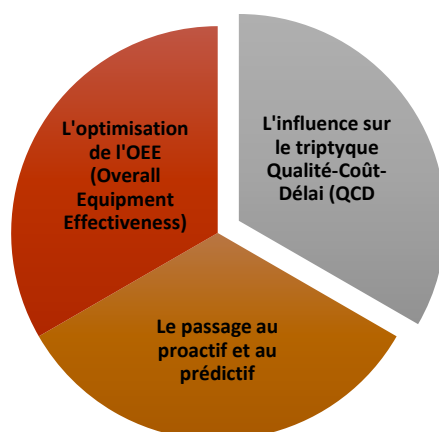


Figure □- 6: les piliers de la maintenance proactive dans l'industrie

La maintenance moderne privilégie désormais le passage vers le proactif et le prédictif : au lieu de subir la panne, les systèmes l'anticipent grâce à l'intégration de **capteurs IoT** et d'**algorithmes d'IA** qui surveillent en temps réel des paramètres tels que la température ou les vibrations pour planifier les interventions avant la défaillance, minimisant ainsi drastiquement les temps d'arrêt [22]. Cette mutation exerce une influence directe sur le triptyque **Qualité-Coût-Délai (QCD)** car une maintenance efficace garantit que les équipements produisent avec le niveau de qualité requis, au coût optimal et sans retard, ce qui constitue un pilier crucial pour le succès du **Lean Manufacturing** [23]. Finalement, l'optimisation de l'OEE (**Overall Equipment Effectiveness**) devient le cœur de cette maintenance stratégique, visant à

maximiser l'efficacité globale des équipements pour transformer la simple disponibilité technique en un levier de gain financier direct pour l'organisation [22].

Les indicateurs clés du changement : Le statut de "fonction stratégique" se manifeste par l'utilisation de mesures de performance rigoureuses [22] :

- **MTBF (Mean Time Between Failures) :** Mesure de la fiabilité, reflétant la capacité du service de maintenance à espacer les pannes.

$$\text{MTBR} = \frac{\text{Temps totale de réparation}}{\text{Nombre de réparations}} \quad (\text{II.1})$$

- **MTTR (Mean Time To Repair) :** Mesure de la maintenabilité, indiquant l'efficacité et la rapidité des processus de réparation.
- **Indicateurs de performance (KPI) :** Le rapport entre MTTR et MTBF permet de benchmarker l'efficacité de la maintenance et d'allouer les ressources de manière intelligente.

Intégration dès la conception : La dimension stratégique commence dès le design. Environ 70 % des coûts de fabrication sont déterminés lors de la conception conceptuelle [24]. Une mauvaise décision de design peut limiter la fonctionnalité et augmenter inutilement les besoins en maintenance future [25]. Aujourd'hui, le choix des procédés et des matériaux est directement lié à leur maintenabilité à long terme pour garantir la viabilité économique du produit [25].

II.4.2 Les types de maintenance

II.4.2.a Maintenance Corrective

La maintenance corrective, souvent qualifiée de maintenance « réactive », consiste à intervenir sur un équipement uniquement après l'occurrence d'une défaillance ou d'une anomalie détectée [22]. En pratique, cette intervention est déclenchée par une panne franche provoquant un arrêt non planifié (unplanned downtime) qui rend la machine totalement inopérable [22]. Toute anomalie doit être corrigée dès son apparition pour stopper la production de défauts et éviter de les transmettre aux étapes suivantes. Dans des cas technologiques précis, comme le découpage au jet d'eau (AWJ), une intervention corrective immédiate s'impose si des capteurs détectent un colmatage du tube de mélange, une chute brutale de pression ou un orifice ébréché [5]. Ces actions visent également à éliminer les défauts produits nécessitant des retouches (rework), identifiés comme l'un des sept gaspillages majeurs du Lean.

L'objectif premier de cette approche reste de rétablir la fonction de l'équipement, une performance mesurée par le **MTTR** (Mean Time To Repair) qui quantifie la maintenabilité et l'efficacité des réparations [22]. Une intervention rapide est indispensable pour limiter les pertes financières, car chaque minute de temps d'arrêt constitue une perte directe pour l'investisseur, particulièrement sur des machines coûteuses [26]. L'arrêt de la ligne permet d'identifier et de résoudre la **cause racine** du problème afin de garantir qu'une qualité optimale soit intégrée à chaque étape du processus. Enfin, bien que le remplacement préventif soit privilégié, l'intervention après défaillance demeure une nécessité technique pour certains composants dont la panne, parfois due à une fatigue imprévue ou des conditions externes, reste difficilement prévisible [22].

II.4.2.b Maintenance Préventive (Systématique et Conditionnelle)

La maintenance préventive consiste à planifier des interventions techniques avant l'occurrence d'une défaillance afin de garantir la fiabilité des équipements et la continuité de la production [22]. Elle se décline en deux approches complémentaires que sont la maintenance systématique, planifiée selon le calendrier, et la maintenance conditionnelle ou prédictive, planifiée selon l'état réel de la machine [22]. La maintenance systématique repose sur des interventions effectuées à des intervalles prédéterminés ou selon un usage défini, indépendamment de l'état actuel de l'équipement, et inclut des actions clés telles que des inspections programmées, des remplacements réguliers de composants et des révisions majeures [22]. L'objectif de cette méthode est de stabiliser les processus de réparation et de réduire le temps d'arrêt total (downtime), lequel peut être diminué de manière spectaculaire, jusqu'à 75 %, grâce à cette rigueur opérationnelle [22]. L'optimisation de ces tâches est renforcée par l'utilisation de fonctions automatisées, comme le préchauffage (warm-up) ou les tests d'étanchéité automatiques, qui permettent de réduire le temps humain alloué à la maintenance.

Parallèlement, la maintenance conditionnelle déclenche une intervention uniquement lorsque des indicateurs spécifiques révèlent une dégradation grâce à une surveillance par capteurs IoT connectés qui analysent en temps réel des variables critiques telles que la température, la pression, les vibrations et l'usure mécanique [5]. Des algorithmes d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique traitent ces données historiques et dynamiques pour prédire le moment exact où une défaillance risque de survenir, permettant une réaction immédiate [5]. Par exemple, dans le découpage au jet d'eau, des capteurs acoustiques ou de vide peuvent détecter un colmatage du tube ou une perte de pression, autorisant l'arrêt de la machine avant que la pièce ne soit endommagée [5]. Pour que cette planification soit efficace, elle doit s'appuyer sur

des cadres méthodologiques où le succès se mesure par l'augmentation du MTBF (fiabilité) et la réduction du MTTR (maintenabilité) ; la standardisation des procédures de réparation peut d'ailleurs accélérer les interventions de 40 % [22]. Dans le cadre du Lean Manufacturing, cette maintenance est souvent portée par la TPM (Total Productive Maintenance), impliquant les opérateurs dans les inspections de base pour identifier les anomalies précoces [27]. Enfin, une fondation solide via la méthode 5S est indispensable pour maintenir un environnement organisé où les anomalies deviennent immédiatement visibles, facilitant ainsi toutes les inspections préventives [27].

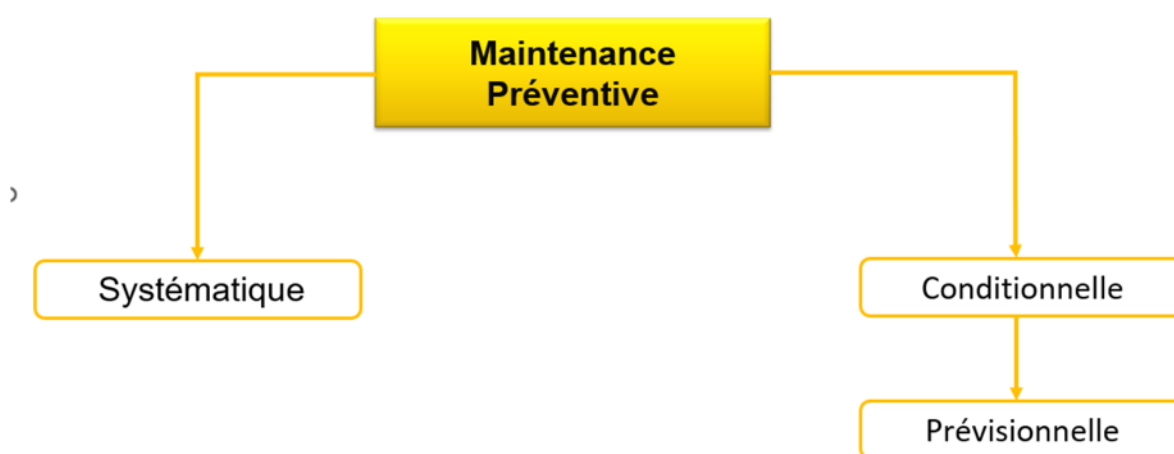


Figure □- 7: schéma de type de maintenance préventive

II.4.3 Indicateurs de Sûreté de Fonctionnement

La maintenance joue un rôle central dans la sûreté de fonctionnement en agissant directement sur la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité des équipements industriels [22]. La fiabilité se définit comme la capacité d'un équipement à assurer sa fonction sans défaillance pendant un intervalle de temps donné, et elle est mesurée par le **MTBF** (Moyenne des temps de bon fonctionnement), calculé en divisant le total des heures opérationnelles par le nombre de pannes [22].

Le passage d'une stratégie corrective à une maintenance proactive et préventive permet d'augmenter significativement le MTBF ; par exemple, des mesures proactives sur une machine de presse ont permis de faire passer cet indicateur de 4,93 heures à **24,25 heures** [22]. Parallèlement, l'optimisation de la maintenabilité caractérise la facilité et la rapidité avec lesquelles un équipement peut être remis en état de marche après une défaillance, un facteur quantifié par le **MTTR** (Moyenne des temps techniques de réparation) qui représente le temps

total de réparation divisé par le nombre d'interventions [22]. La maintenance optimise ce facteur par la standardisation des procédures de réparation et la formation des techniciens, ce qui peut réduire les temps d'intervention jusqu'à **40 %** [22]. La disponibilité est le résultat combiné d'une haute fiabilité et d'une excellente maintenabilité, garantissant que la machine est prête à produire quand on en a besoin [22]. Cet indicateur est étroitement lié au **Downtime** (temps d'arrêt total) et à l'efficacité globale des équipements (OEE), et l'utilisation de technologies modernes comme l'IoT et l'Intelligence Artificielle permet une maintenance prédictive qui surveille en temps réel l'état des composants, tels que la température ou les vibrations, pour intervenir juste avant la panne [22]. Ces stratégies permettent de réduire le temps d'arrêt total jusqu'à **75 %** [22]. Enfin, l'efficacité globale de la fonction maintenance peut être évaluée par un modèle de **KPI inverse**, défini par la formule :

$$\text{KPI} = \left(\frac{\text{MTTR}}{\text{MTBF}} \right) \times 100 \quad (\text{II.2})$$

où un score faible démontre une maintenance performante car il indique que les pannes sont rares et résolues rapidement [22]. En optimisant ces trois piliers, la maintenance transforme la gestion des actifs en un levier de productivité durable et de réduction des coûts opérationnels [22].

II.5 La Transition vers la Maintenance 4.0

II.5.1 Le paradigme de l'Industrie 4.0

Le paradigme de **l'Industrie 4.0** repose sur l'intégration massive de technologies numériques au sein de l'appareil productif, transformant l'usine traditionnelle en un système cyber-physique interconnecté où les données et les communications sans fil redéfinissent les approches traditionnelles [28]. Cette interconnexion globale redéfinit l'usine moderne à travers plusieurs axes majeurs :

- **L'Interconnexion via l'Internet des Objets (IoT) :** L'usine moderne n'est plus une somme de machines isolées, mais un réseau où chaque composant, tel que les pompes ou les robots, communique en temps réel pour optimiser la production [5]. Grâce à l'IoT, les équipements peuvent être **surveillés et contrôlés à distance** via un système centralisé, fournissant des données critiques sur les taux de production et la performance des actifs depuis n'importe quel endroit [5]. Cette intégration permet aux différents sous-

systèmes, tels que la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et le Progiciel de Gestion Intégrée (ERP), d'échanger des flux de données continus, rendant la fabrication plus rapide, plus flexible et moins sujette aux erreurs.

- **L'Intelligence Artificielle et la Maintenance Prédictive** : L'intégration de l'Intelligence Artificielle (IA) et du Machine Learning (ML) permet de passer d'une gestion réactive à une gestion proactive des équipements [22]. Dans le cadre de la **maintenance prédictive**, des algorithmes analysent en temps réel des indicateurs tels que les vibrations, la température et l'usure pour prédire les défaillances avant qu'elles ne surviennent, minimisant ainsi le temps d'arrêt et les coûts opérationnels [5]. Parallèlement, le ML optimise la qualité en analysant les données historiques pour ajuster dynamiquement les paramètres de processus, comme la pression ou la vitesse, afin d'atteindre une précision supérieure [5].
- **La Flexibilité et la Personnalisation de Masse** : L'interconnexion globale permet de répondre à la demande croissante de **personnalisation de masse** tout en maintenant l'efficacité productive [29]. L'utilisation de **jumeaux numériques (Digital Twins)**, modèles virtuels synchronisés avec l'usine réelle, permet de simuler et d'optimiser les scénarios de production avant leur exécution physique [28]. Les systèmes reconfigurables permettent d'adapter rapidement le volume et le type de produit grâce à des technologies comme la fabrication additive, brisant les limites de la fabrication traditionnelle [30].

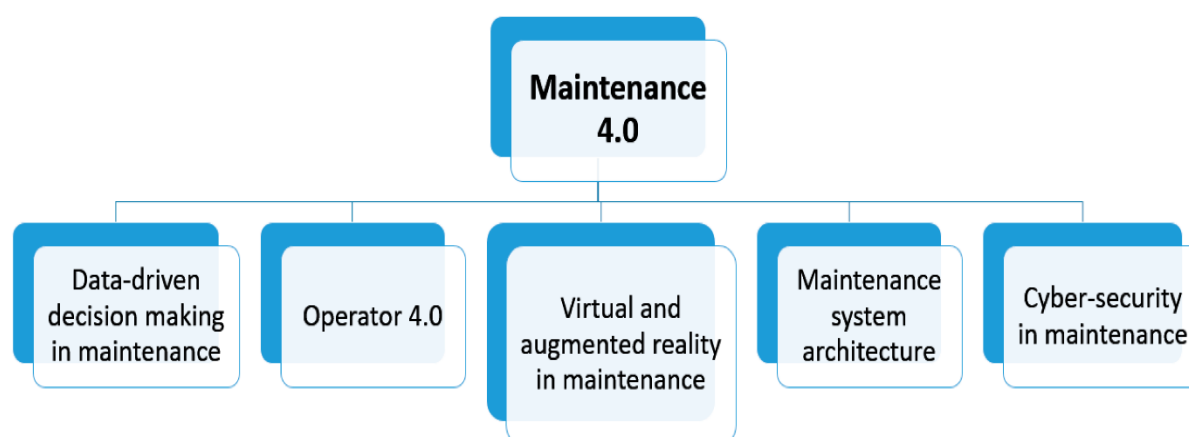


Figure □- 8: la maintenance 4.0

II.5.2 Les piliers technologiques de la maintenance intelligente

La maintenance intelligente repose sur l'intégration de technologies avancées qui transforment la gestion des équipements en un processus proactif et prédictif. Voici les trois piliers technologiques détaillés selon les sources

II.5.2.a IoT et Capteurs Intelligents

Collecte en temps réel :

L'Internet des Objets (IoT) constitue la base de la collecte de données en permettant une surveillance continue de l'état de santé des machines [5].

- **Intégration de capteurs** : Des capteurs connectés sont intégrés directement dans les composants critiques des machines (comme les pompes ou les buses) pour mesurer en temps réel des variables physiques telles que la température, la pression, les vibrations et l'usure mécanique [5] Et parmi ces Capteurs physiques utilisés :

- ✓ Accéléromètres (mesure des vibrations → détection de déséquilibre ou usure de roulements)
- ✓ Thermocouples ou RTD (mesure de température → surchauffe moteur, outil)
- ✓ Capteurs de pression (suivi des circuits pneumatiques/hydrauliques)
- ✓ Capteurs de courant (analyse de la consommation électrique → charge machine)
- ✓ Capteurs d'émission acoustique (détection de micro-fissures ou défauts)

Et pour les Chaîne d'acquisition :

- ✓ Signal analogique → conditionnement (filtrage, amplification)
- ✓ Conversion A/N (ADC)
- ✓ Transmission via protocoles industriels

Exemple concret (dans notre cas on va prendre la machine découpe plasma) :

- ❖ Un **capteur de vibration** est fixé sur la torche ou la structure.
- ❖ Un **capteur de température** surveille la torche plasma.
- ❖ Un **capteur de pression** contrôle le gaz utilisé.
- **Surveillance à distance** : Ces dispositifs permettent aux opérateurs d'accéder aux indicateurs de performance et aux taux de production depuis n'importe quel endroit via un système centralisé [5].
- **Boucles de contrôle** : La fabrication intégrée par ordinateur (CIM) utilise ces entrées de capteurs pour créer des processus de contrôle en boucle fermée, garantissant que la machine opère toujours dans des conditions optimales.



Figure □- 9: schéma d'étapes de la maintenance intégrée par IA

II.5.2.b Big Data et Analyse de données

Transformation de la donnée brute : Le passage à l'Industrie 4.0 génère des volumes de données sans précédent qui nécessitent des méthodes de traitement spécifiques pour devenir exploitables.

- **Gestion de la complexité :** Les systèmes de fabrication intelligents produisent des masses de données brutes qui exigent de nouvelles méthodologies pour le traitement en temps réel et la prise de décision dynamique [31].
- **Réduction de scénarios :** Pour gérer cette charge computationnelle, des techniques comme la réduction de scénarios est utilisée pour filtrer les éléments non représentatifs et ne conserver que les données essentielles à l'optimisation [32].
- **Apprentissage par l'expérience :** Les plateformes de Big Data permettent aux systèmes d'apprendre des décisions historiques, transformant des journaux d'événements complexes en modèles vectorisés pour la classification et l'aide à la décision [33].

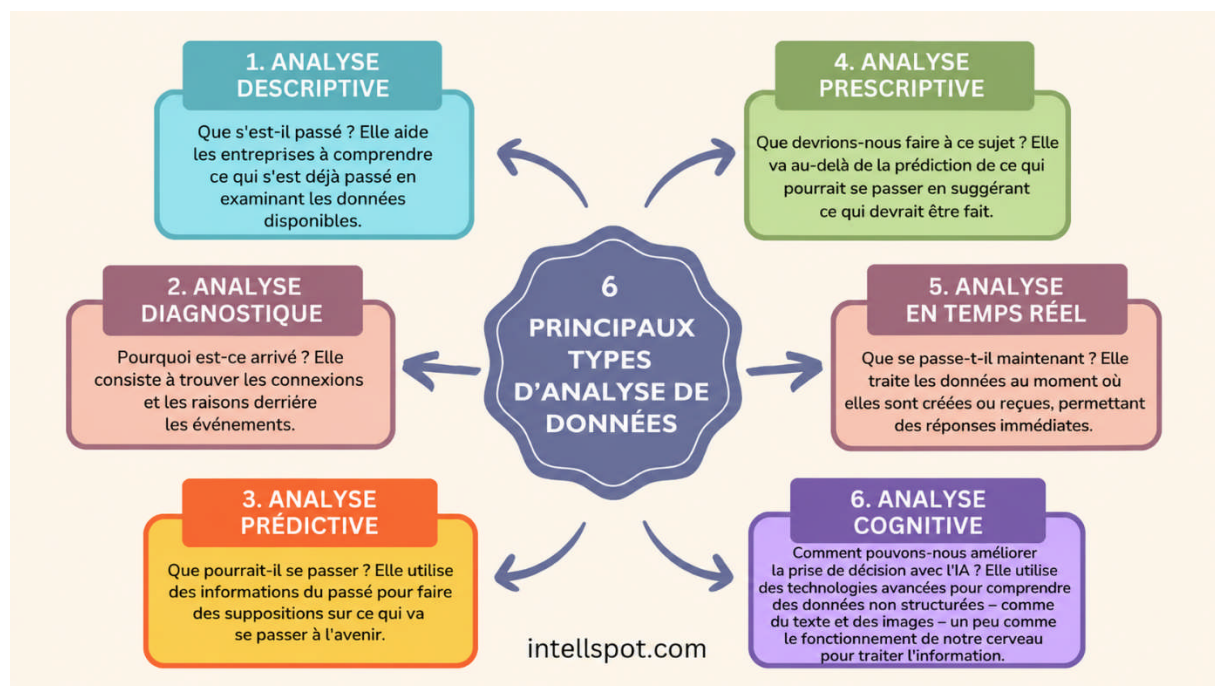


Figure □- 10: les types d'analytique des Big Data

II.5.2.c Intelligence Artificielle (IA)

L'intelligence artificielle transforme radicalement la gestion des actifs industriels en permettant de passer d'un simple diagnostic, qui se limite à identifier une panne existante, à un pronostic capable de prédire l'occurrence future d'une défaillance [5]. Ce passage vers la maintenance prédictive s'appuie sur l'intégration de capteurs **IoT** qui collectent en temps réel des données physiques critiques, telles que les vibrations, la température et la pression, lesquelles sont ensuite traitées par des algorithmes d'apprentissage automatique (**Machine Learning**) pour identifier des modèles d'usure invisible [5].

Ces modèles apprennent des journaux d'événements historiques et des données de performance pour anticiper le moment exact où une intervention sera nécessaire, permettant ainsi une planification proactive qui minimise le temps d'arrêt total et les coûts opérationnels [22]. L'utilisation de technologies avancées comme les réseaux de neurones profonds et le **Deep Learning** permet de vectoriser des données complexes pour établir des modèles de diagnostic de pannes de haute précision, capables de détecter des anomalies comportementales avant qu'elles ne se transforment en défaillances catastrophiques [34].

En transformant la donnée brute en connaissance prévisionnelle, l'IA assure non seulement la continuité de la production mais optimise également le triptyque Qualité-Coût-Délai en garantissant que les machines opèrent toujours dans des conditions optimales [22].

II.6 L'Inspection Basée sur le Risque (Risk-Based Inspection – RBI)

II.6.1 Concept du RBI

L'analyse du risque, pilier central d'une stratégie de maintenance proactive, s'avère nettement plus performante que les calendriers d'inspection fixes car elle permet de passer d'une gestion rigide et arbitraire à une planification optimisée basée sur la fiabilité réelle et critique des équipements [22].

Contrairement aux intervalles temporels constants, qui peuvent entraîner un sur entretien coûteux ou, à l'inverse, laisser survenir des défaillances imprévues entre deux interventions, l'approche basée sur le risque s'appuie sur des indicateurs de performance tels que le MTBF (moyenne des temps de bon fonctionnement) afin d'identifier les points de vulnérabilité et d'allouer les ressources là où l'impact d'une panne serait le plus critique [22].

