

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU**  
**FACULTÉ DE GÉNIE DE LA CONSTRUCTION**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE**



**MÉMOIRE**  
**DE FIN D'ETUDES**



**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER**  
**EN GÉNIE MÉCANIQUE**  
**OPTION : CONSTRUCTION MÉCANIQUE**

**THEME**

**Etude de pièces plastiques réalisées par  
impression 3D. Application à  
l'aérodynamique**

**Proposé et dirigé par :**

**M. OULD OUALI Mohand**

**Etudié par :**

**M. LARBI Hamid**

**Promotion : 2018 /2019**

## Remerciement

Je tiens à remercier chaleureusement mon promoteur M<sup>r</sup> OULD OUALI Mohand pour le fait de m'avoir permis d'entreprendre cette recherche, et pour tous l'égard porté à mes travaux, pour sa participation à la mise en forme de cette étude, pour les encouragements, le suivis et les conseils qu'il m'a prodigués.

Mes vifs remerciements à messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptent de siéger à ma soutenance.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants du département Génie Mécanique ainsi qu'à tous les enseignants qui ont participé à ma formation.

Je tiens à exprimer ma gratitude à l'égard de tous mes amis qui m'ont apporté soutien et aide au cours de mon travail.

## **Dédicaces**

À mon père (Arezki) qui m'a accompagné tout le long de mon parcours.

Je dédie ce travail à ma chère mère (Tassadit), qui a été pour moi la source d'encouragement et d'assurance.

À mon frère El Hadi

À mes très chères sœurs et leurs époux

À mes chers neveux et nièces

À toute la famille

À tous mes amis et à toute ma promotion

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin

à l'élaboration de ce mémoire de fin d'étude



# Table des matières

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

## Chapitre I

I. Introduction.....	3
I.1 Définition.....	3
I.2 Historique.....	3
I.3 Fonctionnement de l'impression 3D.....	4
I.4 Les technologies de l'impression 3D.....	5
I.4.1 Fabrication additive métallique.....	5
I.4.2 Fabrication additive plastique.....	7
I.5 Les matériaux d'impression.....	11
I.5.1 Les plastiques.....	11
I.5.2 Les métaux.....	12
I.5.3 Les autres matériaux.....	13
I.6 Les champs d'applications.....	14
I.6.1 La fabrication de moules.....	14
I.6.2 Le biomédical.....	14
I.6.3 L'automobile.....	15
I.6.4 Aéronautique et l'aérospatial.....	15
I.7 Normalisation.....	16

## Chapitre II

II. Introduction.....	17
II.1 L'air :.....	17
II.1.1 Les paramètres influençant sur la résistance de l'air :.....	17
II.2 Nombre de Reynolds.....	19
II.3 L'écoulement.....	20
II.3.1 L'écoulement laminaire.....	20
II.3.2 L'écoulement turbulent.....	20
II.3.3 L'écoulement tourbillonnaire.....	21
II.4 La couche limite.....	21
II.5 Les surfaces portantes.....	22

II.6	Portance et trainée .....	23
II.6.1	Expression de la trainée.....	24
II.6.2	Expression de la portance.....	24
II.7	Les différents facteurs influents la valeur de la trainée et de la portance.....	24
II.7.1	Effet de l'allongement.....	24
II.7.2	Effet de la rugosité .....	25
II.8	Evolution de la résultante aérodynamique en fonction de L'incidence .....	26
II.9	Courbe des coefficients de portance en fonction des angles d'incidences .....	27

### Chapitre III

III.	Introduction .....	29
III.1	: Imprimante 3D de type Zortrax M200 Plus.....	29
III.1.1	Propriétés de l'imprimante Zortrax M200 Plus.....	29
III.1.2	Les paramètres d'impression [20] .....	32
III.1.3	Logiciel d'imprimante (Z-SUITE).....	36
III.1.4	Matériau d'impression utilisé.....	36
III.2	Logiciel solidworks 2013.....	37
III.3	Machine de traction.....	38
III.4	Soufflerie DeltaLab EA103 .....	39
III.4.1	Instruments de mesure.....	40
III.4.2	Le tube de Pitot .....	40
III.4.3	Balance aérodynamique .....	41
III.4.4	Indicateur de contraintes .....	42
III.4.5	Micro-ordinateur et chaîne d'acquisition des données .....	43
III.5	Logiciel XFlow-2019x.....	43

### Chapitre IV

IV.	Introduction .....	45
IV.1	Influence de la position et l'épaisseur de couche d'impression.....	45
IV.1.1	Conception et réalisation des éprouvettes .....	45
IV.1.2	Essai de traction .....	49
IV.1.3	Résultats des essais de traction.....	49
IV.1.4	Interprétations des résultats.....	57
IV.1.5	Comparaison des résultats.....	59
IV.2	Effet de l'état de surface en aérodynamique.....	64

IV.2.1	Conception et réalisation de la maquette d'avion .....	64
IV.2.2	Traitement de l'état de surface de la maquette d'avion .....	64
IV.2.3	Essai en soufflerie .....	66
IV.2.4	Résultats des essais.....	66
IV.2.5	Interprétation des résultats .....	69
IV.2.6	Comparaison des résultats .....	69
IV.3	Simulation de l'aérodynamique de la maquette d'avion.....	70
IV.3.1	Description du problème .....	71
IV.3.2	Résultats des simulations .....	71
	Conclusion générale et perspectives.....	79

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Principe général de la fabrication additive par couche. ....	5
<b>Figure I.2 :</b> Schématisation de procédé SLS. ....	5
<b>Figure I.3 :</b> Schématisation de procédé EBM. ....	6
<b>Figure I.4 :</b> Principe de fabrication par la Stéréolithographie. ....	8
<b>Figure I.5:</b> Principe de fabrication directe avec un procédé FDM. ....	8
<b>Figure I.6 :</b> Principe de fabrication par projection de gouttes. ....	9
<b>Figure I.7 :</b> Principe de fabrication directe avec un procédé CEF. ....	10
<b>Figure I.8 :</b> Différents dépôts du thermoplastique : linéaire, triangulaire ou nid d'abeille. ....	10
<b>Figure I.9 :</b> Différentes trajectoires de dépôt de fibre continue : isotropique et concentrique	10
<b>Figure I.10 :</b> Exemple d'objet en céramique. ....	14
<b>Figure I.11:</b> Prothèse crânienne réalisé par l'impression 3D. ....	14
<b>Figure I.12:</b> Culbuteurs réalisés par impression 3D. ....	15
<b>Figure I.13:</b> Drone fabriqué en impression 3D. ....	15
<b>Figure II.1 :</b> l'effet de pression sur une plaque plane. ....	17
<b>Figure II.2:</b> Ecoulement autour d'un disque plat perpendiculaire au courant d'air. ....	18
<b>Figure II.3 :</b> Ecoulement autour d'une demi-sphère. ....	18
<b>Figure II.4 :</b> Ecoulement autour d'une sphère. ....	19
<b>Figure II.5 :</b> Ecoulement autour d'un corps en forme d'un œuf. ....	19
<b>Figure II.6:</b> Ecoulement laminaire de fluide. ....	20
<b>Figure II.7:</b> Ecoulement turbulent de fluide. ....	20
<b>Figure II.8:</b> Ecoulement tourbillonnaire de fluide. ....	21
<b>Figure II.9 :</b> Schématique de la couche limite. ....	22
<b>Figure II.10:</b> Exemple d'une surface portante. ....	22
<b>Figure II.11:</b> Profil d'aile. ....	23
<b>Figure II.12 :</b> La Force de portance et de traînée. ....	23
<b>Figure II.13 :</b> Tourbillons marginaux aux fonctions de l'allongement de l'aile. ....	25
<b>Figure II.14 :</b> Influence de la rugosité sur le coefficient de portance. ....	26
<b>Figure II.15:</b> La polaire. ....	27
<b>Figure II.16 :</b> Coefficient de portance en fonction de l'incidence. ....	28
<b>Figure II.17 :</b> Maquette Sukhoi SU-35. ....	28
<b>Figure III.1 :</b> Imprimante Zortrax M200 Plus. ....	30
<b>Figure III.2 :</b> Vue de face de la Zortrax M200 Plus. ....	30

