



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Universités d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance en Electromécanique

Thème

Étude et conception d'une machine pour les revêtements des surfaces par films minces

Présenté par : KAID Khaled

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
REGUIEG Yssaad Sadek	MAA	IMSI-Univ.D'Oran2	Président
BELARIFI Farid	Pr	IMSI-Univ.D'Oran2	Encadreur
AOUIMEUR Yamina	MAA	IMSI-Univ.D'Oran2	Examineur

Année universitaire : 2020/2021

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

A mon père Abdelkader et ma mère Oerzine Nora pour leur amour inestimable, leurs sacrifices, leur confiance, leur soutien et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.

A ma grand-mère, et mon oncle

A ma sœur et mes frères, Fatima, Djamel Eddine, Mohamed, Ibrahim pour leur tendresse, leur complicité et leur présence

A mes tantes et mes oncles de la famille Kaid ainsi que de la famille Ouerzine, spécialement

A tous mes camarades de l'Université Oran 2, de lycée de Zahana et de l'école Rizini Kouider

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mes études et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon encadreur de mémoire M. Farid Belarifi, Professeur à l'université d'Oran 2, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université d'Oran et les intervenants professionnels responsables de ma formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

Je remercie en particulier Monsieur Benilha Samir, pour m'avoir donné un énorme soutien pour la réalisation de ce travail

Mes parents, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Sommaire

Introduction general	1
Chapitre 1: les revêtements de surfaces	
1. Introduction.....	5
2. Les différents types de traitement de surface.....	5
2.1 Revêtements mécaniques	5
2.1.1 Aérogommage.....	5
2.1.2 Ebavurage	6
2.1.3 Brunissage	7
2.1.4 Galetage	7
2.1.5 Grenailage.....	9
2.1.6 Sablage.....	9
2.1.7 Microbillage.....	10
2.1.8 Polissage	11
2.2 revetement metalique	12
2.2.1 depot par voie humide.....	12
2.2.2 Depot par voie seche	14
2.2.3 Depot par voie thermique	17
2.2.4 Dépôt par projection thermique	19
2.2.5 Revêtement optique	19
2.2.6 Revêtement de conversion	20
2.2.6.1 Électrolytique	20
2.2.6.2 chimique	21
3 Les Films minces.....	22
3.1 Définition.....	22
3.2 Bref historique de l'application des couches minces.....	22
3.3 Formation d'une couche mince	23
3.4 L'interface revêtement substrat	24
3.5 Les propriétés des couches minces	25
3.6 Applications des couches minces.	26
3.6.1 Couches de protection contre la corrosion et l'usure	26

3.6.2 Couches minces dans les composants et dispositifs électroniques	26
4. Couches minces et optique	27
5. Techniques de projection	27
5.1. La projection à la flamme	27
5.2 La projection flamme-poudre.....	28
5.3 La projection flamme-fil	29
5.5 Canon à détonation	31
5.6 La projection à l'arc électrique.	32
5.6.1 La projection à arc électrique entre deux fils	32
5.7 La projection plasma	33
6 Caractéristiques des différents procédés de projection thermique.....	34
7 Conclusion	35

Chapitre 2 : Notions sur la CAO

<u>1</u> Introduction.....	37
2 Evolution de la CAO	39
2.1 Les Pères de la CAO.....	38
<u>2.2</u> La différence entre le DAO et la CAO	39
<u>3</u> Modélisation géométrique en CAO	39
3.1 Les courbes	39
<u>3.2</u> Différent types des courbes.....	40
3.2.1 Représentation de P. de Casteljaou.....	40
3.2.2 Cubiques paramétriques de J. Ferguson	41
3.2.3 Méthode d'Hermite	41
<u>3.2.4</u> Les splines.....	41
<u>3.2.5</u> Répartition de la valeur du paramètre.....	42
3.2.6 Les différents type splines	42
3.2.6.1 Splines non rationnelles, uniformes ou non uniformes.....	42
3.2.6.2 Splines rationnelles uniformes ou non uniformes (NURBS).....	42
3 Les surface	43
3.3.1 Carreaux de J. Ferguson.....	43
3.3.2 Carreaux de S. Coons	44
3.3.3 Surfaces triangulaires.....	44

3.3.4 Carreaux UNISURF	45
3.3.5 Surfaces splines non rationnelles et rationnelles	46
3.3.6 La représentation des objets surfaciques	46
3.4 La modélisation filaire	47
3.5 La modélisation volumique	47
4 Les différents logiciels de la CAO	49
5 Choix de logicielle INVENTOR	50
5.1 Présentation du logiciel Inventor	52
5.1.1 Interface d'utilisateur	52
5.1.2 L'interface lors d'un travail sur des esquisses 2D	53
5.1.3 L'interface lors d'une création d'une pièce en 3D	54
5.1.4 Interface d'utilisateur lors d'une création d'un assemblage	55
5.1.5 Interface utilisateur lors d'une mise en plan des pièces ou assemblages	55
5.2 Les fonctions d'Inventor	56
5.2.1 Simulation de mouvement intégrée	56
5.2.2 Définition des charges	57
5.2.3 Analyse par éléments finis intégrée	58
5.2.4 Analyse statique	58
5.2.5 Études paramétriques	58
5.2.6 Suivi de trajectoire	59
5.2.7 Graphes	60
5.2.8 Interfaçage	60
6 Conclusion	60

chapitre 3 : Étude et conception de la machine

1 introduction	63
2 Présentation de la machine	63
3 partie mecanique	64
4 Les éléments de système de projection thermique	67
5. Partie commande	68
5.1 Matériels utilisé	68
5.2 L'alimentation de la machine	68
5.3 Le moteur DC (Moteur à courant continue)	68

5.4 Les moteurs pas à pas	69
5.5 Les caractéristiques des moteurs pas à pas utilisé	69
6 Matériel Électronique	70
6.1 La carte mère Arduino Uno	71
6.2 Le pilote des moteurs pas à pas (Le Big easy drive)	71
6.3 Descriptions des broches	73
7. Programme hardware pour la reconnaissance des donnés de sorties.....	74
7.1 Arduino IDE	74
7.2 La communication série.....	75
8. Conclusion	76
Conclusion general	77
Annexe	78
Référence Bibliographiques	81

Liste des figures chapitre 1

Figure 1.1 machine de L'aérogommage.	6
Figure 1.2: Ebavurage	7
Figure 1.3: Galetage	8
Figure 1.4: Grenailage.....	9
Figure 1.5: fonctionnement d'une sableuse.	10
Figure 1.6: Microbillage.....	10
Figure 1.7: principe de polissage	11
Figure 1.8: principe d'écrouissage	12
Figure 1.9: Dépôt électrolytique.....	12
Figure 1.10: Argenture	13
Figure 1.11: Nickelage	13
Figure 1.12: Cuivrage.....	14
Figure 1.13: principe de projection thermique	14
Figure 1.14: Dépôt physique PVD	15
Figure 1.15: Dépôt chimique CVD.	15
Figure 1.16: schéma de Faisceaux énergétiques	16
Figure 1.17: Dordure	17
Figure 1.18: cuivrage.....	17
Figure 1.19: Etamage	18
Figure 1.20: Argenture	18
Figure 1.21: Galvanisation	19
Figure 1.22: Traitement antireflets	20
Figure 1.23 : principe L'anodisation.....	20
Figure 1.24 : reaction de sulferation.....	21
Figure 1.25 : Phosphatation	22
Figure 1.26 : Chromatations.....	22
Figure 1.27 : La projection à la flamme	28
Figure 1.28 :Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre	29
Figure 1.29 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil	30
Figure 1.30 : Schéma de principe de projection à tire contenue (HVOF)	31
Figure 1.31 : Schéma de principe d'un canon à détonation	31
Figure 1.32 : Principe de la projection à arc électrique entre deux fils	32
Figure 1.33 : Principe de fonctionnement d'une torche plasma.....	34

Liste des figures chapitre 2

Figure 2.1 : Diagramme de conception	37
Figure 2.2 : Dessin assisté par ordinateur	39
Figure 2.3: Courbe cubique	40
Figure 2.4: Représentation des courbes de P. de Casteljaou	40
Figure 2.5: Splines rationnelles uniformes ou non uniformes (NURBS)	43
Figure 2.6: Carreau de Ferguson	44
Figure 2.7: Surface triangulaire.....	45
Figure 2.8: Carreaux UNISURF.....	45

Figure 2.9: Modélisation surfacique.....	46
Figure 2.10: Modélisation filaire.....	47
Figure 2.11: Modélisation volumique	48
Figure 2.12 : Représentation de deux cubes en tant que primitive	48
Figure 2.13 : Différentes opération booléennes	49
Figure 2.14: Les différentes marques des logiciels de C.A.O.....	49
Figure 2.15 : Capture d'écran d'accueil du logiciel Inventor professional 2017.....	50
Figure 2.16 : Les différents types de fichiers dans Inventor	53
Figure 2.17 : Les outils pour un dessin en 2D.....	53
Figure 2.18 : Les outils pour une création d'une pièce en 3D.	54
Figure 2.19 : Les outils pour crée un assemblage	56
Figure 2.20 : apture d'écran d'un travail sur un assemblage	56
Figure 2.21 : Les outils pour la mise en plan des pieces et des assemblages.....	56
Figure 2.22: Simulation de mouvement intégrée	57
Figure 2.23: Définition des charges dans Inventor	57
Figure 2.24 : Analyse par éléments finis dans le logiciel Inventor	58
Figure 2.25 : Étude paramétrique dans le logiciel Inventor	59
Figure 2.26 : Suivi de trajectoire dans le logiciel Inventor	59
Figure 2.27 : Les graphes dans le logiciel Inventor	60

Liste des figures chapitre 3

Figure 3.1 : Dessin d'ensemble en 3D de la machine	64
Figure 3.2 : Modélisation 3D du support de la table	65
Figure 3.3 : Modélisation 3D du support coté	65
Figure 3.4 : Modélisation 3D du support de l'axe Z	66
Figure 3.5 : Modélisation 3D du support de l'axe Y	66
Figure 3.6: Modélisation 3D de la bus	67
Figure 3.7: Bouteille d'oxygène	67
Figure 3.8: Bouteille d'acétylène	68
Figure 3.9: Un moteur pas à pas bipolaire	70
Figure 3.10: La carte mère Arduino Uno	71
Figure 3.11: Le Big easy drive	72
Figure 3.12: Connexion des moteurs pas à pas avec les pilotes et la carte Arduino	74
Figure 3.13: Interface d'utilisateur d'Arduino IDE	75
Figure 3.14: Schéma de la communication série de notre cas	76
Figure A: Dessin technique de la buse	78
Figure B: Dessin technique du couvercle	79
Figure C: Dessin technique du raccord	80

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : les principales caractéristiques des techniques de projection thermique.....	33
Tableau 3.1 : Les caractéristiques techniques de la machine	63
Tableau 3.2: Les éléments de la machine.....	69
Tableau 3.3: Caractéristiques du moteur pas à pas	69
Tableau 3.4: Les composants de la carte Arduino.....	71
Tableau 3.5: Les composants du pilote du moteur pas à pas	72

Introduction générale

L'évolution croissante des éléments de machines pour répondre aux impératifs exigés à leurs fonctionnements en minimisant le maximum de défiance, met en évidence le choix adéquat et le procédé utiliser pour garantir ces caractéristiques exigées par les bureaux d'études. De ce fait les traitements de surfaces sont intervenu pour permettre d'augmenter la résistance des pièces ou de les protéger contre les aléas du temps. Dans ce contexte, il existe des procédés mécanique, chimique, électrochimique ou physique qui ont pour but de modifier l'aspect ou la fonction des surfaces des matériaux afin de l'adapter à certaines conditions d'utilisation. Ces derniers consistent aussi à substituer à la surface d'origine d'un composant, une nouvelle surface à propriétés mieux adaptées pour répondre aux besoins fonctionnels. Cette substitution peut faire appel à de nombreuses familles de matériaux : polymères, métaux, céramiques, ainsi qu'à de nombreuses techniques. On insiste plus spécifiquement sur les revêtements plus orientés vers les applications tribologiques, et de ce fait la mise en évidence d'une technique pour le revêtement par film mince passe automatiquement de la conception d'une machine qui peut apporter un plus dans notre environnement industriel. Cette conception passe par une procédure préétablis, à savoir répondre à un cahier de charge, l'avant-projet de conception et la faisabilité technique. Dans notre cas nous somme au stade de l'avant-projet de la conception d'une machine de projection par film mince, dans ce contexte on fait appel aux outils de conception assistés par ordinateur (CAO), qui met en évidence un certain nombre de paramètre pour le choix des techniques de calcul et de conception. Le choix d'une stratégie de calcul est dicté par la résolution de l'équation entre qualité et le cout financier. De ce fait le choix adéquat des outils de conceptions est primordial lorsque nous nous lançons dans l'étude et la conception d'une machine de type mécanique avec commandes assistés, comme dans notre cas met en évidence plusieurs défis de résolution pour l'engineering de conception. En effet la combinaison entre plusieurs systèmes peut induire des erreurs c'est pour cette raison que l'envoi d'instruction à la machine passe par un interfaçage machine ou matériel appelé « Interface Hardware », c'est ce dernier qui est utilisé pour faire fonctionner la machine tel que la carte mère, les types des moteurs et les pilotes des moteurs et aussi les étapes de fonctionnement de la machine. Entre autre nous devons vérifier que les différentes séquences envoyés à la machines sont correctes et ne sont pas erronés par des erreurs de programmation appelés les "Bugs". D'où la nécessiter de vérifier les entrer sortie sous vides avant utilisation sous charges. En ce qui concerne notre avant-projet nous avons opté pour Inventor 2017 pour

la conception de CAO et du matériel disponible ainsi qu'une interface open source pour réaliser les différents déplacements de la machine.

Le mémoire est organisé en trois chapitres distincts et une conclusion.

En ce qui concerne le chapitre 1, il traite de l'état des différents procédés et techniques utilisés à nos jours sur les traitements de surface et il met l'accent spécialement sur les procédés des revêtements par les films minces.

Le chapitre 2, traite des outils de CAO, et de son évolution. Nous mettons en évidence les différents modèles mathématiques. Il présente la structure des différents modèles filaire, surfacique et volumique. Entre autre il présente le logiciel Autodesk Inventor, qui sera l'outil choisi pour la conception de la machine.

Le Chapitre 3, traite de l'avant-projet de conception, dans lequel nous retrouvons la constitution de la machine et la démarche utilisée en vue de concevoir cette machine.

Chapitre I

Chapitre1

Les revêtements de surface

1. Introduction [1]

Les traitements de surfaces sont des procédés qui permettent d'augmenter la résistance des pièces ou de les protéger contre les aléas du temps comme la corrosion ou le fluage. Dans ce contexte, il existe des procédés mécanique, chimique, électrochimique ou physique qui ont pour but de modifier l'aspect ou la fonction des surfaces des matériaux afin de l'adapter à certaines conditions d'utilisation. Ces derniers consistent aussi à substituer à la surface d'origine d'un composant, une nouvelle surface à propriétés mieux adaptées pour répondre aux besoins fonctionnels. Cette substitution peut faire appel à de nombreuses familles de matériaux : polymères, métaux, céramiques, ainsi qu'à de nombreuses techniques. On insiste plus spécifiquement sur les revêtements plus orientés vers les applications tribologiques.

2. Les différents types de traitement de surface

2.1 Revêtements mécaniques

2.1.1 Aérogommage

L'aérogommage est un procédé de traitement de surface dérivé de la technique de sablage. Cela consiste en la projection d'un abrasif naturel à l'aide d'air comprimé à basse pression en vue du décapage ou nettoyage de surface¹. Quand de l'eau est ajoutée au mélange d'abrasif et d'air, on appelle cela de la « brumisation »; ne pas confondre avec l'hydro gommage qui correspond à la technique du sablage pour laquelle on utilise 80 % d'eau et 20 % de sable. Cette technique est mieux adaptée que le sablage aux travaux de précision et à l'emploi dans des endroits difficilement accessibles. Grâce à l'emploi de basse pression et à un choix d'une large gamme d'abrasifs, elle est efficace sur tout support. L'utilisation d'abrasifs de très faibles granulométries permet le respect total de nombreux supports. En exemple, il est possible de décaper un vernis ou une peinture le long d'une vitrerie sans qu'il y ait le moindre impact sur le verre lorsque l'abrasif est adapté (figure 1.1).



Figure 1.1 : machine de L'aérogommage

2.1.2 Ebavurage

Le moyen le plus simple pour ébavurer est l'abrasion manuelle, à la lime ou à la disquieuse. Une autre technique manuelle consiste à casser la bavure en la rabattant (éventuellement en plusieurs alternances) au moyen d'un outil. Pour une production en grande série de pièces de petites dimensions, l'ébavurage peut être automatisé. Les pièces sont alors brassées en présence de médias abrasifs de forme et de taille bien définies, en présence d'additifs chimiques ce qui permet d'entraîner les microparticules de métal et d'abrasif. Cette technique (tribofinition) permet aussi d'obtenir un bel état de surface général sur les pièces (polissage), comme indiqué par la figure 1.2.



Figure 1.2 : Ebavurage

2.1.3 Brunissage

Ce dernier désigne deux techniques bien distinctes, qui sont le brunissage chimique et mécanique.

➤ **Brunissage chimique**

Procédé d'oxydation superficielle des aciers obtenue par voie chimique, permettant l'obtention d'un aspect noir

➤ **Brunissage mécanique**

Technique de polissage utilisée en finition d'un revêtement métallique comme la dorure ou l'argenture ou d'une fabrication en argent, en or, en cuivre ou en alliage cuivreux.

2.1.4. Galetage

Est un procédé industriel réalisé en finition et super finition, et on distingue trois types de galetage (figure 1.3).

➤ **Galetage de renforcement**

Il est réalisé sur une pièce pour en augmenter la résistance à la fatigue, soit sur son ensemble soit sur les parties soumises à des concentrations de contraintes élevées. Cette opération favorise l'endurance de la pièce.

Exemple d'application : le galetage d'un vilebrequin (en fin d'usinage, on réalise un galetage aux bords des tourillons et des manetons pour réduire le risque de fissuration dans ces zones particulièrement sollicitées).

➤ **Galetage de super finition**

Le niveau de super finition est obtenu, sans modification de forme, par utilisation des galets à état de surface glacée. Application sur surface cylindrique, sphérique ou filetée pour en améliorer les flancs de vis.

➤ **Galetage de mise en forme**

Le galetage est un brunissage avec des galets pour modifier la forme initiale d'une pièce. Cette pièce est usinée en laissant une surépaisseur par rapport à la cote nominale, et le métal est repoussé en faisant rouler les galets dessus.

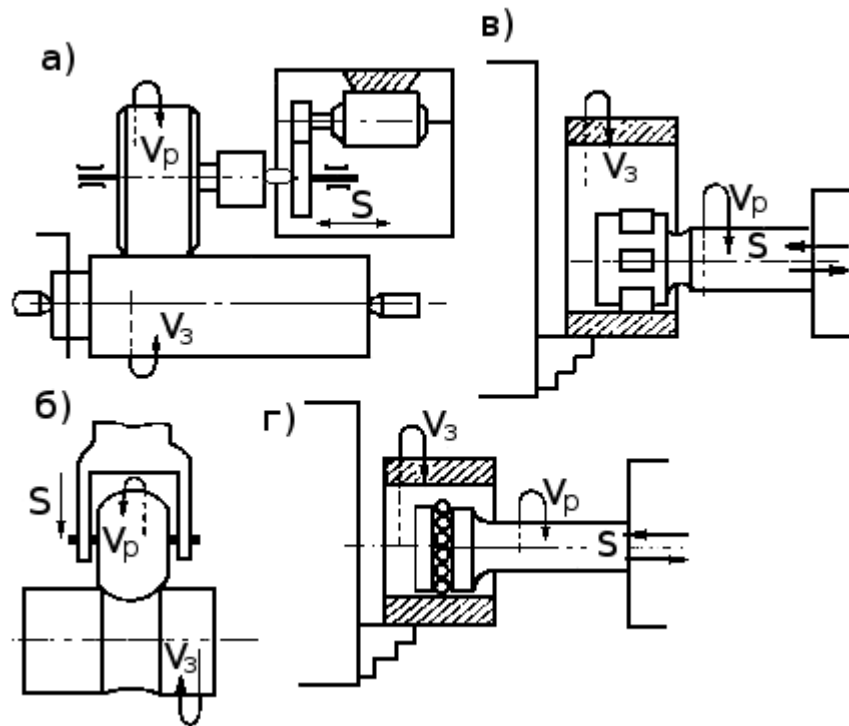


Figure 1.3 : Galetage

2.1.5 Grenailage

Le grenailage est une technique consistant à projeter, à l'aide d'une grenailleuse, des microbilles sur la surface d'un objet pour en modifier la structure superficielle. Le grenailage angulaire désigne aussi les décapages faits par projection de particules abrasives n'ayant pas la forme d'une bille (couramment appelé sablage) comme indiqué par la figure 1.4.

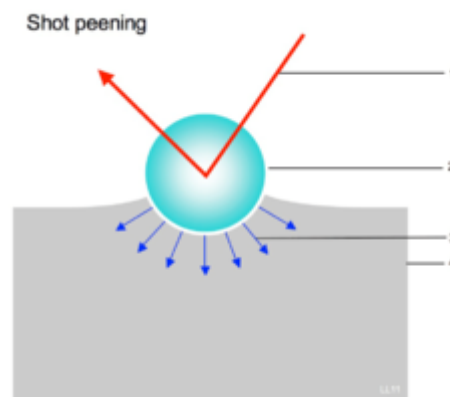


Figure 1.4 : Grenailage

2.1.6 Sablage

Le sablage est une technique industrielle de nettoyage des grandes surfaces en utilisant un abrasif projeté à grande vitesse à l'aide d'air comprimé au travers d'une buse, sur le matériau à décaper. Quand l'abrasif est constitué de billes, on parle aussi ou plutôt de grenailage.

Le sablage est utilisé dans de nombreuses industries ; c'est Une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposée sur un autre matériau. Ce dernier est appelé «substrat». Le but du dépôt en couches minces est de doter la surface des

Pièces de propriétés particulières tout en gardant le bénéfice des propriétés massives du substrat. également une technique de ravalement de façade (figure 1.5).

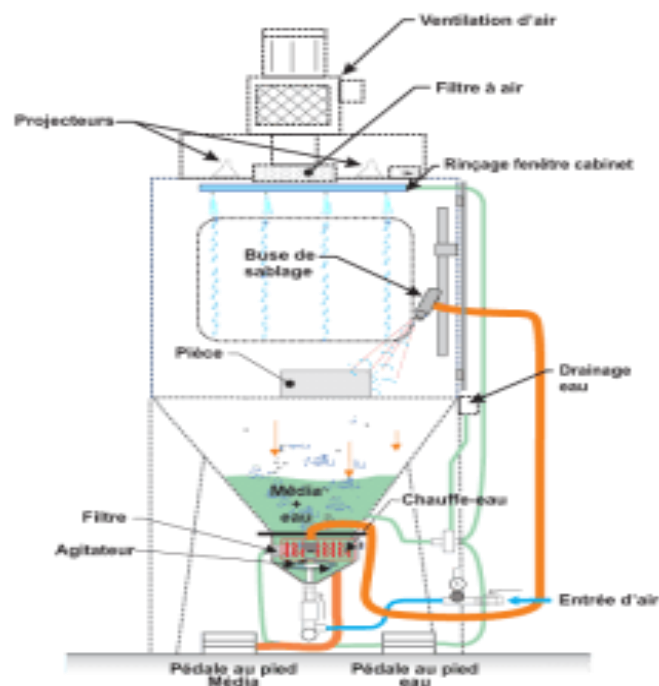


Figure 1.5 : fonctionnement d'une sabreuse

2.1.7 Microbillage

Le microbillage est un procédé de traitement de surface par impact. Il consiste à projeter des microbilles (généralement en verre) sur une surface, dans le but de la décaper sans l'abîmer. La surface obtenue est satinée brillante. On utilise le microbillage pour le nettoyage, le décapage de pièces mécaniques de toutes matières, ou pour réaliser une

finition esthétique sur l'inox ou les métaux non ferreux comme l'aluminium. Les applications du microbillage sont nombreuses et variées. Le microbillage se rapproche fort du sablage et s'effectue avec les mêmes machines, comme indiqué par la figure 1.6.