Cette philosophie intègre une gestion des risques rigoureuse via l'analyse des modes de défaillance (FMEA), permettant d'anticiper et de prévenir les pannes potentiellement dangereuses pour la sécurité des biens et des personnes, garantissant ainsi une conformité constante aux normes de sécurité. En utilisant la surveillance en temps réel via des capteurs IoT et l'intelligence artificielle, cette méthode permet une transition vers le pronostic, réduisant le temps d'arrêt total jusqu'à 75 % et transformant la disponibilité technique en gain financier direct [5] ; [22]. En fin de compte, l'analyse du risque assure une continuité de production supérieure en éliminant les gaspillages liés aux interventions inutiles tout en sécurisant le triptyque Qualité-Coût-Délai indispensable à l'excellence opérationnelle [35].

Dans ce cadre, la méthode AMDEC / FMECA permet une évaluation quantitative de la criticité à travers l'indice de priorité de risque RPN (Risk Priority Number) défini par :

$$\text{RPN} = \text{S} \times \text{O} \times \text{D} \quad (\text{II. 3})$$

Où :

- **S (Severity / Gravité)** : impact de la défaillance (échelle typique 1 à 10),
- **O (Occurrence)** : probabilité d'apparition, souvent estimée à partir du MTBF ou du taux de défaillance :
$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} \quad (\text{II. 4})$$
- **D (Detection)** : capacité de détection avant occurrence de l'effet critique.

L'occurrence peut être quantifiée de manière probabiliste. En supposant un taux de défaillance constant (loi exponentielle), la probabilité de défaillance sur un intervalle est donnée par :

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (II.5)$$

Exemple :

Pour un composant avec :

- **MTBF = 100h $\Rightarrow \lambda = 0.001h^{-1}$**
- **Intervalle de mission : t = 100h**

$$P(100) = 1 - e^{(-0.001 \times 100)} \approx 0.095 \text{ (9.5\%)} \quad (II.6)$$

Cette probabilité est ensuite traduite en indice **O** (par exemple O = 4 sur une échelle normalisée).

Si l'on considère :

- **S = 9** (défaillance critique impact sécurité/production)
- **O = 4**
- **D = 5** (détection moyenne via capteurs)

$$RPN = 9 \times 4 \times 5 = 180$$

Interprétation :

- **RPN > 100 $\rightarrow$ niveau critique $\rightarrow$ action corrective/préventive immédiate**
- **RPN < 40 $\rightarrow$ acceptable sous surveillance**

En complément, la FMECA introduit une **criticité probabiliste (C)** :

$$C = \lambda \times t \times S \quad (II.7)$$

Permettant une analyse plus fine orientée fiabilité.

Cette démarche est conforme aux exigences des normes **NF EN 60812** et **IEC 60300-3-1**, qui imposent :

- une structuration formelle des modes de défaillance,
- une quantification cohérente des indices S, O, D,
- une traçabilité des calculs de criticité,
- et une hiérarchisation des risques basée sur des seuils d'acceptabilité.

L'intégration des données IoT permet d'actualiser dynamiquement λ , O et D, rendant le calcul du RPN évolutif en temps réel et permettant une transition vers une maintenance prédictive basée sur l'estimation de la durée de vie résiduelle (RUL).

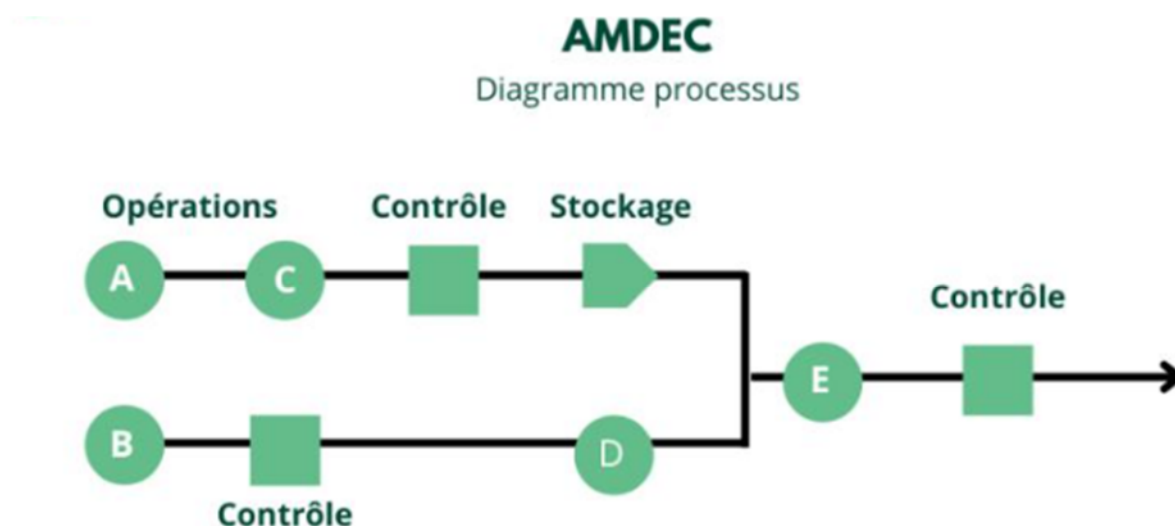


Figure □- 11: Diagramme processus AMDEC

II.6.2 Méthodologie d'analyse

II.6.2.a Évaluation de la Probabilité de Défaillance (PoF)

L'évaluation de la probabilité de défaillance (PoF) constitue un pilier fondamental de l'ingénierie de la fiabilité, s'appuyant sur des indicateurs de performance rigoureux tels que le **MTBF** (Moyenne des temps de bon fonctionnement) pour quantifier la fréquence statistique des pannes sur un intervalle temporel donné [22]. Cette démarche s'inscrit dans une méthodologie d'analyse systématique des risques, notamment à travers l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (**FMEA**), qui permet d'identifier et de hiérarchiser les vulnérabilités potentielles d'un système dès sa phase de conception ou durant son

exploitation [36]. Grâce à l'intégration des technologies de l'Industrie 4.0, comme les capteurs IoT et les algorithmes d'intelligence artificielle, cette évaluation ne se limite plus à des données historiques mais devient une prédiction dynamique capable d'anticiper l'occurrence d'une défaillance avant qu'elle ne compromette la sécurité ou la continuité de la production [5]. En maîtrisant ainsi la probabilité de défaillance, les gestionnaires d'actifs peuvent optimiser leurs stratégies d'intervention et réduire le temps d'arrêt total de manière spectaculaire, transformant la gestion de l'incertitude en un levier direct d'efficacité globale et de réduction des coûts opérationnels [22].

II.6.2.b Évaluation des Conséquences de la Défaillance (CoF) (économiques, environnementales, humaines)

L'évaluation des conséquences de la défaillance (CoF) constitue une étape critique de la gestion des risques industriels, car elle permet de quantifier l'impact multidimensionnel des pannes sur les performances globales de l'organisation [36]. Sur le plan **économique**, chaque arrêt non planifié représente une perte financière directe et sèche pour l'investisseur, pouvant entraîner des ruptures majeures dans la chaîne d'approvisionnement et une augmentation drastique des coûts opérationnels, particulièrement pour les actifs critiques de haute technologie dont le coût d'acquisition est élevé [22].

Concernant les conséquences humaines, une défaillance logicielle ou mécanique, notamment dans le secteur médical ou sur des machines-outils à grande vitesse, peut exposer les utilisateurs et les opérateurs à des risques de blessures graves. Il devient dès lors indispensable d'intégrer des dispositifs de sécurité actifs et de mettre en place une gestion rigoureuse de l'ergonomie afin de garantir la sécurité des biens et des personnes.

Enfin, les impacts **environnementaux** sont désormais des critères de décision fondamentaux, englobant la consommation excessive d'énergie, la génération de déchets non recyclables et les émissions de gaz à effet de serre, ce qui impose le passage à des modèles de maintenance proactive pour éviter les dégradations de processus qui nuisent à la durabilité et à la conformité réglementaire du système productif.

II.7 Pilotage de la Performance par les Indicateurs Clés (KPI)

II.7.1 Définition et rôle des KPI

Les indicateurs de performance, ou **KPI**, constituent des outils de mesure quantifiables indispensables à la gestion stratégique car ils permettent de transformer des données opérationnelles complexes en leviers d'action pour l'excellence industrielle [22]. La mesure est au cœur de l'amélioration continue car elle définit l'état de référence initial et permet de suivre avec précision l'atteinte des objectifs fixés par la direction, garantissant ainsi que chaque initiative de type **Kaizen** produit des résultats concrets et durables [37].

En utilisant des métriques ciblées comme le **MTBF** pour la fiabilité et le **MTTR** pour la maintenabilité, les entreprises peuvent benchmarker l'efficacité de leurs interventions et valider le passage de stratégies réactives à des modèles proactifs qui réduisent drastiquement le temps d'arrêt total, souvent jusqu'à 75 % [22].

Cette rigueur analytique, souvent centralisée dans des tableaux de bord, est essentielle pour identifier les opportunités d'optimisation là où les gains financiers et de productivité sont les plus élevés, tout en sécurisant les acquis grâce à la standardisation des meilleures pratiques [37]. Enfin, la mesure constante des performances permet d'ajuster les ressources et les processus en temps réel, transformant la fonction maintenance et production en un système agile capable de s'adapter aux fluctuations du marché tout en préservant le triptyque Qualité-Coût-Délai indispensable à la compétitivité [38].

II.7.2 Analyse des indicateurs fondamentaux

II.7.2.a MTBF (Mean Time Between Failures)

La Moyenne des temps de bon fonctionnement, ou **MTBF** (Mean Time Between Failures), constitue l'indicateur fondamental pour quantifier la fiabilité d'un équipement industriel en mesurant le temps opérationnel moyen s'écoulant entre deux défaillances consécutives [22].

Sa quantification repose sur un calcul mathématique rigoureux consistant à diviser le nombre total d'heures de fonctionnement effectif par le nombre de pannes survenues durant une période d'observation définie [22]. Une valeur de MTBF élevée est le signe d'une fiabilité supérieure, et le suivi de cet indicateur est essentiel pour valider l'efficacité des politiques de maintenance, particulièrement lors de la transition d'une stratégie réactive vers une approche proactive ou préventive [22]. À titre d'illustration, l'application de mesures de maintenance systématique et de formation des opérateurs sur une machine de presse a permis de faire passer le MTBF de

4,93 heures à un pic de **24,25 heures**, démontrant ainsi une amélioration drastique de la stabilité du système productif [22].

Exemple du calcul :

Les Données de base :

- **Période d'observation :** 100 heures (durée totale de l'étude).
- **Nombre de pannes :** 3 interruptions.
- **Temps total d'arrêt :** 10 heures (somme des durées de réparation).

Trouver le temps de fonctionnement réel

$$100h(\text{total}) - 10h(\text{arrêt}) = 90h \text{ fonctionnement}$$

On divise ce temps de fonctionnement par le nombre de pannes.

$$\frac{90 \text{ h}}{3 \text{ pannes}} = 30 \text{ heures}$$

II.7.2.b MTTR (Mean Time to Repair)

La Moyenne des temps techniques de réparation, ou **MTTR** (Mean Time To Repair), constitue l'indicateur fondamental pour quantifier la maintenabilité d'un système en mesurant le temps moyen nécessaire pour remettre un équipement en état de fonctionnement après une défaillance [22].

Pour mesurer précisément l'efficacité des équipes de réparation, cet indicateur est calculé en divisant le temps total consacré aux réparations par le nombre d'interventions effectuées, reflétant ainsi la rapidité et l'agilité technique des intervenants [22]. Une stabilité du MTTR témoigne de processus de réparation bien établis, tandis que sa réduction est souvent le fruit d'une gestion optimisée des pièces de rechange, d'une formation accrue des techniciens et, plus significativement, de la standardisation des procédures qui peut réduire la durée des interventions jusqu'à **40 %** [22].

Enfin, l'efficacité des équipes est validée par l'intégration du MTTR dans un modèle de **KPI inverse**, où le ratio entre le temps de réparation et le temps de bon fonctionnement permet de suivre l'évolution de la performance globale et de garantir une réduction durable du temps d'arrêt total de la production [22].

Exemple du calcul :

Les Données de base :

- **Nombre de pannes :** 3 interventions.

➤ **Détail des arrêts :**

- ❖ Panne 1 : 2 heures.
- ❖ Panne 2 : 5 heures.
- ❖ Panne 3 : 3 heures.

On additionne la durée de toutes les réparations, puis on divise par le nombre d'interventions.

$$\text{somme des temps d'arrêt} = 2 + 5 + 3 = 10h$$

$$MTTR = \frac{10h}{3\text{pannes}} = 3.33h$$

II.7.2.c Taux de disponibilité

Le taux de disponibilité correspond au temps réel durant lequel l'outil de production est fonctionnel et prêt à être utilisé, représentant le résultat combiné d'une haute fiabilité (**MTBF**) et d'une excellente maintenabilité (**MTTR**) [22]. Cet indicateur est intimement lié au **Downtime** (temps d'arrêt), qui englobe la totalité du temps non opérationnel causé par les défaillances et les interventions de réparation, ainsi qu'à l'Efficacité Globale des Équipements (**OEE** ou **TRG**), utilisée comme mesure de succès fondamentale dans le management des procédés de fabrication [22]. Grâce à l'adoption de technologies numériques comme l'**IoT** et l'Intelligence Artificielle, il est désormais possible de pratiquer une maintenance prédictive qui surveille l'état de santé des composants critiques en temps réel pour anticiper les pannes, permettant de réduire le temps d'arrêt total de manière spectaculaire jusqu'à 75 % [39] ; [22].

En maximisant ce temps d'utilisation effectif, l'entreprise transforme ses actifs technologiques en leviers de rentabilité, car chaque période d'indisponibilité représente une perte financière sèche pour l'investisseur et une perturbation majeure de la chaîne d'approvisionnement [40] ; [22]. Finalement, le suivi rigoureux de la disponibilité via des indicateurs clés de performance permet d'allouer les ressources de maintenance là où l'impact sur la production est le plus critique, garantissant une productivité durable et une amélioration continue des opérations industrielles [22].

Exemple du calcul :

Les Données de base :

- Temps **de fonctionnement (MTBF)** : 90 heures (le temps où la machine a tourné).
- Temps **d'arrêt (MTTR)** : 10 heures (le temps passé en réparation).
- Temps **total d'ouverture** : 100 heures.

La formule standard est le rapport entre le temps de fonctionnement et le temps total requis :

$$\text{Disponibilité} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \times 100 \quad (\text{II.8})$$

$$\frac{90}{90 + 10} = \frac{90}{100} = 0.9 \quad (90\%)$$

La machine a été disponible **90 %** du temps prévu.

II.7.2.d Taux de défaillance

Le taux de défaillance, qui exprime la fréquence statistique d'apparition des pannes sur une période donnée, constitue une mesure fondamentale de l'ingénierie de la fiabilité étroitement liée au **MTBF** (Moyenne des temps de bon fonctionnement) [22]. Cet indicateur est quantifié en divisant le total des heures opérationnelles par le nombre de défaillances enregistrées, permettant ainsi de situer le niveau de stabilité d'un équipement et de détecter toute dégradation de sa performance au fil du temps [22].

L'évaluation systématique de cette fréquence est souvent complétée par une analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (**FMEA**), une méthode rigoureuse qui aide à identifier les vulnérabilités fonctionnelles dès la phase de conception afin de prévenir les arrêts inopinés avant qu'ils ne surviennent [40]. Dans une optique d'excellence opérationnelle, le passage d'une maintenance purement corrective à des stratégies proactives et prédictives — s'appuyant sur des capteurs **IoT** et des algorithmes d'Intelligence Artificielle pour surveiller l'usure en temps réel — permet de réduire drastiquement la fréquence d'apparition des pannes en planifiant les interventions avant la rupture [5] ; [22].

En maîtrisant ainsi la probabilité de défaillance, les entreprises stabilisent leurs processus de production, comme le démontrent les études de cas où l'application de mesures préventives a

permis d'augmenter le MTBF de manière spectaculaire, passant de 4,93 heures à plus de **24 heures** sur des équipements critiques [22].

Exemple du calcul :

Les Données de base :

- **Nombre de pannes (\$n\$) :** 3 pannes.
- **Temps de Bon Fonctionnement Total :** 90 heures.

$$\lambda = \frac{\text{Nombre de pannes}}{\text{Temp de fonctionnement}} \quad (II.9)$$

$$\lambda = \frac{3}{90} = 0.33 \text{ Pannes par heure}$$

II.7.2.e Le Taux de Rendement Synthétique (TRS)

Le Taux de Rendement Synthétique, plus couramment désigné sous l'acronyme **TRS** ou **OEE**, constitue l'indicateur d'excellence pour synthétiser la performance globale d'un système productif en agrégeant trois dimensions critiques que sont la disponibilité, la performance et la qualité. Ce pilotage de la performance repose sur une **disponibilité** technique maximisée, laquelle est le fruit direct d'une haute fiabilité mesurée par le MTBF et d'une maintenabilité optimale quantifiée par le MTTR, permettant ainsi de réduire les arrêts non planifiés de près de **75 %** grâce à une transition vers une maintenance proactive [22]. La composante **performance** évalue quant à elle l'aptitude de l'équipement à fonctionner à ses cadences nominales sans dérive de vitesse, tandis que le pilier **qualité** assure que le flux de sortie est exempt de défauts ou de rebuts, garantissant ainsi que seules les activités à valeur ajoutée sont comptabilisées. En intégrant ces paramètres dans une boucle d'amélioration continue, le TRS permet d'identifier précisément les sources de gaspillage et de transformer la gestion des actifs industriels en un avantage compétitif durable au sein de l'Industrie 4.0 [37].

Finalement, l'efficacité globale d'une usine ne dépend pas uniquement de la technologie embarquée mais d'une synchronisation parfaite entre la préparation des interventions, la formation des opérateurs et la stabilisation des processus de réparation, ce qui permet de tendre vers la perfection opérationnelle en satisfaisant simultanément les objectifs de coût et de délai [22].

Exemple du calcul :

Les Données de base :

On prend un totale de 100 pièces

Taux de Disponibilité (Le temps où la machine a tourné par rapport au temps prévu) :

$$TD = 90\%$$

Taux de Performance (La vitesse réelle par rapport à la vitesse théorique) :

$$TP = 80\%$$

Taux de Qualité (Le nombre de bonnes pièces par rapport au total produit) :

$$TQ = 98\%$$

La formule synthétique est le produit de ces trois facteurs :

$$TRS = TD \times TP \times TQ \quad (II.10)$$

$$TRS = 0.90 \times 0.80 \times 0.98 = 0.705 \quad (70.5\%)$$

Un TRS de **70,5%** signifie que sur 100 heures payées, seulement 70,5 heures ont servi à créer de la valeur réelle.

II.8 Conclusion

Les procédés de découpage modernes nécessitent des équipements performants et fiables. L'intégration de l'**Industrie 4.0** avec l'approche **Risk-Based Inspection (RBI)** permet d'améliorer la gestion de la maintenance grâce au suivi intelligent des machines, à l'analyse des données et à la prévention des défaillances. Cette combinaison contribue à maximiser la disponibilité des équipements, à réduire les arrêts de production et à améliorer la performance globale des systèmes industriels.

Chapitre III :
Étude technique et analyse
fonctionnelle du système

III.1 Introduction et Fondements de la Technologie de découpe plasma

La technologie de découpe plasma, fréquemment employée dans l'industrie pour le travail des métaux conducteurs, repose sur un procédé thermique. Elle se base sur la génération d'un jet de plasma à une température extrêmement élevée, qui permet de liquéfier le matériau et d'assurer une découpe rapide et précise. Cette méthode a évolué afin de surpasser les contraintes des techniques traditionnelles telles que l'oxycoupage, particulièrement en ce qui concerne la rapidité et la qualité.

L'incorporation du contrôle numérique (CNC) a constitué un tournant majeur dans son développement, autorisant l'automatisation des parcours et une répétabilité accrue des opérations. En outre, l'instauration de systèmes de contrôle sophistiqués, comme la vérification de la hauteur du faisceau et les régulateurs PID, a permis d'améliorer la stabilité du processus et la qualité de la coupe. Par conséquent, la machine de découpe plasma contemporaine allie performance, exactitude et automatisation, ce qui la rend essentielle dans les applications industrielles contemporaines.



Figure □- 1: Découpeuse plasma PL-C 2060

III.2 Cahier des charges

Le cahier des charges fonctionnelles est la liste exhaustive des fonctions et des Contraintes que le produit de l'étude doit respecter. En ce sens, nous avons listé toutes les fonctions qu'on doit prendre en compte :

Machine de découpe plasma CNC – PLC 2060

Objectif du projet :

- Mettre en place un système de maintenance préventive et corrective pour assurer :
 - Le bon fonctionnement de la découpeuse plasma
 - La réduction des pannes
 - L'augmentation de la durée de vie des équipements

Description de l'équipement :

- Type : Machine de découpe plasma CNC
- Modèle : PLC 2060
- Fonction : Découpe de tôles métalliques (acier, inox, aluminium)
- Commande : Automatisée (CNC + PLC)

Éléments principaux :

- Source plasma
- Table de découpe
- Système de guidage (rails + moteurs)
- Torche plasma
- Compresseur d'air
- Armoire électrique (PLC, variateurs, relais)

Types de maintenance :

- Maintenance préventive

Objectif :

- éviter les pannes avant qu'elles arrivent
- Nettoyage quotidien de la table
- Vérification des consommables (buse, électrode)
- Contrôle des câbles et connexions
- Lubrification des axes
- Vérification pression d'air

- Maintenance corrective

Objectif :

- réparer en cas de panne
- Diagnostic de la panne
- Remplacement des pièces défectueuses
- Test de fonctionnement après réparation

Besoins fonctionnels :

- Le système de maintenance doit permettre :
- Suivi des interventions
- Planification des maintenances
- Historique des pannes
- Gestion des pièces de rechange
- Suivi du temps d'arrêt

Indicateurs de performance (KPI) :

- Taux de panne
- Temps moyen de réparation (MTTR)
- Temps moyen entre pannes (MTBF)
- Disponibilité machine

III.3 Principe physique (Découpe plasma)

Le plasma est scientifiquement reconnu comme le quatrième état de la matière, s'ajoutant aux états solide, liquide et gazeux bien connus. Il se définit fondamentalement comme un gaz chauffé à une température extrêmement élevée et ionisé, ce qui lui permet de devenir un milieu électriquement conducteur [41]. Pour séparer la matière, le procédé de découpe à l'arc plasma utilise ce gaz ionisé comme une électrode pour transférer un arc électrique puissant vers la pièce à traiter [41]. La séparation physique s'opère par la combinaison d'une fusion thermique localisée et d'une action mécanique de soufflage. Dans un premier temps, la chaleur intense générée par l'arc électrique fait fondre le métal conducteur au point d'impact.

Ensuite, le gaz plasma est forcé de traverser une ouverture restreinte dans la buse de la torche, ce qui l'oblige à sortir à une vitesse très élevée. C'est cette force cinétique du jet de plasma, souvent assistée par des gaz de protection, qui expulse le métal en fusion hors de la fente de coupe, permettant ainsi de sectionner le matériau [41]. Cette technique est spécifiquement employée pour découper des matériaux électriquement conducteurs, car la pièce elle-même doit

faire partie du circuit électrique pour permettre le transfert de l'arc. Elle permet de traiter efficacement des métaux tels que l'acier doux, l'acier inoxydable et l'aluminium avec une grande précision, tout en évitant l'usure mécanique car il n'y a aucun contact direct entre la torche et la pièce usinée [42], [43].