<b>Figure III.3</b> : Vue de droite de la Zortrax M200 Plus.....	31
<b>Figure III.4</b> : Vue de gauche de la Zortrax M200 Plus.....	31
<b>Figure III.5</b> : Fractionnement d'un objet. ....	32
<b>Figure III.6</b> : Rotation d'un objet. ....	32
<b>Figure III.7</b> : Redimensionnement d'un objet. ....	33
<b>Figure III.8</b> : Choix d'épaisseur de couche. ....	34
<b>Figure III.9</b> : Les différentes qualités d'impression. ....	34
<b>Figure III.10</b> : Les différents types de remplissage. ....	35
<b>Figure III.11</b> : Configuration du support. ....	35
<b>Figure III.12</b> : Bobine filament Z-Ultrat.....	37
<b>Figure III.13</b> : Eprouvette conçue avec Solidworks 2013. ....	38
<b>Figure III.14</b> : Machine de traction.....	38
<b>Figure III.15</b> : Dimensions de l'éprouvette haltère. ....	39
<b>Figure III.16</b> : Soufflerie Deltalab EA 103.....	39
<b>Figure III.17</b> : Description de la soufflerie DeltaLab EA103.....	40
<b>Figure III.18</b> : Tube de Pitot. ....	40
<b>Figure III.19</b> : Balance aérodynamique. ....	42
<b>Figure III.20</b> : Indicateur de contrainte.....	42
<b>Figure III.21</b> : Chaîne d'acquisition des données. ....	43
<b>Figure III.22</b> : L'Interface de logiciel Xflow.....	44
<b>Figure IV.1</b> : Eprouvette de type 1BA. ....	45
<b>Figure IV.2</b> : Conception de l'éprouvette sur Solidworks. ....	46
<b>Figure IV.3</b> : Préparation de l'éprouvette pour l'impression sur le logiciel Z-Suite. ....	46
<b>Figure IV.4</b> : Impression des éprouvettes. ....	47
<b>Figure IV.5</b> : Retrait des éprouvettes. ....	47
<b>Figure IV.6</b> : Les différentes positions d'impression.....	48
<b>Figure IV.7</b> : Abréviation de la numérotation des éprouvettes. ....	48
<b>Figure IV.8</b> : Courbes de première position épaisseur de couche 0,09 mm. ....	50
<b>Figure IV.9</b> : Courbes de première position épaisseur de couche 0,14 mm. ....	50
<b>Figure IV.10</b> : Courbes de première position épaisseur de couche 0,29 mm. ....	50
<b>Figure IV.11</b> : Courbes de la première position d'impression avec les différentes épaisseurs de couche d'impression.....	51
<b>Figure IV.12</b> : Courbes de la deuxième position épaisseur de couche 0,09 mm. ....	52
<b>Figure IV.13</b> : Courbes de la deuxième position épaisseur de couche 0,14 mm. ....	52

<b>Figure IV.14 :</b> Courbes de la deuxième position épaisseur de couche 0,29 mm. ....	52
<b>Figure IV.15 :</b> Courbes de la deuxième position d'impression avec les différentes épaisseurs de couche d'impression.....	53
<b>Figure IV.16 :</b> Courbes de la troisième position épaisseur de couche 0,09 mm.....	54
<b>Figure IV.17 :</b> Courbes de la troisième position épaisseur de couche 0,14 mm.....	54
<b>Figure IV.18 :</b> Courbes de la troisième position épaisseur de couche 0,29 mm.....	54
<b>Figure IV.19 :</b> Courbes de la troisième position d'impression avec les différentes épaisseurs de couche d'impression.....	55
<b>Figure IV.20 :</b> Courbes de la quatrième position épaisseur de couche 0,09 mm.....	56
<b>Figure IV.21 :</b> Courbes de la quatrième position épaisseur de couche 0,14 mm.....	56
<b>Figure IV.22 :</b> Courbes de la quatrième position épaisseur de couche 0,29 mm.....	56
<b>Figure IV.23 :</b> Courbes de la quatrième position d'impression avec les différentes épaisseurs de couche d'impression.....	57
<b>Figure IV.24 :</b> Eprouvettes de la première position à la fin d'essai.....	57
<b>Figure IV.25 :</b> Eprouvettes de la deuxième position à la fin d'essai. ....	58
<b>Figure IV.26 :</b> Eprouvettes de la troisième position à la fin d'essai. ....	58
<b>Figure IV.27 :</b> Eprouvettes de la quatrième position à la fin d'essai. ....	59
<b>Figure IV.28 :</b> Evolution contraintes-déformations des éprouvettes imprimées suivant différentes positions pour une épaisseur de couche 0.09mm. ....	60
<b>Figure IV.29 :</b> Evolution contraintes-déformations des éprouvettes imprimées suivant différentes positions pour une épaisseur de couche 0.14mm. ....	61
<b>Figure IV.30 :</b> Evolution contraintes-déformations des éprouvettes imprimées suivant différentes positions pour une épaisseur de couche 0.29mm. ....	61
<b>Figure IV.31 :</b> Modules de Young des différentes positions pour l'épaisseur 0.09mm. ....	62
<b>Figure IV.32 :</b> Contrainte maximale des différentes positions pour l'épaisseur 0.09mm. ....	62
<b>Figure IV.33 :</b> Modules de Young des différentes positions pour l'épaisseur 0.14mm. ....	62
<b>Figure IV.34 :</b> Contrainte maximale des différentes positions pour l'épaisseur 0.14mm. ....	63
<b>Figure IV.35 :</b> Modules de Young des différentes positions pour l'épaisseur 0.29mm. ....	63
<b>Figure IV.36 :</b> Contrainte maximale des différentes positions pour l'épaisseur 0.29mm. ....	63
<b>Figure IV.37 :</b> Maquette d'avion Sukhoi Su-35.....	64
<b>Figure IV.38 :</b> Traitement à la vapeur d'acétone. ....	65
<b>Figure IV.39 :</b> Maquette déformée après traitement à la vapeur d'acétone.....	65
<b>Figure IV.40 :</b> Maquette après revêtement.....	66

<b>Figure IV.41</b> : Coefficient de portance ( $C_z$ ) en fonction des incidences maquette sans revêtement. ....	67
<b>Figure IV.42</b> : Coefficient de traînée ( $C_x$ ) en fonction des incidences maquette sans revêtement. ....	67
<b>Figure IV.43</b> : $C_z$ en fonction de $C_x$ (la polaire) de la maquette sans revêtement.....	67
<b>Figure IV.44</b> : Coefficient de portance ( $C_z$ ) en fonction des incidences maquette revêtue. ...	68
<b>Figure IV.45</b> : Coefficient de traînée ( $C_x$ ) en fonction des incidences maquette revêtue.....	68
<b>Figure IV.46</b> : $C_z$ en fonction de $C_x$ (la polaire) de la maquette revêtue.....	69
<b>Figure IV.47</b> : Coefficient de portance ( $C_z$ ) en fonction des incidences. ....	70
<b>Figure IV.48</b> : Coefficient de traînée ( $C_x$ ) en fonction des incidences. ....	70
<b>Figure IV.49</b> : Polaires. ....	70
<b>Figure IV.50</b> : La vortacité pour une incidence de $0^\circ$ .....	71
<b>Figure IV.51</b> : La vortacité pour une incidence de $10^\circ$ .....	72
<b>Figure IV.52</b> : La vortacité pour une incidence de $30^\circ$ .....	73
<b>Figure IV.53</b> : La vortacité pour une incidence de $45^\circ$ .....	74
<b>Figure IV.54</b> : La turbulence pour une incidence de $0^\circ$ .....	75
<b>Figure IV.55</b> : La turbulence pour une incidence de $10^\circ$ .....	76
<b>Figure IV.57</b> : La turbulence pour une incidence de $45^\circ$ .....	77
<b>Figure IV.56</b> : La turbulence pour une incidence de $30^\circ$ .....	78

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Différentes technologies et les matériaux correspondants. ....	11
<b>Tableau I.2</b> : Liste des normes publiées en matière d'impression 3D. ....	16
<b>Tableau III.1</b> : Caractéristiques de filament Z-Ultrat. ....	36
<b>Tableau IV.1</b> : Dimensions en millimètre d'une éprouvette selon la norme ISO527 1BA. ...	45
<b>Tableau IV.2</b> : Caractéristiques des éprouvettes de la première position d'impression. ....	49
<b>Tableau IV.3</b> : Caractéristiques des éprouvettes de la deuxième position d'impression. ....	51
<b>Tableau IV.4</b> : Caractéristiques des éprouvettes de la troisième position d'impression. ....	53
<b>Tableau IV.5</b> : Caractéristiques des éprouvettes de la quatrième position d'impression. ....	55
<b>Tableau IV.6</b> : Portance et trainée à $V=15$ m/s maquette sans revêtement. ....	66
<b>Tableau IV.7</b> : Portance et trainée à $V=15$ m/s maquette revêtue. ....	68

## Liste des abréviations

- 3D** : Tridimensionnel.
- ABS** : Acrylonitrile Butadiène Styène.
- CAO** : Conception assistée par ordinateur.
- CEN CENELEC** : Comité européen de normalisation
- DMLS** : Direct Metal Sintring.
- EBM** : Electron Beam Malting.
- FA**: Fabrication additive.
- FDM** : Fused Deposition Modeling (Dépôt de matière fondue).
- FFF** : Fused filament fabrication.
- ISO** : International organization for standardization.
- SLA** : Stereolithography Apparatus.
- SLS** : Selective Laser Sintering.
- STL** : STereo-Lithography.
- DLP**: Digital light processing.
- LMD** : Laser Metal Deposition.
- SLM**: Selective Laser Melting.
- CEF** : Composite Filament Fabrication.
- PLA** : Polylactique.