Figure 1.6 : Microbillage

2.1.8 Polissage

Le polissage ou poli est l'action de polir, de rendre lisse et éventuellement brillant par abrasion ou par écouissage comme indiqué par les figures 1.7 et 1.8. En ce qui concerne la technique d'abrasion ou polissage manuel c'est des machines (tribofinition, polisseuse automatiques) avec des vibrateurs ou des centrifugeuses satellitaires - avec des disques de différents matériaux tournant à grande vitesse, avec ou sans pâte à polir, ou par les techniques de tribofinition (création de mouvements relatifs entre pièces à polir et médias ou abrasifs en présence d'additifs). L'écrouissage consiste dans l'utilisation d'un brunissoir, polissage par vibration avec médias brunissant (billes et aiguilles d'acier

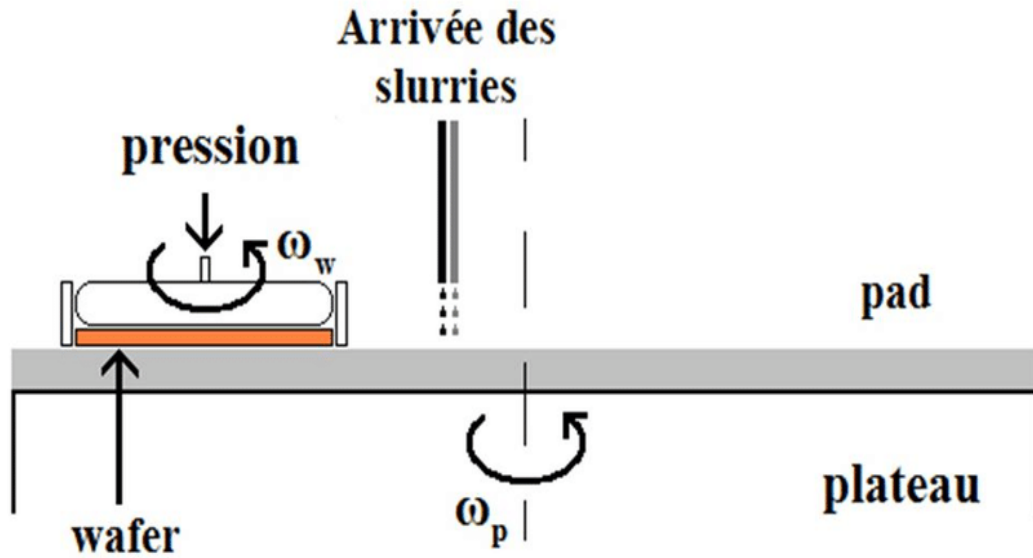


Figure 1.7 : principe de polissage

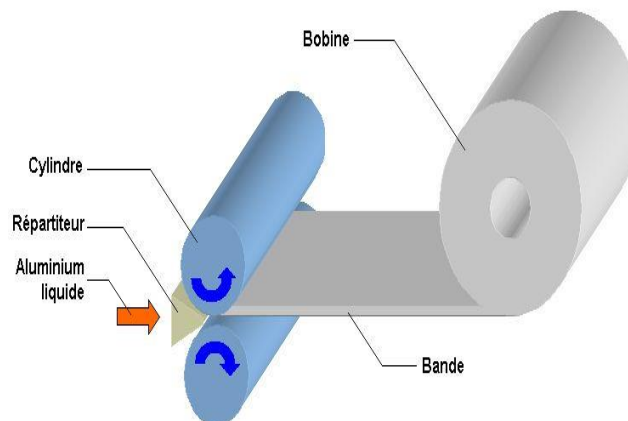


Figure 1.8 : principe d'écrouissage

2.2 Revêtement métallique

Une opération de revêtement consiste à recouvrir le métal d'une couche superficielle protectrice. Cette couche est généralement un alliage très souvent composé de zinc (particulièrement intéressant pour ses propriétés anticorrosives).

2.2.1 Dépôt par voie humide

➤ Dépôt électrolytique

C'est le principe de l'électrolyse utilisé pour appliquer au moyen d'un courant électrique continu, un dépôt métallique, à la surface d'un objet, le métal étant initialement sous forme de cations en solution dans un solvant (en général, l'eau). Cette technique est utilisée pour reproduire, orner ou embellir un objet, à partir d'un moule, soit encore pour en prendre l'empreinte.

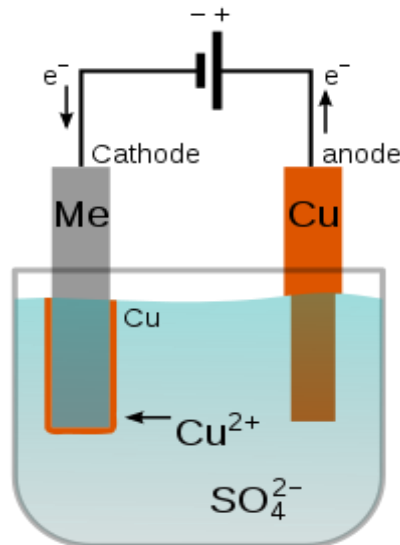


Figure 1.9 : Dépôt électrolytique

- Dépôt chimique statique
- ✓ Argenture

L'argenture est le dépôt d'une couche d'argent sur un support quelconque



Figure 1.10 : Argenture

✓ **Nickelage**

Le nickel a comme particularité d'être relativement inoxydable à l'air et permet de donner une apparence brillante et de qualité. Il s'emploie pour protéger contre la corrosion ou améliorer l'apparence de pièces en fer, en cuivre ou en laiton.



Figure 1.11 : Nickelage

✓ **Cuivrage**

Le cuivrage est une opération de revêtement par du cuivre, de la surface de pièces devant être protégées de l'oxydation ou devant recevoir un cuivrage préalable à un traitement incompatible avec la matière de la pièce, chromage de matières synthétiques par exemple.



Figure 1.12 : Cuivrage

✓ **Dépôt chimique dynamique**

Jet Métal est une technique innovante de métallisation par voie humide permettant un dépôt chimique dynamique, le procédé JetMetal permet de métalliser un substrat de n'importe quelle nature par projection simultanée de deux solutions aqueuses (concrètement un oxydant et un réducteur). La réaction d'oxydo-réduction à la surface du substrat permet de former un film métallique homogène et continu. La projection s'effectue à température ambiante avec un pistolet pneumatique.

2.2.2 Dépôt par voie sèche

- **Rechargement métallique**
- ✓ **Projection thermique**

La projection thermique fait partie des procédés industriels de traitement de surface avec apport de matière par voie sèche. Elle consiste à projeter à l'aide d'un gaz vecteur un matériau, généralement sous forme de poudre, à haute température et à grande vitesse, sur un substrat (surface de la pièce à revêtir) généralement métallique, afin de former un revêtement.

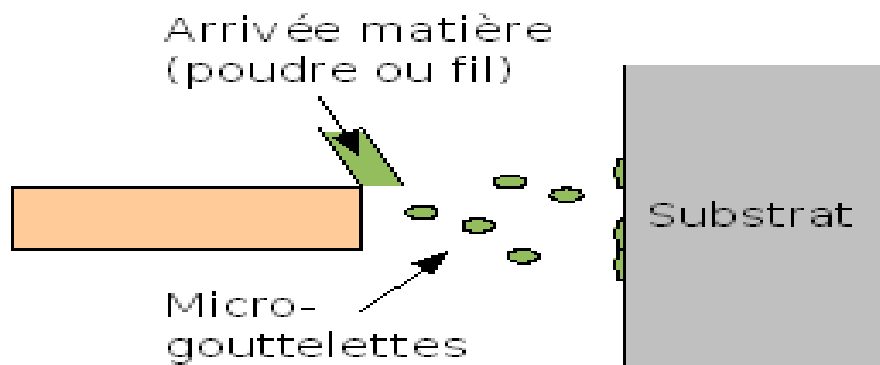


Figure1.13 : principe de projection thermique

- ✓ **Phase vapeur**
- **Dépôt physique PVD**

Le dépôt physique en phase vapeur (ou PVD pour l'anglais physical vapor deposition) est un ensemble de méthodes de dépôt sous vide de films minces

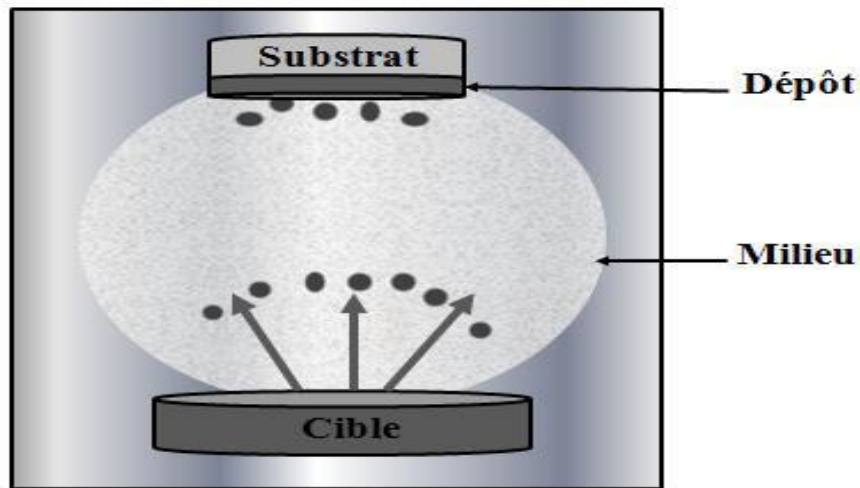


Figure1.14 : Dépôt physique PVD

- **Dépôt chimique en phase vapeur**

Le dépôt chimique en phase vapeur (ou CVD pour l'anglais chemical vapor deposition) est une méthode de dépôt sous vide de films minces, à partir de précurseurs gazeux.

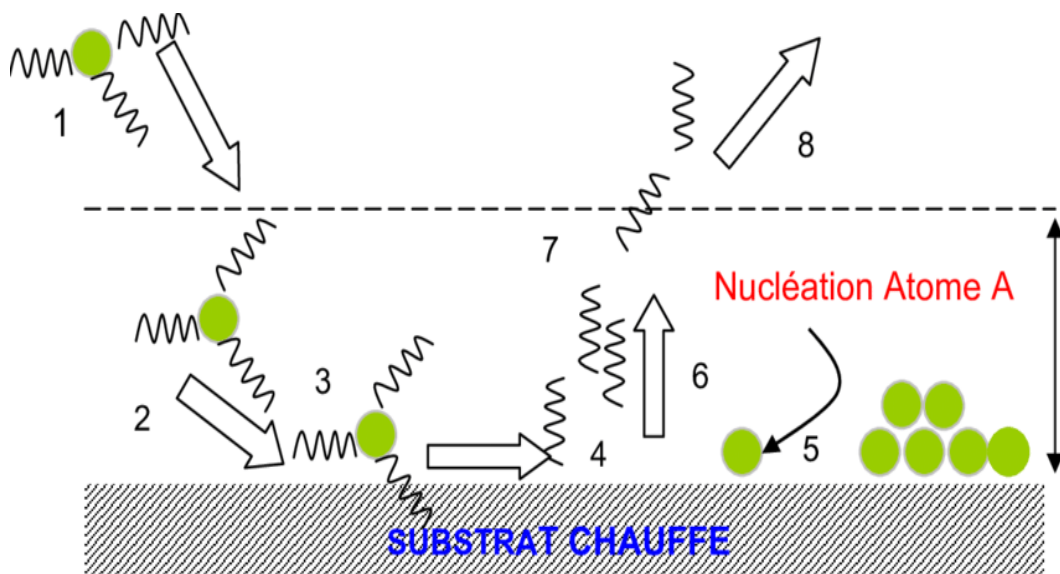


Figure1.15 : Dépôt chimique CVD

- **Faisceaux énergétiques**

Les traitements par faisceaux de matière ou d'énergie occupent une place de plus en plus importante dans l'éventail très large des techniques de traitement de surface. Ceci est lié aux

différents avantages offerts par ce type de traitements. En effet, l'utilisation de faisceaux, qu'ils soient de particules ou d'énergie, permet d'effectuer facilement des traitements localisés

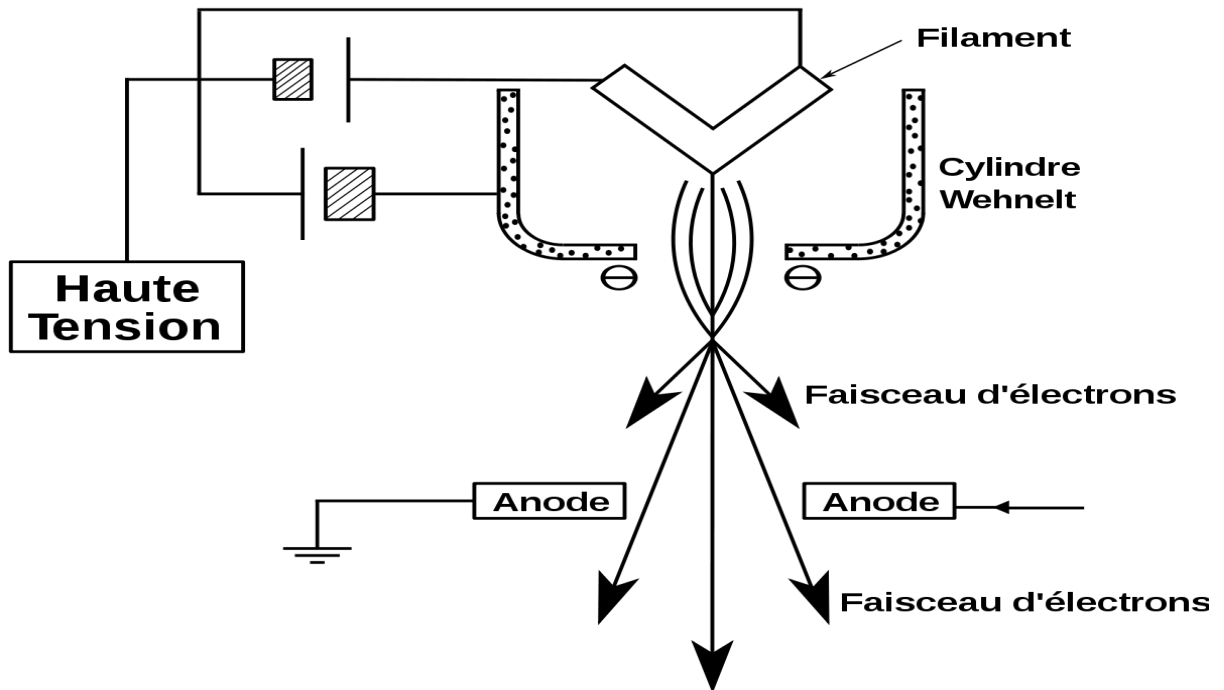


Figure 1.16 : schéma de Faisceaux énergétiques

- Application de feuilles métalliques

✓ Dorure

La dorure est une technique visant à rehausser les objets d'art, de culte ou précieux, en les recouvrant d'or. Elle est connue depuis l'Antiquité, notamment en Égypte antique



Figure 1.17 :Dordure

✓ **Cuivrage**

Le cuivrage est une opération de revêtement par du cuivre, de la surface de pièces devant être protégées de l'oxydation ou devant recevoir un cuivrage préalable à un traitement incompatible avec la matière de la pièce,



Figure1.18 : cuivrage

2.2.3 Dépôt par voie thermique

✓ **Etamage**

L'étamage est une opération de traitement de surface qui consiste à appliquer une couche d'étain sur une pièce métallique.

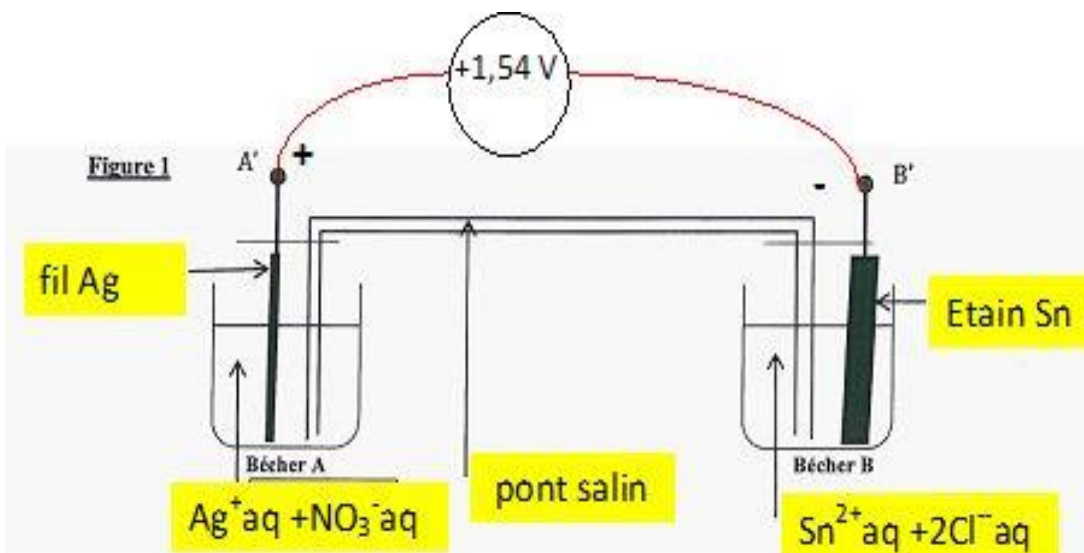


Figure1.19 : Etamage

✓ **Argenture au mercure**

Cette pratique a évolué au cours des siècles, et on dore encore au début du xxie siècle



Figure1.20 : Argenture

✓ **immersions en métal fondu**

L'immersion est l'action de recouvrir une pièce d'une couche de zinc dans le but de la protéger contre la corrosion. Le traitement est dit anticorrosif. Le mot vient du nom de l'inventeur Luigi Galvani (1737-1798), physicien et médecin italien ayant découvert le galvanisme le 6 novembre 1780.

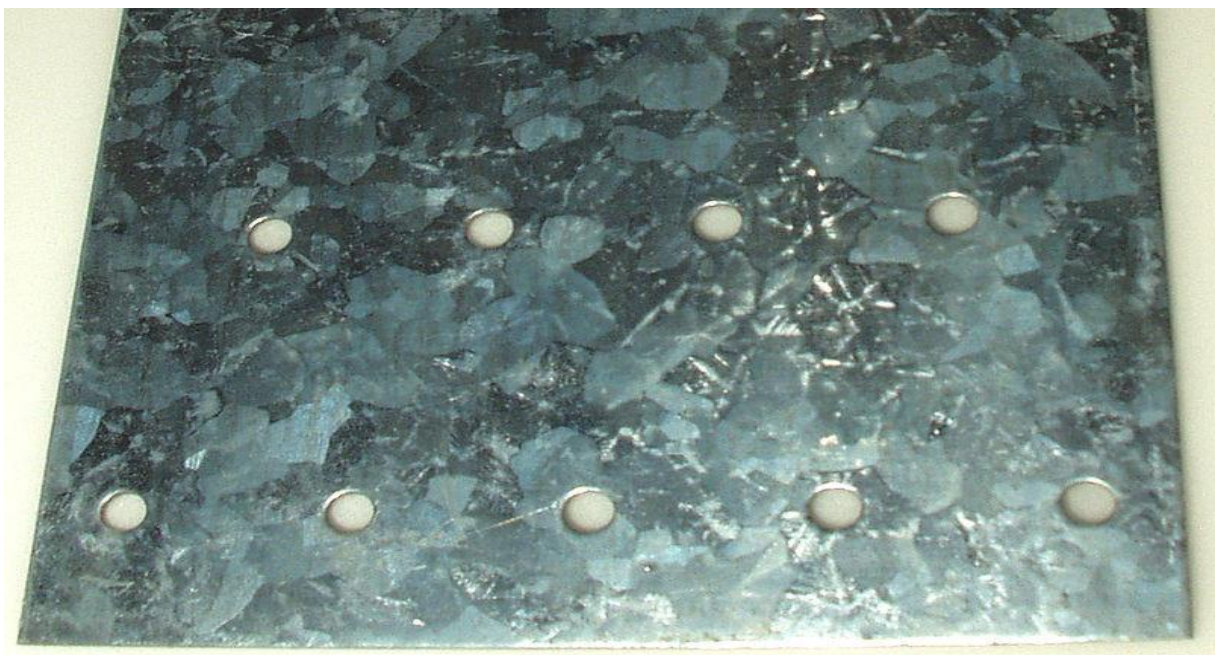


Figure1.21 : galvanisation

2.2.4 Dépôt par projection thermique :

✓ **L'hexa-plasma**

L'hexa-plasma ou protection plasma est un traitement thermique superficiel, à l'aide d'une torche à plasma de pièces en contact et soumises à des réactions de frottement, de roulement ou de corrosion.

✓ **Flam –plating**

Le flame-plating (placage à la flamme) est un procédé de projection thermique qui permet d'obtenir, en surface, pour n'importe quel métal, les propriétés du carbure de tungstène massif grâce à une projection à vitesse supersonique de particules sur la surface à revêtir. La force de projection est obtenue par une explosion.

2.2.5 Revêtement optique :

✓ **traitements antireflets :**

Un traitement antireflet est un traitement de surface permettant de diminuer la part de lumière réfléchi et donc augmenter la part de lumière transmise au travers d'un dioptre. Il existe plusieurs méthodes : certaines consistent à déposer un assemblage lamellaire de matériaux diélectriques en surface, d'autres à effectuer une corrugation de la surface du matériau. Ces deux techniques visent à diminuer voire annuler le coefficient de réflexion de la lumière sur un spectre donné de longueurs d'onde.

Peu présents avant les années 1970, les traitements antireflets sont aujourd'hui appliqués dans de multiples domaines de l'optique. Ils sont notamment utilisés sur les objectifs d'appareils photo, sur les verres ophtalmiques, et sur les lames optiques de laboratoire.

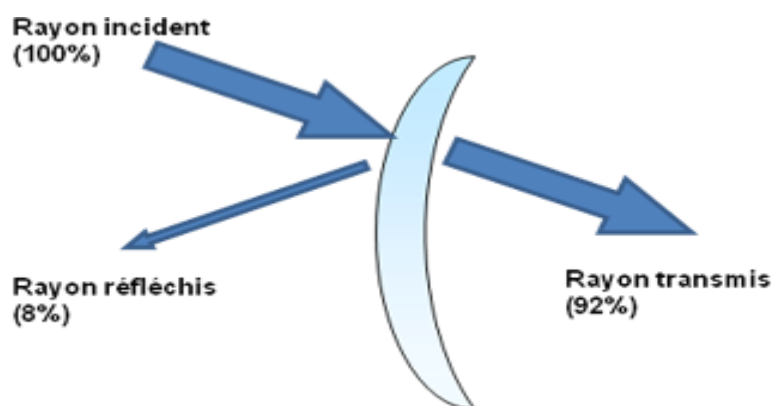


Figure1.22 : traitements antireflets

2.2.6 Revêtement de conversion

2.2.6.1 Électrolytique

✓ Anodisation

L'anodisation (appelé parfois éloxage, en Suisse Romande) est un traitement de surface (de type conversion) qui permet de protéger ou de décorer une pièce en aluminium (ou alliage) ou titane (ou alliage) par oxydation anodique (couche électriquement isolante de 5 à 50 micromètres). Elle octroie aux matériaux une meilleure résistance à l'usure, à la corrosion et à la chaleur. L'épaisseur varie en fonction de la destination du produit final.