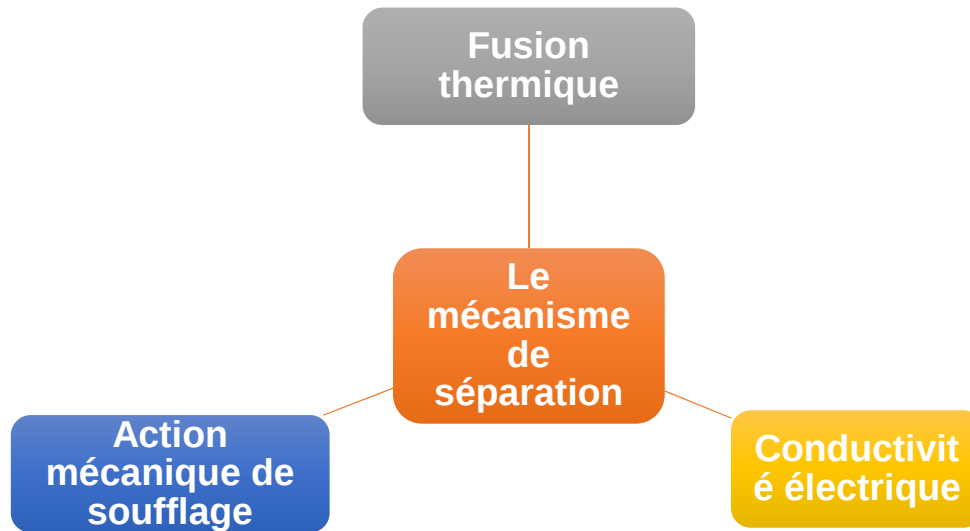


Figure □- 2: Le mécanisme de séparation

III.3.1 Avantages et limites

En productique, le choix entre le plasma, le laser et l'oxycoupage repose sur un équilibre stratégique entre la polyvalence des matériaux, la précision géométrique et la rentabilité opérationnelle [41]. Le plasma haute précision s'impose comme une solution polyvalente capable de traiter tous les métaux conducteurs avec une vitesse jusqu'à dix fois supérieure à l'oxycoupage sur les épaisseurs moyennes, tout en affichant des coûts d'exploitation nettement inférieurs au laser [43], [44].

Alors que le laser excelle dans la précision extrême sur tôles fines et que l'oxycoupage reste la norme pour les aciers très épais, le plasma offre la flexibilité nécessaire pour maintenir une productivité élevée sur une large plage d'épaisseurs (jusqu'à 50 mm) sans être pénalisé par les matériaux réfléchissants comme l'aluminium ou le cuivre [45], [41].

Tableau □- 1: tableau comparatif synthétisant des avantages et limites

Critère	Découpe Plasma (Haute Précision)	Découpe Laser (Fibre/CO2)	Oxycoupage
Matériaux compatibles	Tous métaux conducteurs (acier, inox, alu, cuivre)	Métaux, plastiques, bois (selon le type de laser)	Uniquement aciers ferreux (oxydables)
Épaisseurs optimales	Moyennes (1,5 mm à 50 mm)	Fines à moyennes (souvent < 20 mm)	Fortes à très fortes (> 30 mm)
Vitesse de coupe	Très élevée sur épaisseurs moyennes	Excellente sur tôles fines, diminue avec l'épaisseur	Lente (vitesse limitée par la réaction chimique)
Précision et Tolérance	Haute (tolérances de 0,2 à 0,5 mm)	Maximale (tolérances < 0,05 mm)	Faible (tolérances larges, nécessite souvent usinage)
Coûts (Initial / Op)	Modéré à équilibré	Très élevé (investissement lourd et gaz)	Très bas (équipement simple et gaz bon marché)
Zone Thermique (ZAC)	Réduite (technologie HP)	Minimale	Étendue

III.4 Architecture et Organes Principaux

III.4.1 Le Générateur de courant (Source de puissance)



Figure □- 3: Générateur (HPR130XD)

Le fonctionnement d'un générateur de découpe plasma repose sur une série d'étapes de transformation de l'énergie et de gestion des fluides, orchestrées par des composants électroniques et mécaniques précis. Tout commence par l'entrée d'alimentation, où le courant alternatif (AC) du réseau électrique pénètre dans l'appareil. Ce courant subit une première transformation via les redresseurs de haute fréquence (HF), dont le rôle est de convertir cette

tension alternative en un courant continu (DC) primaire [46]. Une fois sous forme continue, l'énergie passe dans le bloc onduleur (inverter). Ce composant est le cœur technologique des machines modernes : il "hache" le courant continu pour le transformer en un signal alternatif à très haute fréquence [46]. Cette étape est cruciale car elle permet d'augmenter l'efficacité électrique à plus de 92 % tout en permettant l'utilisation de composants internes beaucoup plus compacts [41]. Le signal haute fréquence ainsi généré traverse ensuite le transformateur de puissance (souvent toroïdal). Grâce à la fréquence élevée issue de l'onduleur, ce transformateur peut être beaucoup plus léger et petit que les modèles traditionnels tout en adaptant précisément la tension et l'intensité nécessaires à la découpe [47], [46]. En sortie de transformateur, un redresseur secondaire intervient pour stabiliser définitivement le courant en un courant continu (DC) parfaitement régulé, garantissant une densité d'arc constante pour une coupe nette et sans scories [47], [41].

Parallèlement à la transformation électrique, le générateur gère le flux gazeux via le système de gestion des gaz. Le régulateur d'air ajuste la pression entrante tandis qu'une vanne magnétique (électrovanne) synchronise l'ouverture et la fermeture du débit de gaz vers la torche. L'ensemble de ces opérations est piloté par le PCB de contrôle (circuit logique), véritable cerveau de la machine. Ce circuit, souvent équipé d'un microprocesseur 32 bits dans les systèmes avancés, gère la synchronisation entre l'amorçage de l'arc, le débit de gaz et les dispositifs de sécurité comme la protection thermique [47], [41].

Enfin, lors de la phase d'amorçage, la source de puissance augmente brusquement la tension pour forcer les électrons à franchir l'espace entre l'électrode et la buse dans la torche, créant ainsi le pilote d'arc qui ionise le gaz. Une fois la torche à proximité du métal, l'arc se transfère à la pièce, fermant le circuit électrique par la pince de masse et permettant la séparation de la matière par fusion thermique et soufflage mécanique [41].

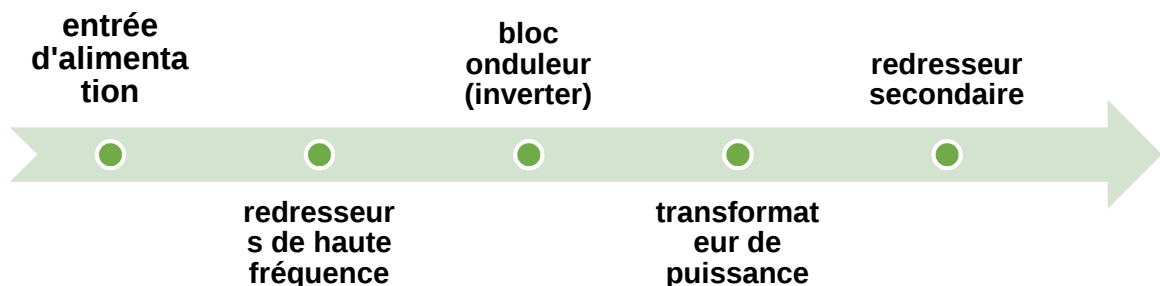


Figure □- 4: schéma des composant du générateur responsables de la transformation électrique



Figure □- 5: les composent du générateur responsables de gère le flux gazeux



Figure □- 6: entrée d'alimentation

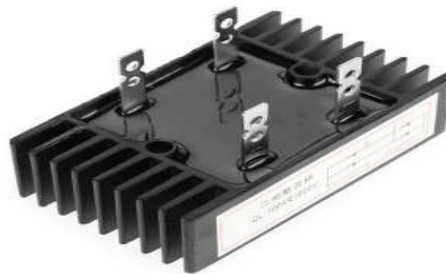


Figure □- 7: redresseurs de haute fréquence



Figure □- 8: bloc onduleur (inverter)



Figure □- 9: transformateur de puissance



Figure □- 10: PCB de contrôle

III.4.2 La Torche de découpe (L'organe effecteur)

Une machine de découpe industrielle peut accueillir deux sortes de torches : la torche plasma, mise en œuvre pour une coupe des matériaux conducteurs rapide et précise, et la torche d'oxycoupage, conçue pour les aciers de forte épaisseur. Cette association contribue à augmenter la souplesse et l'efficacité du processus de découpe.

III.4.2.a Torche plasma

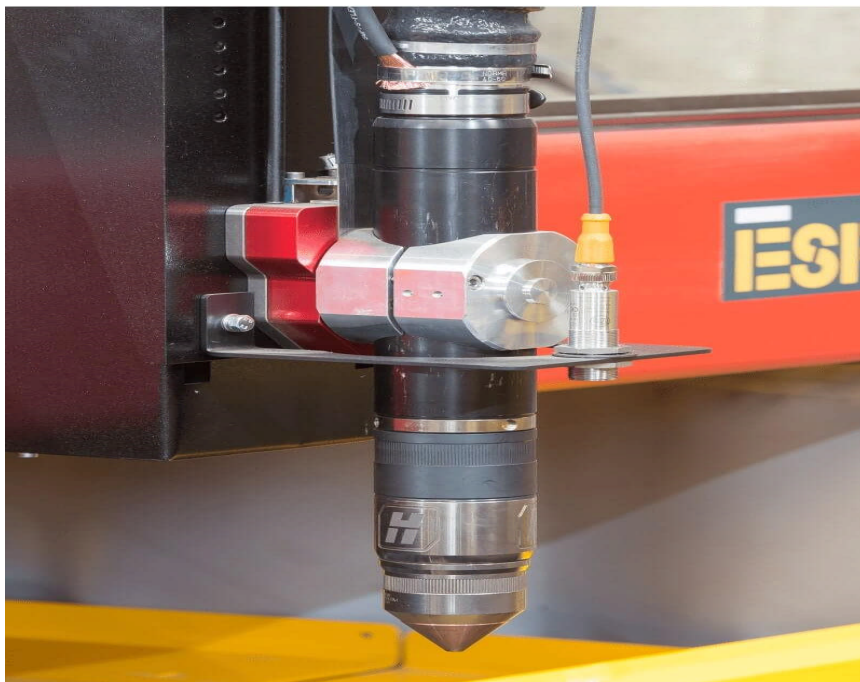


Figure □- 11: Torche de découpeuse plasma

Dans la torche de découpe plasma, l'électrode remplit la fonction vitale de porteur du courant continu (DC) et constitue le point d'origine de l'arc électrique. Elle est généralement pourvue d'un insert en matériau hautement conducteur et résistant, tel que le hafnium ou le cérium, qui

s'érode progressivement avec l'usage. Dans les systèmes avancés utilisant une "cartouche de démarrage" (start cartridge), l'électrode reste fixe tandis que la pression de l'air rompt le contact pour initier l'arc pilote, garantissant ainsi une plus longue durée de vie des composants et une meilleure fiabilité de l'amorçage [41].

La tuyère, également appelée buse ou pointe (tip), a pour rôle principal de restreindre le flux de gaz ionisé afin de concentrer l'énergie de l'arc et d'augmenter considérablement la vitesse du jet. Ce processus crée un effet venturi qui transforme le gaz en un faisceau plasma dense capable de sectionner le métal. Dans le cas du plasma haute définition, la technologie utilise des tuyères ventilées en deux pièces pour atteindre des densités énergétiques allant jusqu'à 60 000 ampères par pouce carré, ce qui permet d'obtenir des coupes plus étroites et des bords parfaitement d'équerre [48]. Une tuyère usée ou dont l'orifice est déformé produit un flux plasma instable, nuisant directement à la précision et à la qualité de la saignée [49].

Enfin, le diffuseur de gaz, souvent désigné sous le terme d'anneau de tourbillonnement (Swirl ring), orchestre la dynamique des fluides à l'intérieur de la tête de la torche en forçant le gaz à circuler en spirale autour de l'électrode. Ce mouvement tourbillonnaire est crucial car il permet de centrer précisément l'arc électrique et de stabiliser le jet de plasma lors de sa sortie par la tuyère [41]. Les innovations récentes, comme la technologie Total Gas Management, intègrent parfois ces ports de diffusion directement dans la tuyère pour optimiser les performances selon l'ampérage sélectionné, éliminant ainsi le besoin d'un diffuseur séparé sur certains modèles haute précision [41].

III.4.2.b Torche oxycoupage

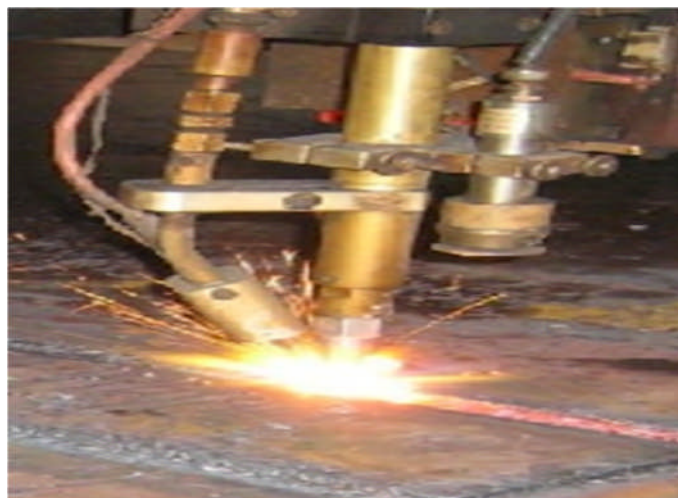


Figure □- 12: Torche oxycoupage

La torche d'oxycoupage se distingue fondamentalement du plasma par son principe de fonctionnement basé sur une réaction chimique d'oxydation rapide, et non sur un arc électrique [41]. Le processus commence par le préchauffage du métal à l'aide d'une flamme mélangeant de l'oxygène et un gaz combustible, comme l'acétylène ou le propane, jusqu'à ce qu'il atteigne sa température d'inflammation [50]. À ce stade, un jet d'oxygène pur à haute pression est libéré, déclenchant une réaction exothermique qui brûle littéralement l'acier tout en expulsant mécaniquement les oxydes de fer en fusion hors de la saignée [51], [41].

Tableau □- 2: Les gaz dans les procédés de découpe thermique

Gaz	Procédé(s)	Matériaux typiques	Rôle et Avantages Clés
Oxygène (O2)	Plasma, Laser, Oxycoupage	Acier doux (carbone)	Déclenche une réaction exothermique qui ajoute de la chaleur, augmente la vitesse de coupe et assure un bord net
Azote (N2)	Plasma, Laser	Acier inoxydable, Aluminium	Utilisé pour la coupe par fusion sans oxydation. Il protège les bords de la corrosion et assure une finition brillante
Air comprimé	Plasma, Laser	Aluminium, Acier doux (fines épaisseurs)	Solution la plus économique et polyvalente. L'air doit être sec et déshuilé pour éviter l'usure des consommables
Argon (Ar)	Plasma	Tous (pour le marquage)	Gaz inerte principalement utilisé pour le marquage plasma ou pour empêcher l'oxydation/nitruration sur des métaux très spécifiques comme le titane
Brouillard d'eau (WMS)	Plasma (N2 + Eau)	Acier inoxydable, Aluminium	Le jet d'eau secondaire se décompose en hydrogène, créant une atmosphère réductrice qui élimine les oxydes et réduit la zone affectée par la chaleur (ZAC) à un coût minime
3Gaz combustibles (Acétylène, Propane)	Oxycoupage	Uniquement métaux ferreux (acier doux)	Utilisés avec l'oxygène pour le préchauffage du métal jusqu'à sa température d'inflammation

III.4.3 Le Système d'alimentation en gaz et air (Compresseur)

L'importance de la pression et de la déshydratation de l'air est absolue pour garantir une découpe de haute qualité et préserver l'intégrité des composants internes de la torche. Un air propre et sec est considéré comme un paramètre vital, car la moindre contamination modifie radicalement la physique de l'arc plasma.

III.4.3.a Importance de la pression et de la déshydratation

La pression doit être réglée avec précision selon les spécifications de la machine, car elle fournit la force mécanique nécessaire pour expulser le métal fondu hors de la saignée. Une pression insuffisante empêche d'atteindre la vitesse de coupe optimale et provoque l'adhérence de scories (dross) sur la face inférieure de la pièce [50]. À l'inverse, une pression excessive peut entraîner une déformation de l'orifice de la tuyère et créer des ondes de choc qui perturbent la stabilité du jet, nuisant à l'équerrage des bords et à la finesse de la coupe [45].

La déshydratation de l'air est tout aussi cruciale. Lorsque l'humidité n'est pas éliminée, elle pénètre dans la torche et se décompose instantanément en hydrogène et en oxygène sous l'effet des températures extrêmes de l'arc (pouvant atteindre 10 000 °C). Ce changement chimique accélère considérablement l'usure de l'insert en hafnium de l'électrode et de l'orifice de la buse. Plus l'air n'est sec, plus la durée de vie des consommables est prolongée et plus la coupe est nette.

III.4.3.b Composants responsables et fonctionnement

Le traitement de l'air repose sur plusieurs composants clés situés entre l'aspiration et l'entrée de la découpeuse :

➤ **Le réservoir du compresseur (Receiver) :**

Il joue un rôle de premier filtre naturel. En emmagasinant l'air comprimé, il permet à l'humidité de se condenser au fond du réservoir sous forme d'eau liquide. Pour fonctionner efficacement, ce réservoir doit être purgé quotidiennement via sa vanne de drainage pour éviter que l'eau accumulée ne remonte dans les conduites [49].

➤ **Les filtres embarqués (Particules et Coalescence) :**

La plupart des systèmes plasma de qualité intègrent un filtre à particules ou un filtre coalescent doté d'une purge automatique qui élimine les premières impuretés et gouttelettes d'eau restantes.

➤ **Le sécheur/filtre submicronique (Absorption) :**

Pour les environnements humides ou industriels, l'ajout d'un filtre submicronique externe est impératif. Ce composant utilise une cartouche filtrante remplaçable conçue pour piéger l'humidité résiduelle par absorption. Il doit être installé au plus près de l'entrée d'air de la machine pour garantir que l'air arrivant dans le plenum de la torche est parfaitement déshydraté.



Figure □ - 13: système d'alimentation en air

III.4.4 L'Unité de contrôle (Boîte électrique et CNC)



Figure □ - 14: Unité de contrôle CNC

L'interface commande-machine (ICM), intégrée au sein de l'unité de commande numérique (CNC), agit comme le cerveau central coordonnant en temps réel l'ensemble des composants

du système de découpe pour garantir une exécution fluide et précise [41]. Cette coordination repose sur un système servo intégré qui pilote les moteurs d'entraînement de la table, assurant une harmonie parfaite entre les mouvements mécaniques et le processus thermique [41]. Pour les trajectoires complexes, telles que les arcs ou les rayons, la CNC doit calculer et modifier continuellement les ratios de vitesse entre les moteurs pour chaque incrément de mouvement, ce qui permet de maintenir la précision géométrique de la découpe dans le plan XY [52], [53].

Le processus d'amorçage de l'arc est synchronisé avec les mouvements des axes par une séquence de signaux logiques bidirectionnels. Initialement, l'ICM envoie un signal de « Start » au générateur de courant, déclenchant l'écoulement du gaz et la création de l'arc pilote [41]. Une étape fondamentale de cette séquence est l'attente du signal de retour « OK to Move » (ou signal de transfert d'arc) : la CNC ne commence à déplacer les axes que lorsqu'elle reçoit la confirmation que l'arc électrique a été transféré avec succès à la pièce à découper [41]. Ce verrouillage électronique évite d'endommager la pièce en commençant un mouvement sans arc établi ou de gaspiller du temps de cycle en cas de défaut d'amorçage [41], [49].

Dans les systèmes de haute précision actuels, l'ICM gère également de manière dynamique la hauteur de la torche (axe Z) via un contrôle de tension d'arc (iHC) totalement intégré [41]. En surveillant la tension en temps réel, l'unité de contrôle ajuste la distance entre la buse et le métal pour compenser l'usure de l'électrode ou les ondulations de la tôle, tout en synchronisant ces ajustements avec la vitesse de coupe pour éviter que la torche ne plonge dans le métal lors des ralentissements dans les angles [41], [42].

Voici un tableau récapitulatif de cette coordination :

Tableau □- 3: Tableau récapitulatif de la coordination de la séquence de découpe par l'unité de contrôle (CNC)

Phase de l'opération	Action de l'ICM (CNC)	Composant piloté / Signal
Interprétation	Analyse des fichiers CAO (DXF/ESSI) et distinction entre trous et contours	Logiciel de pilotage (ex: iCNC XT)
Initialisation	Positionnement de la torche à la hauteur d'allumage programmée	Moteur de l'axe Z (Lifter)
Séquence Arc	Envoi de la commande de début de cycle	Signal Start / Stop
Confirmation	Analyse de la stabilité de l'arc avant tout déplacement	Signal OK to Move
Exécution	Synchronisation des moteurs pour suivre le tracé tout en maintenant la hauteur via la tension d'arc	Servomoteurs X, Y et contrôle iHC
Finalisation	Arrêt de l'arc à la fin du tracé et temporisation du gaz pour le refroidissement	Électrovanne de gaz et puissance DC

III.4.5 Table de découpe plasma

C'est une Structure métallique intégrée à une machine de découpe plasma destinée à soutenir et stabiliser les tôles durant l'opération de découpe. Elle est normalement munie de lames de support et d'un système d'aspiration ou d'un bac à eau pour limiter les fumées, les projections et les déformations thermiques.



Figure □- 15: Table de découpe

III.4.6 Armoire électrique



Figure □- 16: Armoire électrique

L'unité de commande numérique (CNC) constitue le cerveau central du système, agissant comme le siège de l'intelligence qui stocke l'expertise et le savoir-faire du processus de découpe [41]. Elle reçoit des instructions (sous forme de fichiers CAO comme le DXF ou de signaux de

capteurs) et les traite pour coordonner l'ensemble des organes techniques en une « temps réel » [41], [54]. La CNC utilise son unité de contrôle (CU) pour diriger le flux de données et envoyer des signaux de commande et de synchronisation précis aux moteurs d'entraînement et au générateur de courant. Dans les systèmes de haute précision, cette intelligence est capable de prise de décision adaptative : elle surveille en continu des variables comme la tension d'arc ou la pression de gaz et effectue des ajustements dynamiques pour optimiser la qualité de la coupe. [41], [53], [42].