# **Introduction générale**

### **Introduction générale**

La Fabrication Additive (FA) est un procédé de fabrication qui a commencé à se développer dans les années 80 et qui atteint actuellement une maturité qui lui permet d'être utilisé de manière rentable et fonctionnelle par les industriels[1]. La fabrication additive est définie comme étant le procédé de mise en forme d'une pièce par ajout de matière, à l'opposé de la mise en forme traditionnelle par enlèvement de matière (usinage) ou déformation plastique (emboutissage, thermoformage, forgeage). La fabrication additive présente de nombreux avantages, elle permet notamment de fabriquer des formes très complexes, certaines irréalisables avec les procédés conventionnels, et avec une grande diversité de matériaux. Cela permet également de réaliser des pièces monobloc, c'est-à-dire des pièces sans assemblage[2].

Les domaines d'applications de la FA sont à l'heure actuelle très variés. Elle est très utilisée pour le prototypage rapide lors de la conception d'un objet avec pour but de réduire les temps de fabrication des prototypes et de diminuer leur coût. L'impression 3D trouve également beaucoup d'applications dans des domaines tels que l'aéronautique, la médecine (réalisation de substituts osseux sur mesure, d'implants dentaires), ou encore l'automobile,...

La réalisation des maquettes et des prototypes est à la fois compliquée et coûteuse avec les procédés conventionnelles, la fabrication additive vient apporter une solution à la fois rapide, efficace et à moindre coût.

Cependant, la FA présente encore certaines faiblesses, liées notamment au procédé. En effet, la FA consiste à déposer des couches les unes sur les autres, dans un plan, jusqu'à réaliser la pièce désirée, un plan privilégié semble apparaître. De plus, l'épaisseur des couches déposées influence l'état de surface.

Dans ce travail de master, nous proposons d'étudier d'abord l'anisotropie de comportement en traction des éprouvettes réalisées selon quatre configurations : horizontale (couchée et debout), verticale et inclinée. Ensuite, nous faisons une étude comparative pour étudier l'état de surface. Nous proposons de faire cette étude dans le cadre de l'aérodynamique, en imprimant une maquette d'avion. Cette maquette subira des essais en soufflerie avant et après revêtement. Le but est de vérifier si l'état de surface de l'avion imprimée brut peut servir de prototype à une étude en aérodynamique ou est-ce qu'un traitement de surface est nécessaire.

Ce mémoire se divise en quatre chapitres. Le premier chapitre donne les éléments importants concernant l'impression 3D. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de quelques concepts de l'aérodynamique. Le troisième chapitre présente les machines, matériels et logiciels utilisés lors de notre travail ainsi que les techniques de caractérisation utilisées. Dans le dernier

## **Introduction générale**

chapitre nous décrivons les étapes de réalisation des échantillons ainsi que les différents résultats obtenus.

# Chapitre I

## Généralités sur l'impression 3D

**I. Introduction**

Dans ce premier chapitre nous présentons le procédé de mise en forme des matériaux par ajout de matière appelé fabrication additive, ainsi les éléments importants concernant ce procédé tel que les technologies existantes, les différents champs d'application et les matériaux d'impression,...

**I.1 Définition**

L'impression tridimensionnelle ou bien la fabrication additive – plus couramment appelée impression 3D, est définie comme étant le procédé de mise en forme d'une pièce par ajout de matière, à l'opposé de la mise en forme traditionnelle par enlèvement de matière (usinage).

La fabrication additive était à l'origine réservée au prototypage et donc à la partie pré-production du cycle de vie d'un produit. Actuellement elle est aussi utilisée dans la phase de production d'un produit. Ce procédé s'insère également dans la phase post-production du cycle de vie d'un produit. En effet, elle peut être utilisée pour réparer des pièces endommagées ou bien pour remplacer les pièces anciennes dont la production en série est terminée et qui n'existe plus en stock. Cependant elle présente la limite de se révéler beaucoup moins productive que l'usinage traditionnel et se limite donc aux productions de pièces en petites et moyennes séries.[1]

**I.2 Historique**

Afin de mieux situer l'impression 3D et les innovations permises par l'avancement technologique et l'avènement du numérique, il est nécessaire de proposer un rappel historique afin de retracer l'évolution des recherches et procédés de fabrication additive. Il faut d'abord constater que cette technologie, née en France voilà déjà plus de trente ans, n'est donc pas nouvelle. En effet, le premier brevet a été déposé en juillet 1984 par Jean-Claude André (CNRS et Institut Polytechnique de Lorraine), Olivier de Witte et Alain Le Méhauté, ingénieur électrochimiste (centre de recherche de la Compagnie générale d'électricité (CGE, future Alcatel), à Marcoussis. À l'origine, il s'agissait de recherche fondamentale sur la géométrie fractale. Pour réaliser un objet fractal – ce qui est impossible à faire par usinage ou par moulage, ils ont eu l'idée d'inventer une imprimante 3D. Olivier de Witte travaillait alors sur les lasers à la Cilas, une filiale de la CGE, et a apporté ses connaissances dans ce domaine. Malheureusement, à l'époque, les concepteurs n'ont pas été suivis par les décideurs, et l'aventure française s'est arrêtée. Olivier de Witte sera quelques années plus tard le responsable en France de 3D Systems. L'Ecole Centrale de Paris pourra ainsi récupérer l'une des toutes premières imprimantes dans le cadre d'un des trois premiers centres de

compétences en France, créé en 1991, le CREATE (Centre de prototypage Rapide Européen d'Assistance, Transfert et Expérimentation).

En 1992, l'Association Française du Prototypage Rapide et de la fabrication additive est créée (AFPR). Cette innovation sera également l'objet d'un brevet en août 1984 par Charles W. Hull aux Etats-Unis. Cet outil était destiné à faciliter la création, jusque-là fastidieuse, des petites pièces de plastique destinées au prototypage pour la mise à l'essai de nouveaux produits. La technologie est utilisée pour créer une maquette tridimensionnelle à partir d'une image et permet aux utilisateurs de mettre à l'épreuve un concept avant d'investir dans un programme de fabrication plus lourd. Cette machine permettait de créer en quelques heures des objets qui par les méthodes traditionnelles de moulage-coulage auraient été fabriqués en plusieurs mois.[3]

### **I.3 Fonctionnement de l'impression 3D**

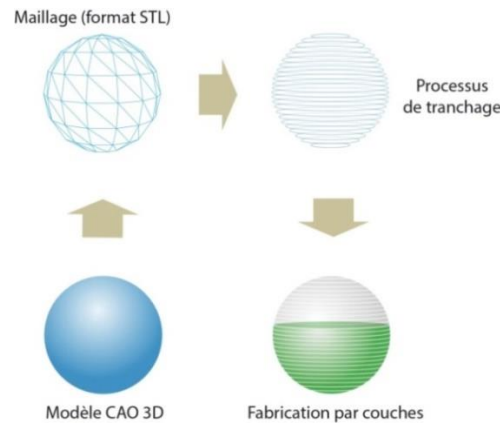
La première étape consiste à dessiner la forme souhaitée sur un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Il existe un nombre important de logiciels sur le marché qui permettent de créer ces modèles 3D. Les plans sont ensuite transmis à l'imprimante. En deuxième étape, l'imprimante traite cette modélisation 3D conformément à la logique de fabrication additive : c'est-à-dire découper le modèle 3D en couches 2D grâce à un logiciel approprié. Autour de ces deux grandes fonctions, d'autres logiciels et matériels électroniques sont intégrés notamment pour assurer la communication entre l'imprimante et les ordinateurs.

L'imprimante 3D reçoit donc une série d'instructions qu'elle va restituer en objets 3D. Plusieurs technologies existent pour passer de couches 2D à un objet 3D. Deux grands types de procédés sont en fait utilisés pour former les objets :

- Soit la matière travaillée peut entrer en fusion et en quel cas, elle peut être fondue peu à peu pour obtenir la forme souhaitée. (Exemple : polymère).
- Soit la matière peut être solidifiée sous l'action de la chaleur ou de la lumière (laser). (Exemples: résine ou alliage de titane).