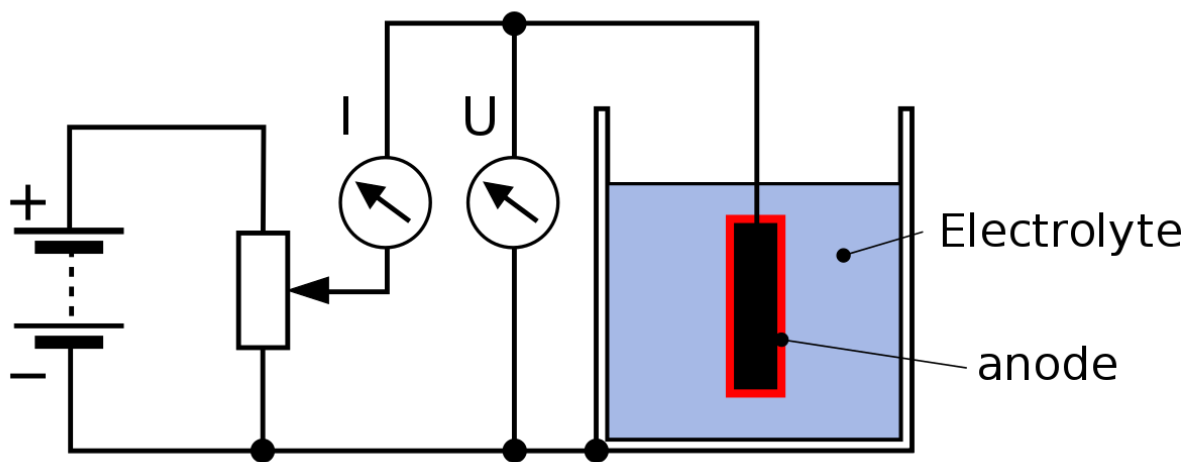


Figure1.23 : principe L'anodisation

✓ Sulfuration

La sulfuration est la réaction permettant d'introduire un ion sulfure dans une molécule ou un matériau. Ce procédé est largement utilisé pour convertir les oxydes en sulfures, mais tient aussi de la gestion de la corrosion et de la modification de surface.

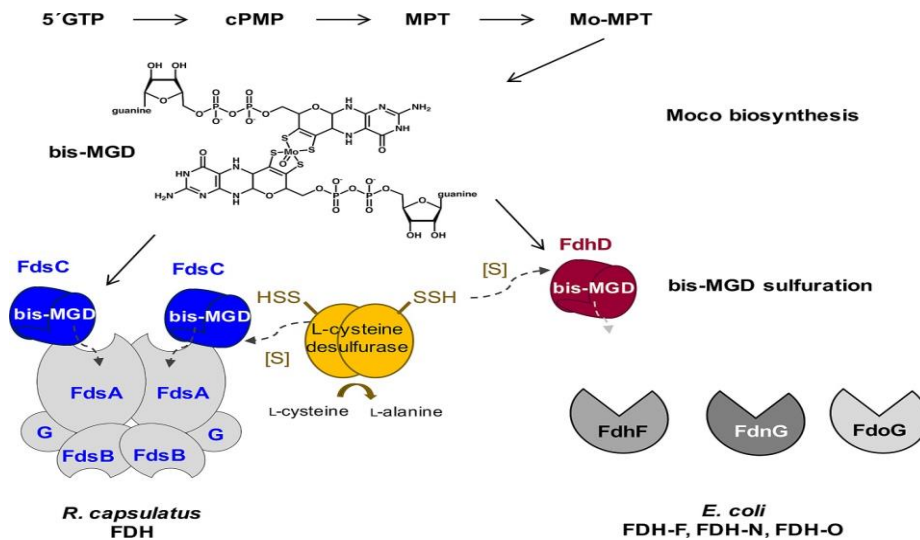


Figure1.24 :reaction de sulfuration

2.2.6.2 Chimique :

✓ Phosphatation

La phosphatation est une réaction chimique opérée au moyen d'un agent phosphoré. En métallurgie, la phosphatation est un prétraitement chimique de la surface de certains métaux, tel que l'acier, à l'aide de solutions contenant essentiellement de l'acide phosphorique et/ou des phosphates



Figure 1.25 : Phosphatation

✓ **Chromatations**

L'application des chromatations ou passivations se fait en général au trempé, intégré dans une ligne de zingage. Au trempé, les pièces subissent des traitements humides



Figure 1.26 : Chromatations

3. Les Films minces [2]

3.1 Définition

Une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposée sur un autre matériau. Ce dernier est appelé «substrat». Le but du dépôt en couches minces est de doter la surface des pièces de propriétés particulières tout en gardant le bénéfice des propriétés massives du substrat.

3.2 Bref historique de l'application des couches minces

Les couches minces sont utilisées depuis des centaines d'années. Anciennement, l'émaillage constitue un exemple de réalisation de couches minces sur des ustensiles divers.

Aujourd'hui, les couches minces sont utilisées dans des domaines d'applications aussi variés que la mécanique avec les couches abrasives ou résistantes à l'usure, l'optique avec les couches réfléchissantes (miroirs), le domaine électrique avec les couches conductrices métalliques et la chimie avec les couches protectrices contre la corrosion. Dans le domaine mécanique, l'utilisation des revêtements s'est généralisée, notamment pour améliorer la durée

de vie des outils de coupe. Un des premiers revêtements utilisés dans ce domaine a été le nitrure de titane

TiN au début des années 60. Les recherches effectuées sur les propriétés des outils de coupe (résistance à l'usure, résistance à l'oxydation, durée de vie) ont conduit à modifier la composition du revêtement par l'ajout d'autres éléments au binaire TiN. Nous pouvons ainsi citer l'ajout de l'aluminium qui a conduit à l'obtention de revêtements de nitrure de titane et

aluminium (Ti,Al)N. Ce matériau est l'un des objets de notre travail. Les propriétés structurales

(Structure atomique, microstructure) et mécaniques (ténacité, dureté) de ces revêtements entrent en jeu pendant le processus d'utilisation. Une meilleure compréhension de l'interdépendance entre ces deux types de propriétés influence de manière positive le choix des films en fonction de leurs domaines d'utilisation.

Le développement de la microélectronique a pour point de départ l'invention des premiers transistors à la fin des années 1940. Les premiers circuits intégrés sont apparus quelques années plus tard (1958) utilisant grandement les matériaux en couches minces tels que des couches métalliques, des couches semi-conductrices et des couches d'oxydes diélectriques.

Aujourd'hui, les couches minces sont utilisées dans une logique de miniaturisation des composants dans de nombreux domaines tels que l'électronique, l'optique, la photonique, le magnétisme dans ses applications pour les capteurs, les micro-actionneurs ou encore l'enregistrement magnétique (stockage de grande densité).

A l'ère des nanotechnologies, les objectifs industriels actuels convergent vers une structuration des couches minces à une échelle nanométrique de plus en plus petite.

3.3 Formation d'une couche mince

L'élaboration de couches minces se fait par plusieurs procédés. Les méthodes PVD (Physiques vapeur déposition) et CVD sont celles qui sont généralement utilisées. La formation d'un dépôt en couche mince se fait en trois étapes [3, 4, 5].

Etape n°1 : Synthèse des espèces

La synthèse ou la création des espèces à déposer, sous forme de vapeur ou plasma, se fait par évaporation ou par pulvérisation, respectivement.

Etape n°2 : Transport des espèces

Le transport de ces espèces de la source vers le substrat peut se dérouler sans collisions entre atomes et molécules si on est en régime de flux moléculaire où le libre parcours moyen est important [3]. En revanche, si la pression partielle du matériau et/ou des gaz de l'enceinte est assez élevée, il y aura de nombreuses collisions dans le plasma pendant le transport vers le substrat

Etape n° 3 : Dépôt sur le substrat et croissance de la couche

Lorsque les espèces (adatoms) arrivent un la surface des substrats, ils y perdent leur énergie graduellement [7]. Une condensation s'en suit pour former des îlots de nucléation stables. Les adatoms ont un degré de mobilité sur la surface qui dépend de leur énergie cinétique et de leur interaction avec la surface. Les îlots vont croître et se rejoignent pour former une couche continue: c'est la coalescence.

3.4. L'interface revêtement substrat

L'objectif d'un revêtement, ou d'une façon plus générale d'un traitement de surface, est de conférer à une surface d'un matériau des propriétés fonctionnelles données. L'interface entre le revêtement et le substrat détermine l'adhérence du dépôt. Il existe quatre familles d'interface [2], définies comme suit:

1- L'interface abrupte : Elle correspond à un changement brutal de composition chimique entre le dépôt et le substrat qui se fait sur une distance de 0.2 à 0.5nm. Ce type d'interface présente une très faible adhérence car elle est assurée, seulement, par les forces de Van Der Walls [3, 4].

2- L'interface de diffusion: elle est caractérisée par changement graduel de la composition chimique dans la zone d'interface. Une variation graduelle est aussi observée dans les propriétés mécaniques (module d'Young, coefficient de dilatation) ainsi qu'une diminution des contraintes résiduelles thermiques et mécaniques [4]. Ce type d'interface présente une bonne adhérence.

3- L'interface composée: elle résulte de la formation d'un composé chimique entre le dépôt et le substrat. Ce type d'interface nécessite une diffusion au préalable. La formation d'un nouveau composé peut provoquer des contraintes résiduelles mécaniques et éventuellement une formation de fissure à l'interface. Généralement ce type d'interface présente une bonne adhérence [4].

4- L'interface pseudo diffusion: elle est définie par un changement graduel de la composition chimique durant le dépôt à la surface [4]. L'adhérence est meilleure en cas de continuité dans la composition du revêtement et du substrat et dans les propriétés mécaniques.

Outre ces aspects, l'interface joue également un rôle thermique important. Le rôle de

La microstructure formée lors du dépôt est considérable. L'interface est une couche de transition hétérogène, siège de défauts, dislocations, lacunes et composés d'inter diffusion. Elle provoque aussi de fortes chutes de conductivité. Il faut signaler que le procédé d'élaboration des dépôts influe considérablement sur les propriétés des couches. Outre ces aspects, l'interface joue également un rôle thermique important. Le rôle de la microstructure formée lors du dépôt est considérable. L'interface est une couche de transition hétérogène, siège de défauts, dislocations, lacunes et composés d'inter diffusion. Elle provoque aussi de fortes chutes de conductivité. Il faut signaler que le procédé d'élaboration des dépôts influe considérablement sur les propriétés des couches [4].

3.5. Les propriétés des couches minces

Les fonctions préalablement attribuées à un revêtement doivent en définitif se traduire par des objectifs opérationnels, en lien avec des propriétés physiques quantifiables. Ainsi, il est possible de demander au système « Substrat + revêtement » de répondre au cahier des charges suivant :

- une ténacité élevée ;
- une parfaite adhésion sur le substrat ;
- une grande résistance à la formation et à la progression des fissures;
- une faible conductivité et diffusivité thermique;
- une haute résistance à l'oxydation;
- une épaisseur adéquate;
- une fonction barrière de diffusion [7]

3.6 Applications des couches minces

La mise en œuvre de technologies de fabrication de couches a conduit à de nombreuses applications dans des domaines très divers. Nous citons, sans être exhaustif, le domaine de la mécanique, des composants électroniques, celui des transducteurs pour capteurs, l'optique, la décoration. Selon le type d'application les procédés de fabrication sont plus ou moins complexes.

Nous allons expliciter ci-dessous ces principaux domaines

3.6.1. Couches de protection contre la corrosion et l'usure

Les dépôts en couches minces peuvent aussi être employés pour protéger ou renforcer une surface, métallique de pièces qui travaillent dans des conditions sévères. Parmi les méthodes d'élaboration de revêtements destinés à la protection des pièces contre la corrosion et l'usure, on peut citer :

- la cémentation,
- la nitruration (ionique et autre)
- la galvanisation
- PVD.

On va aussi trouver des applications des revêtements pour assurer non seulement une protection contre la corrosion, mais aussi un renforcement de la dureté de la surface, c'est par exemple le cas des lames de rasoir dont la surface est recouverte d'une microcouche de platine ou de titane. Certains forets sont recouverts d'une couche de titane qui leur confère une bien plus grande dureté avec un coût de fabrication bien moindre que s'ils étaient usinés intégralement en titane. Les outils de tour sont ainsi recouverts d'une couche de l'ordre du micron de nitrure de molybdène ou de titane obtenu par dépôts PVD. Dans le domaine de la tribologie les techniques d'évaporation réactive ou « ion - plating » sont susceptibles de conduire à des états de surface améliorés garantissant une diminution des frottements et donc d'une augmentation de la durée de vie des dispositifs en état de contact permanent tels que les engrenages.

3.6.2. Couches minces dans les composants et dispositifs électroniques

Trois matériaux ont été principalement utilisés. En premier lieu, l'aluminium qui se présente comme matériau facile à déposer par évaporation thermique. Il est bon conducteur de

l'électricité et facile à interconnecter. Il est, en outre d'un coût modique. C'est le matériau type exploité dans des circuits tels que les amplificateurs opérationnels.

4. Couches minces et optique :

En optique on va exploiter la technologie des couches minces pour plusieurs applications. On citera, entre autres, les cas des couches réfléchissantes et les couches « antireflet ».

a) Couches réfléchissantes

Dans le premier cas on va trouver les applications de type miroir plan, ou de forme complexe comme les réflecteurs de phare de véhicules automobiles. Ils sont effectivement des dispositifs métallisés sous vide et comportant une couche d'aluminium doublée d'une couche de silice, déposée par ion - plating. Immédiatement après le dépôt d'aluminium. Ce qui assure sa résistance aux conditions sévères d'utilisation.

b) Couches antireflets

Les couches antireflets et anti UV sont réellement des couches minces et souvent même très minces (<10nm) constituées d'empilement de divers matériaux. On les trouve en optique

5. Techniques de projection [8]

5.1 La projection à la flamme

La projection thermique utilisant l'énergie calorifique provenant de la combustion de gaz est connue sous le nom de la projection flamme. Les mélanges les plus utilisés sont : oxypropane, oxyacétylène qui donne des flammes oxycombustibles à des températures de 2800°C, 3100°C respectivement. Les matériaux qui fondent à une température inférieure à 2800°C, et qui ne se subliment pas, peuvent être projetés à la flamme

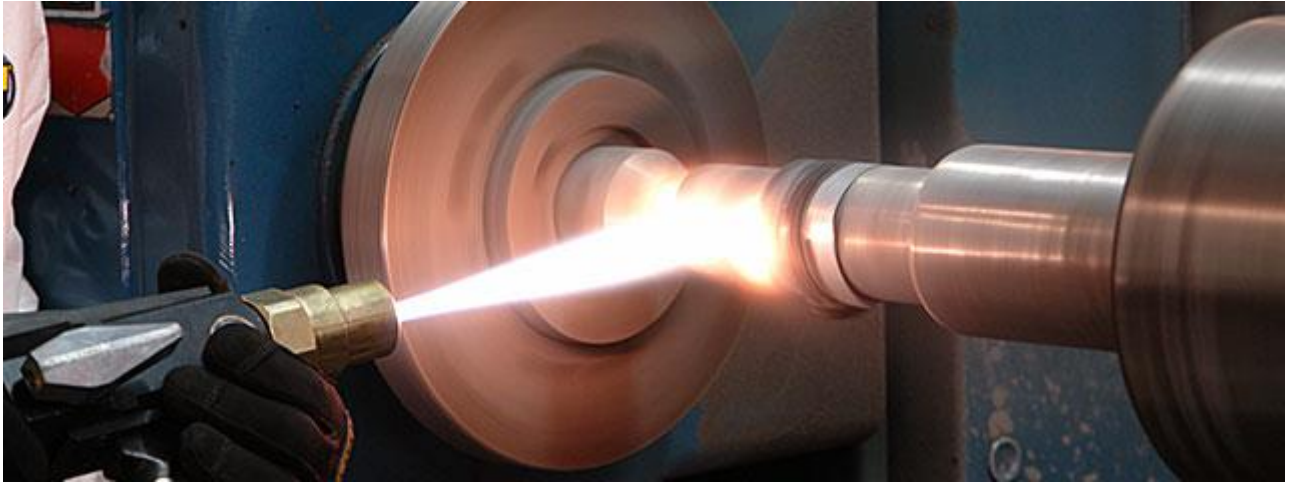


Figure1. 27 : La projection à la flamme

5.2 La projection flamme-poudre

Le matériau d'apport est introduit sous forme de poudre dans la flamme oxycombustible où il est accéléré grâce à l'énergie cinétique transmise essentiellement par le gaz porteur ou le gaz de soufflage de combustion

La poudre à projeter peut être un métal pur, un alliage, un composite, un cermet ou certaines céramiques à bas point de fusion. La température de fusion des matériaux utilisés doit être inférieure à 0,6 à 0,7 la température de la flamme ($T_{\text{fusion}} = 0,6 \text{ à } 0,7 T_{\text{flamme}}$).

En raison de la faible vitesse d'impact des particules projetées, de l'ordre de 30 à 50 m/s, les dépôts obtenus ont une faible adhérence (de l'ordre de 20 à 40 MPa) et une porosité relativement élevée (10 à 20%). Les matériaux les plus utilisés sont les alliages auto fusibles (alliages à base de Ni ou Co contenant du bore et/ou du silicium et les alliages à bas point de fusion. Pour les alliages auto-fusibles, la refusions et la liaison du dépôt avec le substrat, sont obtenues par un post-traitement de chauffage après projection. Les dépôts refondus sont denses et presque sans porosité. De plus, les oxydes sont éliminés grâce au bore et au silicium sur lesquels l'oxygène se fixe préférentiellement et qui diffusent ensuite vers la surface du fait du gradient de température

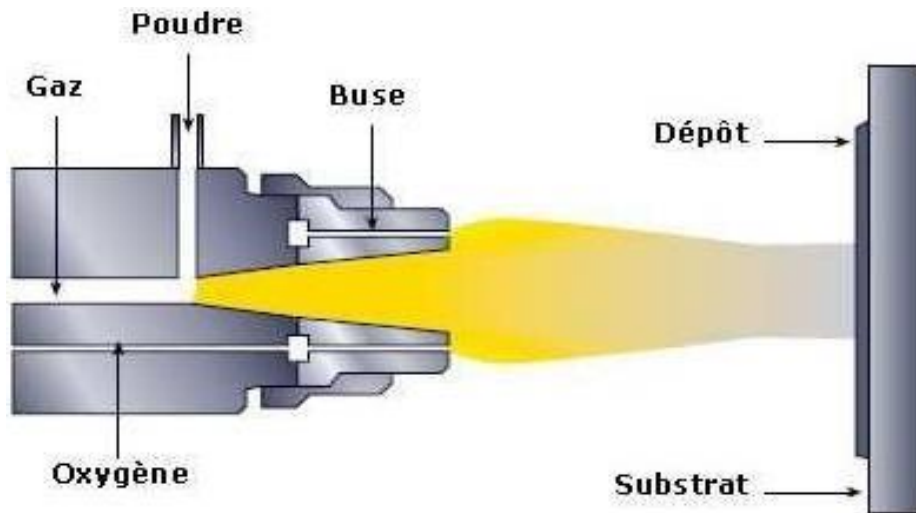


Figure1. 28 : Schéma de principe d'un pistolet flamme-poudre

5.3 La projection flamme-fil

Le matériau est conditionné sous forme de fil ou de tige et entraîné dans la flamme par des rouleaux placés à l'arrière de la torche. Ces rouleaux sont actionnés par un moteur électrique ou un moteur pneumatique. Une fois l'extrémité de la tige ou du fil fondue dans la flamme, un courant d'air comprimé l'atomise et projette les particules sur la surface du substrat à une vitesse pouvant atteindre 150 m/s. Les taux horaires de déposition varient de 1 à 30 kg/h selon le type du matériau projeté et le diamètre des fils ou des baguettes utilisés .

La température de fusion des matériaux peut atteindre 0,95 de la température de la flamme ($T_{\text{fusion}} = 0,95 T_{\text{flamme}}$). L'épaisseur des dépôts varie de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres.

Cette technique permet de projeter des métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Ni, Mo), des aciers et des alliages à base de Zn, Cu et de Ni sous forme de fils et quelques céramiques (Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, ZrO_2 avec stabilisants) sous forme de cordons ou de baguettes.

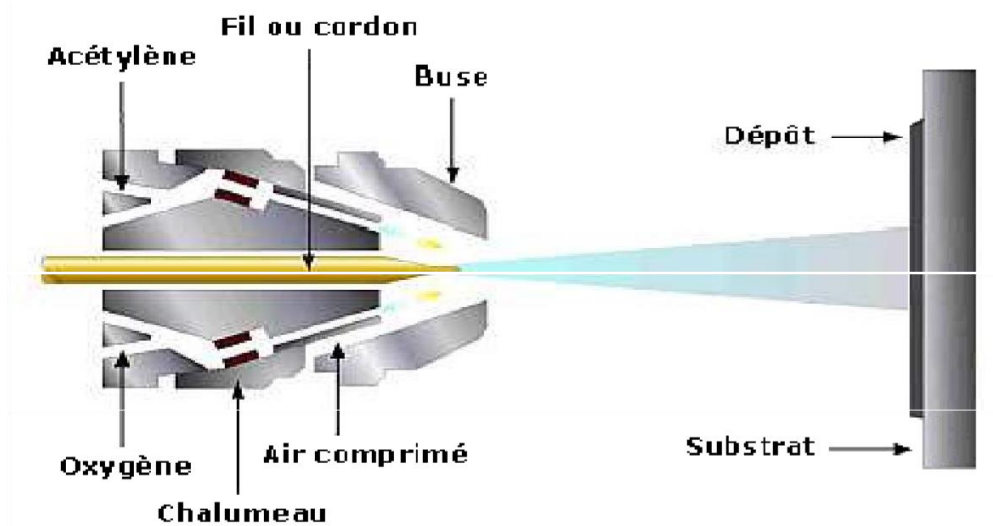


Figure 1.29: Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme-fil

5.4 Flamme hypersonique (communément désignée par l'acronyme anglais

HVOF: High Velocity Oxyfuel Flame)

Ce procédé utilise la combustion sous pression d'un carburant sous forme gazeuse (propane, propylène, acétylène, hydrogène) ou liquide (kérosène) avec de l'oxygène ou éventuellement de l'air en particulier pour le kérosène. Les gaz de combustion pénètrent dans la chambre de combustion à des pressions allant jusqu'à 1 MPa ce qui augmente légèrement la température de combustion .

La chambre est refroidie par une circulation d'eau. La flamme est ensuite accélérée dans une tuyère et acquière à la sortie de celle-ci une vitesse supersonique. La poudre à projeter est soit propulsée sous pression dans l'axe du jet (injection en amont de la tuyère) soit injectée au voisinage en aval de la tuyère à une pression proche de la pression atmosphérique. Les vitesses acquises par les particules peuvent atteindre 60 à 70 m/s et les dépôts réalisés présentent une bonne adhérence (de 70 à 100 MPa) et une faible porosité (2%). Les matériaux projetés sont essentiellement des cermets (WC-Co, Cr₃C₇-NiCr), des métaux, des alliages métalliques auto fusibles ou non

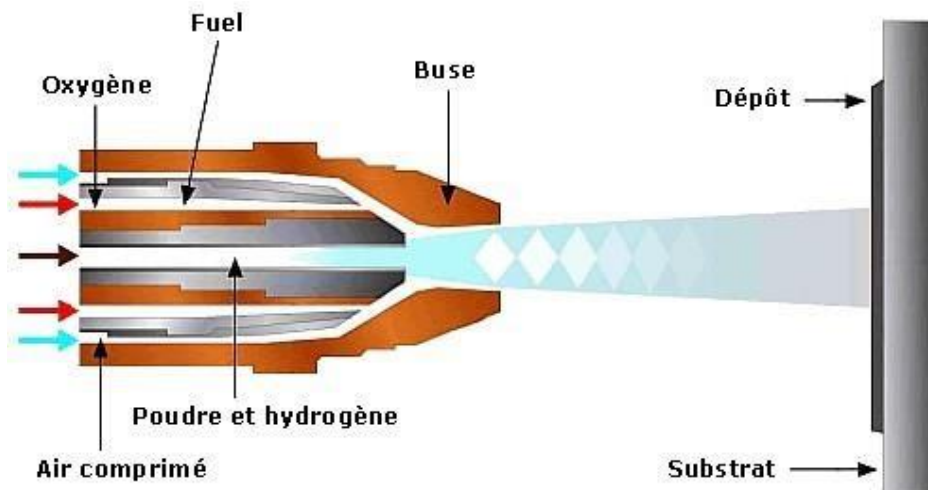


Figure 1.30 : Schéma de principe de projection à tire contenue (HVOF)

5.5 Canon à détonation

Cette technique de projection consiste à introduire le matériau d'apport sous forme de poudre, dans un tube fermé à une extrémité, en même temps que les gaz de combustion (généralement oxygène et acétylène). Ce mélange détoure grâce à une étincelle, les gaz brûlés sont balayés par de l'azote et les gaz explosifs frais réinjectés à la fréquence de 6 à 60 allumages par seconde. La poudre est chauffée et éjectée à très grande vitesse (950m/s) par l'onde de choc qui se propage dans le tube avec une surpression de l'ordre de 2 MPa.