Tableau □ - 4: tableau illustrant cette analogie fonctionnelle

Composant Technique (CNC/Boîte Électrique)	Rôle dans le Système [Source]
Logiciel de pilotage et base de données (ex : iCNC XT)	Stocke les paramètres de coupe (ampérage, vitesse) et l'expertise métier
Décodeur binaire / Processeur (CPU)	Transforme les fichiers de conception (dessins) en instructions machine compréhensibles
Système servo intégré	Synchronise les mouvements des axes X et Y pour tracer des formes complexes comme des cercles ou des rayons
Contrôle de hauteur (iHC) et capteurs	Ajuste en temps réel la position de la torche face aux irrégularités du métal, garantissant la sécurité et la précision
Bus de communication et câbles de contrôle	Transmet les signaux « Start », « Stop » et « OK to Move » entre la CNC, le générateur et la torche

III.5 Analyse Fonctionnelle et Cinématique

III.5.1 Processus de formation de l'arc (Amorçage)

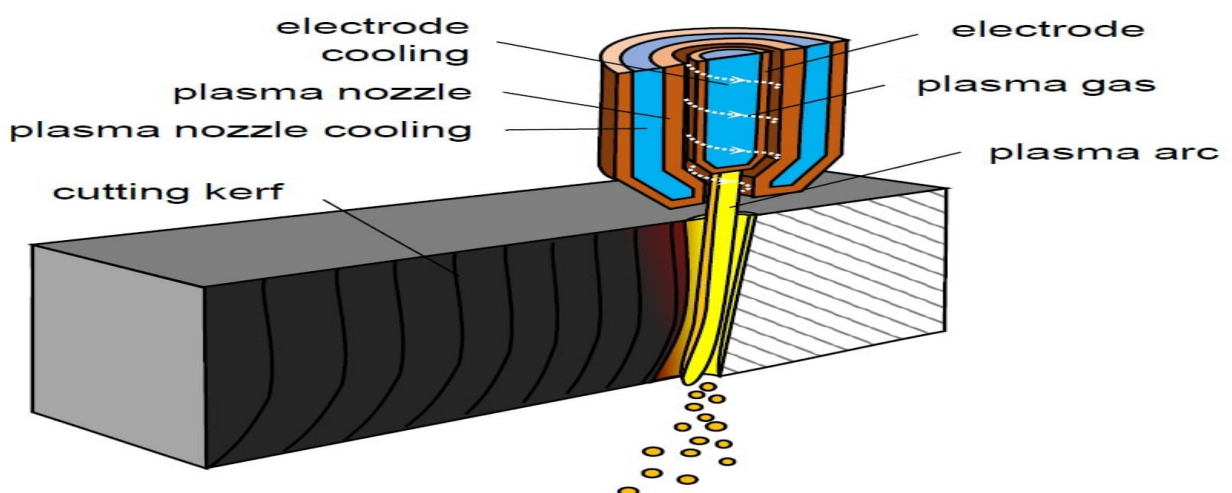


Figure □ - 17: Processus de formation de l'arc (Amorçage)

Le passage de l'appui sur le bouton « Start » à la pénétration effective du métal suit une séquence précise et rapide, coordonnée par l'unité de contrôle et le générateur, qui transforme un arc électrique interne en un jet de plasma de puissance capable de découper.

➤ **Initialisation et flux de gaz :**

Dès que l'opérateur active la commande (gâchette ou signal CNC), le système déclenche l'ouverture de l'électrovanne pour permettre l'écoulement du gaz comprimé dans la torche. Dans les systèmes automatisés, cette étape s'accompagne d'un positionnement de la torche à une hauteur d'allumage prédéfinie par rapport à la tôle [41].

➤ **Création de l'Arc Pilote (Arc non transféré) :**

Il s'agit d'un arc de faible énergie établi exclusivement à l'intérieur de la tête de la torche entre l'électrode (polarité négative) et la tuyère/buse (polarité positive).

- **Mécanisme de démarrage :** Dans les technologies modernes, une « cartouche de démarrage » (start cartridge) sépare physiquement l'électrode de la buse sous la pression de l'air, créant une étincelle qui ionise le gaz et établit l'arc pilote [41].
- **Rôle :** Cet arc sert à ioniser le gaz pour le rendre conducteur, créant ainsi un chemin de plasma pour l'arc principal, sans encore toucher la pièce à découper [46].

➤ **Transition vers l'Arc de Transfert :**

Lorsque la torche est à une distance adéquate de la pièce (qui est reliée à la terre via la pince de masse), l'arc électrique détecte un chemin plus direct et conducteur vers le métal.

- **Le saut d'arc :** Le circuit électronique commute alors le courant continu (DC) pour qu'il ne circule plus vers la buse mais directement vers la pièce à couper.
- **Signal de mouvement :** Dès que ce transfert est réussi, l'unité de contrôle reçoit un signal « OK to Move », confirmant que l'arc est établi sur la pièce et que le mouvement des axes peut débuter [41].

➤ **Pénétration (Piercing) et Découpe :**

Une fois l'arc transféré, le générateur libère le plein ampérage sélectionné [49]. La température extrême (plus de 10 000 °C) fait fondre instantanément le métal, tandis que le jet de gaz à haute vitesse expulse mécaniquement la matière en fusion à travers l'épaisseur du matériau [41]. Pour les tôles épaisses, la torche peut effectuer une temporisation de pénétration avant de commencer son avance linéaire afin de s'assurer que le métal est sectionné sur toute sa profondeur [41].

Tableau □- 5: différences entre arc piloté et arc de transfert

Type d'arc	Circuit électrique	Rôle principal
Arc Pilote	Électrode → Buse (Tuyère)	Ionisation du gaz et préparation du chemin conducteur
Arc de Transfert	Électrode → Pièce (Métal)	Fusion et séparation effective de la matière

III.5.2 Eléments de transmission du mouvement

Le mouvement précis de la torche de découpe d'une machine de découpe plasma CNC est essentiel pour assurer la qualité et la précision des pièces produites. Ce déplacement est réalisé par une transmission mécanique et électromécanique qui permet de faire se déplacer la torche suivant différents axes commandés par la commande numérique. La coordination entre les moteurs, les organes de guidage et les mécanismes de transmission permet à la machine d'adopter des trajectoires précises et régulières qui s'adaptent aux découpes de formes complexes. Plusieurs éléments mécaniques sont donc mobilisés pour garantir la transmission et la commande du mouvement au cœur de la découpeuse plasma CNC.

- **Moteur pas à pas** est un dispositif électromécanique qui convertit des impulsions électriques en déplacements angulaires discrets appelés « pas », permettant ainsi de contrôler précisément la position et la vitesse d'un axe sans nécessiter de boucle de rétroaction complexe.

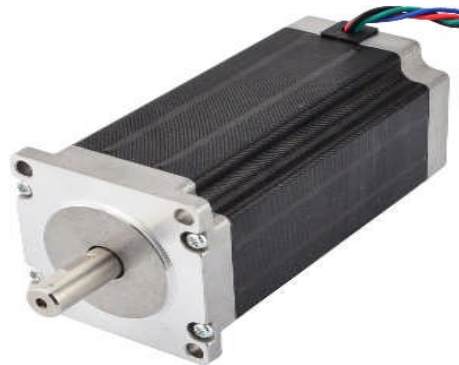


Figure □- 18: Moteur pas à pas

- **rails de guidage linéaire** sont les composants mécaniques qui permettent le déplacement précis de la tête de découpe le long des axes X et Y, parallèlement à la surface de la pièce traitée, afin de définir les coordonnées de la trajectoire de mouvement.



Figure □- 19: rails de guidage linéaire

- **Crémaillère et pignon** un dispositif de transmission mécanique composé d'un engrenage circulaire (le pignon) s'engrenant sur une barre dentée rectiligne (la crémaillère), ce qui permet de convertir le mouvement rotatif des moteurs d'entraînement en un déplacement linéaire précis de la tête de découpe sur la table.

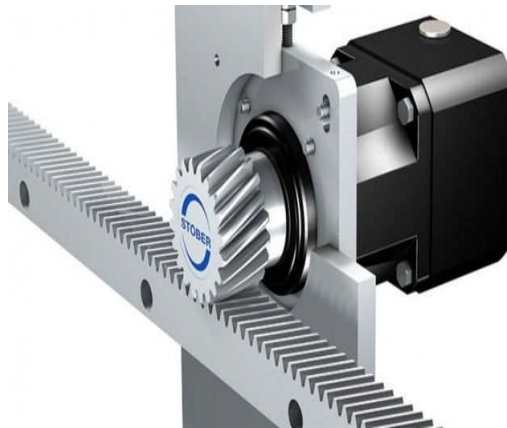


Figure □- 20: système Crémaillère et pignon

- **Vis à billes** est un organe de transmission mécanique de haute précision qui convertit le mouvement rotatif des moteurs en un déplacement linéaire fluide, permettant à la tête de découpe de suivre avec une extrême rigueur les coordonnées de la trajectoire programmée.

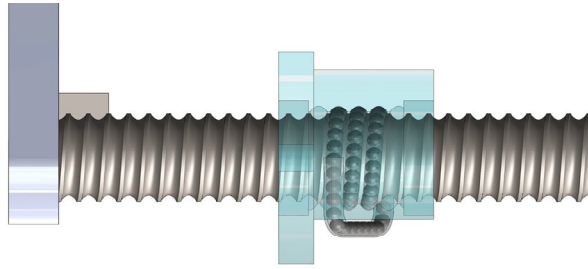


Figure □- 21: système vis à billes

- **courroies et poulies** est un dispositif de transmission mécanique qui permet de transférer la puissance d'un moteur vers les organes fonctionnels d'un outil, tels que les lames de scie ou les tambours de ponçage.

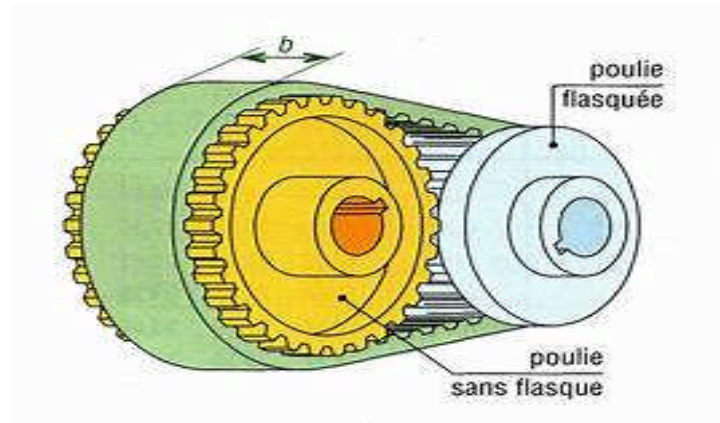


Figure □- 22: courroies et poulies

- **portique mobile** (souvent appelé « gantry ») est la structure transversale d'une machine CNC qui se déplace mécaniquement sur toute la longueur de la table de découpe afin de supporter et de guider la tête de torche le long des axes de mouvement.



Figure □- 23: portique mobile

- La **chaîne porte-câbles** (également appelée chenille de guidage ou *drag chain*) est un composant mécanique articulé conçu pour guider et protéger les câbles électriques et les conduits de fluides (air, gaz) reliés aux parties mobiles d'une machine CNC.



Figure □ - 24: chaine porte câbles

III.5.3 Schéma cinématique (Mouvements)

La précision du tracé dans les systèmes de découpe CNC repose sur la synergie entre la mécanique de transmission (qu'il s'agisse de pignons-crémaillères pour la vitesse ou de vis à billes pour la précision axiale) et l'unité de commande numérique.

- **Coordination et synchronisation des mouvements** Le maintien d'une trajectoire fidèle dépend avant tout du système servo intégré qui pilote les moteurs d'entraînement de la table pour assurer une harmonie parfaite entre les axes [41]. Cette précision est particulièrement mise à l'épreuve lors de tracés courbes : pour produire un arc ou un cercle, la CNC doit calculer et modifier continuellement les ratios de vitesse entre les moteurs pour chaque incrément de mouvement [52]. Une synchronisation rigoureuse des mouvements simultanés dans le plan XY est donc indispensable pour éviter les écarts géométriques et garantir la répétabilité du tracé [52].
- **Boucle de rétroaction et résolution** La transmission assure la précision grâce à l'utilisation de servomoteurs avec retour par encodeur, permettant au système de vérifier en temps réel la position réelle de la torche par rapport à la commande [41]. Les systèmes modernes atteignent des résolutions de feedback extrêmement fines, allant jusqu'à **0,0025 mm**, ce qui permet de compenser instantanément toute erreur de suivi (following error) [41].

- **Optimisation logicielle du tracé** Enfin, la précision mécanique est renforcée par des solutions intelligentes comme la technologie Diameter PRO. Ce logiciel ajuste dynamiquement une multitude de réglages, incluant les vitesses de déplacement et les hauteurs de torche, pour optimiser la qualité des tracés spécifiques (comme les trous ou les rayons complexes) directement via le contrôleur CNC [41]. Cette approche réduit la dépendance vis-à-vis de l'expertise de l'opérateur et garantit une précision constante, coupe après coupe [41], [55]

III.6. Vers la Gestion de la Maintenance (Transition)

III.6.1 Les zones de fragilité (Consommables)

Dans un système de découpe plasma, les composants de la torche qui s'usent le plus rapidement sont l'électrode et la tuyère (ou buse), car ils sont directement exposés à l'érosion thermique et aux contraintes électriques de l'arc [46].

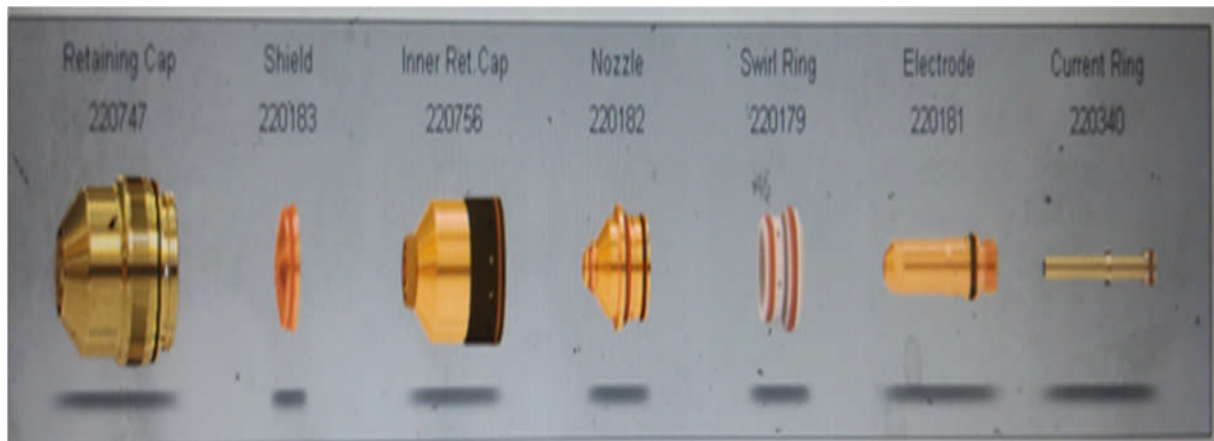


Figure □- 25: Eléments de torche de découpe

III.6.1.a L'Électrode : Le point d'émission

L'électrode est considérée comme l'un des consommables les plus sollicités. Elle contient un insert central en matériau hautement émissif, comme le hafnium ou le cérium, qui s'érode progressivement à chaque amorçage et pendant toute la durée de la coupe [41].



Figure □- 26: la dégradation d'une électrode en fonction d'usage

- **Signe d'usure** : Elle doit être remplacée lorsque le cratère formé au centre de l'insert atteint une profondeur de plus de 1,6 mm (1/16") [49].
- **Conséquence** : Une électrode trop usée provoque un arc instable, réduit la qualité de coupe et peut finir par endommager définitivement la tête de la torche (« blowout ») [41], [42].

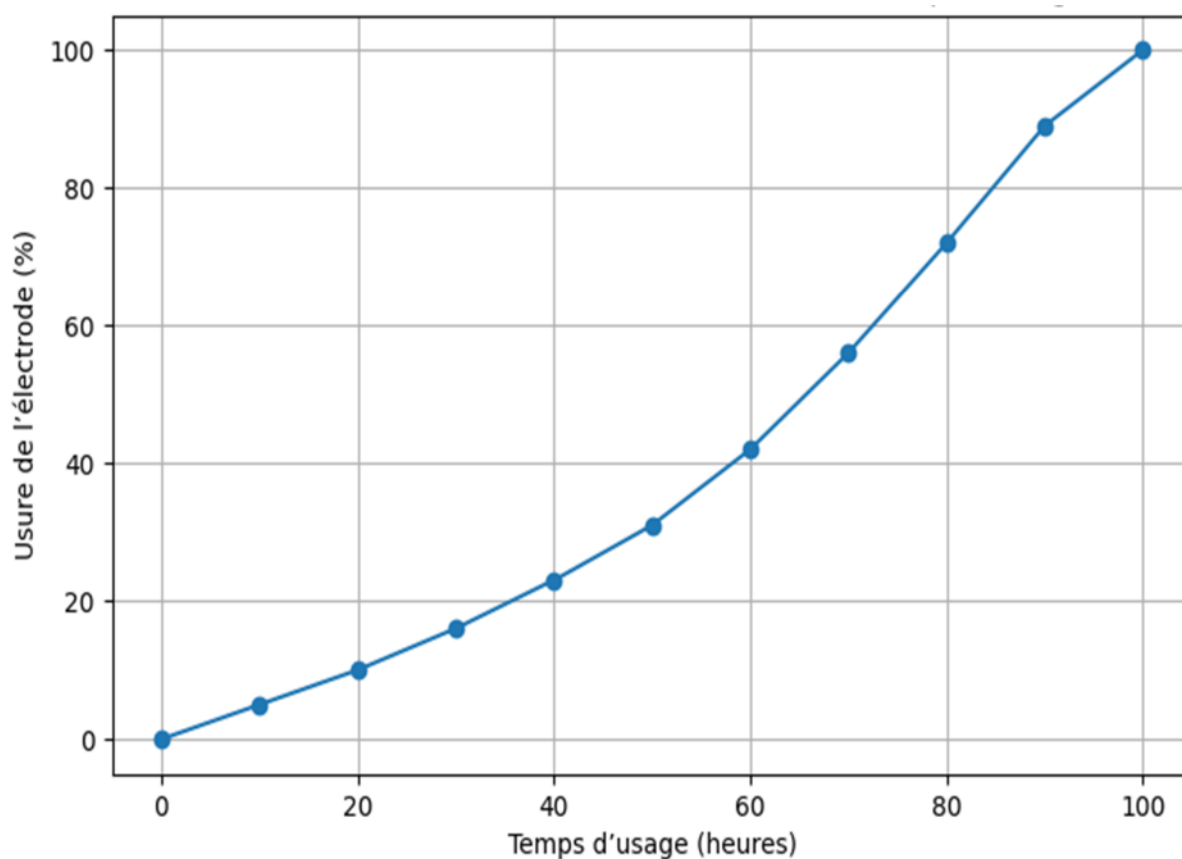


Figure □- 27: courbe d'usure de l'électrode

Tableau □- 6: Tableau III-6 : Analyse de courbe d'usure de l'électrode

Temps d'usage (Heures)	Usure de l'électrode (%)	Observation technique
0-50	0-30	Formation du cratère d'insertion
50-80	30-70	Creusement significatif de l'insert émissif
100	100	Épuisement total de l'insert

Le taux d'usure de l'électrode est calculé en pourcentage (%) en rapportant une mesure physique à son seuil critique de défaillance, selon 2 lois :

- **Loi géométrique (Profondeur) :** $U(t) = \frac{P(t)}{P_{max}} \times 100$ (III. 1)

- **Loi gravimétrique (Masse) :** $U(t) = \frac{M_{int} - M(t)}{\Delta M_{max}} \times 100$ (III. 2)

Comme l'illustre le graphe d'usure de l'électrode, l'évolution de ce taux suit une cinétique non linéaire. On observe d'abord une **phase stable et linéaire** (0 à 40 h) correspondant au rodage normal du consommable. Au-delà de 60 h, l'usure subit une **accélération exponentielle** : le creusement de l'insert déstabilise l'arc électrique, ce qui augmente localement la température et précipite la destruction de la pièce jusqu'à sa fin de vie (100 % d'usure à 100 h).

III.6.1.b La Tuyère (Buse)

La tuyère assure la constriction du gaz plasma pour augmenter sa vitesse et son énergie. Son orifice subit une érosion mécanique et thermique constante due au passage du jet supersonique.



Figure □- 28: la dégradation d'une buse en fonction d'usage

- **Signe d'usure** : Elle est jugée hors d'usage si son orifice devient déformé ou s'il est élargi de plus de 50 % par rapport à sa taille d'origine [49].
- **Conséquence** : Une tuyère endommagée produit un jet de plasma asymétrique, ce qui entraîne des coupes biaisées (angle de dépouille irrégulier) et une formation excessive de scories (dross) [42].

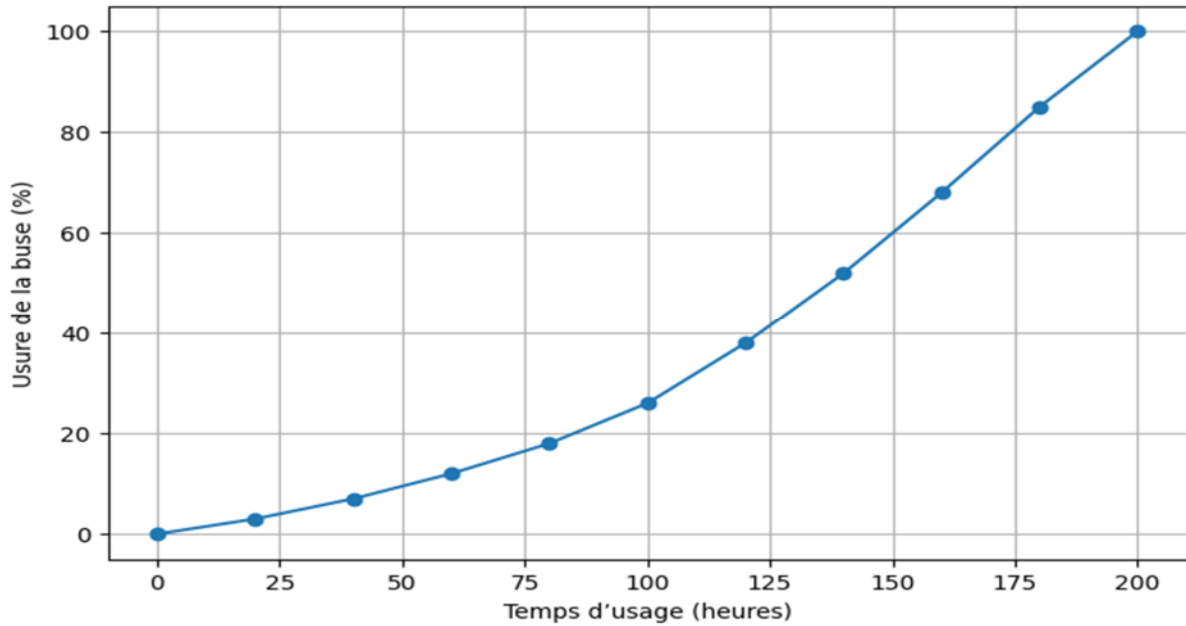


Figure 29: courbe d'usure de buse

Tableau 7: Analyse de courbe d'usure de Buse

Temps d'usage (Heures)	Usure (%)	Observation technique
0-100	0-25	Phase de rodage et usure normale
100-150	25-60	Accélération de l'érosion de l'orifice
200	100	Fin de vie

Le taux d'usure de la buse est calculé en pourcentage (%) en mesurant l'altération de sa géométrie ou de sa masse par rapport à un seuil critique de défaillance, selon deux lois principales :

- **Loi géométrique (Diamètre de l'orifice) :**
$$U_{buse}(t) = \frac{D(t) - D_{int}}{D_{max} - D_{int}} \times 100 \quad (III.3)$$

- **Loi gravimétrique (Masse) :**
$$U_{buse}(t) = \frac{M_{int} - M(t)}{\Delta M_{max}} \times 100 \quad (III.4)$$

Comme le montre le graphe de la buse, la cinétique d'usure de la buse reste non linéaire mais s'étale ici sur un cycle de **200 heures** :

- **De 0 à 100 heures (Phase stable)** : L'orifice conserve une bonne circularité, l'usure progresse lentement.
- **De 100 à 200 heures (Accélération exponentielle)** : Les projections répétées et l'arc pilote ovalisent ou élargissent l'orifice. Cette déformation thermique locale perturbe la concentration du flux de gaz, ce qui accélère la détérioration de la pièce jusqu'à sa fin de vie (100 % d'usure à 200 h).