Mais dans les deux cas, l'imprimante 3D « pense » couche par couche pour obtenir la forme 3D. Chacune de ces méthodes implique des qualités propres qui jouent sur la durée nécessaire à l'obtention de l'objet mais aussi sur leur taille limite.[4]

Le principe général de la fabrication additive est présenté sur la **Figure I.1**



**Figure I.1:** Principe général de la fabrication additive par couche.[5]

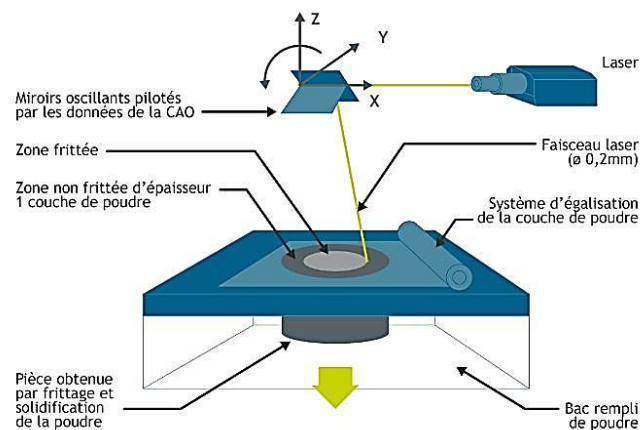
## I.4 Les technologies de l'impression 3D

L'ensemble des technologies d'impression tridimensionnelle connues est basé sur la découpe numérique d'un objet virtuel 3D en lamelles 2D de très fine épaisseur. Ces fines lamelles sont ensuite déposées physiquement une sur l'autre par l'imprimante en les fixant sur les précédentes, ce qui reconstitue l'objet réel. Il existe différents types de technologies, les plus connues étant la stéréolithographie, le frittage laser et la FDM (Fused Deposition Modeling).[1] Nous présentons ces différentes techniques dans ce qui suit dans le cas des métaux et polymères.

### I.4.1 Fabrication additive métallique

#### I.4.1.1 Frittage laser sur lit de poudre (SLS : Selective Laser Sintering)

Cette technologie est proche de la stéréolithographie mais sans la cuve remplie de polymère. Des matières dures (sous forme de poudre) comme le polystyrène, le verre, le nylon, certains métaux (le titane, l'acier, l'argent...) ou de la céramique sont frappées par un laser. Là où le laser frappe, la poudre fond pour s'assembler et créer la forme. La poudre non atteinte par le laser peut être réutilisée pour les prochains objets.[1]



**Figure I.2 :** Schématisation de procédé SLS.[6]

### I.4.1.2 Frittage laser par projection de poudre (LMD : Laser Metal Deposition)

Cette technique consiste à venir fondre la surface d'une pièce métallique à l'aide d'un laser. Simultanément, un jet de poudre est projeté sur la zone en fusion. Cette poudre fond sur la zone en fusion et vient ainsi former une couche qui fusionne avec le substrat. Plusieurs passages peuvent être nécessaires pour obtenir l'épaisseur désirée. Cette technique est utilisée à la fois pour créer des pièces 3D à partir de rien et pour réparer des pièces. Elle peut également être utilisée pour faire des traitements spéciaux de surfaces avec pour but d'améliorer la résistance à la corrosion ou à l'usure. [1]

### I.4.1.3 Fusion par faisceau d'électrons (EBM : Electron Beam Melting)

Ce procédé utilise un faisceau d'électrons à haute énergie qui vient impacter un lit de poudre métallique sous vide. La matière est localement fondue et s'agglomère. Ce procédé est orienté vers la production. Ce procédé est très utilisé pour la fabrication additive série. Les matériaux utilisés sont exclusivement métalliques (exemple : Titane, Alliage de titane, alliage de chrome...).[3]

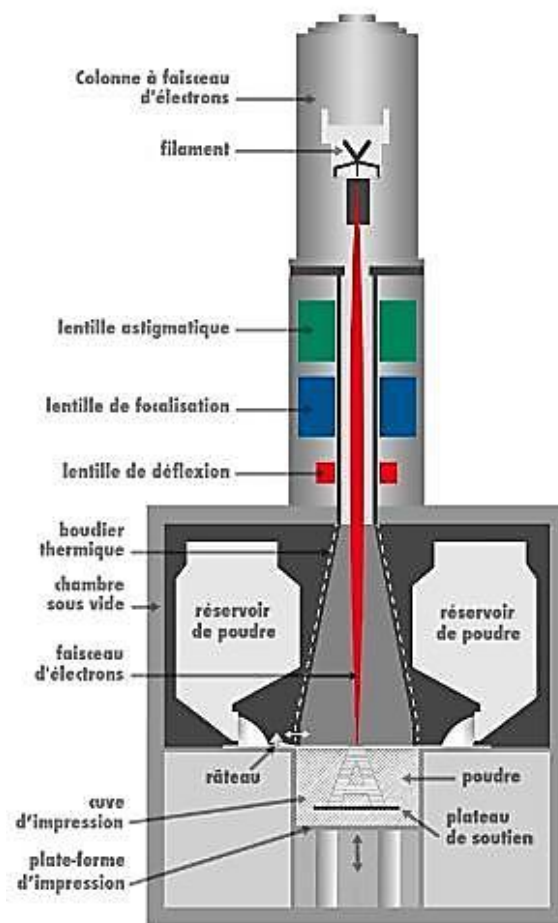


Figure I.3 : Schématisation de procédé EBM.[7]

#### I.4.1.4 Le frittage laser de métal (DMLS)

**DMLS** est aussi une technologie de « frittage », mais elle fait référence au procédé appliqué aux alliages métalliques. L'avantage de cette technologie est de produire des objets exempts des contraintes résiduelles et de défauts internes, à l'inverse des composants métalliques fabriqués traditionnellement. Mais l'inconvénient est qu'elle est très coûteuse, ce qui limite son utilisation à des applications haut de gamme, comme la fabrication de pièces dans l'industrie aérospatiale.[3]

#### I.4.1.5 Fusion sélective par laser (SLM: Selective Laser Melting)

La technologie **SLM** est un processus de « melting » qui utilise le laser pour obtenir une fusion complète. En ce sens, la poudre n'est pas simplement fusionnée, mais elle est réellement fondue en une partie homogène. Cette technologie offre l'avantage de produire des objets plus denses et plus résistants que **DMLS**, mais elle ne peut être utilisée qu'avec certains métaux, à savoir l'acier inoxydable, le titane, le cobalt chrome et l'aluminium. Il s'agit aussi d'une technologie très énergétiquement coûteuse, car chaque couche de poudre métallique doit être chauffée au-dessus du point de fusion.[3]

### I.4.2 Fabrication additive plastique

#### I.4.2.1 Stéréolithographie

La stéréolithographie a deux formes :

**La photopolymérisation (SLA)** : qui consiste à concentrer un rayon ultraviolet dans une cuve remplie de photopolymère (un matériau dont les molécules se modifient sous l'effet de la lumière, la plupart de temps ultraviolette). Le laser ultraviolet travaille le modèle 3D souhaité couche après couche. Lorsque le rayon frappe la matière, cette dernière se durcit sous son impact en se liant aux couches adjacentes.

**Digital light processing (DLP)**: le DLP utilise des faisceaux plus larges pour projeter les sections de l'objet directement dans la cuve de photopolymère.[8]

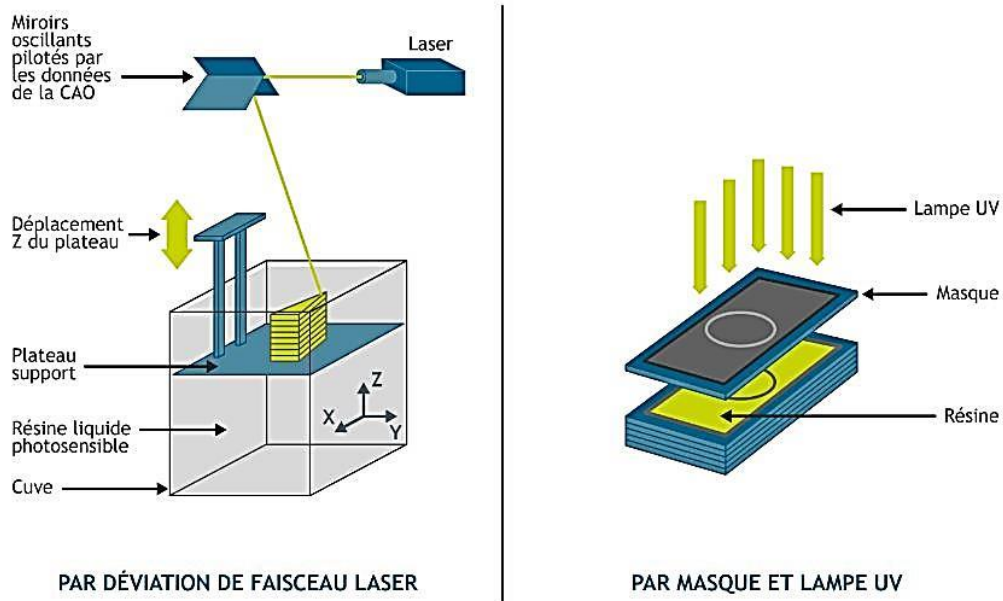


Figure I.4 : Principe de fabrication par la Stéréolithographie.[6]