Le régime de projection est discontinu. Les particules impactent dans un état plastique donc avec une oxydation très faible (moins de 0,1 % en poids). La densification du dépôt est excellente compte tenu de la vitesse d'impact

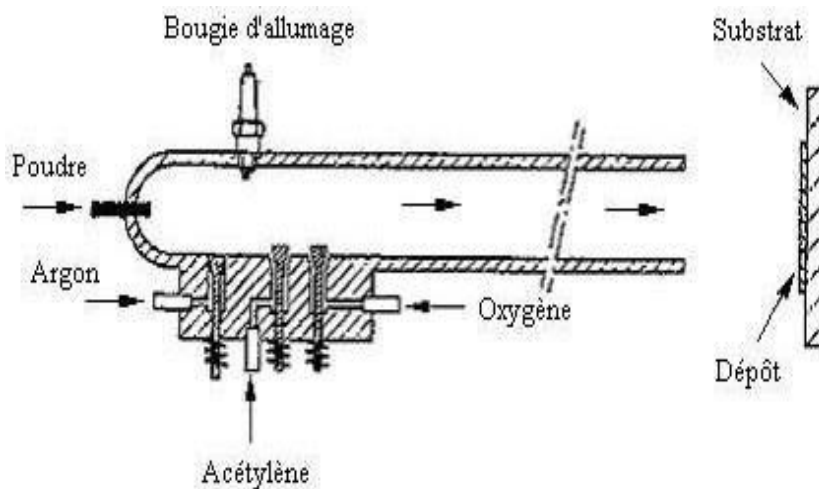


Figure 31 : Schéma de principe d'un canon à détonation

Ce procédé permet d'obtenir des dépôts très denses (porosité inférieure à 1%), avec une adhérence élevée (souvent supérieure à 80 MPa) et une rugosité faible ($Ra = \pm 3\mu m$). Les taux de dépôt sont compris entre 2 et 5 kg/h. Il est, cependant, peu répandu du fait de la complexité et du prix du matériel. Les revêtements par canon à détonation sont réservés aux pièces techniques nécessitant une qualité de dépôt optimale. Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont les carbures de chrome ou de tungstène avec un liant métallique (Ni ou Co), l'alumine et l'oxyde de chrome. Une des principales applications de cette technique est la protection de rouleaux d'imprimerie par le cermet WC-Co et le revêtement de têtes de foreuses

5.6 La projection à l'arc électrique

5.6.1 La projection à arc électrique entre deux fils

Le principe consiste à créer un arc entre deux fils métalliques agissant en tant que deux électrodes. Un jet d'air comprimé, situé dans l'axe du point de création de l'arc, propulse le métal fondu sur le substrat (Figure 32).

L'un des avantages de ce procédé est que les deux fils de nature différente peuvent être utilisés simultanément pour produire un pseudo alliage.

Les principales applications de la technique de projection à l'arc sont les revêtements résistants à la corrosion (zinc, aluminium).

Les propriétés des dépôts obtenus sont meilleures que pour la projection à la flamme, en raison d'une vitesse de particule plus élevée

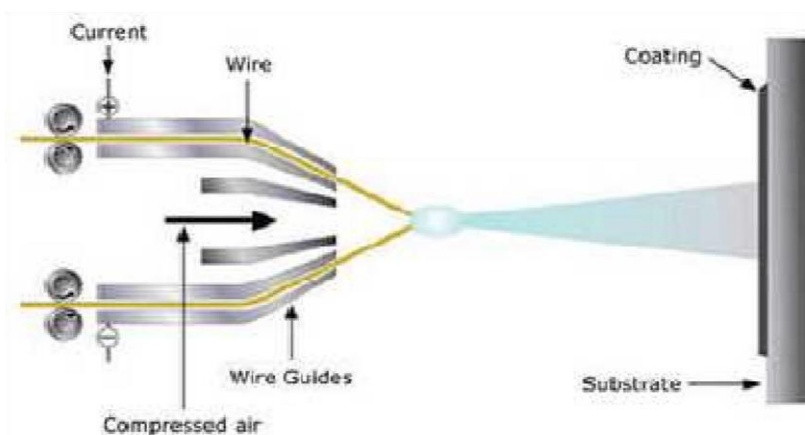


Figure 1.32 : Principe de la projection à arc électrique entre deux fils

5.7 La projection plasma

Le plasma est considéré comme le 4ème état de la matière. C'est un gaz ionisé constitué de molécules, d'atomes, d'ions et d'électrons, l'ensemble étant électriquement neutre. Un plasma Ar/H₂ sera ainsi constitué des espèces suivantes : Ar, H, H⁺, Ar⁺, e⁻.

Le procédé de projection plasma utilise comme source thermique un arc électrique éclatant entre une cathode et une anode dans un plasma gazeux, initié par une décharge haute fréquence en général. Le flux gazeux, ainsi porté à très haute température (12000 Co), est étranglé dans une tuyère, et s'échappe de la buse à vitesse élevée comprises entre 800 et 1200 m/s, suivant la densité du plasma et la nature des gaz. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie que l'on injecte le matériau d'apport sous forme de poudre véhiculée par un gaz porteur. Ce qui permet d'obtenir une bonne fusion et un bon étalement des particules à l'impact, qui elles, sont projetées à des vitesses de l'ordre de 200 à 250 m/s sur le substrat (figure 1.33)

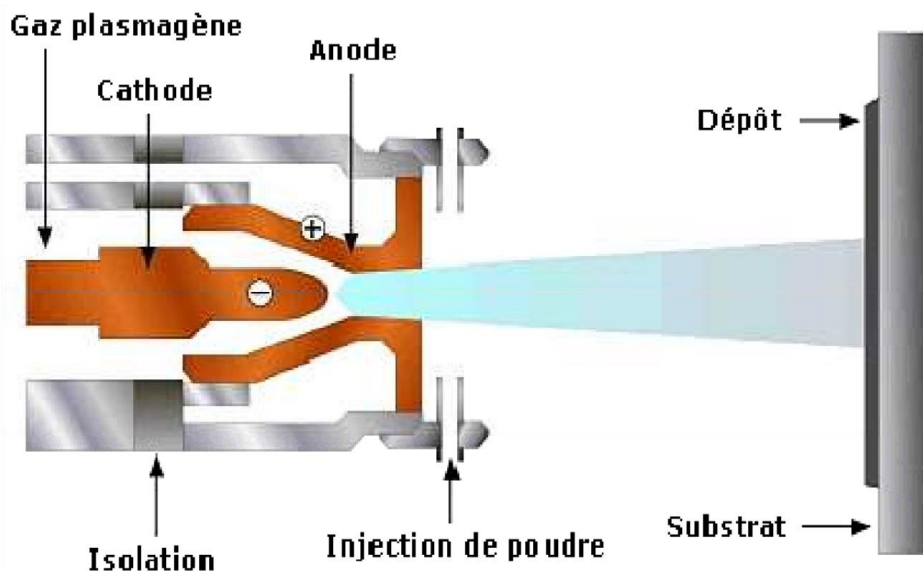


Figure 1.33 : Principe de fonctionnement d'une torche plasma

6 .Caractéristiques des différents procédés de projection thermique

Le tableau ci-dessous résume et compare les principales caractéristiques des techniques de projection thermique

Caractéristiques	Projection flamme	Arc électrique	plasma	HVOF	Canon à détonation
Température de flamme (°C)	3 000	6 000	12 000	3 000	3 000
Vitesse des particules (m/s)	40 à 150	250	200	700	950
Taux horaire de dépôt (Kg/h)	1 à 20	5 à 30	1 à 4	3 à 5	3 à 5
Rendement moyen (%)	50 à 70	80	70	70	70
Taux de porosité (%)	10 à 20	8 à 15	1 à 10	0.5 à 2	0.5 à 2
Force d'adhérence (MPa)	20 à 40	40	30 à 70	50 à 80	50 à 80
Épaisseur déposée (mm)	0.1 à 1.5	0.2 à 3	0.05 à 1.5	0.05 à 1	0.05 à 1

Tableau I : les principales caractéristiques des techniques de projection thermique.

7. Conclusion

Nous avons synthétisés dans ce chapitre les différents procédés des revêtements des surfaces, en passant par les techniques de revêtements mécaniques, chimiques, électrolytiques et les revêtements par films minces. Il s'avère que quel que soit le procédé utilisé, nous avons un aspect financier qui est mis en jeu. De ce fait les techniques standards (mécaniques, chimique ou électrolytiques) sont entrainés de faire place aux revêtements par films minces car pour les mêmes propriétés obtenus par les autres procédés nous pouvons le faire par les films minces tout en économisant les dépôts qui sont très onéreux, par contre la technique est complexe, d'où le fait d'investir pour une recherche de machines adéquates simple et pouvant faire des dépôts très résistants.

Chapitre II

Chapitre2

Notions sur la CAO

1. Introduction

L'étude ou la conception d'un produit met en évidence un certain nombre de paramètres pour le choix des techniques de calcul et de conception, ceux-ci est dû à la multitude des outils en dans le domaine de la conception assistée par ordinateur (CAO). Le choix d'une stratégie de calcul est dicté par la résolution de l'équation entre qualité et le cout financier. De ce fait le choix adéquat des outils de conceptions est primordial lorsque nous nous lançons dans l'étude et la conception d'une machine Dans ce contexte nous proposons un état des lieux des différents outils de CAO représenté par le diagramme de la figure 2.1

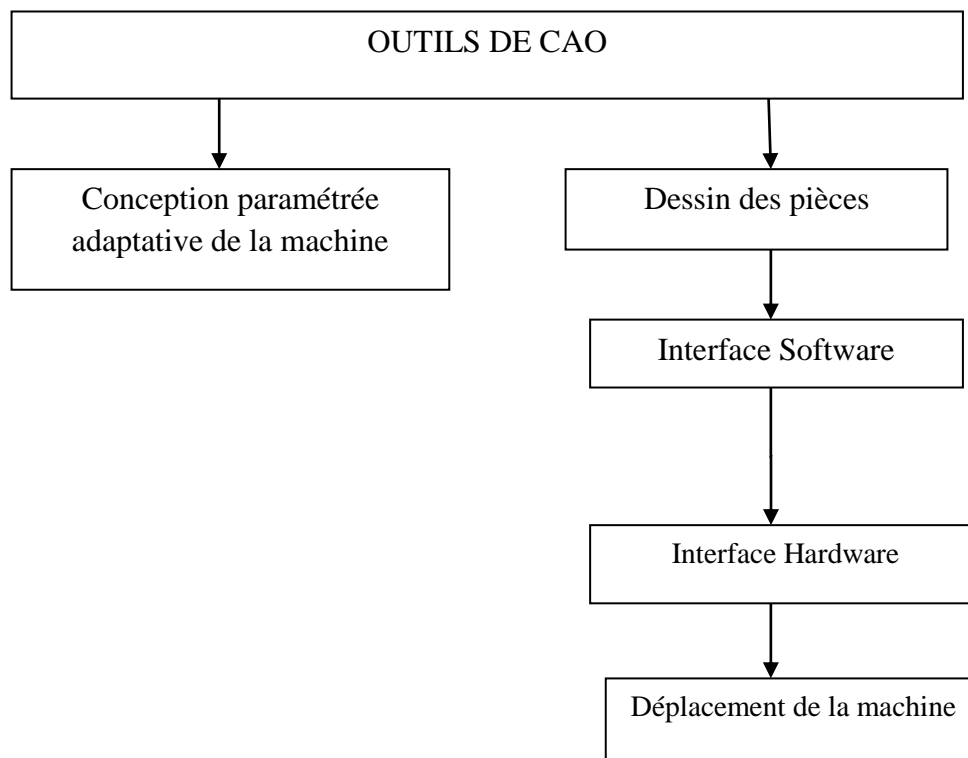


Figure 2.1: Diagramme de conception

2. Evolution de la CAO :

La conception assistée par ordinateur semble être une révolution récente, la plupart des logiciels de CAO, que les ingénieurs, les développeurs de jeux vidéos ou encore , les architectes utilisent

aujourd'hui datent de plus de 10 ans. La CAO en elle-même a commencée il y a plus de 50 ans. Les débuts de la conception technique moderne sont issus des développements de la géométrie descriptive qui a commencé au 16ème et 17ème siècle. Les méthodes de dessins techniques se sont améliorées avec l'introduction des machines à dessiner, mais la création de dessins d'ingénierie a en réalité très peu changé depuis la seconde guerre mondiale.

Dans les années 1950, le développement de l'informatique en temps réel a énormément progressé conjointement aux commandes numériques des machines-outils et à l'automatisation de la conception technique. Mais ce travail est le fruit de deux personnes en particulier, Patrick Hanratty et Ivan Sutherland, qui ont largement participé au développement de ce que nous appelons aujourd'hui la CAO ou Conception Assistée par Ordinateur.

2.1. Les Pères de la CAO

Patrick J. Hanratty est largement crédité comme "le Père de CAD". En 1957, il développe pour la société General Electric un programme PRONTO (Program for Numerical Tooling Operations) et le premier langage de programmation de contrôle numérique.

Quant à Yvan Sutherland, il présente en 1963 sa thèse de doctorat intitulée « Sketchpad » dans laquelle il développe le précurseur des programmes de conception assistée par ordinateur. Ce premier programme a comme caractéristique d'utiliser un crayon optique pour manipuler des objets affichés sur un écran cathodique. C'est le début de l'interface graphique et de la modélisation 3D.

Les années 1960 et 1970 ont apporté d'autres développements et plusieurs sociétés voient le jour afin de commercialiser les premiers programmes de CAO : Evans & Sutherland, Applicon, Computervision ou encore M&S Computing.

Avec l'émergence des stations de travail UNIX au début des années 80, les systèmes de CAO se développent énormément et sont surtout utilisés par l'aérospatiale, le secteur automobile et les industries.

L'introduction du premier Personal Computer par IBM, en 1981, ouvre la voie à l'utilisation à grande échelle de la Conception Assistée par Ordinateur. L'année suivante, un groupe de programmeurs créent Autodesk, et en 1983 ils réalisent AutoCAD, le premier programme de CAD importante pour l'IBM PC.

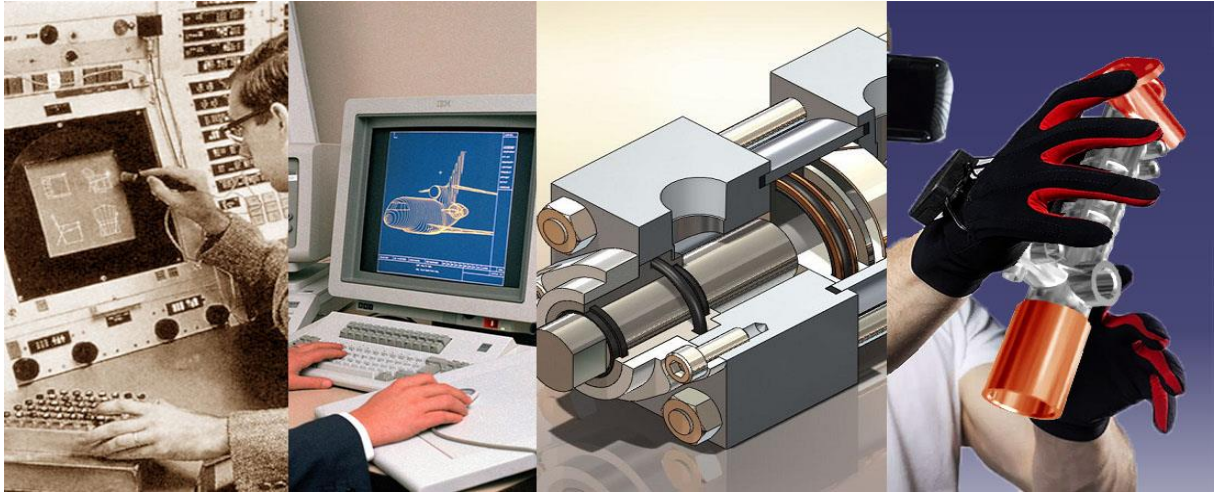


Figure 2.2 : dessin assisté par ordinateur

2.2. La différence entre le DAO et la CAO :

On confond souvent CAO et **DAO** (dessin assisté par ordinateur) : **la CAO** n'a pas pour fonction première l'édition du dessin. Il s'agit d'un outil informatique souvent lié à un métier, fonctionnant en langage dit objet, et permettant l'organisation virtuelle de fonctions techniques. Cela permet ensuite la simulation de comportement de l'objet conçu, l'édition éventuelle d'un plan ou d'un schéma étant automatique et accessoire. En **DAO**, un trait est un trait et le logiciel ne permet pas l'interprétation technique de l'ensemble.

3. Modélisation géométrique en CAO

Nous abordons dans ce paragraphe, de manière succincte, quelques notions fondamentales de la CAO. Nous nous focalisons sur les concepts mis en œuvre dans les approches géométriques proposées.

3.1. Les courbes

Après quelques tentatives de représentation à l'aide des séries de Fourier (Fayard) ou des formes cartésiennes (Inaba) la représentation universellement employée maintenant est celle des fonctions paramétriques polynomiales rationnelles ou non rationnelles, qui avaient fait l'objet des travaux d'Isaac Schönberg après 1940, mais sur lesquelles l'attention de l'industrie n'avait guère été attirée, car il n'existait pas encore alors de moyens de calcul assez rapides pour justifier une application pratique.

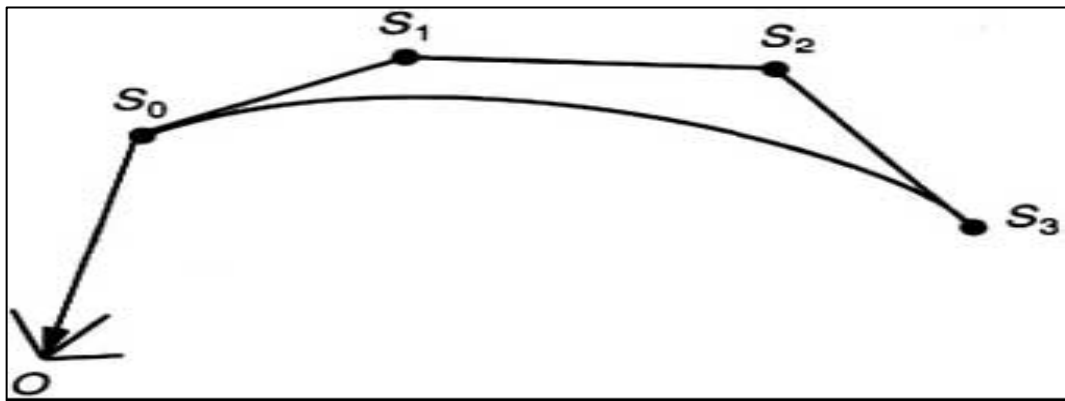


Figure 2.3 : Courbe cubique

3.2. Différent types des courbes

3.2.1. Représentation de P. de Casteljau

Dès 1958, Paul de Casteljau, mathématicien chez Citroën, réalisa des travaux remarquables, mais ceux-ci ne furent publiés sous forme détaillée qu'en 1985, en raison de la discrétion qui était traditionnelle dans cette entreprise. Sous sa forme la plus simple, la représentation d'un arc de courbe compris entre les valeurs 0 et 1 d'un paramètre u s'exprime par l'équation 1, et représenté par la figure 3.2 :

$$P(u) = \sum_{i=0}^3 s_i \cdot \beta_{i,3}(u) \quad (2.1)$$

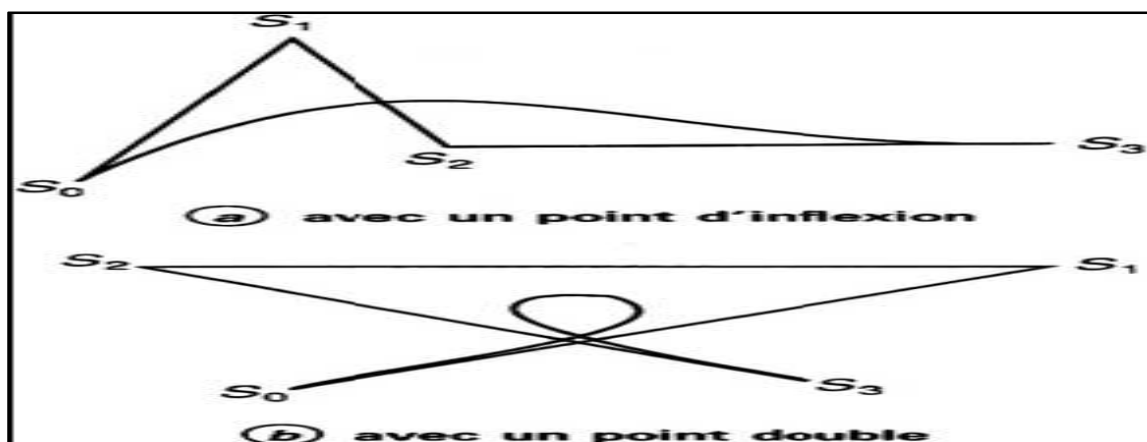


Figure 2.4 : Représentation des courbes de P. de Casteljau

3.2.2. Cubiques paramétriques de J. Ferguson

En 1964, James Ferguson, de chez Boeing, a publié, dans le Journal of the Association for Computing Machinery (JACM), une étude sur les surfaces paramétriques dans laquelle un arc de courbe paramétrique, limité par les valeurs 0 et 1 du paramètre, et de degré trois, est défini par les conditions aux limites et exprimé par l'équation suivante :

$$P(u) = \sum_{i=0}^3 a_i \cdot u^i \quad (2.2)$$

3.2.3. Méthode d'Hermite

Le principe de la méthode d'Hermite peut s'appliquer à la définition d'une courbe de degré m astreinte à passer par $(m + 1)$ points dont les coordonnées sont connues dans un espace bidimensionnel ou tridimensionnel. On attribue à chacun une valeur du paramètre, comprise entre 0 et 1, et qui croît en fonction du rang dans l'ordre de passage par les points. La forme générale de cette méthode est exprimée par l'équation suivante :

$$P(u) = \sum_{i=0}^3 b_i \cdot u^i \quad (2.3)$$

3.2.4. Les splines

Le mot anglais spline a malencontreusement prévalu, alors qu'il se traduit en français par les substantifs latte ou baguette. En imaginant les diverses théories des splines, leurs auteurs ont voulu créer un système automatique dans lequel une courbe ou une surface sont astreintes à passer par des points bien définis. Une spline est constituée par la juxtaposition d'arcs de courbes paramétriques polynomiales reliant deux points de passage consécutifs ; le raccordement entre deux arcs est assuré naturellement en leur extrémité commune, origine pour l'un et extrémité pour l'autre, par l'égalité des pentes, et éventuellement des courbures ou même d'un raccordement à un ordre plus élevé. Cette continuité peut être garantie par l'égalité de leurs dérivées successives, mais cette condition suffisante n'est pas nécessaire pour assurer la continuité géométrique, celle que recherchent les utilisateurs dans l'industrie ; en effet, pour que deux arcs soient tangents en leur point de raccordement, il suffit que leurs vecteurs dérivées soient colinéaires, c'est-à-dire proportionnels sans être forcément égaux ; cette liberté se retrouve, sous une forme un peu plus compliquée, quand il s'agit d'osculon

3.2.5. Répartition de la valeur du paramètre

Entre les points extrêmes d'une spline, il est simple d'avoir une variation d'un seul paramètre, qui passe de façon continue d'une valeur t_0 à t_m lorsqu'il existe $(m + 1)$ points de passage ; ces valeurs peuvent être respectivement 0 et 1, mais ce n'est pas obligatoire.