III.6.1.c Autres composants de la chaîne de fragilité

Bien que plus robustes, d'autres pièces doivent être surveillées régulièrement :

- **Le diffuseur (Swirl Ring)** : Ses micro-orifices peuvent s'obstruer ou se fissurer, perturbant le flux de gaz tourbillonnaire nécessaire à la stabilité de l'arc [⁴⁹].

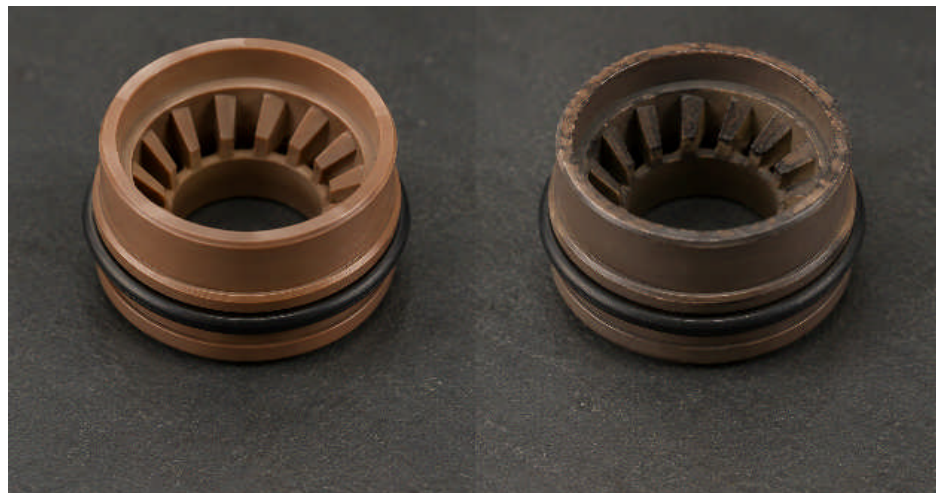


Figure □ - 30: la dégradation du diffuseur en fonction d'usage

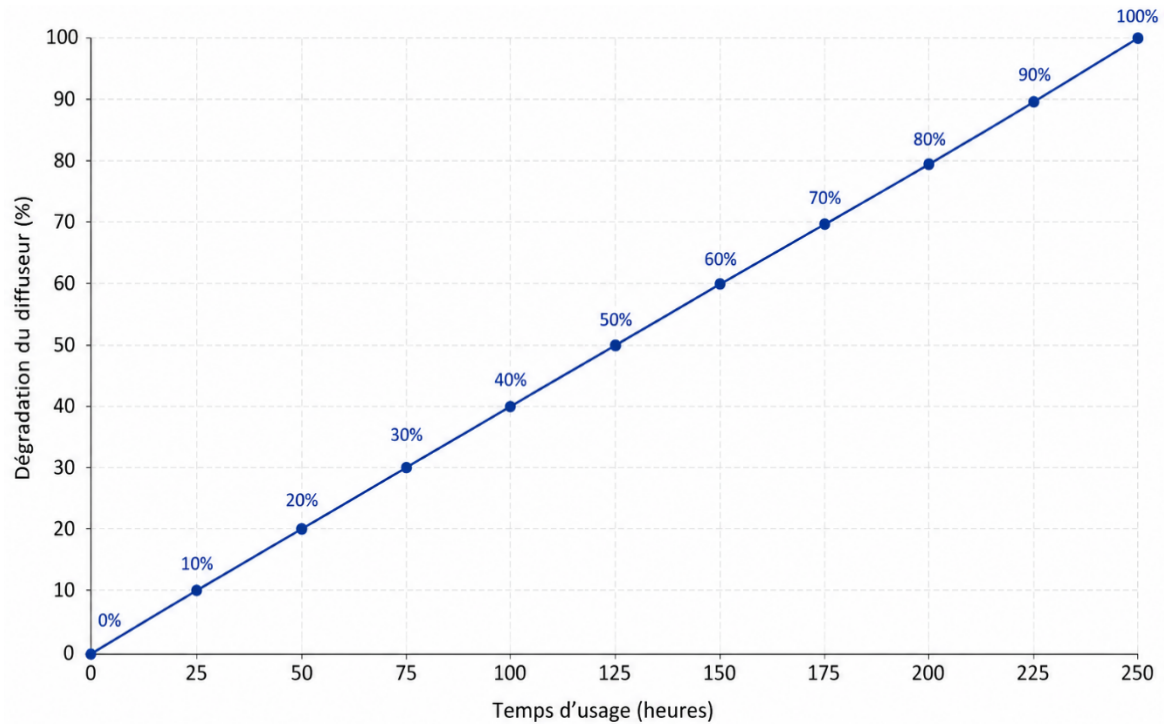


Figure 31: courbe d'usure du diffuseur

Tableau 8: Analyse de courbe d'usure de diffuseur

Temps d'usage (Heures)	Dégradation (%)	État Réel du Swirl Ring
0-100	0-40	État quasiment neuf, peu d'impact sur la coupe.
125	50	Accumulation de calamine ou suie sur les trous.
250	100	Orifices bouchés ou déformation thermique grave.

Le taux de dégradation du diffuseur est calculé en pourcentage (%) en mesurant l'obstruction ou la déformation de ses micro-canaux d'injection par rapport à un seuil critique, selon deux méthodes principales :

- **Loi géométrique (Section efficace des orifices) :** $D_{diff}(t) = \frac{A_{int} - A(t)}{A_{int} - A_{min}} \times 100$ (III.5)
- **Loi fluïdique (Perte de charge) :** Souvent mesurée indirectement par la variation de pression du gaz de protection à débit constant pour détecter l'encrassement des trous par les projections.

Contrairement à l'électrode et à la buse, le graphe diffuseur montre une cinétique de dégradation **strictement linéaire** étalée sur **250 heures** :

- **De 0 à 250 heures (Usure constante) :** La dégradation progresse de manière parfaitement proportionnelle au temps d'utilisation (un gain constant de 10 % toutes les 2500 minutes / 25 heures). Le diffuseur n'étant pas en contact direct avec l'arc électrique, il subit un vieillissement thermique et un encrassement régulier sans effet d'accélération brutale. Son remplacement à 250 heures (100 %) est planifié de façon purement préventive pour éviter les perturbations de flux gazeux.
 - **Le capuchon de protection (Shield Cup) :** Situé à l'extrémité, il protège les composants internes des projections de métal en fusion lors du perçage [41].



Figure 32: Capuchon de protection

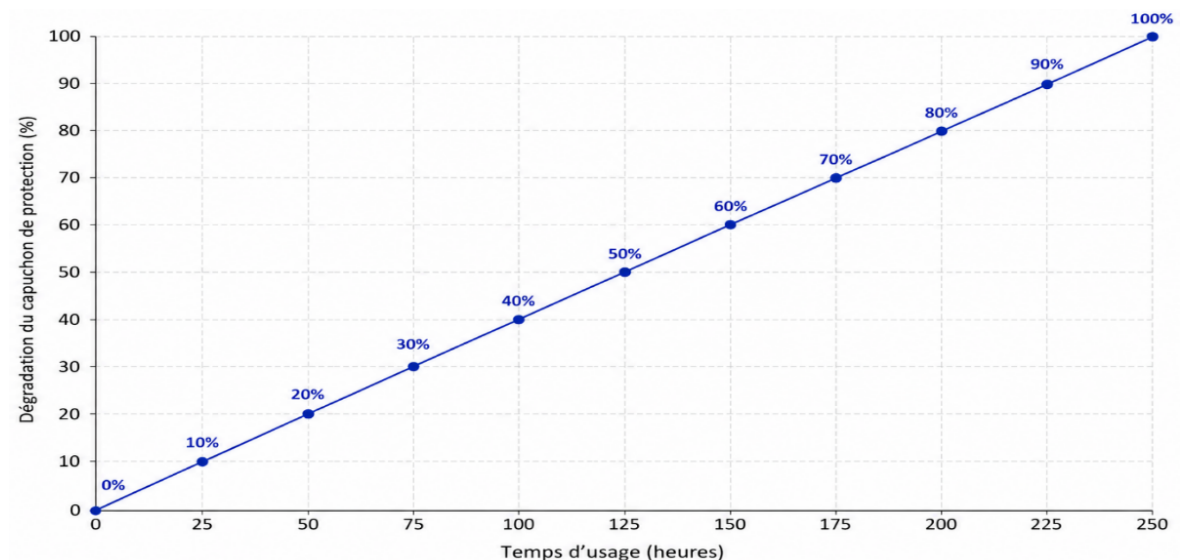


Figure 33: courbe d'usure du capuchon de protection

Tableau □- 9: Analyse de courbe d'usure de Capuchon de protection

Temps d'usage (Heures)	Dégradation (%)	Observation technique
0	0	État neuf.
125	50	Atteinte exactement à la moitié du temps.
250	100	Fin de vie théorique.

❖ Pour la loi de taux d'usure c'est la même chose que la Buse

- **La cartouche de démarrage (Start Cartridge) :** Dans les systèmes modernes, c'est la seule pièce mobile de la torche ; une usure de ses composants internes peut empêcher l'amorçage de l'arc pilote ^[41].



Figure □- 34: Cartouche de démarrage

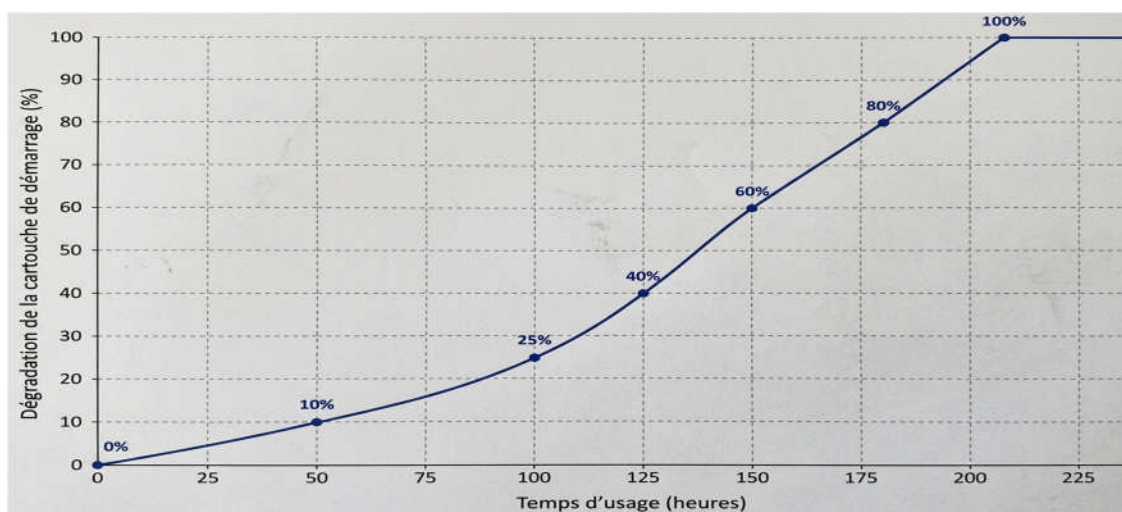


Figure □- 35: Courbe d'usure d'une cartouche de démarrage

Tableau □- 10: Analyse de courbe d'usure de la cartouche de démarrage

Temps d'usage (Heures)	Dégradation de la cartouche (%)	État du composant
0	0	Neuf
50	20	Usure normale
100	45	Usure intermédiaire
150	75	Zone critique
200	100	Remplacement obligatoire

Le taux de dégradation de la cartouche de démarrage est quantifié en pourcentage (%) en mesurant la perte de performance de son mécanisme mobile (souvent un piston à ressort permettant l'amorçage "blowback") ou son isolation diélectrique :

- **Loi mécanique (Résistance cinématique ou usure du contact) :**

$$D_{cart}(t) = \frac{R(t) - R_{int}}{R_{max} - R_{int}} \times 100 \quad (III.6)$$

Comme l'illustre le graphe de cartouche de démarrage, la cinétique suit une courbe **sigmoïde (en S)** qui s'arrête net à environ **210 heures** :

- **De 0 à 100 heures (Phase lente) :** La cartouche s'use très peu au début (seulement 25 % de dégradation après 100 h), le mécanisme interne conservant ses propriétés initiales.
- **De 100 à 210 heures (Phase d'usure critique) :** La courbe subit une forte accélération linéaire. Les arcs pilotes répétitifs et l'accumulation de suie grippent le piston mobile.
- **À 210 heures (Seuil des 100 %) :** La cartouche atteint un niveau de dégradation total et se stabilise sur un plateau de panne complète (le piston reste bloqué), rendant l'amorçage de la torche impossible et son remplacement immédiat obligatoire.

Facteurs aggravants : La durée de vie de ces consommables est drastiquement réduite par une mauvaise qualité de l'air (humidité ou huile), des réglages d'ampérage inappropriés pour la buse utilisée, ou un nombre excessif de cycles "Start/Stop" [49]. L'utilisation de technologies avancées comme les consommables "XTremeLife™" permet toutefois de prolonger significativement leur longévité grâce à une meilleure dissipation thermique [49].

III.6.2 Les cause de défaillance

L'optimisation du processus de découpe repose sur une surveillance rigoureuse de la pression du gaz d'assistance, car une baisse de pression réduit l'énergie cinétique nécessaire à l'expulsion du métal fondu, provoquant ainsi l'apparition de scories (dross) et une diminution de la vitesse de coupe [51], [56]. Les systèmes intelligents, tels que ceux développés par Bodor, révèlent que 40 % des opérations de maintenance liées aux réglages sont directement imputables à des problèmes de gaz, soulignant l'importance d'un contrôle précis pour maintenir la stabilité de la saignée [57]. Une pression fluctuante ou inadaptée peut déclencher la formation d'ondes de choc complexes, comme le Disque de Choc de Mach (MSD), ce qui réduit brusquement la pression de stagnation sur la pièce et dégrade irrémédiablement la qualité de surface [56].

En parallèle, la tension d'arc constitue un indicateur vital pour évaluer l'état de santé des consommables, car l'unité de contrôle effectue un échantillonnage de tension (voltage sampling) pour compenser l'usure de l'électrode et maintenir une distance buse-tôle constante tout au long de sa durée de vie [41]. Une dérive significative de cette tension signale que l'insert en hafnium est proche de l'épuisement, permettant ainsi d'anticiper un « blowout » qui pourrait endommager le corps de la torche ou gâcher des plaques de métal coûteuses [58], [42].

De plus, la protection du système contre les variations de tension d'entrée, souvent limitée à une marge de sécurité de +/- 10 %, permet au générateur de se déconnecter préventivement en cas de pics instables, préservant ainsi l'intégrité des circuits électroniques sensibles [47].

Tableau □- 11: Les paramètres à respecter

matériaux	Épaisseur (mm)	Intensité (A)	Tension (v)	Gaz (Plasm/Prot)	Vitesse (mm/min)
Acier doux	1	40	180	Air / Air	3990
	6	60	180	Air / Air	2145
	10	80	180	Air / Air	1060
	15	120	180	Air / Air	1320
Acier inox	2	40	180	Air / Air	1140
	6	60	180	Air / Air	1790
	12	100	180	Air / Air	1255
Aluminium	3	40	180	Air / Air	2350
	10	80	180	Air / Air	1330
	15	120	180	Air / Air	1445

Enfin, l'intégration de l'Internet des objets (IoT) et de l'intelligence artificielle dans des contrôleurs avancés comme le NX4 transforme la maintenance réactive en une stratégie prédictive performante [58], [42]. Ces systèmes analysent en temps réel les indicateurs de

performance, tels que la vitesse de coupe et la consommation d'énergie, pour identifier les signes précurseurs de défaillance des buses ou des électrodes [42]. Cette approche systémique, où la machine surveille ses propres « constantes vitales », assure des opérations ininterrompues et une productivité accrue en résolvant les anomalies avant qu'elles ne provoquent un arrêt de production [42], [41].

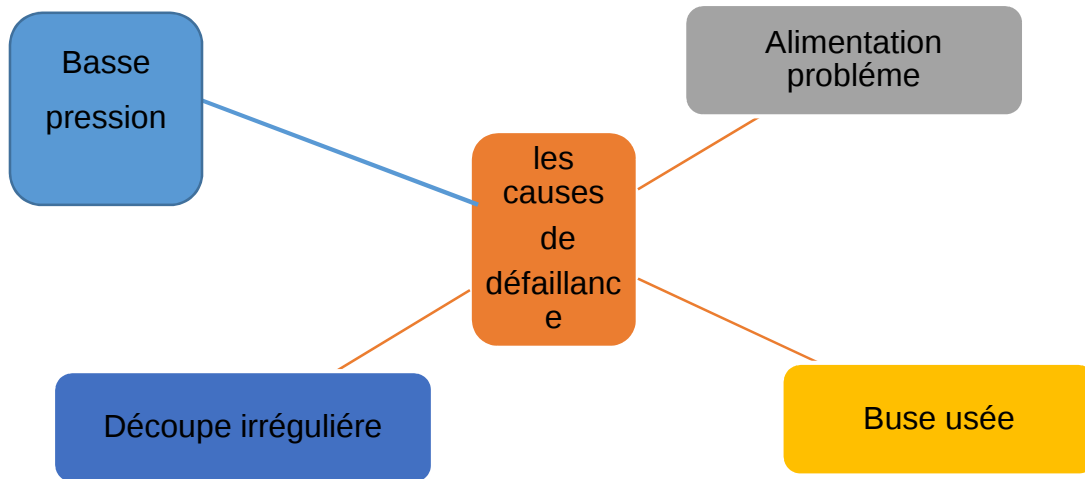


Figure □ - 36: les causes de défaillance

III.6.3 Objectifs de la maintenance

Le passage d'une maintenance curative à une approche préventive et prédictive est indispensable pour garantir la rentabilité et la longévité d'un système de découpe plasma, car le coût d'une immobilisation non planifiée dépasse largement celui des simples pièces de rechange [46]. En intégrant les soins techniques directement dans le cycle de production, les entreprises maximisent leur Efficacité Globale de l'Équipement (OEE) et réduisent les risques de gâcher des plaques de métal coûteuses à cause d'une dérive des paramètres [59], [60]. Sur le plan opérationnel, l'utilisation de consommables usés, comme une tuyère déformée ou une électrode érodée, dégrade immédiatement la précision géométrique de la saignée et favorise l'apparition de scories, obligeant alors à recourir à des opérations secondaires de meulage coûteuses [42], [56]. Une stratégie préventive est également vitale pour protéger l'intégrité physique de la machine, car elle permet d'éviter des événements catastrophiques comme le « blowout », une explosion interne de la torche qui survient lorsqu'une électrode est totalement épuisée, entraînant des réparations bien plus onéreuses qu'un simple remplacement programmé [58], [41]. Grâce à l'avènement de l'Industrie 4.0, les systèmes modernes exploitent l'IoT et l'intelligence artificielle pour surveiller en temps réel les « constantes vitales » telles que la pression de gaz

ou la tension d'arc, alertant l'opérateur avant qu'un défaut thermique critique ne survienne [42], [49]. Cette transition permet ainsi de transformer la maintenance, autrefois perçue comme une contrainte de réparation, en un véritable levier de performance chirurgicale et de productivité ininterrompue [41].



Figure □- 37: objectifs de la maintenance

III.6.4 Analyse des pannes rencontrées et actions correctives appliquées

Plusieurs pannes techniques ont été constatées sur la machine de découpe plasma CNC pendant la durée du stage. Ces anomalies ont perturbé le fonctionnement global du système, à savoir la stabilité du générateur plasma, le déplacement des axes et le système informatique de commande. Cette partie a pour but d'énoncer les pannes principales rencontrées et analyser leurs causes techniques là où la maintenance a été effectuée pour effectuer le retour au fonctionnement normal de la machine.

III.6.4.a Méthodologie de diagnostic des pannes

Le diagnostic des différentes défaillances a été effectué à partir de plusieurs méthodes d'analyse industrielle :

- Observation directe du comportement de la machine ;
- Contrôle visuel des composants mécaniques et hydrauliques ;
- Vérification du système de lubrification ;
- Inspection des rails de guidage et des capteurs ;
- Analyse des alarmes du système CNC ;
- Contrôle du logiciel TwinCAT ;
- Consultation des opérateurs et du service maintenance.

Cette méthodologie a permis d'identifier les causes principales des dysfonctionnements observés durant l'exploitation de la machine.

III.6.4.b Classification des pannes rencontrées

Les pannes détectées durant le stage peuvent être classées en trois catégories principales :

➤ **Panne du système de lubrification**

La panne était liée à un blocage du débitmètre à turbine, qui permet de mesurer de façon indirecte que le lubrifiant circule bien dans le circuit hydraulique.

➤ **Panne mécanique du déplacement selon l'axe X**

Cette panne était due à l'accumulation de graisse et de poussière sur les rails de guidage ainsi qu'à l'usure du capteur de fin de course de l'axe X.

➤ **Panne logicielle du système TwinCAT**

Cette panne se situait au niveau du logiciel TwinCAT qui assure la communication entre le système Windows et le système informatique de la machine CNC.

III.6.4.c Tableau d'analyse des pannes

Tableau III- 12: Tableau d'analyse des pannes

Panne observée	Cause probable	Méthode de diagnostic	Intervention réalisée	Résultat obtenu
Arrêt du générateur plasma	Lubrifiant contaminé par des résidus bloquant la turbine du débitmètre	Contrôle du circuit de lubrification et inspection du débitmètre	Nettoyage du réservoir et du circuit, remplacement complet du lubrifiant	Fonctionnement normal du générateur
Blocage du déplacement selon l'axe X	Accumulation de graisse et de poussière sur les rails + usure du capteur de fin de course	Inspection des rails et contrôle des capteurs	Nettoyage des rails, suppression de la graisse et remplacement du capteur	Déplacement fluide de l'axe X rétabli
Arrêt total de la machine	Dysfonctionnement du logiciel TwinCAT	Diagnostic informatique réalisé par un ingénieur	Reconfiguration et réactivation du logiciel	Reprise normale du système CNC

III.6.4.d Étude détaillée des pannes

• **Panne du système de lubrification**

Une alarme relative à la circulation du lubrifiant a entraîné l'arrêt automatique du générateur plasma suite à une panne du système de lubrification. L'inspection a révélé que le lubrifiant

était souillé par des résidus qui ont bloqué la turbine du débitmètre chargé de contrôler le débit du lubrifiant. Pour y remédier, le réservoir et le circuit de lubrification ont été démontés, nettoyés, puis complètement renouvelés en lubrifiant. Après maintenance, la circulation du lubrifiant est revenue à la normale et le générateur plasma a recommencé à fonctionner correctement.