### I.4.2.2 Dépôt de matière fondue (FDM : Fused Deposition Modeling)

Le FDM consiste à porter à la fusion de petites gouttes de matière plastique qui créent la forme couche après couche. Une fois que la goutte quitte l'application, elle durcit de manière immédiate tout en se fondant avec les couches inférieures. C'est le procédé le moins coûteux.[8]Le principe de cette technique est présenté sur la **Figure I.5.**

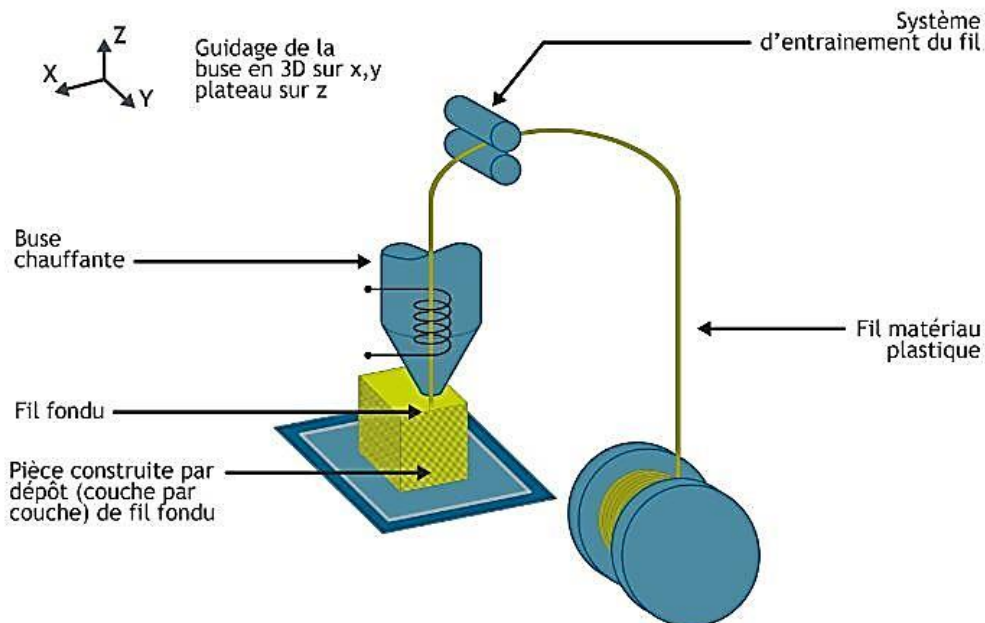


Figure I.5: .Principe de fabrication directe avec un procédé FDM.[6]

### I.4.2.3 Impression projection de gouttes (Material Jetting)

Le principe de ces imprimantes par jet multiple est assez proche de celui d'une imprimante classique : les buses utilisées sont d'ailleurs identiques aux imprimantes de bureau. C'est l'empilement de ces couches qui crée un volume. La pièce est généralement réalisée par dépose de gouttes de résine thermodurcissable (polypropylènes, cire...) qui est réticulée couche par couche par une lampe UV.

Afin de maintenir la pièce, un support est créé en même temps que la pièce, mais en cire. La cire est ensuite fondue à l'étuve pour obtenir une pièce finale.[8]

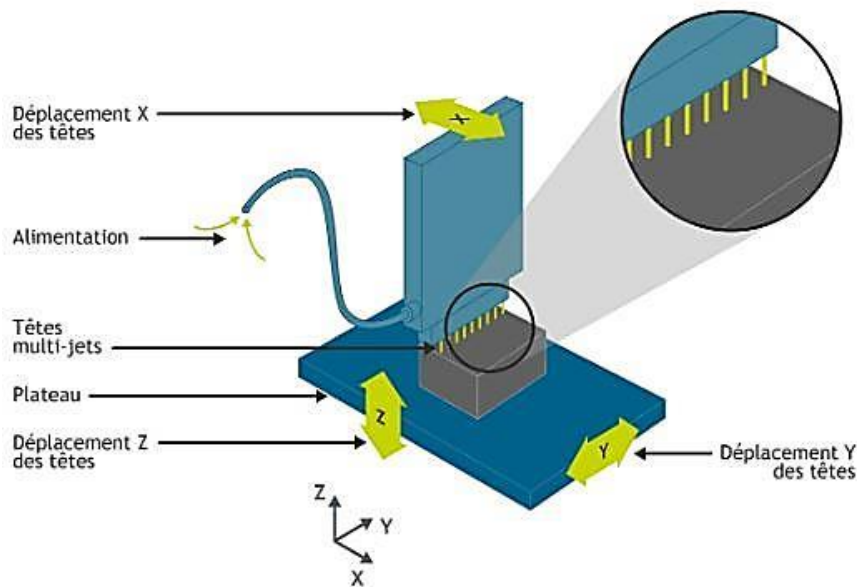


Figure I.6 : Principe de fabrication par projection de gouttes.[6]

### I.4.2.4 Fabrication continue de filaments composites (CEF : Composite Filament Fabrication)

La technologie CEF (Figure I.7) fonctionne de la même façon que la FDM. En utilisant un système double tête d'extrusion la première est pour le remplissage de la matière première (filament en plastique) qui peut se faire de trois manières différentes : linéaire, triangulaire ou hexagonale (Figure I.8), et la deuxième pour déposer la fibre sur les couches suivant deux types de trajectoires (Figure I.9) pour renforcer les parties mécaniques.[9]

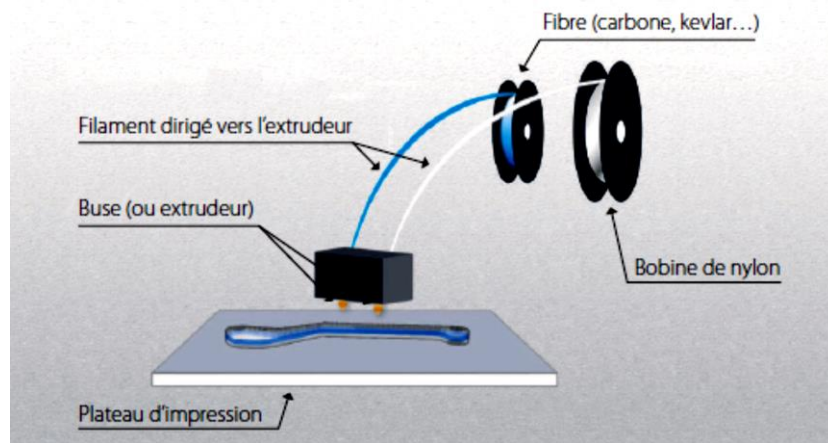


Figure I.7 : Principe de fabrication directe avec un procédé CEF.[9]



Figure I.8 : Différents dépôts du thermoplastique : linéaire, triangulaire ou nid d'abeille.[9]

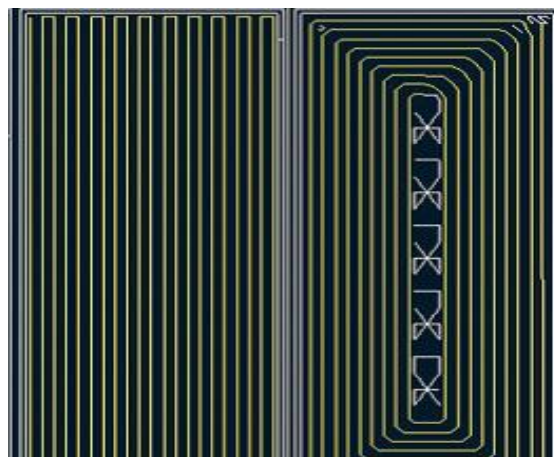


Figure I.9 : Différentes trajectoires de dépôt de fibre continue : isotropique et concentrique.[9]

## I.5 Les matériaux d'impression

La fabrication additive permet de travailler avec une large variété de procédés et chaque procédé à ces propres matériaux. A partir de là on peut les classer en trois catégories : plastiques, composites, autres matériaux.