3.2.6. Les différents type des Splines

3.2.6.1 Splines non rationnelles, uniformes ou non uniformes

Un point d'un arc de courbe Spline est défini par l'expression :

$$P(u) = \sum_{i=0}^m b_i \cdot u^i \quad (2.4)$$

Les coefficients s_i sont des vecteurs ayant une origine quelconque et une extrémité constituée par leur point de définition ; la somme des fonctions F étant identiquement égale à 1, cela explique pourquoi l'origine commune des vecteurs s peut être située n'importe où et pourquoi la forme d'une courbe ne varie pas lorsque la collection de ses points de définition subit, en bloc, une translation ou une rotation.

3.2.6.2. Splines rationnelles uniformes ou non uniformes (NURBS)

Excepté les paraboles, une spline non rationnelle ne peut représenter exactement une conique ; on peut considérer que c'est un défaut, bien qu'une cubique soit capable d'en fournir une acceptable approximation. C'est pourquoi on a étudié les formes rationnelles qui remédient à cet inconvénient.

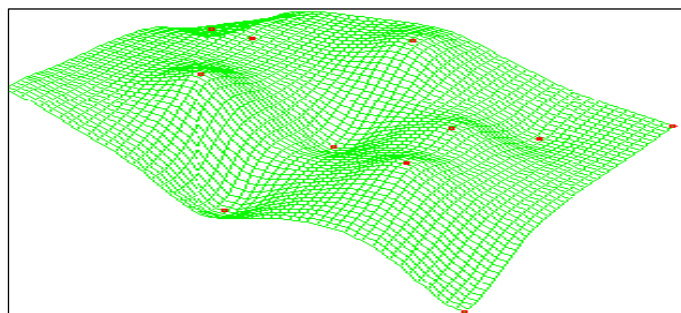


Figure 2.5 : Splines rationnelles uniformes ou non uniformes (NURBS)

3.3. Les surfaces

Parmi les premiers travaux accomplis en France à propos de la CFAO, il faut citer ceux de Jean-Marc Brun et Michel Théron, chercheurs à la faculté d'Orsay vers 1965. Leur solution était fondée sur la combinaison booléenne de solides définis par des droites et des cercles. Cette méthode se prêtait mal à la description d'objets ayant des formes plus variées, tels par exemple des avions, les coques de bateaux, les aubes de turbines, les carrosseries d'automobiles, etc. On ne cite cette solution que pour mémoire et la suite de la présente étude se limitera à celle des solutions paramétriques. Les applications industrielles sont différentes selon qu'il faut traiter de la dynamique des fluides, de la mécanique des milieux

3.3.1. Carreaux de J. Ferguson

La méthode a été exposée par James Ferguson, ingénieur chez Boeing, dans le *Journal of the Association for Computing Machinery* (JACM) en avril 1964. Le contour d'un carreau est défini par quatre cubiques paramétriques $P(u, 0)$, $P(u, 1)$, $P(0, v)$ et $P(1, v)$. En chaque coin, on connaît donc les dérivées partielles paramétriques. Pour compléter la définition, on choisit arbitrairement en chaque coin une dérivée mixte : $\frac{\partial^2}{\partial u \partial v}$

On possède alors les seize conditions qui déterminent les coefficients a de l'expression suivante :

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} \cdot u^i v^j \quad (2.5)$$

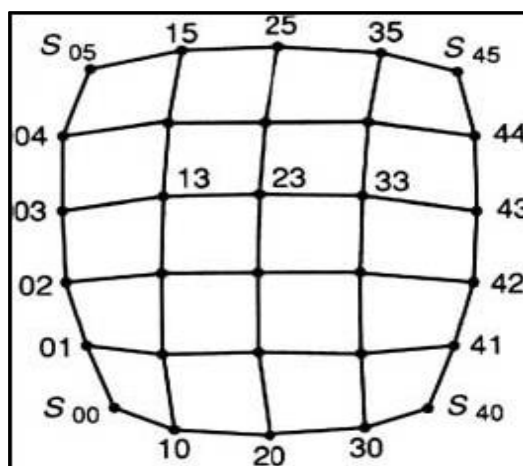


Figure 2.6 : Carreau de Ferguson

3.3.2. Carreaux de S. Coons

Steven A. Coons, enseignant alors au MIT, reçut d'un grand constructeur d'automobiles, au début de la décennie de 1960, la mission suivante : « Sur la maquette d'une carrosserie de voiture, on a tracé des lignes, planes ou gauches, formant un carroyage. Les quatre côtés d'un carreau étant des courbes paramétriques préalablement définies, déterminer les points internes du carreau n assurant son raccordement tangentiel avec ses voisins. »

3.3.3. Surfaces triangulaires

Quand une surface est de forme très irrégulière, comme c'est le cas, par exemple, pour un levé topographique, ou lorsque les points, dont on a mesuré les coordonnées cartésiennes à l'aide d'un procédé mal adapté, forment un réseau plus ou moins irrégulier, la première opération consiste à relier les points trois à trois en prenant comme critère leur distance cartésienne ; on emploie pour cela l'algorithme de Delauney. Ensuite, on transforme les facettes triangulaires planes en surfaces élémentaires gauches tangentes entre elles.

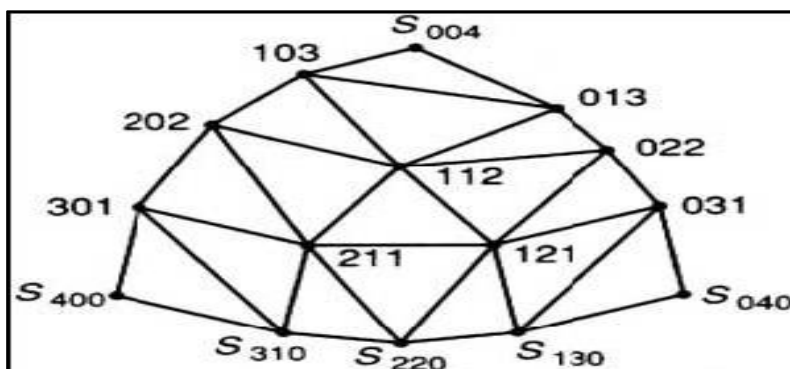


Figure 2.7 : Surface triangulaire

3.3.4. Carreaux UNISURF

Par analogie avec la représentation des courbes, un carreau est déterminé par un réseau caractéristique dont les mailles quadrangulaires ne sont pas forcément planes et dont les paramètres sont traités par des fonctions qui ne sont pas obligatoirement du même degré. La numérotation des sommets du réseau de la figure 3.6 montre que la surface est du quatrième degré par rapport à u et du cinquième par rapport à v .

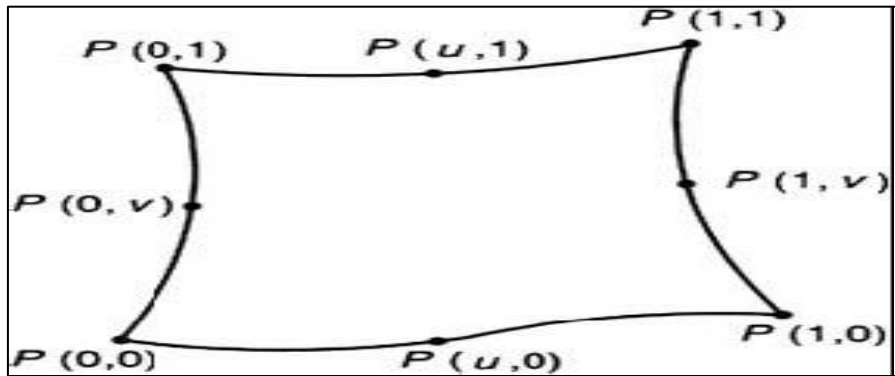


Figure 2.8 : Carreaux UNISURF

3.3.5. Surfaces splines non rationnelles et rationnelles

De même qu'une courbe spline est déterminée par un polygone caractéristique dont les sommets sont les points de définition, un carreau spline est déterminé par un réseau caractéristique. Les conditions de raccordement sont tirées directement de celles qui concernent les courbes, qu'elles soient non rationnelles ou rationnelles

3.3.6 La représentation des objets surfaciques

Cette modélisation est le premier outil du concepteur de formes car elle prend en compte la notion de surface dont elle permet la représentation et la manipulation.

Un objet est défini par son enveloppe, ses surfaces-frontières. On gère les intersections de surfaces et on applique des règles de contrôle topologique (ouvert/fermé, intérieur/extérieur) pour « créer » des objets.



Figure 2.9 : Modélisation surfacique

C'est le premier niveau de modélisation qui permet de traiter les parties cachées. Il existe deux types de modélisation surfacique : par facettes planes et par surfaces gauches.

- **par facettes planes**

C'est la méthode la plus couramment utilisée en surfacique. L'objet y est représenté par des facettes. On habille une structure filaire avec ces facettes polygonales planes (ou « carreaux »). Il est possible d'obtenir une visualisation correcte de l'objet en utilisant un grand nombre de facettes.

- **par surfaces gauches**

Cette méthode est employée quand la surface à définir est trop complexe pour être définie par des surfaces simples (planes, cylindriques, sphériques, coniques...). La surface à définir l'est alors par des fonctions polynomiales paramétrées. L'utilisation de ces fonctions donne une excellente approximation de la surface réelle (et permet aussi l'obtention à l'écran de son profil apparent). Son utilisation est indispensable pour la commande numérique, car on connaît mathématiquement tout point de la surface.

3.4. La modélisation filaire

Les autres appellations de cette modélisation sont linéiques, treillis ou fil de fer. C'est le premier niveau de modélisation dans l'espace. Elle utilise les mêmes entités géométriques que le 2D, en y ajoutant la troisième dimension. Elle est donc basée sur des points et des lignes.

L'objet est décrit par ses sommets (points) et ses arêtes (lignes qui relient ces sommets). Pour gérer la notion de pièce, on ne pourra utiliser que des points appartenant aux arêtes ; ce sont les seuls repérables. Cette modélisation permet la représentation « réelle » d'un objet dans l'espace. Les erreurs d'interprétation sont diminuées (du fait des compléments d'informations apportés par la troisième dimension). Elle permet donc de traiter des géométries plus complexes que le 2D. Entre autre, cette modélisation ne comporte pas les notions de surface et de volume bien que la visualisation obtenue puisse en donner « l'idée ».

Il n'y a donc pas d'élimination automatique des arêtes cachées. Elle doit être faite manuellement par l'utilisateur. Cela apporte aussi des ambiguïtés au niveau de la compréhension de la géométrie de la pièce. On se heurte vite à des problèmes de lecture de dessin. Celle-ci devient difficile au-delà d'une certaine densité de traits comme indiqué par la figure 2.10.

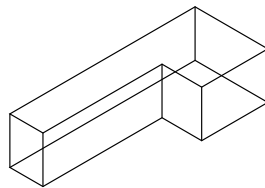


Figure 2.10 : Modélisation filaire

3.5. La modélisation volumique

C'est la modélisation la plus complète car elle englobe les deux précédentes (arêtes et surfaces). Elle permet la représentation dans l'espace, avec la notion de matière (figure 2.11).

La Représentation CSG (constructive solide géométrie), s'apparente à celle d'un artisan qui usine des pièces élémentaires avant de les assembler, pour obtenir un objet plus complexe. Les pièces élémentaires sont dites des primitives ou des objets de base (parallélépipède, cylindre, cône,.....). On applique à ce genre de modèles toutes les opérations booléennes telle que : addition, soustraction, extrusion, intersection, cela pour obtenir des objets complexes.

La représentation CSG est très adaptée à la réalisation d'objets mécaniques. Pour sa visualisation, le modèle CSG, en 2D, passe en mode B-Rep avec une interface interne au logiciel. La figure 2.12, illustre le principe de représentation et de visualisation.

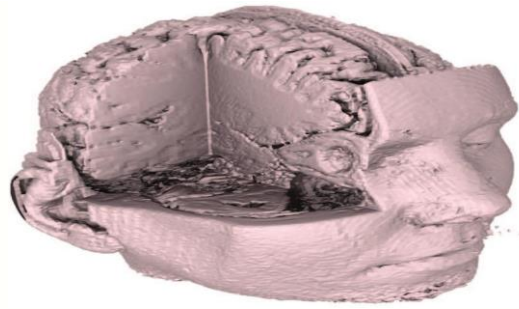


Figure 2.11 : modélisation volumique

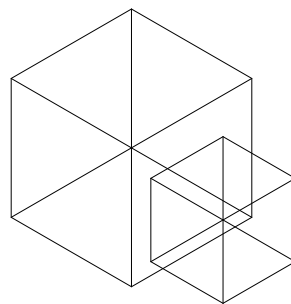
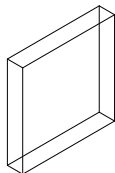


Figure 2.12 : Représentation de deux cubes en tant que primitive à laquelle on va appliquer des opérations booléennes.

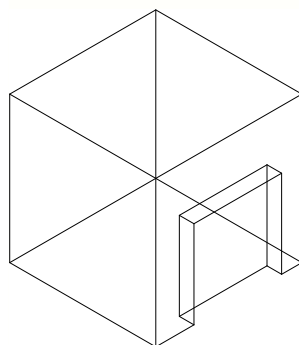
V1: le grand cube

V2: le petit cube



c. Opération d'intersection

$(V1 \cap V2)$



b. opération de soustraction

$(V1 - V2)$

Figure 2.13 : Deux opérations booléennes sur les volumes

4. Les différents logiciels de la CAO

Il existe une multitude de logiciels dans le domaine de la C.A.O représentés par la figure 3. 2

Ces différents logiciels travail avec des courbes paramétrés.



Figure 2.14 : Les différentes marques des logiciels de C.A.O.

5. Choix de logicielle inventor [9]

Sur la multitude logicielle existante, notre choix se fait sur le logiciel Inventor 2016 de la société Autodesk qui à développer entre le logiciel Autocad, les raisons de ce choix sont énuméré comme suit:

- le logiciel Inventor permet de lire et d'écrire directement dans des fichiers DWG, sans convertisseur. Ainsi, les utilisateurs sont en mesure d'exploiter leurs précieuses données DWG™ pour créer des modèles précis de pièces en 3D et produire une nouvelle documentation au format DWG, entièrement associative avec la conception 3D.
- Il concentre l'attention sur les exigences fonctionnelles de la conception avant d'engager dans la création de la géométrie qui prend en compte l'idée initiale du concepteur. Les produits Autodesk Inventor capturent les exigences fonctionnelles d'une conception pour diriger la création des modèles 3D, permettant ainsi de concevoir des pièces et des ensembles sur la base de paramètres réels, tels que la charge, la vitesse et la puissance. Grâce à un processus basé sur la conception fonctionnelle, les projeteurs peuvent rapidement créer des prototypes numériques qui valident les fonctions des conceptions et détectent les erreurs avant

la fabrication. Résultat : des cycles de conception accélérés et des conceptions de plus grande qualité.

- Le produit Inventor aide les utilisateurs du logiciel AutoCAD à devenir des experts en Digital Prototyping rapidement et avec un minimum de formation, en leur permettant de travailler dans un environnement de conception qu'ils connaissent bien, avec des icônes aisément reconnaissables, des raccourcis compatibles avec AutoCAD, des invites attachées au curseur et la possibilité de répéter les commandes. Les profils (dont certains, destinés aux experts AutoCAD et Inventor, sont prêts à l'emploi) permettent aux concepteurs de configurer Inventor pour correspondre à leur méthode de travail. Par ailleurs, les utilisateurs peuvent transférer leurs paramètres d'un ordinateur à un autre en exportant leur profil au format XML.

- Il associe les vues de dessin aux composants d'origine, de sorte qu'un changement effectué sur une pièce ou un ensemble est automatiquement répercuté sur toutes les feuilles de dessin associées. Il améliore la productivité de dessin en créant automatiquement des vues de face, de côté, isométrique, de détail, en coupe et auxiliaires, de pièces et d'ensembles appartenant au modèle. Annotez rapidement les plans en extrayant les cotes provenant directement de la conception.

- Il offre une gestion intégrée des données grâce au logiciel Autodesk® Vault, une application centralisée qui permet aux groupes de travail de stocker et de gérer en toute sécurité les données de conception en cours d'élaboration et les documents connexes. Pour des fonctionnalités supplémentaires, telles que le contrôle des révisions, la sécurité des fichiers et des dossiers, ainsi que la gestion des nomenclatures et des ordres de modification de conception,

- Il Crée des listes de pièces et des nomenclatures automatisées et associatives, développées spécifiquement pour la fabrication et qui sont automatiquement mises à jour lorsque la conception est modifiée. Sont pris en charge, notamment, plusieurs listes de pièces par dessin, les sous-ensembles que l'on peut développer ou réduire, la reconnaissance automatique des pièces normalisées, ainsi que des options personnalisables qui permettent d'adapter les différents éléments aux pratiques de l'entreprise. Modifiez une conception une seule fois, les mises à jour se répercutent sur l'ensemble du dessin pour que chacun travaille sur les mêmes bases. Vous éliminez ainsi les coûteuses interruptions de production suite à une erreur

d'inventaire, d'identification ou de commande de pièces. Exportez des données de nomenclature vers des systèmes de planification des ressources de fabrication (MRP), de planification des ressources d'entreprise (ERP) ou de gestion des données tels que Autodesk® Vault, ou liez ces données à ces types de systèmes.

- Il Crée rapidement des plans d'ensembles et des vues d'ensembles éclatées à utiliser dans des manuels de formation et des instructions de fabrication. L'environnement de présentation d'Autodesk Inventor permet aux concepteurs de créer facilement des séquences animées attrayantes, en vue de les utiliser dans des vidéos de formation, des instructions et des présentations commerciales pour communiquer visuellement leur idée initiale.

- Il Crée rapidement et facilement des rendus, des animations et des présentations photoréalistes de grande qualité, qui contribuent à améliorer la communication avec les clients et les autres décisionnaires. Le logiciel Autodesk® Inventor™ Studio fournit les meilleurs outils de rendu, d'illustration et d'animation dans l'environnement de conception d'Inventor.

Il permet la Création des pièces de meilleure qualité et évitez les problèmes sur le terrain grâce à la fonctionnalité d'analyse par éléments finis du logiciel Autodesk® Inventor™ Professional pour déterminer les contraintes et les déformations sous charge. Utilisez cette fonctionnalité pour optimiser la résistance des pièces et réduire les coûts matière sans compromettre les performances. La fonctionnalité de simulation dynamique d'Autodesk Inventor Professional prolonge les avantages du prototype numérique en permettant aux ingénieurs de prévoir les forces et les accélérations subies par chaque pièce de l'ensemble dans des conditions réelles, avec des charges variables en fonction du temps, différentes caractéristiques de frottement et des composants dynamiques comme les ressorts et les amortisseurs.

- Le logiciel Autodesk Inventor Professional permet de placer, rapidement et avec précision, des systèmes routés, des tronçons de tubes et de canalisations ou des faisceaux de câbles et de fils dans des conceptions 3D. Les conceptions routées s'adaptent automatiquement aux règles de conception définies par l'utilisateur pour réduire les erreurs et gagner du temps. Comme avec tous les fichiers Inventor, les dessins d'ensembles sont automatiquement mis à jour dès que le modèle de routage est modifié.

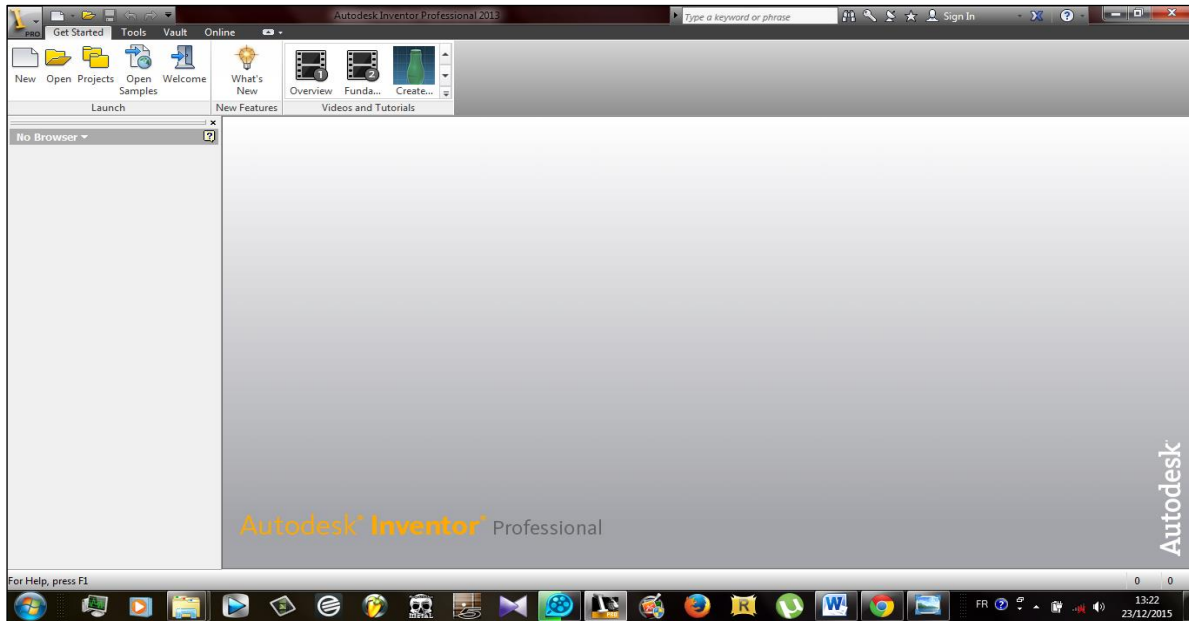


Figure 2.15 : Capture d'écran d'accueil du logiciel Inventor professional 2017

Le logiciel Inventor peut être interfacé avec deux manières

Interfaçage Software/Software

- Interfaçage avec les autres logiciels Autodesk® tel que AutoCAD, Inventor Fusion, InventorCAM
 - Interfaçage avec les autres logiciels tel que MasterCAM, X-CAM, Microsoft Excel® et ANSYS
- Interfaçage Software/Hardware :

Le logiciel Inventor peut être interfacé avec des machines à commande numérique par l'intermédiaire de l'exportation vers le logiciel HSM, qui représente le complément d'inventor pour avoir un outil complet de CFAO

5.1 Présentation du logiciel Inventor

Après avoir présenté des logiciels de C.A.O tels que : Solidworks, Catia, Solid Edge TopSolid et Kompas 3D. Et pour présenter le logiciel Inventor professionnel nous avons choisir les étapes suivantes :

5.1.1 Interface d'utilisateur

Le logiciel Inventor contient quatre types de fichiers pièces (.ipt*), assemblage (.iam*), dessin technique (.idw* ou .dwg*) et présentation(.ipn*)

Comme tous les logiciels tels que Microsoft Word, Microsoft Excel, Photoshop...etc. Inventor possède des icônes simples et faciles à identifier comme : Ouvrir(Open), Nouveau(New), sauvegarder(Save)...etc.

Une fois ouvrir un type de fichier quel que soit-il un fichier pièce, assemblage ou dessin technique l'interface de ce logiciel se change automatiquement avec l'apparence des outils différents, mais on remarque que la barre d'outil et la barre de navigation restent les mêmes quel que soit le type de fichier.