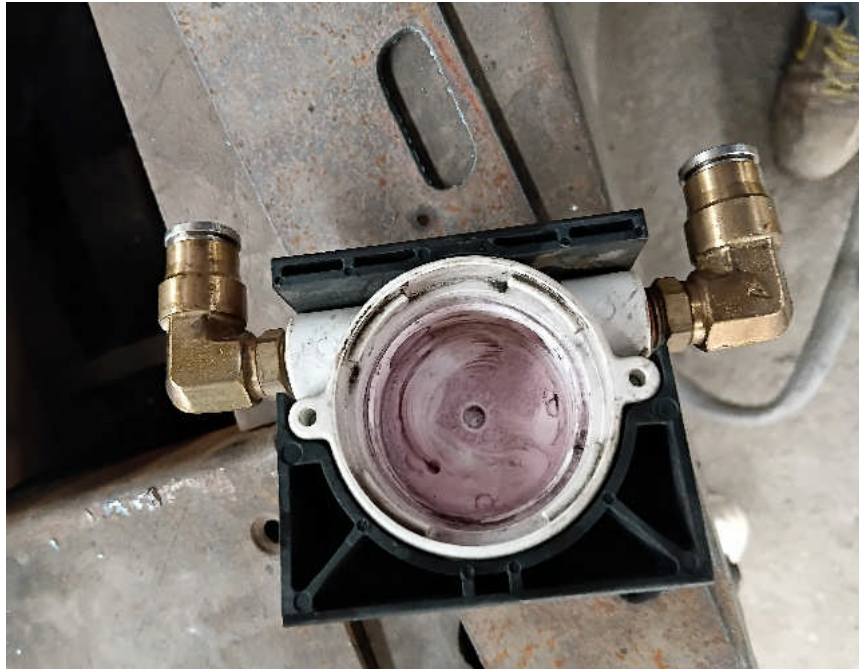


Figure □- 38: Capteur de pression à turbine – Vue interne après démontage et inspection

- **Panne mécanique du déplacement selon l'axe X**

La machine montrait un grippage du déplacement selon l'axe X couplé à un mouvement régulier du portique. Le problème était dû à l'accumulation de poussière mélangée à la graisse des rails de guidage qui formait une couche dure empêchant le déplacement mécanique. En plus, le contacteur de fin de course près du servomoteur de l'axe X était usé. L'intervention de maintenance a consisté à nettoyer les rails, à éliminer l'ancienne graisse, à appliquer une nouvelle lubrification et à remplacer le capteur défectueux. Après réparation, le jeu de l'axe X est redevenu fluide et stable.



Figure □- 39: capteur fin de course utilisé

- **Panne logicielle du système TwinCAT**

Une panne du logiciel TwinCAT a entraîné un arrêt complet de la machine et une perte de communication entre Windows et le système CNC. L'opérateur indiquait que ce problème se présentait environ une fois tous les dix mois. Un diagnostic mené par un ingénieur spécialisé a permis, une fois une reconfiguration puis réactivation de TwinCAT réalisé, de remettre en lien le système informatique avec la machine. Après l'intervention, la machine a repris son fonctionnement normal.

III.7 Conclusion

Ce chapitre a été l'occasion de souligner les bases techniques et fonctionnelles de la machine de découpe plasma, en examinant tant son principe physique que son développement technologique et sa configuration globale. L'analyse approfondie des divers éléments, à savoir le générateur, la torche, le dispositif d'approvisionnement en air et l'unité de commande CNC, a révélé que l'efficacité du système dépend d'une coordination précise et harmonisée entre ces pièces. De plus, l'étude fonctionnelle et cinématique a facilité la compréhension des diverses phases du processus de découpe, allant de l'initiation de l'arc à la division de la matière, ainsi que l'importance cruciale des systèmes de transmission en ce qui concerne la précision du dessin. L'approche systémique a fourni une perspective holistique qui facilite la compréhension des processus opérationnels et l'identification des pannes.

Finalement, la détection des zones vulnérables et des signes de dysfonctionnement souligne l'importance d'une stratégie de maintenance personnalisée. Cette analyse prépare le terrain pour le chapitre suivant, où l'accent sera mis sur l'élaboration d'un plan de maintenance dans le but d'augmenter la fiabilité, la disponibilité et la longévité de la machine de découpe plasma.

Chapitre IV : organisation et mise en œuvre de la maintenance

IV.1 Introduction

Le maintien en condition opérationnelle (MCO) d'une cellule de découpe plasma CNC constitue un enjeu critique afin de garantir la productivité et la précision dimensionnelle des pièces, compte tenu des contraintes thermiques, cinématiques et pneumatiques extrêmes qui altèrent la géométrie du jet et entraînent la formation de bavures. Ce chapitre a pour but de proposer une stratégie globale de maintenance dont l'objectif est d'optimiser la disponibilité opérationnelle de la machine par une démarche structurée. Elle commence par une analyse des causes des défaillances récurrentes (instabilité du THC, usure de la buse...) afin de mettre en place des politiques correctives systématiques et conditionnées par des check-lists opérationnels.

En outre, cette préconisation s'applique dans le cadre d'un diagnostic systémique fondé sur le diagramme d'Ishikawa (5M) pour identifier les causes essentielles des pannes, tout en contrôlant la maîtrise des risques en santé, sécurité au travail, l'environnement (HSE) (rayonnements actiniques et fumées de pyrolyse) et la digitalisation du suivi des indicateurs de performance (KPI).

IV.2 Analyse des causes de défaillance

IV.2.1 Paramètres responsables de la découpe irrégulière

Une découpe irrégulière sur une machine CNC est souvent le résultat d'un manque de **rigidité** de l'ensemble machine-outil-pièce, ce qui engendre des vibrations indésirables connues sous le nom de « broutement » ou **chatter** ^[61], ^[62]. D'un point de vue mécanique, le **surplomb excessif** (overhang) de l'outil ou de la pièce à usiner est l'une des causes les plus fréquentes de ce phénomène, car il diminue la stabilité nécessaire à une coupe précise ⁶². Un soutien insuffisant des matériaux, particulièrement pour les matériaux fins comme les tôles de grande dimension, peut également provoquer des vibrations et des distorsions sous l'effet des forces de coupe, nuisant à la régularité du travail ⁶¹. En termes de réglages, une mauvaise adéquation entre la **vitesse d'avance** (feedrate) et la vitesse de coupe influe négativement sur la finition de surface et la précision dimensionnelle ^[63], ^[64]. D'autres facteurs comme la profondeur de coupe, la largeur de coupe ou une direction de contour nage inappropriée peuvent modifier les forces exercées sur la pièce et altérer la régularité de la trajectoire ^[61].

Enfin, l'accumulation de **chaleur** lors de l'usinage, si elle n'est pas gérée par des conditions de coupe ou un liquide de refroidissement adéquat, peut dégrader l'état de surface et provoquer des imprécisions [64].

IV.2.2 Problème d'alimentation

Les perturbations électriques, notamment les interférences électromagnétiques (EMI) et radioélectriques (RFI), affectent le fonctionnement des machines CNC en provoquant des défaillances intermittentes souvent confondues avec des erreurs de logique logicielle [65]. Ces interférences, ainsi que la sensibilité des instruments aux champs électriques externes, créent un « bruit » nuisible à la précision et à la stabilité du système de contrôle [65]. Une alimentation instable ou une coupure de courant constitue un risque majeur pour la mémoire vive (RAM) de la machine, qui est volatile ; cela peut entraîner la perte définitive des **paramètres système** critiques si la batterie de secours est défaillante [66].

Enfin, l'utilisation de dispositifs de sécurité comme des fusibles est indispensable pour isoler les composants sensibles et protéger les circuits électroniques contre les dommages matériels liés aux surcharges de courant [65].

IV.2.3 Basse pression

Une pression d'air comprimé insuffisante est l'une des principales raisons pour lesquelles les performances d'une machine de découpe plasma CNC peuvent se dégrader. L'air comprimé sert non seulement à créer l'arc plasma, mais il joue également un rôle crucial dans la construction du jet plasma, l'élimination du métal fondu hors de la zone de coupe et le refroidissement des éléments consommables tels que l'électrode et la buse. Si la pression de l'air est inférieure aux valeurs recommandées par le fabricant, cela perturbe l'équilibre du processus de découpe. Du point de vue du processus de découpe, une pression d'air insuffisante réduit la vitesse à laquelle les particules métalliques en fusion sont expulsées. Cela signifie que le métal fondu n'est pas éliminé efficacement de la zone de coupe, ce qui entraîne la formation de bavures importantes sur la face inférieure de la tôle et détériore la qualité des arêtes découpées. La découpe devient irrégulière, avec des variations de dimensions qui peuvent nuire au respect des tolérances imposées.

De plus, une pression d'air modifie insuffisante les caractéristiques du jet plasma. Le jet perd en concentration et en énergie, ce qui se traduit par un élargissement de la zone de coupe et une réduction de la précision géométrique des pièces obtenues. Les angles de coupe deviennent moins réguliers et peuvent présenter une conicité excessive, notamment lors de la découpe de fortes épaisseurs. Une pression d'air inadéquate peut également provoquer une instabilité de

l'arc plasma. Les fluctuations du jet entraînent des variations locales de l'énergie transmise au matériau, ce qui génère une qualité de coupe non homogène sur l'ensemble du contour. Dans certains cas, cette instabilité peut conduire à des extinctions momentanées de l'arc ou à des défauts de pénétration, obligeant l'opérateur à interrompre le cycle de fabrication.

L'augmentation de l'apport thermique est une autre conséquence importante d'une basse pression d'air. En raison de l'élimination insuffisante de la chaleur et du métal fondu, une quantité excessive d'énergie est transmise à la pièce. Cela favorise l'apparition de déformations, notamment dans le cas des tôles fines, ainsi qu'une altération de l'état de surface des zones découpées. De plus, le manque de pression sollicite davantage les éléments consommables du système plasma. La buse et l'électrode sont soumises à des températures plus élevées et à des conditions de fonctionnement défavorables, ce qui accélère leur usure. Une dégradation anormale de ces composants accentue à son tour les défauts de découpe et augmente les coûts de maintenance. Les causes d'une basse pression d'air peuvent être multiples, telles que des dysfonctionnements du compresseur, des fuites dans le réseau pneumatique, un colmatage des filtres, un dysfonctionnement du régulateur de pression ou un réglage incorrect des paramètres de la machine. Il est donc essentiel d'intégrer le contrôle de la pression d'air dans le programme de maintenance préventive afin de garantir la répétabilité du processus et la qualité des pièces produites. Ainsi, le maintien d'une pression d'air conforme aux spécifications du fabricant est une condition essentielle pour assurer la stabilité de l'arc plasma, l'efficacité de l'élimination du métal en fusion, la longévité des éléments consommables et l'obtention d'une découpe précise et régulière.



Figure □- 1: Déformation de la tôle causée par une basse pression

IV.2.4 Buse usée

L'usure de la buse sur une machine CNC plasma est assimilée à un phénomène de **dérive** (drift), représentant une détérioration continue qui modifie les variables critiques du processus [65]. Cette usure physique altère la géométrie de l'orifice, ce qui est comparable à un changement de rayon pour un outil de coupe classique, et nécessite des ajustements fréquents des **offsets de correction** (Wear Offset) pour maintenir la précision dimensionnelle [66]. Si la buse n'est pas remplacée selon un calendrier de maintenance préventive, la consommation de cette pièce d'usure finit par dégrader les performances globales, provoquant des imprécisions de trajectoire et des finitions de surface de moindre qualité [67], [68].

En outre, comme la simulation et l'exécution du programme CNC reposent sur la position théorique exacte de la pointe de l'outil, une buse déformée empêche le système de garantir la **relation prévisible** nécessaire entre la commande numérique et la découpe réelle [66], [65].

Enfin, tout comme un outil émoussé en usinage conventionnel augmente les forces et la chaleur, une buse usée peut provoquer une accumulation thermique excessive, entraînant des distorsions de la pièce et une instabilité du jet plasma [69].

IV.3 Stratégies de la maintenance adoptée

Après avoir étudié les causes des défauts de la machine de découpe plasma CNC, il est clair que l'entreprise n'a pas d'historique des pannes pour analyser les problèmes récurrents. Elle n'a pas non plus de système pour collecter et utiliser les données de maintenance. Les interventions sont souvent réalisées après que la panne soit survenue, ce qui peut entraîner des arrêts de production imprévus. Cela peut des retards, réduire la disponibilité des équipements et entraîner des pertes économiques pour l'entreprise.

Nous avons donc créé une stratégie de maintenance spécifique pour répondre aux besoins de l'entreprise. Cette stratégie est basée sur des recherches, des observations sur le terrain et des données recueillies pendant la scène. L'objectif est d'adopter une approche plus préventive, pour anticiper les défaillances, optimiser les interventions et améliorer la fiabilité et la disponibilité de la machine de découpe plasma CNC. Cette approche permettra à l'entreprise de mieux gérer la maintenance et de réduire les risques de pannes. Elle contribuera également à accroître la productivité et à minimiser les coûts liés aux réparations et aux arrêts de production.

IV.3.1 Maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique consiste à effectuer des interventions de reconditionnement ou d'inspection sur les équipements à des **intervalles fixes** prédéfinis, indépendamment de l'état actuel de la machine [71].

Cette approche réduit les risques de défaillance en identifiant et en traitant les signes d'usure ou de dégradation avant qu'ils ne provoquent une panne totale. Les interventions planifiées permettent notamment de réaliser des tâches critiques comme le nettoyage des filtres, la vérification des niveaux d'huile des boîtes de vitesses ou la détection de points chauds dans les entraînements électriques, évitant ainsi des défaillances catastrophiques [71].

En agissant de manière proactive, cette stratégie minimise les **temps d'arrêt imprévus** (downtime), qui sont extrêmement coûteux, et assure la continuité de la production en maintenant la machine dans un état de fonctionnement stable et prévisible [71], [65]. De plus, ces interventions basées sur les recommandations du fabricant et les données historiques de défaillance permettent de lutter contre la **détérioration accélérée** des composants, prolongeant ainsi la durée de vie utile des actifs. Contrairement à la maintenance corrective qui intervient après le bris, la maintenance planifiée permet de remplacer les pièces d'usure avant qu'elles n'endommagent des composants plus onéreux, réduisant ainsi les coûts globaux de réparation et de remplacement [71].

Enfin, en intégrant ces tâches dans un système de gestion informatisé (MMS), l'organisation s'assure qu'aucune vérification de sécurité ou de performance n'est oubliée, garantissant ainsi que le processus reste « sous contrôle » et conforme aux objectifs de qualité [71], [65].

IV.4 Plan de maintenance opérationnel

IV.4.1 Maintenance quotidienne

Pour que la découpeuse plasma coupe précisément, dure longtemps et ne tombe pas en panne au milieu de la production (ce qui coûte cher), il faut tous les jours l'entretenir soigneusement. Ces interventions prennent généralement 10 à 15 minutes en début et en fin de poste, et se concentrent sur trois zones critiques : la torche, l'alimentation en air et la structure de la table.

Tableau □- 1: Maintenance quotidienne à réaliser par l'opérateur de la machine

Zone	Opération	Objectif	Statut (Bonne état/mauvaise état)	Remarque
Torche	Démonter et inspecter l'usure de l'électrode et de la buse.	Éviter les dérives de coupe et protéger la torche.		
Torche	Nettoyer les filets et vérifier le joint torique.	Garantir une bonne étanchéité et un flux régulier.		
Air	Purger les filtres du compresseur et du générateur.	Éliminer l'eau et l'huile du circuit d'air.		
Mécanique	Essuyer les glissières et crémaillères des axes X, Y, Z.	Prévenir l'usure prématurée des guidages.		
Sécurité	Vérifier l'état de la pince de masse et des câbles.	Assurer la sécurité électrique et la stabilité de l'arc.		
Table	Écrémer les scories de surface et ajuster le niveau.	Maintenir une bonne évacuation des fumées/projections.		

IV.4.2 Maintenance hebdomadaire

La maintenance hebdomadaire d'une découpeuse plasma CNC vient compléter les contrôles quotidiens. Elle s'attache au nettoyage en profondeur, au graissage et au contrôle des organes mobiles mécaniques et pneumatiques. Ces opérations, habituellement effectuées en fin de semaine, durent entre 30 et 45 minutes et permettent d'éviter les dérives géométriques lors de la découpe ainsi que l'usure prématurée des guidages.

Tableau □ - 2: Maintenance hebdomadaire a réalisé par l'opérateur de la machine

Composant / Zone	Intervention à réaliser	Objectif visé	Statut (Bonne état/mauvaise état)	Remarque
Guidages (X, Y, Z)	Nettoyer les rails avec le solvant, essuyé et lubrifier légèrement.	Garantir la fluidité des mouvements et la précision CNC.		
Transmission	Contrôler l'alignement des pignons/crémaillères et l'état des courroies.	Éviter les jeux mécaniques et les saccades.		
Axe Z / THC	Nettoyer la vis d'entraînement et tester la liberté de mouvement du capteur.	Assurer le maintien parfait de la hauteur de coupe.		
Filtres à air	Inspecter l'état visuel des cartouches filtrantes (dessiccateur/coal escent).	Garantir un air sec et pur à 100% pour l'arc plasma.		
Table de coupe	Gratter les scories sur les lattes de support et nettoyer le fond du bac.	Assurer la planéité des tôles et le bon retour de masse.		
Faisceau torche	Inspecter visuellement l'état de la gaine de protection (coupures, brûlures).	Prévenir le court-circuit et les fuites de fluides.		

IV.4.3 Maintenance Mensuelle /Trimestrielle Semestrielle

La maintenance périodique, s'étendant du cycle mensuel au semestriel, est une stratégie proactive essentielle pour garantir la **précision géométrique**, l'**intégrité électrique** et la **qualité des fluides** nécessaires au bon fonctionnement d'une machine CNC plasma ^[71]. Le contrôle de la planéité de la table assure que la géométrie de la machine reste une référence fiable, évitant ainsi des déviations qui compromettraient la précision dimensionnelle de la découpe ^[66], ^[72].

En parallèle, la vérification et le resserrage des connexions électriques de la source plasma permettent d'éliminer les risques de pannes sporadiques et d'instabilité de l'arc, souvent causés par des points chauds ou une mise à la terre défaillante ^[73], ^[65].

Enfin, le remplacement régulier du filtre du compresseur est crucial pour maintenir un air sec et propre, ce qui protège les électrovannes de la contamination et assure une constriction optimale de l'arc plasma, évitant ainsi une dégradation prématurée de la qualité de coupe [71].

Tableau □- 3: Maintenance semestrielle a réalisé par l'opérateur de la machine

Action de maintenance	Bénéfices principaux
Planéité de la table	• Précision • Stabilité géométrique • Qualité des pièces
Connexions électriques	• Fiabilité • Stabilité de l'arc • Réduction des pannes
Filtre du compresseur	• Air propre • Protection des équipements • Qualité de coupe

IV.5 Guide de dépannage (Diagnostic) et Modélisation

Ishikawa(les 5M)

IV.5.1 analyse systémique par le Diagramme d'Ishikawa (Les 5M)

L'analyse systémique au moyen du diagramme d'Ishikawa, également connu sous le nom de diagramme en arêtes de poisson, s'avère un outil performant pour déterminer les causes profondes d'un défaut grave qui touche la machine de découpe plasma CNC. Cette méthode permet de classer les causes potentielles selon les cinq catégories fondamentales des 5M (Main-d'œuvre, Machine, Méthode, Matière et Milieu), facilitant ainsi le diagnostic et la mise en place d'actions correctives adaptées.

Exemple : Défaut étudié : Dégradation de la qualité de découpe (bavures excessives, manque de précision et instabilité de l'arc plasma).

Tableau □- 4: les cinq catégories fondamentaux de la méthode d'Ishikawa (les 5M)

Catégorie (5M)	Causes potentielles
Main-d'œuvre	Mauvais réglage des paramètres de coupe, manque de formation des opérateurs, entretien non conforme.
Machine	Usure de la buse ou de l'électrode, défaut du THC, jeu mécanique dans les axes, connexions électriques desserrées
Méthode	Paramètres de coupe inadaptés (vitesse, intensité, hauteur), absence de procédure de maintenance préventive
Matière	Tôle oxydée ou déformée, épaisseur non conforme, air comprimé contaminé par l'eau ou l'huile.
Milieu	Poussières métalliques, humidité excessive, variations de tension électrique, température élevée de l'atelier.

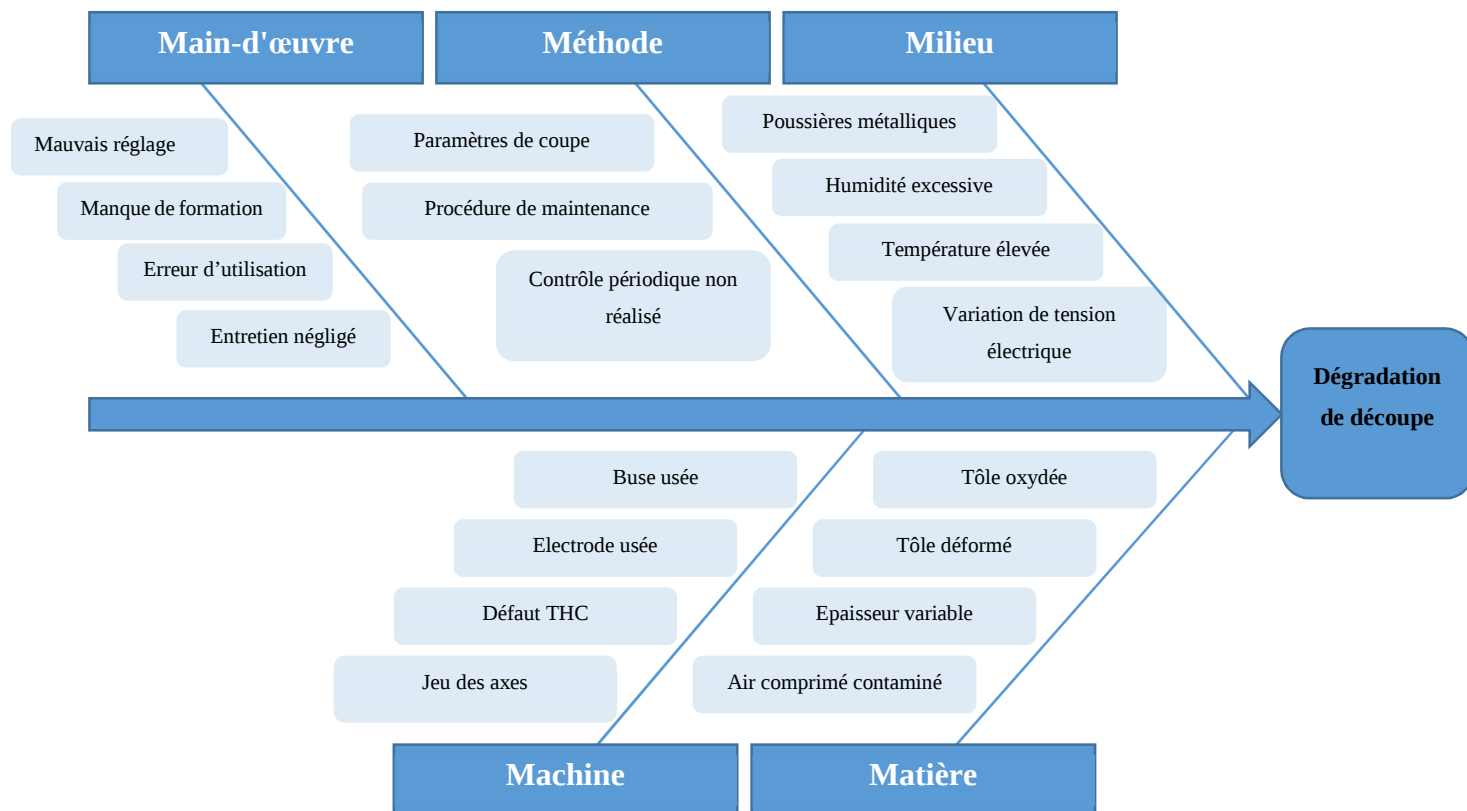


Figure □- 2: Diagramme d'Ishikawa

IV.5.2 Tableau logique de diagnostic

Ce tableau permet d'identifier rapidement l'origine d'un défaut sporadique en remontant du symptôme à la variable de processus défaillante. La maintenance préventive régulière permet d'anticiper ces défaillances en traitant les causes avant qu'elles n'affectent la production.