Technologies	Polymères	Métaux	Céramiques
Stéréolithographie	×		
Digital Light Processing	×		
Selective Laser Sintering	×	×	×
Direct Metal Laser Sintering		×	
Selective Laser Melting		×	
Electron Beam Melting		×	
Fused Desposition Modelling	×		
Material Jetting	×		
Binder Jetting	×	×	
Laminated Object Manufacturing	×	×	×
Directed Energy Deposition		×	×

**Tableau I.1** : Différentes technologies et les matériaux correspondants.[10]

### I.5.1 Les plastiques

Les plastiques sont actuellement les matériaux les plus populaires dans le domaine de l'impression 3D, représentant 64% du marché. Les plastiques sont des polymères qui peuvent être mis en forme sous l'effet d'une source thermique, tels que l'ABS et le PLA, ou d'une source lumineuse, tels que les résines.

- Dans la famille des polymères thermoplastiques, on retrouve souvent l'**ABS** (Acrylonitrile Butadiène Styène) qui est l'un des matériaux le plus utilisé dans la fabrication additive. Sa température d'impression se situe entre 200 et 250 °C. On le trouve principalement sous la forme de filament. Il s'agit du matériau des briques de Lego, mais il est aussi très utilisé aussi dans l'automobile, les appareils électroménagers et autres applications. Il possède l'avantage de bien résister aux chocs, ce qui le rend très utile pour les applications fonctionnelles. Ce matériau offre beaucoup de liberté de conception, cependant, la finition de surface est plus brute qu'avec d'autres matériaux.

- On retrouve ensuite le **PLA** (acide polyactique) qui appartient également à la famille des polymères thermoplastiques. Ce matériau est fabriqué à partir de composants biologiques comme l'amidon de maïs ou le sucre de canne, il offre donc l'avantage d'être biodégradable et non toxique. On le trouve principalement sous la forme de filament. Lorsqu'il fond, il ne sent pas aussi fort que l'ABS et a besoin de températures moins élevées, sa température d'impression se situe entre 160 et 220 °C. Le PLA est plus facile à imprimer que l'ABS et offre un bon niveau de finition. En revanche il n'est pas très résistant à la chaleur, ni à l'humidité, et casse plus facilement.

- Le **polyamide** est un autre plastique fortement utilisé dans l'impression 3D. Il se trouve principalement sous forme de fine poudre, blanche et granuleuse, pour être utilisé avec les technologies de frittage laser (SLS). Cependant, certaines familles de ce matériau, comme le nylon, peuvent se présenter sous la forme de filament et être utilisées avec le procédé FDM. Il possède de nombreuses qualités telles qu'une bonne stabilité, rigidité, flexibilité et une excellente résistance aux chocs. La couleur finale est de nature blanche, mate, et opaque, avec une surface légèrement poreuse.

- La poudre de polyamide peut être mélangée avec de l'aluminium pour donner naissance à l'**alumide**. La combinaison de ces deux composants offre l'avantage de réaliser des pièces à la fois très solides et flexibles, tout en conservant une bonne résistance à la chaleur. L'impression d'alumide s'effectue avec les technologies de frittage laser (SLS), et produit des objets avec un aspect proche du métal. Néanmoins, sa surface légèrement poreuse et sableuse nécessite souvent un travail de finition, qui peut être de nature diverse.

- Une autre grande famille des plastiques utilisée dans l'impression 3D concerne les **résines**. Ces résines sont des polymères liquides qui constituent le matériau de base de plusieurs techniques d'impression 3D, comme la Stéréolithographie. Elles permettent d'obtenir des objets avec une très bonne finition externe, de couleur variée, ou même transparente. Dans tous les cas, il est possible de réaliser un processus de coloration ainsi que n'importe quel autre traitement post-impression.[11]

### **I.5.2 Les métaux**

Après les plastiques, les métaux sont les matériaux les plus utilisés par les industriels dans l'impression 3D. Les métaux se présentent sous forme de poudre, et sont principalement utilisés avec des processus de fusion. Dans cette catégorie, on retrouve la liste non exhaustive des métaux suivants :

- **L'aluminium** et ses d'alliages (AlSi12 et AlSi10Mg). Ces matériaux ont l'avantage d'avoir une faible différence entre leur température de fusion et leur point de solidification, à

l'inverse des alliages d'aluminium à haute résistance. Ces poudres métalliques permettent la création de pièces légères avec de bonnes propriétés thermiques. Les applications typiques sont des pièces avec des parois minces, telles que des échangeurs de chaleur, des pièces de production ou des pièces de rechange pour l'automobile, l'aérospatiale et l'aviation.

- **Le cobalt-chrome** et ses alliages. Cette classe de super-alliages présente une très bonne résistance à l'usure et à la corrosion, ainsi qu'un comportement non magnétique. Bien que ce matériau existe depuis longtemps, il ne peut être utilisé que depuis récemment pour l'impression 3D, notamment avec la technologie EBM. L'entreprise Suédoise Arcam a par exemple développé l'ASTM F75, un alliage très solide et résistant utilisé dans la conception d'outillage et de moules. Lisse et résistant, le cobalt-chrome est aussi employé pour la réalisation de prothèses médicales, comme un genou ou une hanche.

- **L'acier inoxydable**, connu sous le nom « inox », fut le premier métal commercialement disponible pour l'impression 3D. Comme son nom le suggère il possède des propriétés lui conférant une grande résistance à la corrosion.

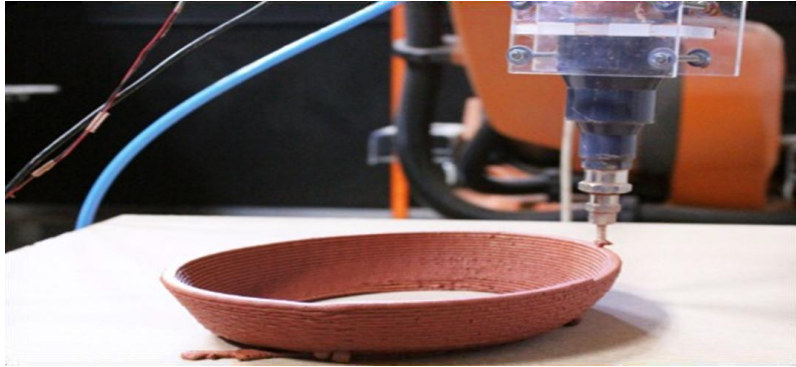
- **L'acier d'outillage** est particulièrement adapté à la fabrication d'outillage rapide et de moules dans les domaines de l'aéronautique, l'aérospatiale, et de l'automobile. Il se caractérise par une excellente dureté, une résistance à l'abrasion et à la déformation, et une bonne capacité à maintenir une arête de coupe à des températures élevées.

- **Le titane** et ses alliages permettent de produire des pièces légères avec une excellente solidité et une très bonne résistance à la corrosion. Les techniques traditionnelles ont l'inconvénient d'être complexes et coûteuses. De plus, ce matériau est difficile à travailler et peut facilement être contaminé par des impuretés lors de la phase de soudage. L'impression 3D permet au contraire de travailler le métal sans contraintes et d'éviter la phase de soudage, ce qui en fait la meilleure technologie actuelle pour travailler ce métal.[11]

### **I.5.3 Les autres matériaux**

Même si les plastiques et les métaux apparaissent clairement comme les matériaux les plus répandus dans le domaine de l'impression 3D, des expérimentations poussées ont été menées avec d'autres composants. On retrouve par exemple le groupe des céramiques qui ne sont actuellement utilisables qu'avec un nombre restreint de procédés d'impression. La céramique est un matériau avec des propriétés intéressantes, tels que son aspect recyclable et étanche.

Il existe aussi une quantité de recherches importantes sur le potentiel de l'impression 3D pour des matériaux biologiques. Le tissu vivant est par exemple étudié dans plusieurs institutions en vue de développer des applications telles que l'impression de tissus externes et d'organes humains pour des transplantations.[2]



**Figure I.10 :** Exemple d'objet en céramique.[2]

## **I.6 Les champs d'applications**

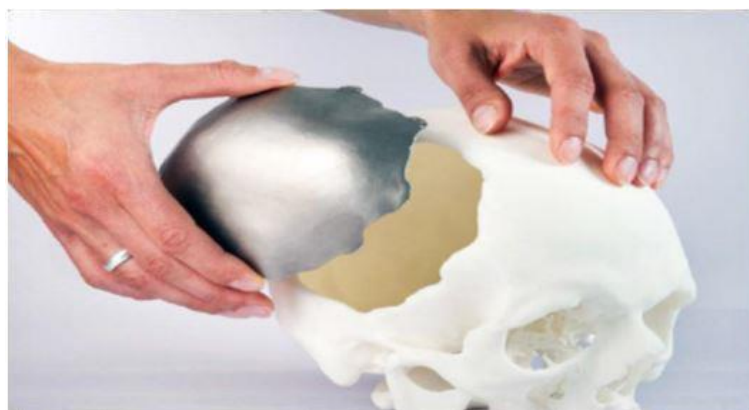
La fabrication additive est aujourd'hui compétitive pour la fabrication de pièces complexes en petites séries ou pour des pièces non fabricables avec d'autres procédés. Elle permet également les concepts de «mass personalization» (personnaliser les objets pour toutes les applications personnalisées) et de « mass customisation » (possibilité à toute personne désirant de concevoir et fabriquer des pièces).