5.1.2. L'interface lors d'un travail sur des esquisses 2D

Pour débiter de travailler sur des esquisses en 2D il faut choisir le type de fichier pièce (.ipt*), et bien choisir le type de la pièce, une pièce standard ou une tôle (sheet metal)

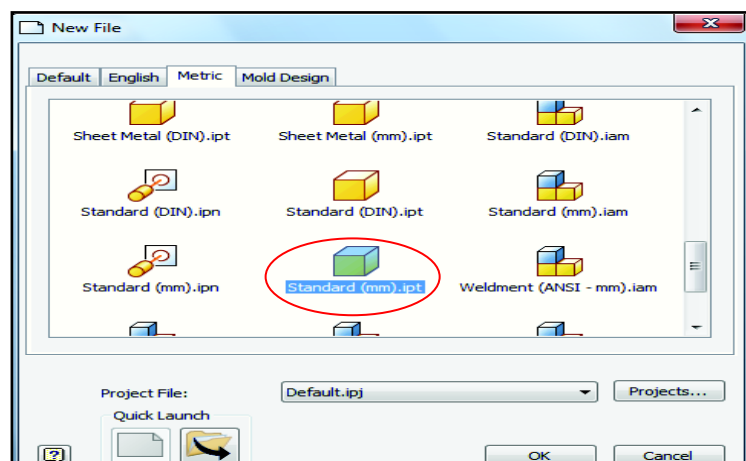


Figure 2.16 : Les différents types de fichiers dans Inventor

Grace a des outils et fonctionnalités incluses par default dans ce logiciel, tels que :

- Les outils géométriques (ligne, cercle, point, arc, rectangle, polygone, ellipse...etc.)
- Les outils de contrainte (cote, parallélisme, perpendicularité, centralité, linéarité)
- Les outils de modification (rotation, déplacement, Copie, extension...etc.)
- Les outils d'insertion (fichier image, fichier Excel ou bien un fichier CAD (AutoCAD))
- **Remarque :** La version de notre logiciel (Autodesk Inventor Professional 2017 est une version en anglais, donc les outils suscités sont traduits en français

F
i
g



ure 2.17 : Les outils pour un dessin en 2D

5.1.3. L'interface lors d'une création d'une pièce en 3D

Tant que ce logiciel est un logiciel de CAO, il faut avoir donc un outil pour crée un volume virtuel (création d'une pièce en 3D). Le logiciel Inventor possède deux outils pour une création en 3D :

- L'extrusion (paramétré seulement par la hauteur)
- La révolution (paramétré par l'axe et le rayon)

Mais il y a aussi des outils pour travailler en 3D tels que :

- Les outils primitives (cube, sphère, cylindre)
- Les outils de création (gravure, sweep, loft, bobinage)
- Les outils de modification (perçage, congé, chanfrein, taraudage...)
- Les outils de surface (soudage, sculpture...)
- L'outil de conversions vers le mode tôlerie (si on est dans le mode pièce standard)
- Les outils pour les pièces plastiques

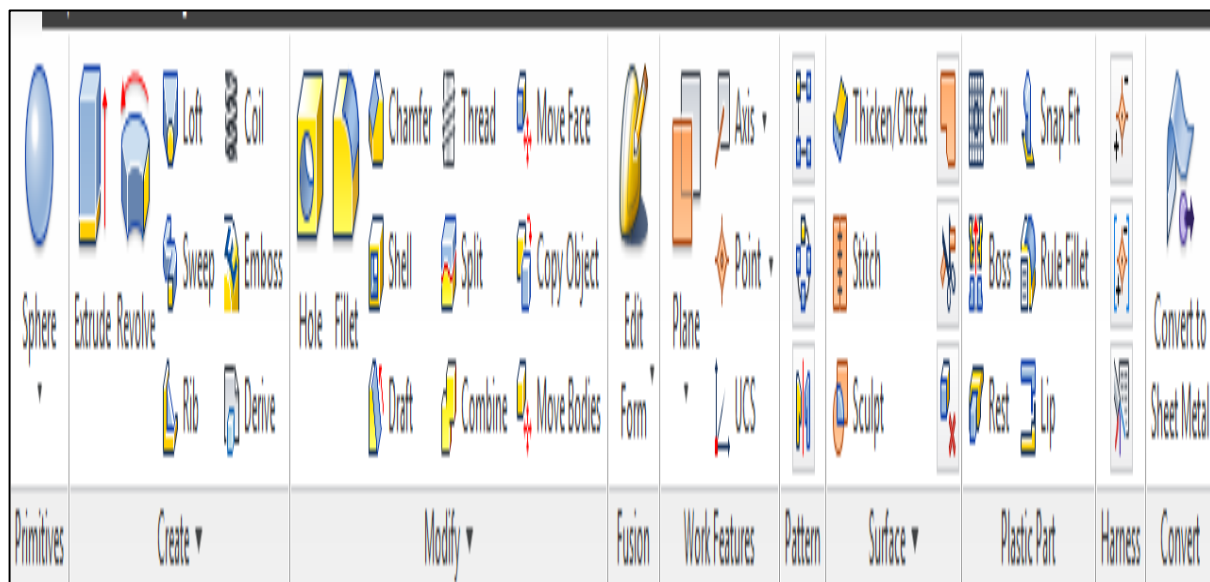


Figure 2.18 : Les outils pour une création d'une pièce en 3D

5.1.4. Interface d'utilisateur lors d'une création d'un assemblage

Dans ce type de fichier il ne s'agit pas de créer ou de dessiner mais il s'agit de placer les pièces ou importer à partir de la bibliothèque d'Inventor si l'assemblage a besoin de quelques éléments normalisés comme des vis, des écrous, des rondelles, des goupilles...etc.

On distingue aussi dans ce type de fichier qu'il y a d'autres outils différents tels que :

- Les outils de placement (Importation des pièces, Remplacement, Importation depuis la bibliothèque...etc.)
- Les outils de positionnement (Contraintes, Rotation, Déplacement, Attachement)
- Les outils managent (Bilan des matériaux, Paramétrage des cotations...etc.)
- Les outils pour les câbles et les pipelines
- L'outil de convertissions

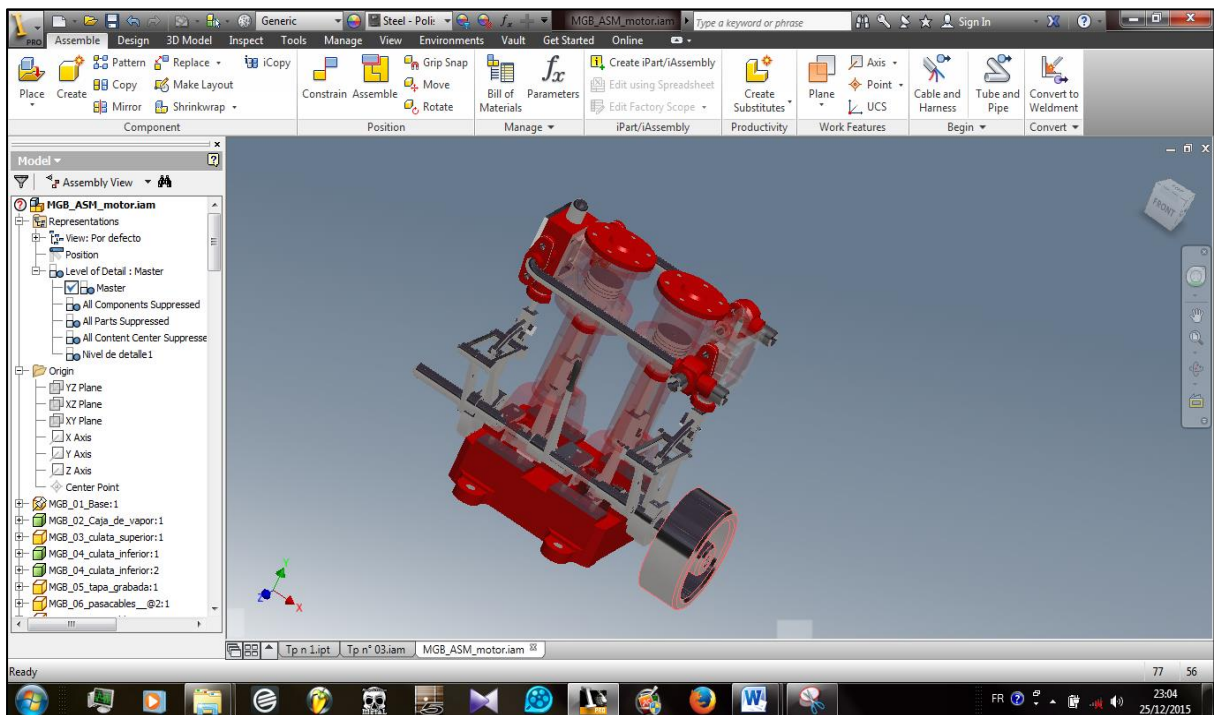


Figure 2.19. Capture d'écran d'un travail sur un assemblage

5.1.5. Interface utilisateur lors d'une mise en plan des pièces ou assemblages

Le logiciel Inventor peut faire facilement un dessin technique d'une pièce ou un assemblage selon les normes des dessins techniques tels que le cartouche, les vues et les coupes, et l'utilisateur peuvent faire son propre dessin grâce à des outils comme :

- Les outils de création (Dessin de base, Projection, Sections, Overlay)
- Les outils de modification (Break, Break out, Slice, Crop, Horizontal)
- L'outil de création d'une nouvelle esquisse
- L'outil de création un nouveau dessin

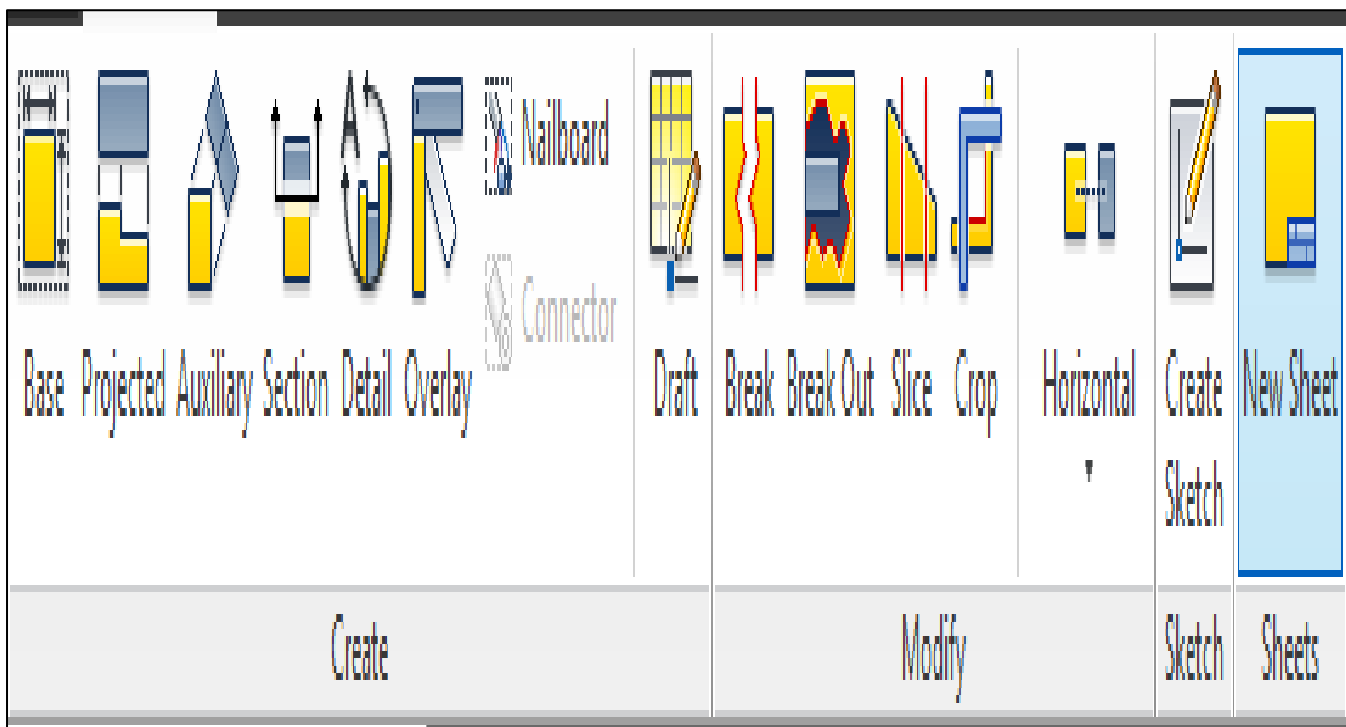


Figure 2.20 : les outils pour la mise en plan des pieces ou assemblage

5.2. Les fonctions d'Inventor [10]

5.2.1. Simulation de mouvement intégrée

On utilise la simulation de mouvement, et non l'intuition, pour prendre de meilleures décisions de conception. La fonction de simulation de mouvement d'Autodesk Inventor utilise les contraintes d'assemblage du modèle 3D pour identifier les corps rigides adéquats, générer les liaisons mécaniques correctes et calculer un comportement dynamique. Ceci aide à comprendre rapidement les comportements du modèle, et notamment la position, la vitesse et les accélérations des pièces en mouvement.



Figure 2.21. Simulation de mouvement intégrée

5.2.2. Définition des charges

On utilise l'éditeur de profil de charge pour appliquer différents couples et charges d'entraînement, ainsi que des fonctions de force variables dans le temps. Cet outil permet d'évaluer les performances du modèle avec différentes configurations de charge.



Figure 2.22. Définition des charges dans Inventor

5.2.3. Analyse par éléments finis intégrée

Pour l'amélioration de la précision et de la fiabilité de l'analyse des contraintes de la conception. On utilise l'analyse FEA intégrée pour prévoir les contraintes et les déformations ainsi que leurs pics de charge avec précision en transférant les forces de réaction issues des incréments de temps vers l'analyse des contraintes d'Autodesk Inventor Professional.

5.2.4. Analyse statique

La vérification des modèles est suffisamment solide tout en évitant les surcharges. On examine la déformation des pièces et des assemblages sous des charges statiques pour déterminer les déformations et les contraintes maximales et minimales. Dans le même temps, on peut vérifier que les conceptions respectent les normes de sécurité requises.

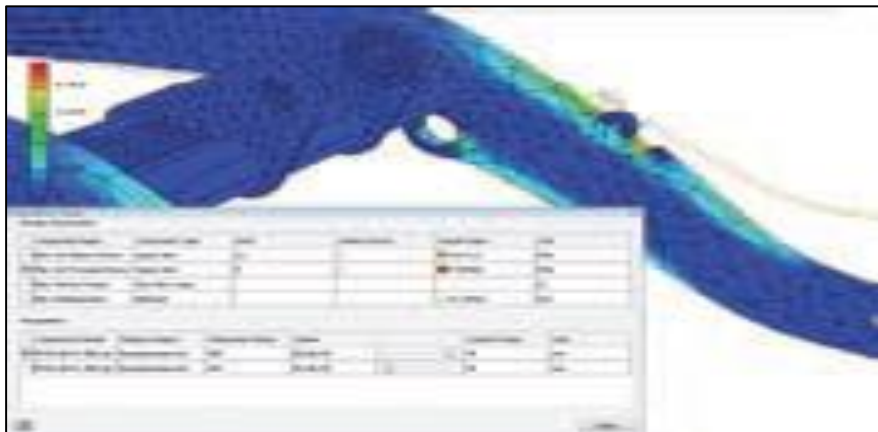


Figure 2.23. Analyse par éléments finis dans le logiciel Inventor

5.2.5. Études paramétriques

L'amélioration des performances structurelles des modèles. On utilise l'outil 'Table de paramètres' pour créer des études paramétriques de contraintes de conception et comprendre l'effet de différentes valeurs de paramètre. On pourra ainsi explorer l'impact sur le modèle des modifications, telles que l'épaisseur des parois, le rayon des congés et le diamètre des trous.

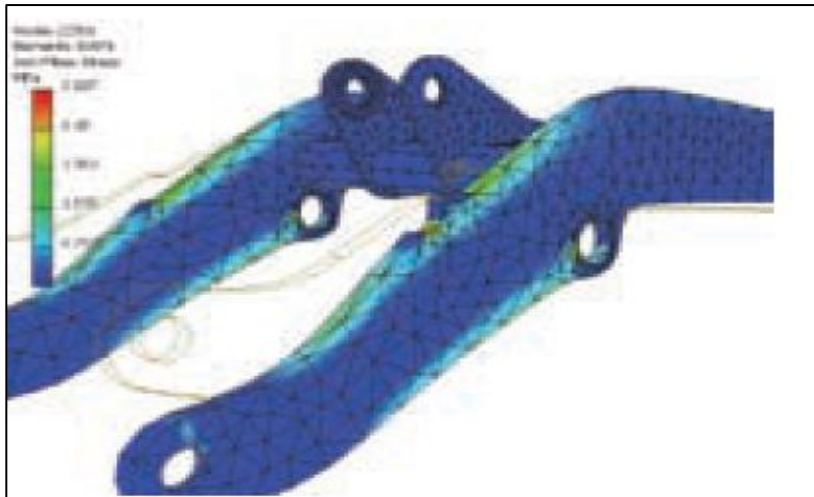


Figure 2.24. Étude paramétrique dans le logiciel Inventor

5.2.6. Suivi de trajectoire

Un calcule en toute simplicité les trajectoires d'un mouvement en simplifiant la conception de cames, de rainures et d'autres composants dépendants de mouvements. À n'importe quel point du modèle avec l'outil Suivi pour afficher la position de ce point à chaque étape de la simulation de mouvement. Grâce à Inventor, on peut enregistrer une sortie des simulations, y compris les suivis de trajectoire et les positions de l'assemblage, et utiliser ces données lors de la conception de pièces et d'assemblages

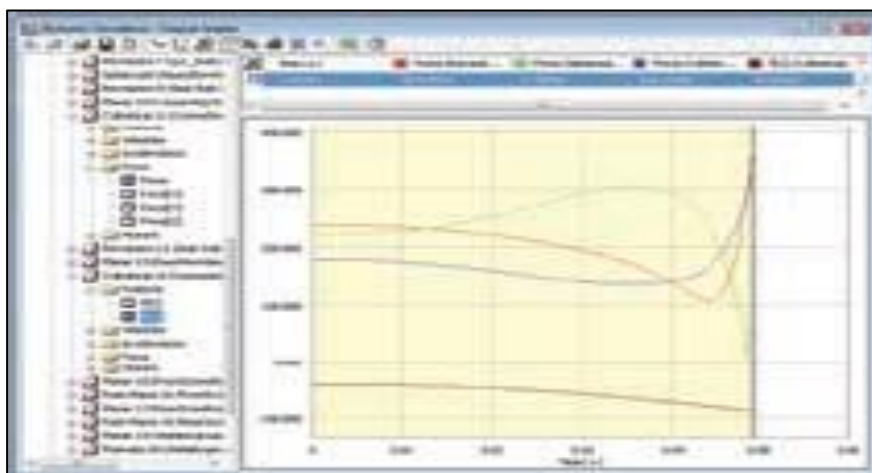


Figure 2.25. Suivi de trajectoire dans le logiciel Inventor

5.2.7. Graphes

Utilisation de la fonction complète de génération de graphes d'Inventor pour analyser rapidement l'évolution des propriétés dynamiques des modèles tout au long de son cycle opératoire. Tracer les courbes d'évolution des différents paramètres physiques (position, force et accélération) en fonction du temps. Avec une comparaison des différentes propriétés en chaque point de la simulation en superposant plusieurs tracés sur le même graphe



Figure 2.26. Les graphes dans le logiciel Inventor

5.8.2. Interfaçage

Le logiciel Inventor peut nous accéder aux données de conception 2D existantes sans installer ou former au logiciel AutoCAD. En ouvrant les dessins AutoCAD directement dans l'application Inventor et utiliser les options Inventor qu'on connaît bien pour afficher, tracer et mesurer. On intègre des données de conception 2D existantes dans les conceptions 3D à l'aide des outils Copier et Coller. Il est aussi possible d'importer ou d'exporter des données vers d'autres logiciels de tel que CATIA, SolidEdge, ou solidworks par des formats spécifiques qu'ils soient, volumiques surfaciques ou filaires.

6. Conclusion :

Il est bien évident que toute conception ou nouvelle adaptation d'un produit passe par l'étude de l'art dans le domaine. Dans ce chapitre nous avons fait le choix d'un logiciel pour notre étude qui reste toujours discutable, car aucune étude n'est parfaite et c'est des améliorations d'une version à une version qui nous de ce fait nous avons fais le choix de travailler avec le logiciel Autodesk Inventor Professional 2017 qui permet un certains nombre d'avantage parmi, lesquels la portabilité des données et sa disponibilité ainsi que sa facilité d'utilisation. Permettent d'arriver à notre meilleur produit

Chapitre III

Chapitre 3

Étude et conception de la machine

1. Introduction

La conception d'une machine de type mécanique avec commandes assistés, comme dans notre cas met en évidence plusieurs défis de résolution pour l'engineering de conception. En effet la combinaison entre plusieurs systèmes peut induire des erreurs c'est pour cette raison que l'envoi d'instruction à la machine passe par un interfaçage machine ou matériel appelé « Interface Hardware », c'est ce dernier qui est utilisé pour faire fonctionner la machine tel que la carte mère, les types des moteurs et les pilotes des moteurs et aussi les étapes de fonctionnement de la machine. Entre autre nous devons vérifier que les différentes séquences envoyés à la machines sont correctes et ne sont pas erronés par des erreurs de programmation appelés les "Bugs". D'où la nécessiter de vérifier les entrer sortie sous vides avant utilisation sous charges. En ce qui concerne notre avant-projet nous avons opté pour Inventor 2017 pour la conception de CAO et du matériel disponible ainsi qu'une interface open source pour réaliser les différents déplacements de la machine.

2. Présentation de la machine

Le prototype réalisée est une machine de projection thermique HVOF (High-Velocity Oxygen Fuel), avec 3 axes de déplacements pour revêtir des pièces de forme déférentes (prismatique, cylindrique...). Le tableau 2.1 représente les caractéristiques techniques de cette machine, la figure 2.1a représente son dessin d'ensemble en 3D, et le tableau 2.2 indique les différents éléments constituant cette machine.