Tableau □- 5: Tableau logique de diagnostic

Cause de défaillance	Cause possible	Solutions
Découpe irrégulière	Manque de rigidité du système machine-outil-pièce, vibrations indésirables (chatter) ou surplomb excessif de l'outil.	Augmenter la rigidité du montage, réduire le surplomb et ajuster la vitesse d'avance .
Problème d'alimentation	Interférences électromagnétiques (EMI), instabilité de la tension d'entrée ou mauvais contact du fil de terre.	Isoler la machine des sources de bruit, nettoyer la poussière des composants et resserrer les connexions.
Basse pression	Air d'entrée insuffisant du compresseur, filtre colmaté ou contamination par l'huile dans l'électrovanne.	Vérifier la pression de sortie du compresseur, assurer un air sec sans huile et remplacer les tuyaux si nécessaire.
Buse usée	Phénomène de dérive (drift) géométrique, mauvaise installation (filetage lâche) ou manque de refroidissement par eau.	Remplacer la buse selon le plan de maintenance, vérifier le serrage et assurer la circulation de l'eau.

IV.6 Conseils a donné à l'Opérateur de la machine et Sécurité

IV.6.1 consignes d'exploitation et de réglage

Le succès du processus de découpe sur une machine CNC repose sur un **paramétrage** méticuleux où les conditions de coupe, bien qu'influencées par des facteurs fixes comme la nature et l'état du matériau, dépendent étroitement de variables sous le contrôle de l'opérateur telles que le choix des outils, la profondeur de coupe et les **vitesse d'avance** (feedrates) [68]. Pour garantir la sécurité lors du lancement d'une nouvelle série, il est impératif de régler initialement les commutateurs de dérogation (override) de vitesse rapide et d'avance entre 10 % et 50 % avant d'optimiser le programme pour une production à plein régime [68]. La précision dimensionnelle exige en outre un réglage rigoureux des **offsets de géométrie et d'usure**, tout en assurant une stabilité constante de la pression d'air, variable critique pour maintenir une relation de cause à effet prévisible entre les réglages et la qualité finale [66].

En ce qui concerne la **manipulation de la torche**, une vérification systématique de l'installation de la buse et de l'électrode (serrage des filetages et propreté) est requise pour éviter toute défaillance de l'arc, tout en ajustant précisément la distance entre la torche et la pièce selon l'épaisseur du matériau. Le maintien d'une parfaite **perpendicularité** de la torche est essentiel

à la stabilité du jet plasma, et chaque trajectoire doit être validée par une simulation graphique (animation) avant l'exécution réelle pour prévenir toute collision dommageable avec la pièce ou les fixations [66].

Enfin, l'opérateur doit impérativement confirmer l'exactitude des données saisies à l'écran et respecter les consignes de sécurité, comme la fermeture des portes de la machine, avant de lancer le cycle de travail.

IV.6.2 Protection Individuelle (EPI)

La protection de l'opérateur lors de l'utilisation d'une machine CNC plasma repose sur la gestion de plusieurs risques critiques identifiés dans les sources :

- **Rayonnement UV** : La découpe plasma génère un arc plasmatique à haute énergie dont l'intensité nécessite une protection oculaire et cutanée rigoureuse. La planification de la sécurité doit impérativement intégrer des mesures pour réduire ces risques physiques et protéger l'opérateur contre les effets nocifs du rayonnement intense [65].
- **Fumées de découpe** : Le processus produit des sous-produits dangereux sous forme de fumées et de gaz qui menacent la santé humaine et l'environnement [65]. L'utilisation de **systèmes d'extraction des fumées** est une précaution indispensable pour maintenir un environnement de travail sain et conformer l'installation aux normes de sécurité [65].
- **Risques électriques** : La sécurité face aux hautes tensions implique un contrôle strict de la **mise à la terre** de la pièce, l'utilisation d'outils de mise à la terre spéciaux et le remplacement des fils vieillissants pour éviter tout mauvais contact. Toute intervention sur les circuits ou les paramètres électriques doit être réservée à du personnel qualifié (électriciens ou techniciens de maintenance) pour prévenir les accidents [66]. Par ailleurs, le respect des dispositifs de sécurité collectifs, tels que la fermeture des **portes de la machine** et l'utilisation de verrouillages (interlocks), est crucial pour empêcher les blessures pendant le cycle de travail [66], [65]. En complément de ces protections, l'opérateur doit être formé à reconnaître les signaux d'alarme et les états de sécurité du système afin de réagir promptement en cas de danger Immédiate [66], [65].

Le port des EPI est obligatoire avant toute opération de découpe plasma. Aucun travail ne doit être effectué sans les équipements de protection adaptés afin de prévenir les risques de brûlures, de projections, d'exposition aux fumées toxiques, au bruit et aux rayonnements du plasma.

Équipements de Protection Individuelle (EPI) obligatoires :

- Casque ou masque de protection pour découpe plasma.
- Lunettes de sécurité.
- Gants de protection thermique.
- Chaussures de sécurité.
- Vêtements ignifugés à manches longues.
- Protection auditive (casque antibruit ou bouchons d'oreilles).
- Masque de protection respiratoire si l'extraction des fumées est insuffisante.

IV.7 digitalisation de la maintenance (Excel)

- **structure et fonctionnement de l'outil suivi**

La digitalisation des données est indispensable pour passer d'une maintenance subie à une maintenance pilotée. L'outil Excel développé dans le cadre de ce mémoire a été conçu comme une application simplifiée de Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO). Il comporte 5 onglets complémentaires, interconnectés par des formules dynamiques, pour une traçabilité totale et une automatisation des alertes.

Onglet 1 : Tableau de Bord

- **Fonctionnement** : Le Tableau de Bord est le centre de pilotage visuel de la machine. Il ne nécessite pas de saisie manuelle de la part de l'utilisateur. Il centralise et calcule automatiquement les indicateurs de performance grâce aux données des autres onglets.

Indicateurs clés affichés :

- **Taux de Disponibilité Réelle** : Le Taux de Disponibilité Réelle calcule le pourcentage de temps pendant lequel la machine est opérationnelle par rapport au temps d'ouverture théorique.
- **Temps Moyen de Réparation** : Le Temps Moyen de Réparation indique l'efficacité de l'équipe technique à résoudre une panne.
- **Nombre total de pannes** : Le Nombre total de pannes est un compteur automatique des arrêts de la machine.
- **Alertes par Organes** : Le système d'Alertes par Organes utilise des voyants colorés qui passent au Rouge dès qu'un retard est détecté dans le plan de maintenance, comme une Alerte basse pression, un Buse à contrôler ou une Alerte tension.

SYSTÈME PILOTÉ			
Filière :	Master 2 Fabrication Mécanique et Productique (FMP)	BOUDIB Smail	BAHMED Salah
Projet :	Mémoire de fin d'études : Gestion & Plan de Maintenance CNC Plasma		
INDICATEURS DE PERFORMANCE DE MAINTENANCE (KPI)			
Taux de Disponibilité Machine			69,9%
Nombre total de Pannes Historiques			4
Temps Moyen de Réparation (MTTR)			15,1 heures
Tâches de Maintenance en Retard			15

Figure □- 3: Tableau de bord (partie 1)

MAINTENANCE - DÉCOUPEUSE PLASMA			
ALERTE PAR TYPES D'ORGANES			
Système Pneumatique (Étanchéité/Pression)		ALERTE PRESSION	
Torche & Consommables (Buse/Tuyère)		BUSE À CONTRÔLER	
Système Électrique (Alimentation)		ALERTE TENSION	
Guidage Mécanique (Axes X/Y/Z)		À LUBRIFIER	

Figure □- 4: Tableau de bord (partie 2)

Onglet 2 : Plan de Maintenance

- **Fonctionnement** : Cet onglet permet de gérer le calendrier préventif de la machine. Il peut être configuré pour des tâches quotidiennes, hebdomadaires, mensuelles ou semestrielles. La caractéristique principale de cet onglet est sa capacité de régénération automatique. L'utilisateur doit simplement saisir la date à laquelle il a effectué la tâche. Le système calcule ensuite instantanément la prochaine échéance.

Structure des colonnes :

- **Code** : Il s'agit d'un identifiant unique pour chaque action de maintenance, comme par exemple PM-01 ou PM-02.
- **Organe / Sous-système** : Cette colonne permet de cibler de manière précise la zone à maintenir, qu'il s'agisse du système pneumatique, de l'axe X/Y, de la torche, etc.
- **Opération de Maintenance** : Ici, l'utilisateur trouve une description claire de la tâche à accomplir, comme la purge, la lubrification ou le contrôle géométrique.

- Périodicité : Cette colonne indique la fréquence à laquelle l'action de maintenance doit être effectuée, qui peut être quotidienne, hebdomadaire, mensuelle ou semestrielle.
- Délai (Jours) : Il s'agit de la conversion en jours de la fréquence, qui peut être de 1, 7, 30 ou 180 jours, et qui est utilisé pour les calculs.
- Dernière Intervention : Il s'agit de la seule colonne que l'utilisateur doit remplir, et elle exige la date du dernier contrôle.
- Jours Restants : Cette colonne est automatisée et calcule l'écart entre l'échéance et la date du jour, en utilisant la fonction qui donne la date d'aujourd'hui.
- Statut Automatique : Le statut s'affiche en vert avec le message « À jour (OK) » si le délai est respecté. Sinon, il passe automatiquement en rouge avec le message « RETARD ! (À faire) » si l'échéance est dépassée.

Opération de Maintenance	Périodicité	Délai (Jours)	Dernière Intervention	Jours Restants	Statut Automatique	Fonctionnaire
Purge des condensats du filtre à air et test d'étanchéité	Quotidien			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Contrôle géométrique de l'orifice de la base et usure	Quotidien			-6179	RETARD ! (À faire)	Technicien
Nettoyage des rails de guidage pour éviter découpe irrégulière	Quotidien			-6179	RETARD ! (À faire)	Ingénieur
Vérification de l'alignement et tension des courroies	Hebdomadaire			-6179	RETARD ! (À faire)	Technicien
Nettoyage de la tête de torche et hauteur automatique	Hebdomadaire			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Nettoyage et test des capteurs inductifs de fin de course	Hebdomadaire			-6179	RETARD ! (À faire)	Technicien
Vidange des sories accumulées ou niveau de l'eau	Hebdomadaire			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Lubrification fine et graissage des glissières et pignons	Mensuelle			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Contrôle global d'étanchéité du circuit (Fuites basse pression)	Mensuelle			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Contrôle de stabilité de la tension et armoire électrique	Mensuelle			-6179	RETARD ! (À faire)	Technicien
Dépoussiérage interne complet et soufflage des cartes	Hebdomadaire			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Resserrage des connexions de puissance de la source plasma	Mensuelle			-6179	RETARD ! (À faire)	Technicien
Remplacement des cartouches de filtres (huile et air)	Semestrielle			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Contrôle de niveau et planéité géométrique de la table	Semestrielle			-6179	RETARD ! (À faire)	Ingénieur
Contrôle du jeu de la vis à billes et guidages verticaux	Mensuelle			-6179	RETARD ! (À faire)	Ingénieur
Mise à jour du logiciel Twin CAT	Semestrielle			-6179	RETARD ! (À faire)	Ingénieur
Nettoyage de la poussière et des résidus à l'air comprimé sec	Quotidien			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Inspection visuelle de l'état général (fissures, corrosion, dommages)	Hebdomadaire			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Vérification du serrage et de l'état des connexions électriques	Mensuelle			-6179	RETARD ! (À faire)	Technicien
Contrôle de l'usure et du jeu mécanique	Semestrielle			-6179	RETARD ! (À faire)	Technicien
Contrôle approfondi de l'usure	Mensuelle			-6179	RETARD ! (À faire)	Ingénieur
Inspection visuelle et nettoyage	Quotidien			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Contrôle de l'isolation des câbles	Semestrielle			-6179	RETARD ! (À faire)	Technicien
Contrôle et vérification de la pression et débit d'air dynamique	Quotidien			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Vérification la pureté de l'air dans la torche	Quotidien			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Vérification et contrôle que s'y a pas des déchets métalliques sur les engrenages	Quotidien			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Vérification que s'y a pas des coupures, des torsions ou de projection de métal sur faisceau de cabl	Quotidien			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Assurez vous que les ventilateurs sont pas contaminé par la poussière	Quotidien			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Vérification que le lubrifiant n'est pas contaminé par la poussière ou des résidus indésirables	Quotidien			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Nettoyez les axes de guidage pour enlever la graisse saturée de poussière métallique	Hebdomadaire			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Appliquez une fine couche de lubrifiant adapté ou de la graisse au lithium sur les rails	Hebdomadaire			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur
Vérification d'allumage des composants et le jeu entre eux	Mensuelle			-6179	RETARD ! (À faire)	Technicien
Nettoyage et lubrification de la vis à billes ou la vis sans fin	Hebdomadaire			-6179	RETARD ! (À faire)	Technicien
Remplacement de l'élément filtrant du régulateur d'air principal	Semestrielle			-6179	RETARD ! (À faire)	Technicien
Nettoyage de l'élément filtrant du régulateur d'air principal	Hebdomadaire			-6179	RETARD ! (À faire)	Opérateur

Figure IV- 5: Onglet du Plan de Maintenance

Onglet 3 : Guide de Diagnostic

Ce guide utilise la base de données Ishikawa 5M pour aider les techniciens à résoudre les problèmes de panne ou de qualité.

Fonctionnement :

Ce guide est conçu pour aider les techniciens à prendre des décisions rapides et efficaces lorsqu'ils rencontrent une panne ou un problème de qualité. Il présente le diagramme d'Ishikawa sous forme de tableau pour un dépannage rapide.

Structure des colonnes :

Ce schéma classe les causes de problèmes en cinq catégories

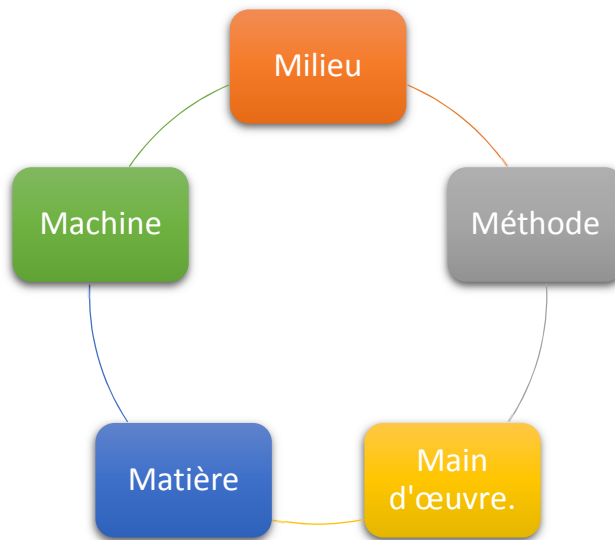


Figure □- 6: Axes de la méthode d'Ishikawa

➤ **Symptôme Constaté :**

Cette colonne décrit le problème visible, comme une découpe irrégulière ou une basse pression.

➤ **Cause Racinaire Détectée :**

Cette colonne fournit une explication physique du problème, comme un orifice de bus ovalisé ou une fuite dans le réseau.

➤ **Action Corrective immédiate :**

Cette colonne propose des solutions techniques pour résoudre le problème et des conseils pour l'exploitation.

Axe Ishikawa (5M)	Symptôme Constaté
Machine / Matériel	Découpe irrégulière / Qualité dégradée
Machine / Cinématique	Découpe irrégulière / Stries profondes
Milieu / Pneumatique	Arc plasma instable ou coupure brusque
Milieu / Pneumatique	Buse usée prématurément (Noircissement)
Matériel / Électrique	Problème d'alimentation / Arrêt CNC
Méthode / CNC	Présence importante de scories épaisses
Matière	Défaut d'amorçage de l'arc pilote
Main d'œuvre / Opérateur	Pièce découpée non conforme aux cotes

Cause Racinaire Détectée	Action Corrective immédiate / Conseils
Buse usée ou orifice de la tuyère déformé thermiquement	Remplacer l'ensemble buse et électrode. Recalibrer la torche.
Jeu mécanique dans les crémaillères ou rails d'axes X/Y encrassés	Nettoyer les glissières, vérifier la tension des courroies et lubrifier.
Basse pression d'air provenant du réseau (Inférieure à 5.5 bars)	Vérifier le compresseur, purger le filtre et ajuster le régulateur.
Présence d'eau ou d'huile condensée dans l'air comprimé	Purger le filtre à air. Vérifier l'unité de séchage réseau.
Fluctuation de tension réseau, câble de puissance ou masse desserré	Contrôler la tension du réseau et resserrer les bornes de puissance.
Vitesse d'avance de coupe trop lente ou ampérage trop fort	Modifier le fichier G-Code, augmenter la vitesse ou réduire l'ampérage.
Surface de la tôle trop oxydée, calaminée ou recouverte de graisse	Nettoyer ou broser mécaniquement la zone d'amorce de la tôle.
Mauvaise prise d'origine pièce (Zéro machine) ou usure outil non compensée	Recadrer l'opérateur sur la procédure de calibration de la CNC.

Figure □- 7: Onglet Guide de Diagnostic

Onglet 4 : Journal des Pannes & Historique

Fonctionnement : C'est le registre des arrêts machines non programmés (maintenance corrective). Chaque fois que la machine tombe en panne, l'utilisateur consigne l'événement pour alimenter le Tableau de Bord.

Structure des colonnes :

- ID Panne : Numéro de suivi de la panne (ex : ERR-01).
- Date de Panne : Date de l'arrêt.
- Composant / Organe en cause : Identification de la pièce défectueuse.
- Temps d'Arrêt Machine (h) : Durée de l'arrêt (utilisée pour calculer la disponibilité et le MTTR).
- Technicien / Opérateur : Nom de l'intervenant.

PARAMÈTRES DE PRODUCTION GLOBAL			
Temps d'ouverture théorique (h) :			200
Date de Panne	Composant / Organe en cause	Temps d'Arrêt Machine (h)	Technicien / Opérateur
2026-05-02	Buse usée / Tête de Torche	0,3	Fellah Allal
2026-05-08	Capteur de pression à turbine	8	Messaoudi Lamine
2026-05-18	Guidage Mécanique (Axe X bloqué)	12	Messaoudi Lamine
2026-05-26	logicielle du système TwinCAT	40	Ingenieur DURMA
Cumul Temps d'Arrêt Total :			60,3
Disponibilité Réelle (%) :			69,9%
MTTR (Temps Moyen de Réparation) :			15,075

Figure □- 8: Onglet du Journal des Pannes & Historique

Onglet 5 : Historique Interventions

- **Fonctionnement** : Permet d'archiver de manière définitive toutes les actions de maintenance préventive réalisées avec succès. C'est la mémoire écrite de la machine, indispensable pour le suivi à long terme et les audits industriels.
- **Structure des colonnes** : Date Action, Code Tâche, Désignation Organe, Type de Maintenance, Observations / Mesures prises, Visa (Signature).

Date Action	Code Tâche	Désignation Organe	Type de Maintenance	Observations / Mesures prises	fonctionnaire
2026-06-01	PM-01	Système Pneumatique	Préventive	Purge effectuée, pression stable à 6 bars. Aucune fuite d'étanchéité.	Opérateur
2026-06-02	PM-03	Guidage Mécanique	Préventive	Nettoyage des poussières métalliques sur l'axe Y.	Opérateur
2026-06-03	PM-02	Buse / Électrode	Préventive	Remplacement de la buse (orifice usé à 1.5mm).	Opérateur
2026-05-29	PM-06	Capteurs CNC	Préventive	Vérification des fins de course X et Y, capteurs OK.	Technicien

Figure □- 9: Onglet du Historique Interventions

- **Ce que l'opérateur ou le technicien doit faire :**

Chaque jour ou chaque semaine, il doit consulter le Tableau de Bord pour repérer les alertes rouges. Lorsqu'il effectue une tâche du plan, par exemple un test d'étanchéité pneumatique, il va dans l'onglet Plan de Maintenance et met à jour la colonne Dernière Intervention avec la date du jour. L'alerte rouge disparaît alors instantanément et repasse au vert.

Si une panne survient, il remplit une ligne dans le Journal des Pannes.

- **Ce que l'outil fait tout seul :**

Il recalcule les jours restants chaque fois qu'on ouvre le fichier.

Il actualise le taux de disponibilité de la découpeuse plasma.

Il régénère les alertes dès que les cycles (24h, 7 jours, 6 mois) sont dépassés, empêchant ainsi tout oubli des consommables ou des vérifications de basse pression.

IV.8 Conclusion

Le quatrième chapitre a permis d'établir les fondements d'une gestion rigoureuse et structurée de la maintenance de la machine de découpe plasma.

L'examen détaillé des défauts, tels que les découpes irrégulières, les problèmes d'alimentation électrique, les pertes de pression pneumatique et l'usure des consommables, a révélé la sensibilité de ce système aux dérives opérationnelles. Grâce à l'application de l'analyse systémique par le diagramme d'Ishikawa, également appelé les 5M, et à l'élaboration d'un tableau logique de diagnostic, nous avons pu identifier efficacement les symptômes techniques et remonter jusqu'aux causes profondes des pannes. Pour résoudre ces problèmes, une stratégie de maintenance mixte a été mise en place. Elle est composée de plusieurs éléments clés, notamment :

Pour anticiper les dégradations critiques, nous avons mis en place un système de prévention systématique et conditionnel. Cela signifie que nous surveillons régulièrement les pressions, l'état des filtres et l'usure de la buse. Notre stratégie s'est traduite par un plan de maintenance structuré, avec des tâches quotidiennes, hebdomadaires et périodiques. Cela permet à l'opérateur de prendre directement en charge la maintenance, tout en respectant les consignes de sécurité et en portant les Équipements de Protection Individuelle (EPI).