### **I.6.1 La fabrication de moules**

La fabrication de moules par fabrication additive a été l'un des premiers exemples d'utilisation de pièces finies pour l'industrie.[4]

### **I.6.2 Le biomédical**

La possibilité de personnaliser totalement les pièces est très intéressante dans ce domaine et la fabrication additive permet notamment la fabrication de prothèse personnalisées (**Figure I.11**). Ce domaine s'intéresse également à la fabrication de structures poreuses, notamment en titane, car elles se rapprochent des propriétés des os. Ce type de structure n'est pas réalisable avec les procédés conventionnels. Les propriétés mécaniques de ce type de pièce sont étudiées dans plusieurs sources.[4]



**Figure I.11:** Prothèse crânienne réalisé par l'impression 3D.[4]

### I.6.3 L'automobile

Principalement l'automobile sportive qui s'intéresse aux pièces complexes en très faible quantités (une ou deux pièces en général) qui doivent être réalisées rapidement. Ces pièces sont complexes car elles intègrent de nouvelles fonctionnalités et ont pour objectif de réduire la masse des produits.



**Figure I.12:** Culbuteurs réalisés par impression 3D.[11]

### I.6.4 Aéronautique et l'aérospatial

De la même façon que pour l'automobile, la fabrication additive dans le domaine aérodynamique et aérospatial permet d'intégrer de nouvelles fonctionnalités et de réduire la masse des pièces. La fabrication de pièces souvent uniques dans ce domaine (**Figure I.13**), en fait un procédé particulièrement intéressant.[8]



**Figure I.13:** Drone fabriqué en impression 3D.[4]

## I.7 Normalisation

Les organismes de réglementation actifs dans le domaine ASTM, ISO et CEN CENELEC ont constitué des comités techniques pour consolidation et appropriation des réglementations de la fabrication additive. En 2016, les trois organismes de normalisation ont signé un accord de collaboration pour l'élaboration de normes communes (**Tableau I.2**)

Technologies	Procédé de fabrication
ISO/ASTM 52921 :2013	Terminologie normalisée pour la fabrication additive -- Systèmes de coordonnées et méthodes d'essai.
ISO 17296-3 :2014	Fabrication additive -- Principes généraux -- Principales caractéristiques et méthodes d'essai correspondantes.
ISO 17296-4 :2014	Fabrication additive -- Principes généraux -- Vue d'ensemble des échanges de Données.
ISO 17296-2 :2015	Fabrication additive -- Principes généraux -- Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières premières.
ISO/ASTM 52900 :2015	Fabrication additive -- Principes généraux -- Terminologie.
ISO/ASTM 52915 :2016	Spécification normalisée pour le format de fichier pour la fabrication additive (AMF)
ISO/ASTM 52901 :2017	Fabrication additive -- Principes généraux -- Exigences pour l'achat de pièces.

**Tableau I.2** : Liste des normes publiées en matière d'impression 3D.[11]

# Chapitre II

## Généralités sur l'aérodynamique

## II. Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation de quelques concepts de l'aérodynamique ainsi que les différentes notions utilisés dans cette théorie.

**L'aérodynamique** est l'étude des phénomènes qui se créent autour d'un corps (aéronef) en déplacement. Examiner en premier lieu le milieu dans lequel les aéronefs évoluent puis déterminer les critères pour qu'ils aient la forme la plus appropriée au vol.[12]

**La Mécanique du vol** est l'étude des forces appliquées à un aéronef en vol. Ces forces peuvent être regroupées en fonction de leur origine : [12]

- **Origine inertielle**, fonction des accélérations subies par la masse de l'avion.
- **Origine propulsive**, générée par les moteurs de l'avion.
- **Origine aérodynamique**, induite par la vitesse de déplacement de l'aéronef.

Avant d'entreprendre l'étude des phénomènes qui permettent à un aéronef de se maintenir dans l'atmosphère et d'y évoluer, il est utile de rappeler brièvement les propriétés caractérisant ce milieu.

### II.1 L'air :

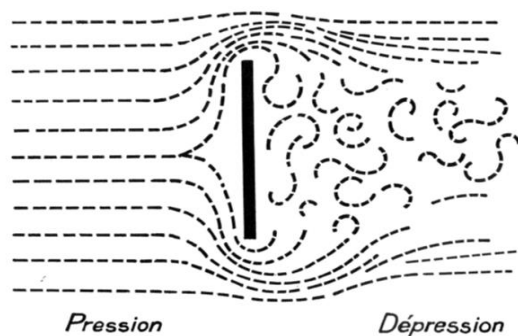
L'air est le mélange gazeux qui constitue l'atmosphère terrestre .Comme tous les gaz, il est composé de molécules extrêmement mobiles les unes par rapport aux autres. Il est invisible, ce qui rend la compréhension des phénomènes relatifs au vol de l'avion difficile.

#### II.1.1 Les paramètres influençant sur la résistance de l'air :

Les forces de pression dépendent de la forme du corps et la disposition que celui-ci occupe par rapport à la direction de la vitesse relative.

Les forces de frottement, dues à la viscosité de l'air, ont un effet directement en rapport avec l'étendue de la surface du corps et aussi avec l'état de cette surface.

Pour illustrer l'effet de la pression, plaçons une plaque plane perpendiculairement au courant d'air (vent relatif).A l'avant de la plaque, l'air va exercer une forte pression, tandis qu'à l'arrière se forme un " vide " qui tend à aspirer la plaque (**Figure II.1**).



**Figure II.1** : l'effet de pression sur une plaque plane.[13]

Dans ces conditions, la plaque est soumise à une force horizontale appelée **résistance de l'air**. En installant un dynamomètre relié à la plaque, nous pouvons mesurer cette force exercée par l'air et les facteurs qui font varier cette force.[13]

### **II.1.1.1 L'aire**

Si nous doublons la surface de la plaque plane, la force mesurée par le dynamomètre double également : La résistance de l'air est proportionnelle à la surface en contact.

### **II.1.1.2 La vitesse**

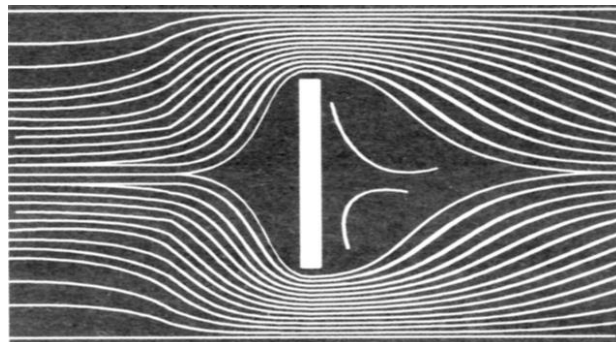
En augmentant la vitesse de l'écoulement, la force exercée par l'air augmente elle aussi : La résistance de l'air est proportionnelle au carré de la vitesse.

### **II.1.1.3 Masse volumique**

La densité de l'air diminue avec l'altitude, la résistance de l'air va diminuer également. On en déduit donc : La résistance de l'air est proportionnelle à la masse volumique de l'air.[14]

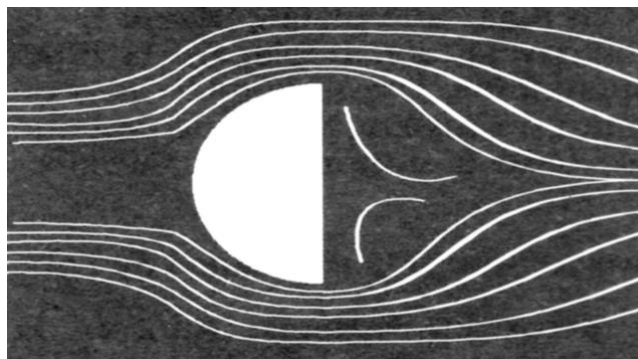
### **II.1.1.4 Forme de corps [14]**

Un disque plat perpendiculaire au courant d'air d'une soufflerie, les filets d'air s'entassent à l'avant du disque et le contournent difficilement (**Figure II.2**).