Caractéristiques	HVOF
Température de flamme (°C)	3 000
Vitesse des particules (m/s)	700
Taux horaire de dépôt (Kg/h)	3 à 5
Rendement moyen (%)	70
Taux de porosité (%)	0.5 à 2
Force d'adhérence (MPa)	50 à 80
Epaisseur déposée (mm)	0.05 à 1

Tableau 3.1 : Les caractéristiques techniques de la machine

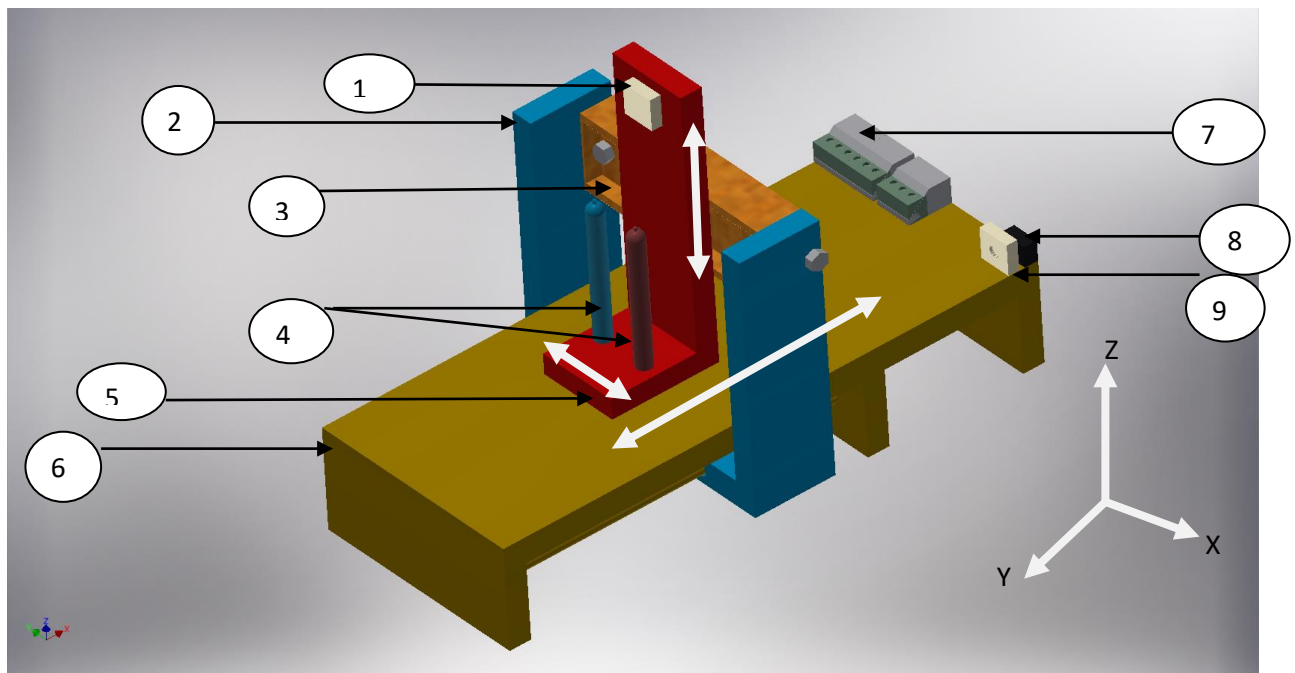


Figure 3.1 : Dessin d'ensemble en 3D de la machine

N° d'élément	Nom d'élément
1	Moteur pas à pas de l'axe Z
2	Support de coté
3	Support de l'axe Y
4	Bouteilles d'oxygène et acétylène
5	Support du moteur DC
6	Table
7	Circuit de commande pour les moteurs pas à pas
8	La carte mère Arduino Uno
9	Moteur pas à pas de l'axe Y

Tableau 3.2 : Les éléments de la machine

3. Partie mécanique

Elle est constituée de plusieurs pièces, dont la représentation 3D volumique a été faite sur Autodesk Inventor 2017 et qui sont :

- La Table (figure 3.2), dont le rôle est de supporter le système de projection.

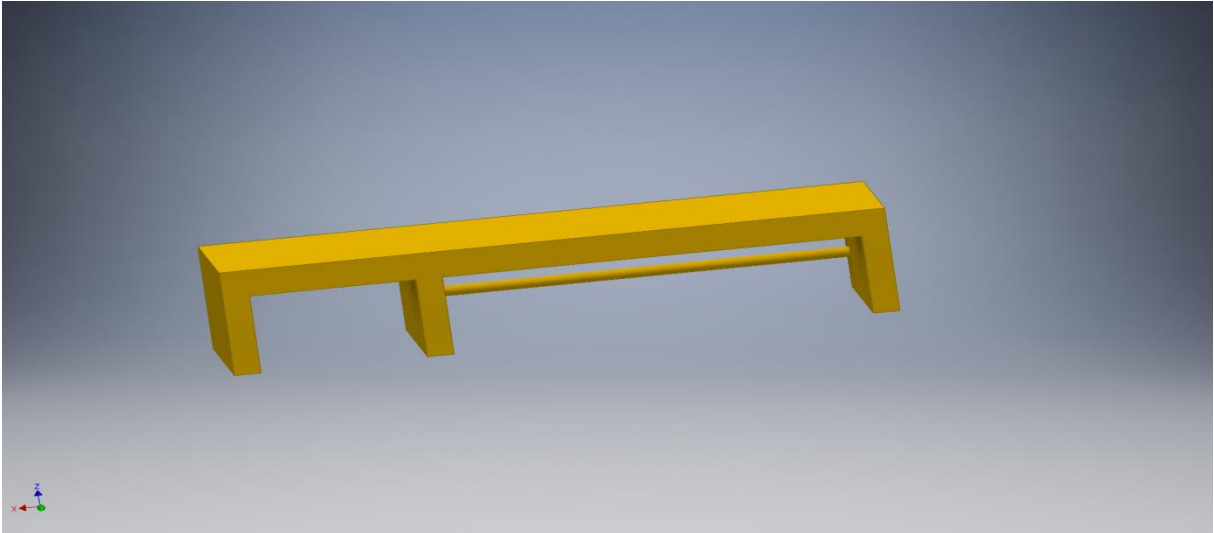


Figure 3.2 : Modélisation 3D du support de la table

- Le Support du coté (figure 3.3), dont, le rôle est d'assurer le mouvement des deux axes Y et Z avec leurs rail, il est fixé en bas avec le support de l'axe X et en haut avec le support de l'axe Y.

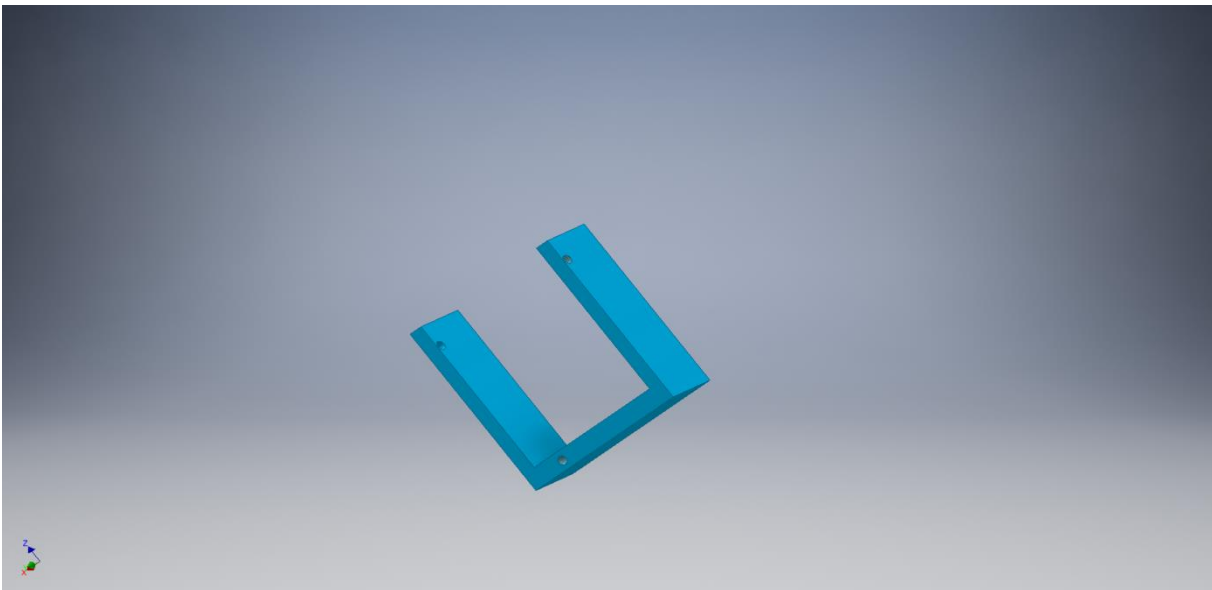


Figure 3.3 : Modélisation 3D du support coté

- Support de l'axe Z (figure 3.4), dont le rôle de cet élément est d'assurer le mouvement selon l'axe Z, il est fixé avec le rail de l'axe Z.

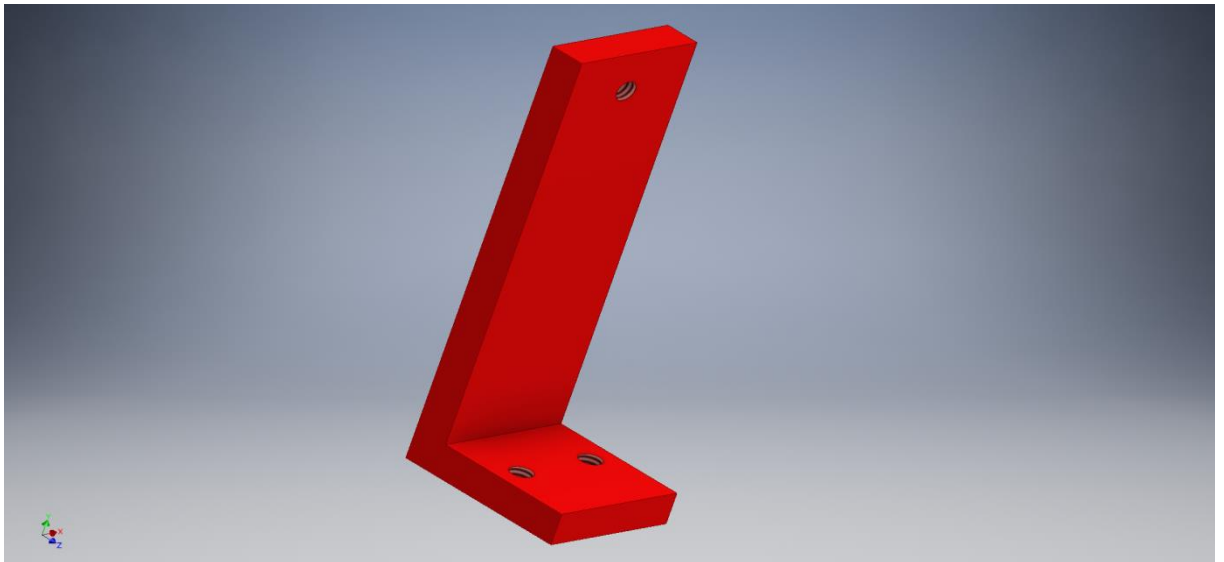


Figure 3.4: Modélisation 3D du support de l'axe Z

- Support de l'axe Y (figure 3.5). Cet élément est fixé avec le rail de l'axe Y et aussi entre les deux supports de côtés, pour le mouvement selon l'axe Y



Figure 3.5 : Modélisation 3D du support de l'axe Y

4. Les éléments de système de projection thermique

Il est constitué d'une buse, d'un couvercle et deux raccords pour la tuyauterie comme indiqué par la figure 3.6, ainsi que de deux bouteilles à gaz, l'une pour l'oxygène, utilisée comme comburant (figure 3.7) et une autre pour l'acétylène, utilisée comme combustible (figure 3.6).

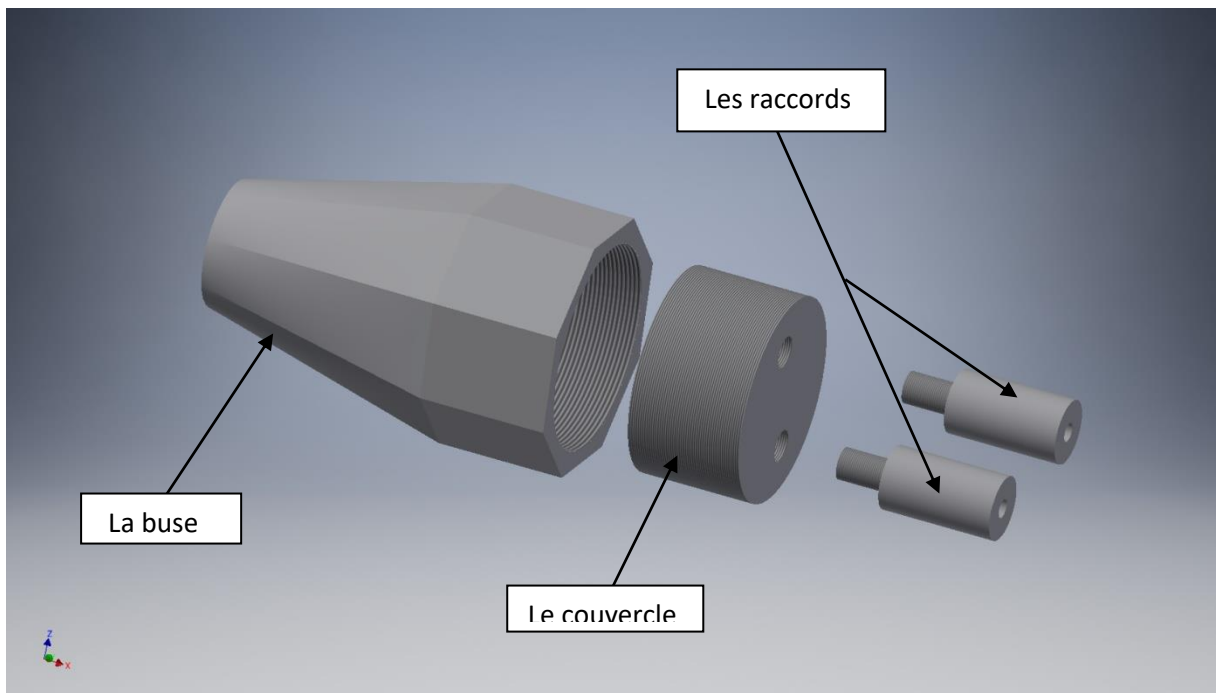


Figure 3.6 : Modélisation 3D de la buse

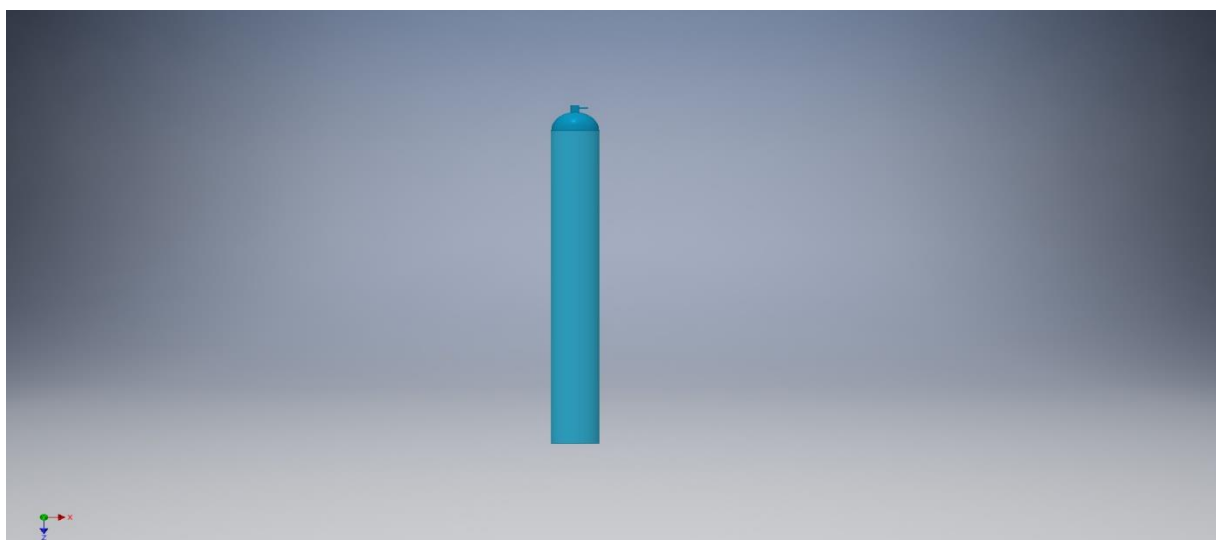


Figure 3.7 : Bouteille d'oxygène

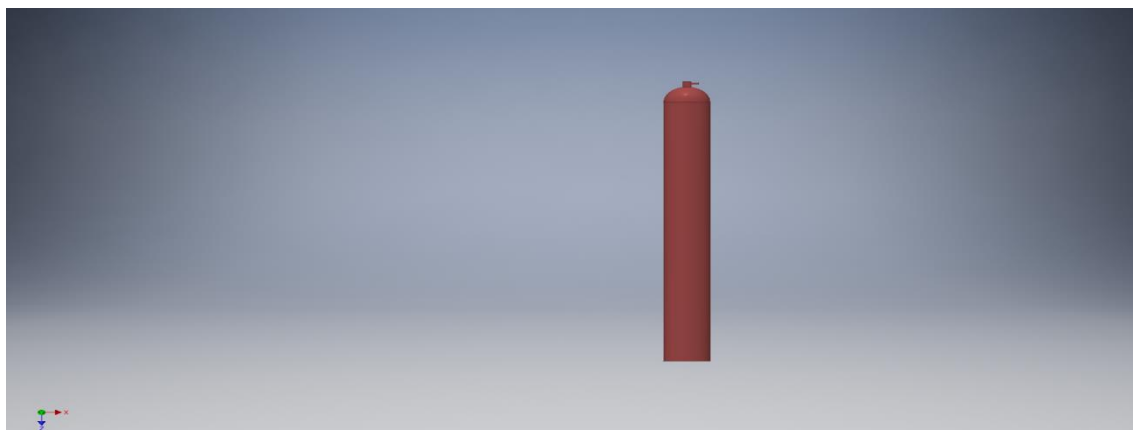


Figure 3.8 : Bouteille d acétylène

5. Partie commande

5.1 Matériels utilisé

5.2 L'alimentation de la machine

Pour alimenter cette machine nous avons utilisé quatre transformateurs abaisseurs de même type qui possèdent les caractéristiques suivantes :

- Input: AC 220v 60/50 Hz
- Output: DC 3V-12V

5.3 Le moteur DC (Moteur à courant continue)

On utilise un moteur DC de type DZ-21-BQ, et d'après le constructeur il possède les caractéristiques suivantes :

Alimentation : 12 Volt
Puissance utile : 5 Watt
Vitesse de rotation : 1800 tr/min
Couple : 188 N/m

5.4 Les moteurs pas à pas

Les moteurs pas à pas sont des moteurs électriques d'une conception particulière, différentes des moteurs classiques. Leur structure permet, par une commande électronique appropriée, d'obtenir une rotation du rotor d'un angle égal à n fois un angle élémentaire appelé « pas ».

Ces moteurs ont connu ces dernières années, un développement important lié à leurs applications en péri-informatique (imprimantes, unités de disque, lecteur de bande ...), en

commande numérique et en robotique. Ces applications concernent pratiquement toujours du positionnement en boucle ouverte, c'est-à-dire sans détecteur de position (codeur, résolveur, potentiomètre, etc.). Le développement de ces moteurs a été rendu possible :

- Par l'amélioration des technologies de fabrication des moteurs eux-mêmes, obtention de meilleures caractéristiques des aimants, amélioration dans la disposition des aimants.
- par l'amélioration des performances des commandes électroniques. En effet, les caractéristiques en couple, vitesse et rendement du moteur pas à pas sont étroitement liées au mode de commande. Aujourd'hui, les commandes les plus performantes associent des circuits intégrés rapides (microcontrôleur, DSP, mémoire, multiplexeur, ...) à des transistors de puissance à haut rendement fonctionnant en découpage haute fréquence (20 kHz à 50 kHz)

Le moteur utilisé est le moteur bipolaire 28BYJ-48. Ce type de moteurs a en général 4 fils, dont deux sont reliés au milieu des bobines. Ils se commandent en les alimentant tour à tour, mais les bobinages sont alimentés toujours dans le même sens par une tension unique d'où le nom de bipolaire

5.5 Les caractéristiques des moteurs pas à pas utilisé

Type du moteur	Moteur pas à pas bipolaire
Type de connexion	4 fils de Connexion
Voltage	5-12 Volts DC
Fréquence	100 Hz
Mode du pas	Mode demi pas recommandé
Angle du pas	Mode demi pas: 5.625 degrés par pas / 64 pas révolution Mode pas : 11.25 degrés par pas / 32 pas par révolution
confection avec le pilote	A (gris), B (bleu), C (jaune), E (rouge)
poids	30g

Tableau 3.3 : Caractéristiques du moteur pas à pas

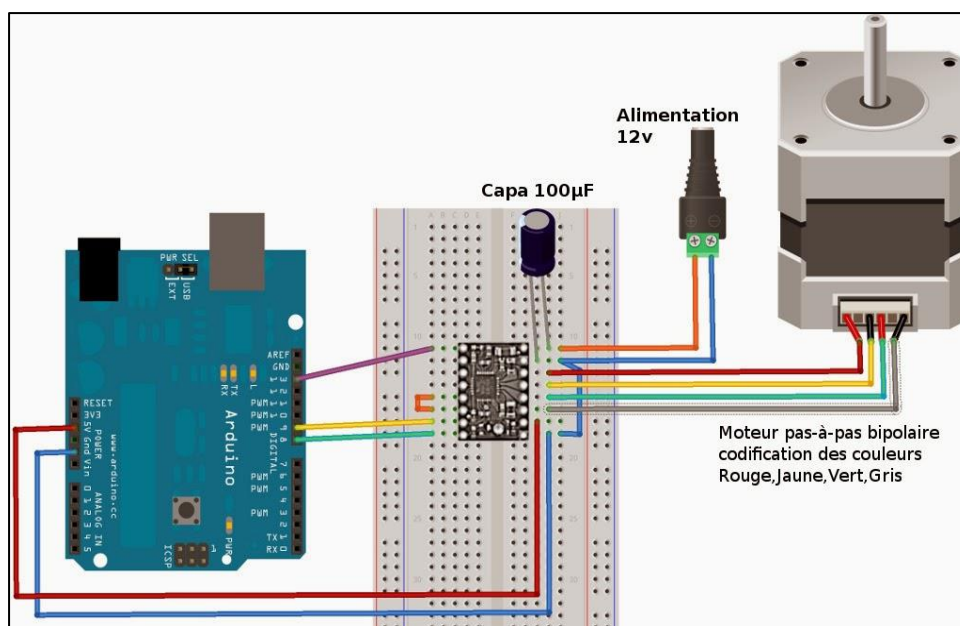


Figure 3.9 : Un moteur pas à pas bipolaire

6. Matériel Électronique

6.1. La carte mère Arduino Uno

Arduino est un circuit imprimé en matériel libre sur lequel se trouve un microcontrôleur. Les plans de la carte elle-même sont publiés en licence libre, cependant, certains composants de la carte, comme le microcontrôleur par exemple, ne sont pas en licence libre. Le microcontrôleur peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la domotique (le contrôle des appareils domestiques - éclairage, chauffage...), le pilotage d'un robot, etc. C'est une plateforme basée sur une interface entrée/sortie simple. Il était destiné à l'origine principalement mais pas exclusivement à la programmation multimédia interactive en vue de spectacle ou d'animations artistiques.

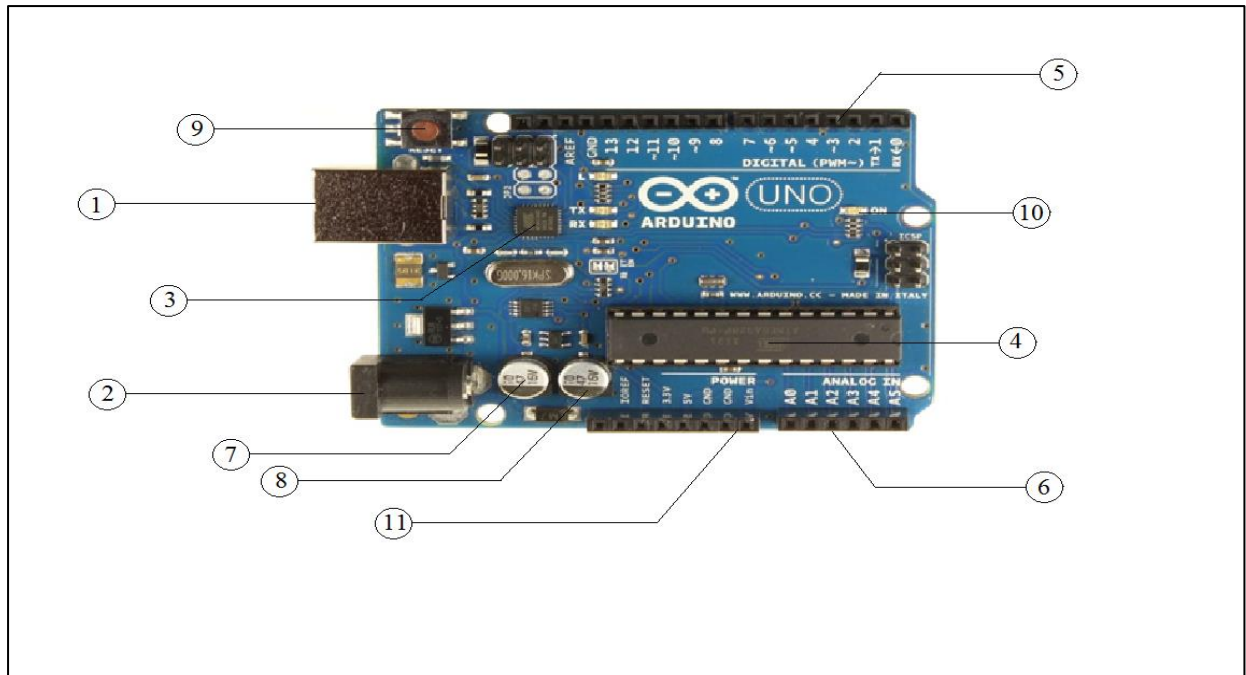


Figure 3.10 : La carte mère Arduino Uno

Numéro d'élément	Le nom d'élément
1	Entrée USB (Jack)
2	Alimentation a courant continue
3	USB vers un sérial IC
4	Microcontrôleur Atmel Atmega 328
5	Entrées et Sorties Numériques
6	Entrées et Sorties Analogiques
7	Régulateur de tension 3.3 V
8	Régulateur de tension 5 V
9	Botton Reset
10	LED ON
11	Alimentation des pinnes

Tableau 3.4 : Les composants de la carte Arduino

6.2 Le pilote des moteurs pas à pas (Le Big easy drive)

Le Big Easy Driver est conçu autour du conducteur du moteur A4988 Allegro. Chaque broche présente sur la carte a deux points de connexion. La première, qui sont les axes les plus proches du centre de la planche, sont espacés pour adapter standards "en-têtes 0.1. Les

points de connexion secondaires sont le plus près du bord de la carte, et sont espacés pour adapter des bornes à vis à 2 broches. Vous peut utiliser selon la broche connexions fonctionnent le mieux pour votre projet. La fonctionnalité entre les deux ensembles ne change pas.