Nous avons également intégré un outil de suivi digitalisé sous Excel, ce qui nous permet de suivre les interventions de manière claire et centralisée. Grâce à ces mesures, nous pouvons garantir que la machine soit disponible au maximum, tout en préservant sa précision brute et la qualité de découpe sur le long terme.

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette mémoire a été réalisé au sein de l'entreprise **FLUIDEX**. Il s'inscrit dans le cadre de l'étude et de l'amélioration de la maintenance d'une machine de découpe plasma CNC. Cette étude nous a permis d'acquérir une connaissance approfondie de l'environnement industriel de l'entreprise. Nous avons également mieux compris ses procédés de fabrication ainsi que les enjeux liés à la disponibilité, à la fiabilité et à la performance des équipements de production.

Dans un premier temps, nous avons étudié les concepts fondamentaux des procédés de fabrication mécanique et de la maintenance industrielle. Cette analyse a mis en évidence l'évolution des stratégies de maintenance, passant des approches correctives traditionnelles vers des méthodes plus performantes basées sur la maintenance préventive, conditionnelle et prédictive. Ces nouvelles approches intègrent les principes de l'Industrie 4.0, les indicateurs clés de performance (KPI) ainsi que les méthodes d'inspection fondées sur l'analyse des risques.

Par la suite, nous avons réalisé une analyse technique approfondie de la machine de découpe plasma CNC afin d'identifier ses principaux organes, de comprendre son principe de fonctionnement et de déterminer les éléments critiques influençant la qualité de découpe et la continuité de service. Une attention particulière a été portée aux consommables de la torche plasma, au système d'alimentation en air comprimé ainsi qu'au système de commande numérique, qui constituent les composants les plus sensibles aux défaillances. L'étude des pannes observées au cours de l'exploitation nous a permis d'identifier plusieurs dysfonctionnements récurrents, notamment les défauts de découpe, les problèmes de basse pression d'air, les pannes d'alimentation ainsi que l'usure des buses. Grâce aux outils de diagnostic, à l'analyse des causes racines et au diagramme d'Ishikawa, nous avons mis en évidence les facteurs techniques, humains et organisationnels responsables de ces défaillances. Afin d'améliorer la fiabilité et la disponibilité de l'équipement, nous avons élaboré un plan de maintenance structuré reposant sur une combinaison de maintenance corrective, préventive et préventive conditionnelle. Des recommandations relatives à l'exploitation de la machine, au respect des règles de sécurité et à l'utilisation des équipements de protection individuelle ont également été proposées afin de réduire les risques de panne et d'accident tout en améliorant les conditions de travail.

Enfin, nous avons développé un outil numérique de suivi sous Excel constituant une première étape vers la digitalisation de la maintenance. Cet outil permet d'assurer une meilleure traçabilité des interventions, de faciliter la planification des opérations de maintenance et

d'améliorer le suivi des performances de l'équipement. Cette étude a démontré que la mise en œuvre d'une stratégie de maintenance organisée, préventive et adaptée constitue un levier essentiel pour améliorer la disponibilité, la fiabilité et la productivité d'une machine de découpe plasma CNC. Les solutions proposées contribuent à réduire les arrêts non planifiés, à diminuer les coûts de maintenance et à garantir une meilleure qualité de production. À plus long terme, l'intégration de technologies de surveillance en temps réel, associées à des outils de maintenance prédictive, représente une perspective prometteuse pour renforcer davantage les performances industrielles et la compétitivité de l'entreprise **FLUIDEX**.

References bibliographies

- [1] M. P. Groover, *Introduction to manufacturing processes*. Wiley Global Education, 2012.
- [2] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. John Wiley & Sons, 2010.
- [3] S. Serope Kalpakjian, *Manufacturing, Engineering and Technology*. 2015. Consulté le: 27 mars 2026.
- [4] « Sélection du processus, de la conception à la fabrication ». Consulté le: 27 mars 2026.
- [6] D. Lukic, M. Milosevic, A. Antic, S. Borojevic, et M. Ficko, « Multi-criteria selection of manufacturing processes in the conceptual process planning », *Adv produc engineer manag*, vol. 12, n° 2, p. 151- 162, mai 2017, doi: 10.14743/apem2017.2.247.
- [7] Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Selangor Darul Ehsan, Malaysia, « ANALYSIS OF PROCESS PARAMETERS ON SPATTER AND DROSS IN PLASMA ARC CUTTING », *IJMMT*, vol. 16, n° 3, p. 68- 74, déc. 2024, doi: 10.54684/ijmmt.2024.16.3.68.
- [8] M. Hashish, « Abrasive Waterjet Machining », *Materials*, vol. 17, n° 13, juill. 2024, doi: 10.3390/ma17133273.
- [9] A. Hasçalık et M. Ay, « CO2 laser cut quality of Inconel 718 nickel – based superalloy », *Optics & Laser Technology*, vol. 48, p. 554- 564, juin 2013, doi: 10.1016/j.optlastec.2012.11.003.
- [10] D. C. Eddy, S. Krishnamurty, I. R. Grosse, et M. Steudel, « Early design stage selection of best manufacturing process », *Journal of Engineering Design*, vol. 31, n° 1, p. 1- 36, janv. 2020, doi: 10.1080/09544828.2019.1662894.
- [11] A. Belhadi et F. E. Touriki, « A framework for effective implementation of lean production in small and medium-sized enterprises », *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, n° 3, p. 786- 810, 2016.
- [12] K. E. Ping, « DESIGN AND FABRICATION OF SMALL SCALE LASER CUTTING MACHINE ».
- [13] Z. C. Chen et L. J. Pan, « Applications of optical path length compensation technology for high power CO2 laser cutting process », *Advanced Materials Research*, vol. 939, p. 177- 185, 2014.
- [14] C. Polat, G. N. Yapici, S. Elahi, et P. Elahi, « Machine learning-based high-precision and real-time focus detection for laser material processing systems », in *Optics, Photonics and*

- Digital Technologies for Imaging Applications VII*, SPIE, mai 2022, p. 7- 13. doi: 10.1117/12.2624383.
- [15] « Détection de mise au point de haute précision et en temps réel basée sur l'apprentissage automatique pour les systèmes de traitement des matériaux par laser ». Consulté le: 27 mars 2026.
- [16] A. I. Hassan et J. Kosmol, « An overview of abrasive waterjet machining (AWJM) », *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Politechnika Slaska*, n° 2/97, p. 181- 205, 1997.
- [17] G. Al-Marahleh, « Parameters controlling abrasive water jet technology: Erosion and impact velocity for both ductile and brittle materials », *IOSR Journal of Engineering*, vol. 5, n° 08, p. 01- 07, 2015.
- [18] R. B. Joshi, A. A. Shaikh, et B. K. Gotawala, « A review on abrasive water jet machining on different material », *International Journal of Engineering Development and Research*, vol. 4, n° 2, p. 860- 866, 2016.
- [19] A. W. Momber et R. Kovacevic, « An energy balance of high-speed abrasive water jet erosion », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 213, n° 6, p. 463- 472, juin 1999, doi: 10.1243/1350650991542811.
- [20] I. F. Azlan, M. I. S. Ismail, et R. Samin, « ANALYSIS OF PROCESS PARAMETERS ON SPATTER AND DROSS IN PLASMA ARC CUTTING », *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. <https://doi.org/10.54684/ijmmt>, vol. 3, 2024, Consulté le: 1 avril 2026.
- [21] P. Moemenishahraki, « Reliability and Maintenance Performance Analysis of a 1600-ton Press Machine Using MTBF, MTTR, KPI, and Downtime Indicators », *IE*, vol. 9, n° 2, p. 36- 41, sept. 2025, doi: 10.11648/j.ie.20250902.11.
- [22] P. Moemenishahraki, « Reliability and Maintenance Performance Analysis of a 1600-ton Press Machine Using MTBF, MTTR, KPI, and Downtime Indicators », *IE*, vol. 9, n° 2, p. 36- 41, sept. 2025, doi: 10.11648/j.ie.20250902.11.
- [23] A. Belhadi et F. E. Touriki, « A framework for effective implementation of lean production in small and medium-sized enterprises », *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, n° 3, p. 786- 810, 2016.
- [24] « (13) Sélection du processus, de la conception à la fabrication ». Consulté le : 1 avril 2026.

- [25] E. Abela, P. Vella, P. Farrugia, G. Cassar, M. V. Gauci, et E. Balzan, « An axiomatic design methodology for manufacturing process selection based on multi-user requirements mapping », 2023, Consulté le: 1 avril 2026.
- [26] D. A. Mohan, « Examination of the skills for facilitating CNC thermal cutting operations to meet the infrastructure demand in India », 2025, Consulté le: 1 avril 2026.
- [27] A. Belhadi et F. E. Touriki, « A framework for effective implementation of lean production in small and medium-sized enterprises », *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, n° 3, p. 786- 810, 2016.
- [28] S. Serop Kalpakjian, *Manufacturing, engineering and technology*. 2015. Consulté le: 1 avril 2026.
- [29] U. K. Uz Zaman, M. Rivette, A. Siadat, et S. M. Mousavi, « Integrated product-process design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 51, p. 169- 180, 2018.
- [30] M. Galati, F. Calignano, et L. Iuliano, « A Review of Integrated Approaches for Material, Design and Process Selection and a Proposal for the AM Processes », in *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management*, Springer, 2018, p. 747- 756. Consulté le: 1 avril 2026.
- [31] D. Lukic, M. Milosevic, A. Antic, et M. Ficko, « Multi-criteria selection of manufacturing processes in the conceptual process planning. », *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 12, n° 2, 2017, Consulté le: 1 avril 2026.
- [32] K. N. Pospelov, Z. V. Burlutskaya, A. M. Gintciak, et K. D. Troshchenko, « Multiparametric optimization of complex system management scenarios based on simulation models », *International Journal of Technology*, vol. 14, n° 8, p. 17481758, 2023.
- [33] S. Boral et S. Chakraborty, « A case-based reasoning approach for non-traditional machining processes selection. », *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 11, n° 4, 2016, Consulté le: 1 avril 2026.
- [34] A. R. Fabbri *et al.*, « Improving zero and few-shot abstractive summarization with intermediate fine-tuning and data augmentation », in *Proceedings of the 2021 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, 2021, p. 704- 717. Consulté le : 1 avril 2026.

- [35] A. Belhadi et F. E. Touriki, « A framework for effective implementation of lean production in small and medium-sized enterprises », *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, n° 3, p. 786- 810, 2016.
- [36] E. Abela, P. Vella, P. Farrugia, G. Cassar, M. V. Gauci, et E. Balzan, « An axiomatic design methodology for manufacturing process selection based on multi-user requirements mapping », 2023, Consulté le: 1 avril 2026.
- [37] A. Belhadi et F. E. Touriki, « A framework for effective implementation of lean production in small and medium-sized enterprises », *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, n° 3, p. 786- 810, 2016.
- [38] « Sélection du processus, de la conception à la fabrication ». Consulté le: 1 avril 2026.
- [39] M. Hashish, « Abrasive waterjet machining », *Materials*, vol. 17, n° 13, p. 3273, 2024.
- [40] K. PING, « DESIGN AND FABRICATION OF SMALL SCALE LASER CUTTING MACHINE », PhD Thesis, Universiti Sains Malaysia, 2017. Consulté le: 1 avril 2026.
- [41] M. I. Boulos, P. L. Fauchais, et E. Pfender, « Handbook of thermal plasmas », 2023, Consulté le: 19 avril 2026.
- [42] « Tendances actuelles en matière de découpe plasma CNC et de robotique pour 2025 - EVST ». Consulté le: 20 avril 2026.
- [43] K. Kharote, D. P. Kharat, S. R. Shekokar, N. A. Kharche, et P. V. Chopde, « An Experimental Analysis of Cutting Quality in Plasma Arc Machining: An Extensive Review », Consulté le: 20 avril 2026.
- [44] « Précision 130 - Découpe plasma CNC haute définition étonnante - Machines de découpe plasma CNC Swift-Cut ». Consulté le: 20 avril 2026.
- [45] « A. Shaparev et al.; THE INFLUENCE GAS JET ON THE... - Google Scholar ». Consulté le: 20 avril 2026.
- [46] V. Korzhyk, W. Haichao, V. Khaskin, I. Ye, S. Peleshenko, et A. Aloslyn, « Review of Modern Equipment for Plasma-Arc Cutting of Metals », *The Scientific Heritage*, n° 100, p. 73- 80, 2022.
- [47] « Catalogue-2023-2024_EN-1.pdf ». Consulté le: 20 avril 2026.
- [48] H. Rauscher, M. Perucca, et G. Buyle, Éd., *Plasma Technology for Hyperfunctional Surfaces: Food, Biomedical, and Textile Applications*, 1^{re} éd. Wiley, 2010. doi: 10.1002/9783527630455.
- [49] « PL-40-Operators-Manual-March-2016.pdf ». Consulté le: 20 avril 2026.
- [50] « How to Choose the Right Gas & Pressure for Fiber Laser Cutting ». Consulté le: 20 avril 2026.

- [51] A. Shaparev, A. Mirzayev, M. Qarayev, S. Mehdiyeva, R. Abbasov, et Y. Huseynov, « THE INFLUENCE GAS JET ON THE QUALITY LASER CUTTING METALS », *Reliability: Theory & Applications*, vol. 20, n° SI 7 (83), p. 310- 319, 2025.
- [52] M. Madić, C. C. Girdu, D. Marinković, P. Janković, et M. Trifunović, « Analysis of kerf width and its variation in CO2 laser cutting of straight and curved cut profiles », *Tehnički vjesnik*, vol. 31, n° 6, p. 1884- 1891, 2024.
- [53] L. Cepauskaite et R. Bendikiene, « Effect of fiber-laser parameters on cutting accuracy of thin and thick S355JR structural steel plates », *Metals*, vol. 14, n° 6, p. 723, 2024.
- [54] D. Reed, *A balanced introduction to computer science*. Pearson Prentice Hall, 2005. Consulté le: 20 avril 2026.
- [55] T. M. Khan, « Fundamentals of plasma: its physics and applications », in *Energy From Plasma*, Elsevier, 2025, p. 3- 35. Consulté le: 20 avril 2026.
- [56] A. Riveiro *et al.*, « Laser cutting: A review on the influence of assist gas », *Materials*, vol. 12, n° 1, p. 157, 2019.
- [57] S. I. Blanchart, « Introduction of a laser cutter, Bodor i7, and bending machine, TruBend 3066, & basics operations », 2023, Consulté le: 20 avril 2026.
- [58] « Emerging Trends for 2026 in the Metal Fabrication Industry ». Consulté le: 20 avril 2026.
- [59] J. Müller, T. Broum, M. Malaga, et M. Milatová, « Integrating Robotic Systems into a Plasma Cutting Workstation-New Workstation Design Approach Using Techno-Economic Evaluation », *Tehnički glasnik*, vol. 19, n° 3, p. 481- 488, 2025.
- [60] A. F. M. Tahir et E. A. Rahim, « A study on the laser cutting quality of ultra-high strength steel », *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 10, n° 2, p. 2145- 2158, 2016.
- [61] P. Smid, *CNC control setup for milling and turning: mastering CNC control systems*. Industrial Press Inc., 2010. Consulté le: 6 juin 2026.
- [62] S. Kalpakjian, *Manufacturing processes for engineering materials*. Pearson Education India, 1985.
- [63] P. Smid, *CNC control setup for milling and turning: mastering CNC control systems*. Industrial Press Inc., 2010. Consulté le: 6 juin 2026.
- [64] « SEROPE KALPAKJIAN, MANUFACTURING PROCESSES FOR ENGINEERIN... - Google Scholar ». Consulté le: 6 juin 2026.
- [65] « JOSEPH M. JURAN, JURAN'S QUALITY HANDBOOK - Google Scholar ». Consulté le : 6 juin 2026.

- [66] P. Smid, *Fanuc CNC custom macros: Programming resources for Fanuc Custom Macro B users*. Industrial Press Inc., 2004. Consulté le: 6 juin 2026.
- [67] A. I. Kupin et O. O. Romanenko, « PROPOSAL FOR A GENERAL CLASSIFICATION OF MAINTENANCE APPROACHES », *Системні технології*, vol. 4, n° 159, p. 46- 55, 2025.
- [68] P. Smid, *CNC control setup for milling and turning: mastering CNC control systems*. Industrial Press Inc., 2010. Consulté le: 6 juin 2026.
- [69] S. Kalpakjian, *Manufacturing processes for engineering materials*. Pearson Education India, 1985.
- [70] K. Silaipillayarputhur, S. Kishore Babu, et S. Sadhasivam, « Dimensionless Performance of Pure Cross Flow Heat Exchanger », in *International Mechanical Engineering Congress and Exposition-India*, American Society of Mechanical Engineers, 2025, p. V003T03A033. Consulté le: 6 juin 2026.
- [71] « MAINTENANCE ENGINEERING IN PROCESS PLANTS - Google Scholar ». Consulté le: 6 juin 2026.
- [72] M. Sleiman, « Caractérisation expérimentale du fonctionnement des torches à cascade », PhD Thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2025. Consulté le: 6 juin 2026.
- [73] M. Sleiman, « Caractérisation expérimentale du fonctionnement des torches à cascade », PhD Thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2025. Consulté le: 6 juin 2026.

Annexes

Check List d'une Maintenance quotidienne de la machine

organe	Opération à faire	Outil d'analyse	Bonne état	Mauvaise état	Remarque
Système Pneumatique	Purge des condensats du filtre à air et test étanchéité	Inspection visuelle,			
Buse	Contrôle géométrique de l'orifice de la buse et usure	pied à coulisse			
Électrode	Contrôle géométrique de l'orifice de la buse et usure	jauge de profondeur			
Tuyère	Contrôle géométrique de l'orifice de la buse et usure	pied à coulisse			
Guidage Mécanique	Nettoyage des rails de guidage pour éviter découpe irrégulière	chiffon de nettoyage			
Moteur pas à pas	Nettoyage de la poussière et des résidus à l'air comprimé sec	Inspection visuelle			
Chaine porte câble	Inspection visuelle et nettoyage	Contrôle visuel			
Système d'alimentation en air	Contrôle et vérification de la pression et débit d'air dynamique	Manomètre			
Système de filtration	Vérification la pureté de l'air dans la torche	inspection visuelle			
Crémaillère	Vérification et contrôle que y'a pas des déchets métalliques sur les engrenages	brosse métallique			
corroie	Vérification et contrôle que y'a pas des déchets métalliques sur les engrenages	Inspection visuelle			
Câbles de la torche	Vérification que y'a pas des coupures, des torsions ou de projection de métal sur faisceau de câbles	multimètre (test de continuité)			
Armoire électrique	Assurez-vous que les ventilateurs ne sont pas contaminés par la poussière	Inspection visuelle,			
Générateur Plasma	Vérification que le lubrifiant n'est pas contaminé par la poussière ou des résidus indésirables	Inspection visuelle			
Réservoir du lubrifiant	Vérification et contrôle de niveau du liquide de refroidissement dans le réservoir	Jauge de niveau,			
Torche	Vérification de fuite de lubrifiant au niveau des raccords de la torche	papier absorbant			

Check List d'une Maintenance Hebdomadaire de la machine

Organe	Opération à faire	Outil d'analyse	Bonne état	Mauvaise état	Remarque
Axes X / Y (Cinématique)	Vérification de l'alignement et tension des courroies	Inspection visuelle			
Buse / Torche / THC	Nettoyage de la tête de torche et hauteur automatique	Contrôle visuel, test fonctionnel du THC			
Capteurs CNC	Nettoyage et test des capteurs inductifs de fin de course	Contrôle visuel, test manuel de déclenchement			
Bac de découpe / Aspiration	Vidange des scories accumulées ou niveau de l'eau	Inspection visuelle, jauge de niveau			
Générateur Plasma	Dépoussiérage interne complet et soufflage des cartes	Contrôle visuel			
Moteur pas à pas	Inspection visuelle de l'état général (fissures, corrosion, dommages)	Contrôle visuel			
Axes de guidage (X, Y, Z)	Nettoyez les axes de guidage pour enlever la graisse saturée de poussière métallique	chiffon non pelucheux			
Axes de guidage (X, Y, Z)	Appliquer une fine couche de lubrifiant adapté ou de la graisse au lithium sur les rails	contrôle manuel de la fluidité du déplacement			
THC	Nettoyage et lubrification de la vis à billes ou la vis sans fin	Contrôle visuel			
Compresseur d'air	Nettoyage de l'élément filtrant du régulateur d'air principal	contrôle de la perte de charge			

Check List d'une Maintenance Mensuelle de la machine

Organe	Opération à faire	Outil d'analyse	Bonne état	Mauvaise état	Remarque
Guidage Mécanique	Lubrification fine et graissage des glissières et pignons	Inspection visuelle			
Système Pneumatique	Contrôle global d'étanchéité du circuit (Fuites basse pression)	Manomètre			
Alimentation électrique	Contrôle de stabilité de la tension et armoire électrique	Multimètre,			
Système Électrique	Resserrage des connexions de puissance de la source plasma	contrôle visuel			
Axe Z	Contrôle du jeu de la vis à billes et guidages verticaux	contrôle manuel			
Hauteur torche	Contrôle du jeu de la vis à billes et guidages verticaux	Comparateur à cadran			
Connecteurs	Vérification du serrage et de l'état des connexions électriques	contrôle visuel			
câbles	Vérification du serrage et de l'état des connexions électriques	Multimètre			
Courroie	Contrôle approfondi de l'usure	pied à coulisse			
Courroie et pignons	Vérification d'alignement des composants et le jeu entre eux	jauge d'épaisseur			
Réservoir du lubrifiant	Nettoyage minutieux du réservoir de lubrifiant	chiffon non pelucheux			
Générateur Plasma	Vérification de l'état de débitmètre	Contrôle visuel			
Table de découpe	Vider et nettoyez les bacs de la table	Inspection visuelle			
Chaine porte câble	Inspection vérification de l'état des câbles porté par la chaine	Contrôle visuel			

Check List d'une Maintenance semestrielle de la machine

Organe	Opération à faire	Outil d'analyse	Bonne état	Mauvaise état	Remarque
Compresseur d'air	Remplacement des cartouches de filtres (huile et air)	Inspection visuelle			
Table CNC	Contrôle de niveau et planéité géométrique de la table	Niveau à bulle de précision, règle de contrôle, comparateur à cadran			
L'Unité de contrôle	Mise à jour du logiciel Twin CAT	ordinateur de maintenance			
Roulements du moteur	Contrôle de l'usure et du jeu mécanique	Inspection visuelle, Comparateur à cadran			
Isolation câble	Contrôle de l'isolation des câbles	Mégohmmètre (testeur d'isolement)			
Compresseur d'air	Remplacement de l'élément filtrant du régulateur d'air principal	Inspection visuelle, manomètre			
Système de mouvement	Calibrage complet des axes et moteurs	Logiciel CNC de calibration			
Système de mouvement	Remplacement des pièces d'usure mécanique	Boite à outils			
Châssis de la machine	mise à la terre (test de continuité et de résistance de la terre)	Ohmmètre, contrôleur de terre			