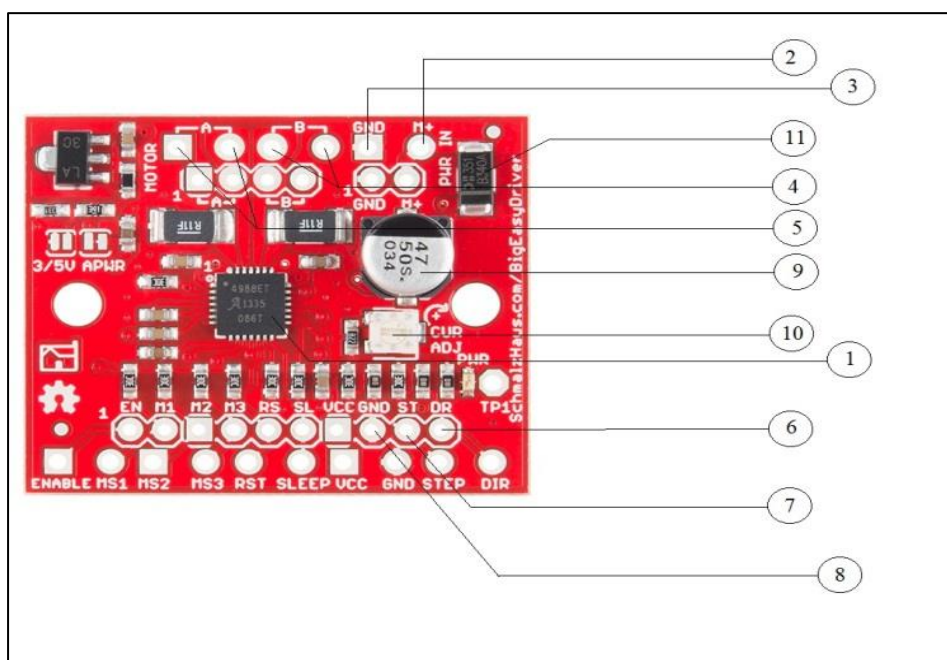


Figure 3.11: Le Big easy drive

	Le nom d'élément
1	Le circuit intégré A4988
2	Alimentation 12V
3	Prise de terre (coté opérative)
4	Branchement des pôles de la bobine B
5	Branchement des pôles de la bobine A
6	Pin de direction du moteur
7	Pin du pas du moteur
8	Prise de terre (coté commande)
9	Régulateur de tension 3.3V
10	Potentiomètre
11	Fusible

Tableau 3.5 : Les composants du pilote du moteur pas à pas

6.3 Descriptions des broches

Plusieurs broches de l'A4988 IC sont placées sur le pilote Big Easy, permettant la connexion directe à un moteur pas à pas bipolaire, ainsi qu'un microcontrôleur.

- Conseil Top Pins

Bobine A +: DMOS Full Bridge 1 sortie B. La moitié du point de connexion pour bipolaire bobine de moteur pas à pas A.

Bobine A -: DMOS Full Bridge 1 sortie A. Autre moitié du point de connexion pour bipolaire bobine de moteur pas à pas A.

Bobine B +: DMOS Full Bridge 2 Sortie B. La moitié du point de connexion pour bipolaire moteur pas à pas la bobine B.

Bobine B -: DMOS Full Bridge 2 Sortie A. Autre moitié du point de connexion pour bipolaire moteur pas à pas la bobine B.

GND: Prise de terre Ground.

M +: Alimentation. 8V - 35V.

- Pins bas

ENABLE: Entrée logique. Active la fonctionnalité au sein du FET de commande de moteur. Si la valeur HIGH, les FET seront désactivés, et l'IC ne seront pas entraîner le moteur. Si réglé sur BAS, tous FET seront activés, permettant le contrôle du moteur.

MS1: Entrée logique. Sélectionner Microstep 1 a une résistance de pull-up de 20 kOhm.

MS2: Entrée logique. Microstep Select 2 a une résistance de pull-up de 20 kOhms.

Voir le tableau ci-dessous pour la vérité HAUT / BAS fonctionnalité.

MS3: Entrée logique. Microstep Select 3 a une résistance de pull-up de 20 kOhms. Vo

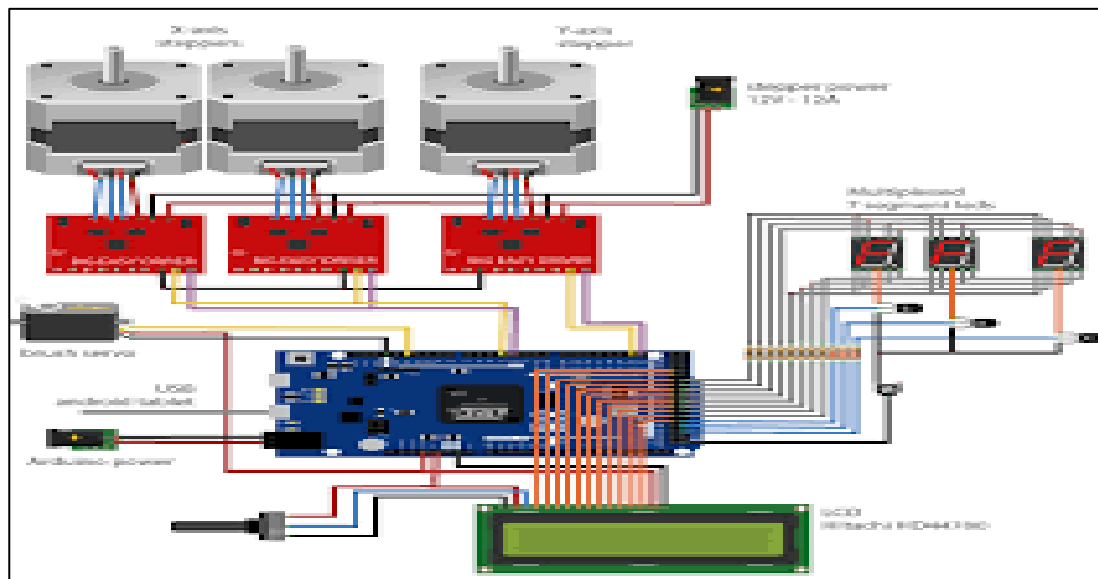


Figure 3.12 : Connexion des moteurs pas à pas avec les pilotes et la carte Arduino

7. Programme hardware pour la reconnaissance des données de sorties

7.1. Arduino IDE

Le logiciel de programmation des modules Arduino est une application Java, libre et multiplateforme, servant d'éditeur de code et de compilateur, et qui peut transférer le firmware et le programme au travers de la liaison série (RS-232, Bluetooth ou USB selon le module). Il est également possible de se passer de l'interface Arduino, et de compiler et uploader les programmes via l'interface en ligne de commande. Le langage de programmation utilisé est le C++, compilé avec le compilateur (avr-g++), et lié à la bibliothèque de développement Arduino, permettant l'utilisation de la carte et de ses entrées/sorties. La mise en place de ce langage standard rend aisé le développement de programmes sur les plates-formes Arduino, à toute personne maîtrisant le C ou le C++. On a programmé notre microcontrôleur Atmega par arduino boot loader pour qu'il puisse supporter le langage Arduino puis on a utilisé l'environnement de développement Arduino IDE pour charger notre programme sur le microcontrôleur.

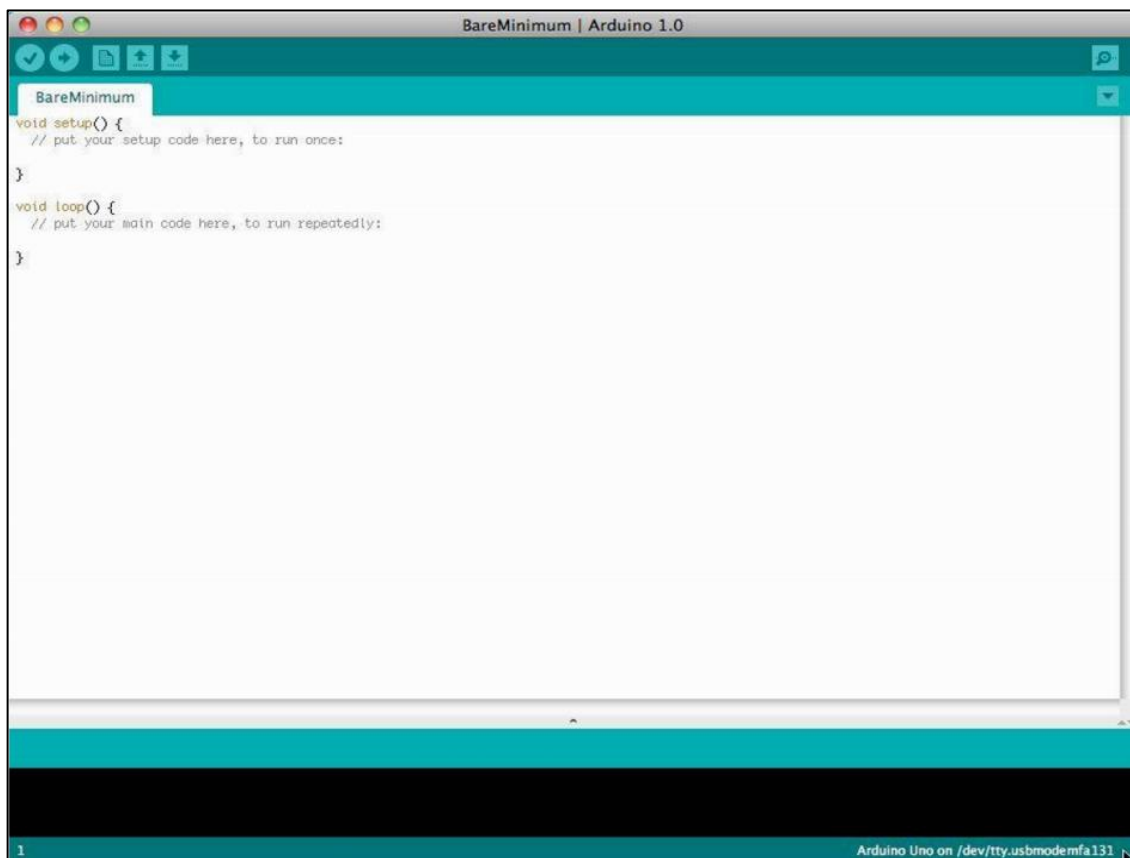


Figure 3.13 : Interface d'utilisateur d'Arduino IDE

7.2 La communication série

La communication série est indispensable pour dialoguer avec votre Arduino puisque c'est le mode de transmission utilisé pour communiquer avec la carte. En communication série, on découpe l'information à transmettre en petits blocs de taille fixe avant de la transmettre. La taille des blocs correspond au nombre des lignes disponibles pour la transmission des données.

Ce type de communication s'oppose à la communication parallèle. En communication parallèle, il y a une ligne par bits à transmettre. Tous les bits sont donc transmis en même temps. Pour une même fréquence de communication, la communication parallèle est donc plus rapide.

L'avantage de la communication série sur la communication parallèle est qu'elle nécessite moins de lignes, donc moins de broches, donc moins de composants. Son coût est donc plus faible.

Le protocole de communication série utilisé est le protocole câble USB pour l'envoi des instructions de commande de mouvement et de contrôle depuis un PC vers la machine [11], comme indiqué par la figure 3.14.

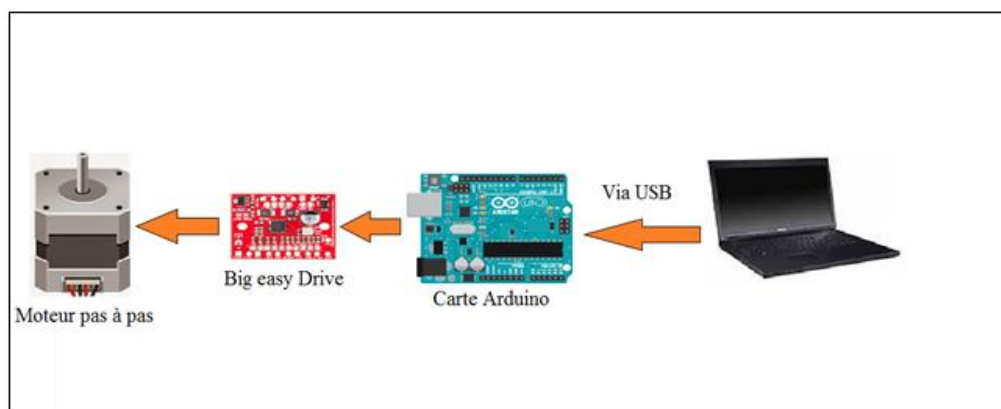


Figure 3.14 : Schéma de la communication série de notre cas

8. Conclusion

Nous avons présentés dans ce chapitre l'avant-projet de la conception de la machine, avec ces constituantes mécaniques, son système de projection thermique ainsi que le système de commande électronique et l'interfaçage de déplacement par moteur pas à pas avec la carte Arduino. Nous avons décrit les opérations de contrôles des entrées sortie et la vérification des programme d'interfaçage avec la carte mère par l'intermédiaire des pilotes des moteurs pas à pas (Big easy drive). Il est à remarquer que le choix de chaque composant c'est fait selon deux critères la compatibilité et la disponibilité des composants sur le marché local.

Conclusion générale

Nous avons synthétisés dans ce mémoire les différents procédés des revêtements des surfaces, en passant par les techniques de revêtements mécaniques, chimiques, électrolytiques et les revêtements par films minces. Il s'avère que quel que soit le procédé utilisé, nous avons un aspect financier qui est mis en jeu. La mise en évidence des films minces par rapport aux autres techniques réside dans le fait qu'aux faibles revêtements on obtient les mêmes caractéristiques et peut mieux que pour les revêtements classiques (traitements thermique ou thermochimique), entre ces derniers peuvent être appliqués à presque la totalité des matériaux ce qui n'est pas le cas des traitements classiques. De ce fait la conception ou nouvelle adaptation d'un produit passe par l'étude de l'art dans le domaine, de ce fait nous avons fait le choix de travailler avec le logiciel Autodesk Inventor Professional 2017 qui permet un certain nombre d'avantages parmi lesquels la portabilité des données et sa disponibilité ainsi que sa facilité d'utilisation. Dans ce contexte nous avons présenté l'avant-projet de la machine avec ces constituantes mécaniques, son système de projection thermique ainsi que le système de commande électronique et l'interfaçage de déplacement par moteur pas à pas avec la carte Arduino. Nous avons décrit les opérations de contrôles des entrées sorties et la vérification des programmes d'interfaçage avec la carte mère par l'intermédiaire des pilotes des moteurs pas à pas (Big easy drive). Il est à remarquer que le choix de chaque composant c'est fait selon deux critères la compatibilité et la disponibilité des composants sur le marché local. En ce qui concerne la machine, nous avons adopté pour une simplicité de conception que nous espérons apportera un plus dans le paysage industriel et que sa future réalisation permettra d'éviter l'importation ce genre de machine qui sont très onéreuses pour notre économie.

Références Bibliographiques

- [1] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Portail:Technologies>
- [2] **Hayat Berkane**, Élaboration et caractérisation da revêtements DURS Ti-Al, Ti-Al-N et Al-Cr-N, Mémoire de Magistère, Université Mentouri de Constantine(2004).
- [3] **Y. Lee, G. Jeon, H. BaeG, H. Yang**, Thin Solid Films, 414, 420-421 (2002).
- [4] **M.Nordine, M. Larosson, S. Hogmark**, Surface and Coatings Technology, 106, 234- (1998).
- [5] **McIntyre D, Greene J.E, Hakansson G, Sundgren J, Munz W.D**, Journal of Applied, Physics, **67**(3), 1542- (1990).
- [6] **Zhou Y.M., Asaki R., Higashi K., Soe W.H., Yamamoto R.**, Surface and Coatings Technology, 130, 9- (2000).
- [7] **Zhang W. H., Hsieh J.H.**, Surface and Coatings Technology, 130, 240 - (2000).
- [8] **Guillaume Marot**, Modalisation de l'essai d'indentation inter faciale et confrontation aux essais normalisés pour la détermination de l'adhérence de revêtements obtenus par projection thermique, Thèse de doctorat, université de Lille 1 (2012).
- [9] **Benzira M.S, Boualem N**, Optimisation des pièces et des assemblages dans le cas du logiciel Inventor, Mémoire de Master, IMSI- Université d'Oran2 (juin 2016).
- 10] **Victor M. Leija** Autodesk Inventor Professionnel manuel (2016)
- [11] **Benterki Abdelmoudjib** Étude et réalisation d'une machine-outil à commande numérique (2015).

Annexe Chapitre 3

Dessins 2D du système de projection

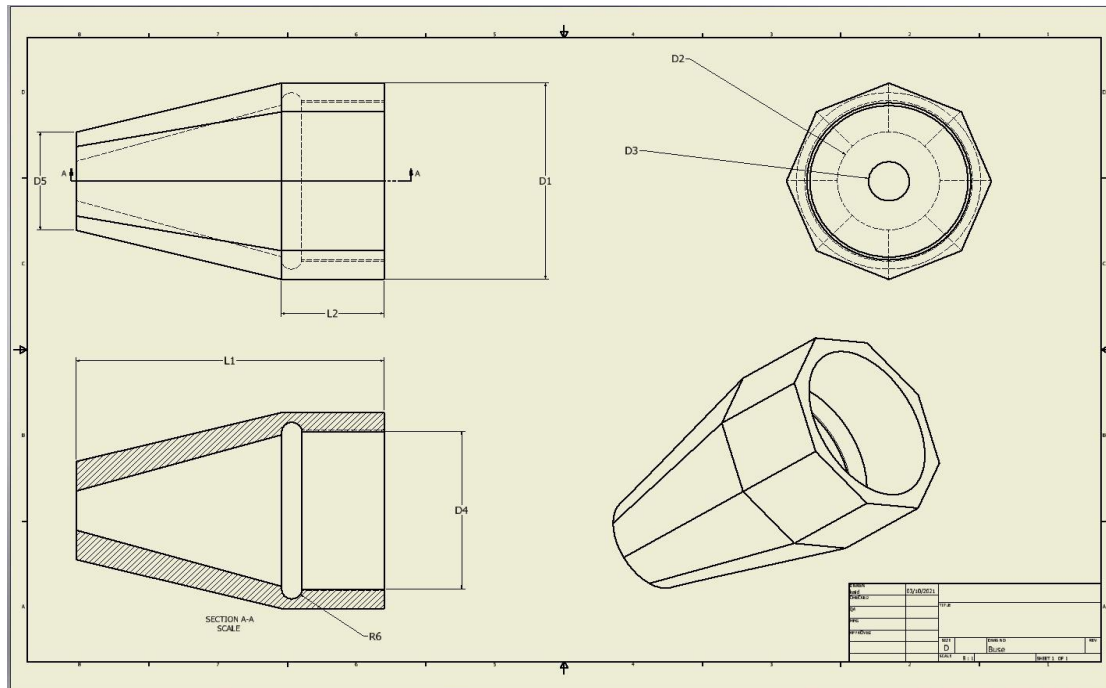


Figure A1: Dessin technique de la buse

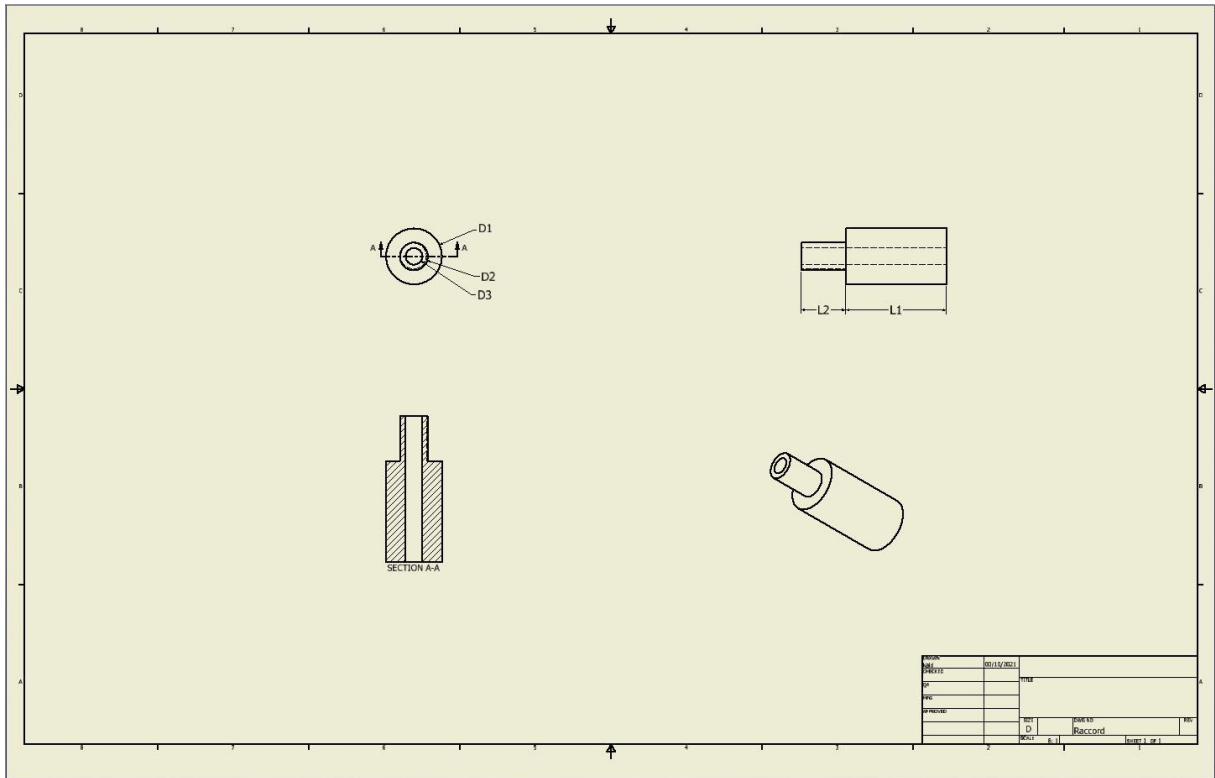


Figure A3 : dessin technique du raccord