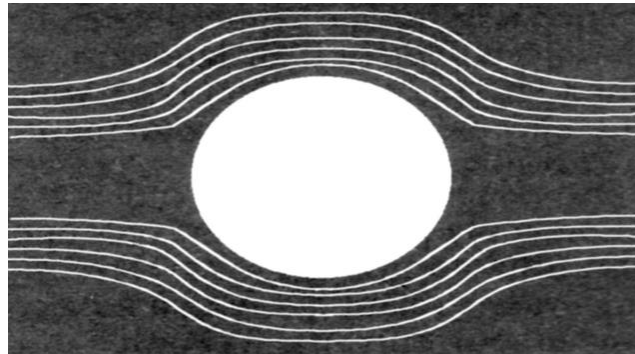
**Figure II.2:** Écoulement autour d'un disque plat perpendiculaire au courant d'air.[12]

Si nous ajoutons une demi-sphère à l'avant de ce disque, nous remarquons que la zone de pression diminue d'une façon appréciable mais, qu'à l'arrière, la dépression et les tourbillons subsistent (**Figure II.3**).



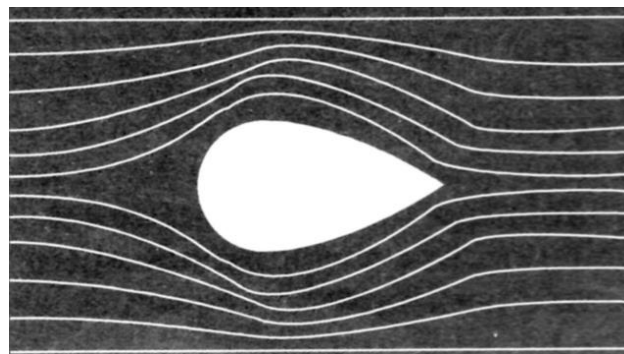
**Figure II.3 :** Écoulement autour d'une demi-sphère.[12]

Ajoutons une seconde demi-sphère à l'arrière, nous obtenons un corps sphérique. L'écoulement est amélioré, la résistance est fortement diminuée, mais n'est pas complètement résorbée (**Figure II.4**).



**Figure II.4** : Écoulement autour d'une sphère.[12]

Pour combler cette zone, étirons la demi-sphère arrière pour approcher la forme d'un œuf. Les filets d'air se rejoignent à l'arrière sans présenter de tourbillons. Il n'existe plus, qu'une très faible résistance de l'air. Le corps obtenu est un corps fuselé (**Figure II.5**).



**Figure II.5** : Écoulement autour d'un corps en forme d'un œuf.[12]

## II.2 Nombre de Reynolds

Osborne Reynolds ingénieur anglais spécialiste de l'hydrodynamique a mis en évidence un nombre sans dimension caractéristique de la nature de l'écoulement d'un fluide ; le nombre de Reynolds "Re". Ce nombre qui porte son nom est le rapport entre les forces d'inertie des molécules du fluide, et les forces de viscosité de ce fluide. La valeur de  $Re$  dépend des dimensions du corps (longueur ou corde), de la vitesse de déplacement ( $V$ ) et de la viscosité cinématique du fluide ( $\nu$ ). 
$$Re = \frac{\rho V L}{\eta}$$

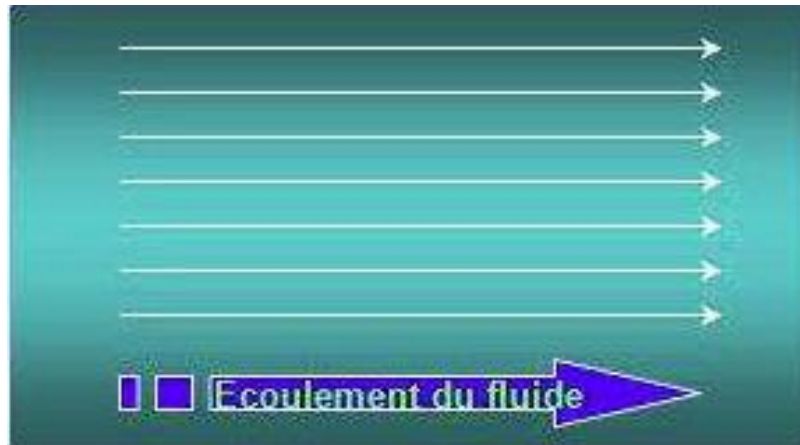
$Re$  est généralement très faible dans les milieux denses et visqueux, et plus élevé dans les milieux fluides et peu denses. En aéronautique,  $Re$  est généralement exprimé en millions ( $10^6$ ).[15]

### II.3 L'écoulement

Terme générique définissant le déplacement de l'air. On distingue en général trois types d'écoulement classés selon le comportement des particules d'air :

#### II.3.1 L'écoulement laminaire [12]

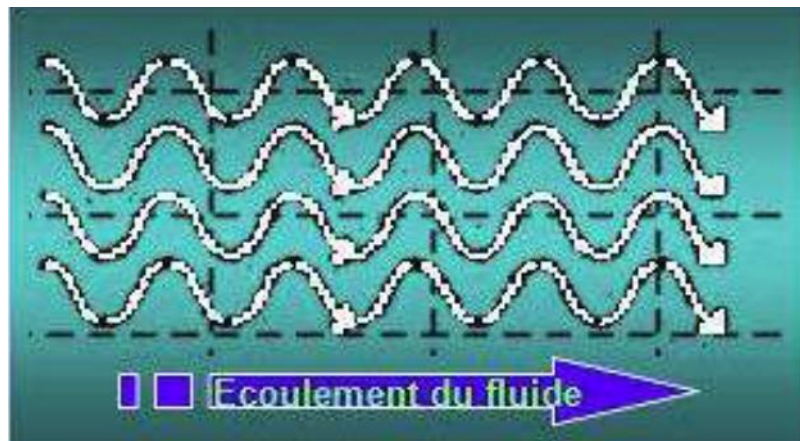
L'air se déplace sans rencontrer d'obstacles ou de force de déviation. Le fluide se comporte comme s'il était inclus dans une multitude de tuyaux parallèles et juxtaposés. Tous ces filets d'air affichent la même vitesse et la même direction. La pression est uniforme dans toute la veine (**Figure II.6**).



**Figure II.6:** Ecoulement laminaire de fluide. [12]

#### II.3.2 L'écoulement turbulent [12]

Le courant d'air rencontre un obstacle à son déplacement. Le mouvement d'ensemble du fluide suit toujours la même direction, mais le déplacement des molécules devient anarchique et ne présente plus aucun caractère de permanence et de régularité. Quel que soit l'endroit d'observation du phénomène, on constate une divergence des molécules tant en direction qu'en intensité (**Figure II.7**).



**Figure II.7:** Ecoulement turbulent de fluide. [12]

### II.3.3 L'écoulement tourbillonnaire [12]

Cas particulier de l'écoulement turbulent dépassé. Ce régime tourbillonnaire semble vouloir réorganiser l'agitation désordonnée de l'écoulement turbulent. Les filets d'air déviés dans tous les sens s'organisent, prennent une direction commune circulaire et associent leur intensité (Figure II.8).

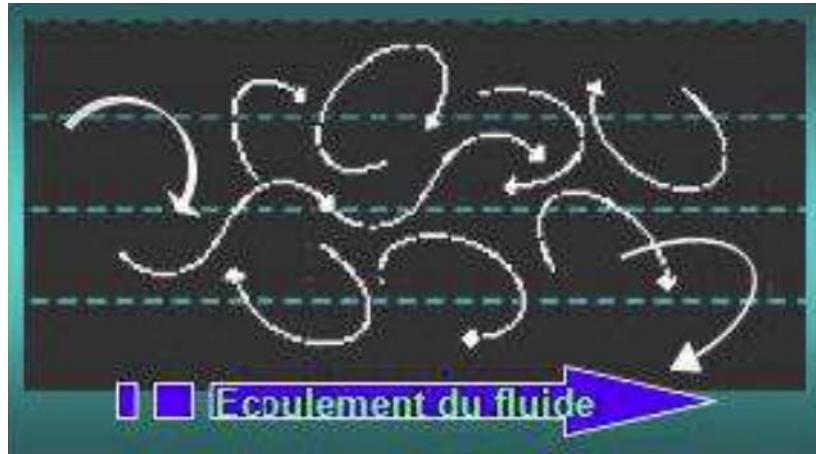


Figure II.8: Ecoulement tourbillonnaire de fluide. [12]

### II.4 La couche limite [16]

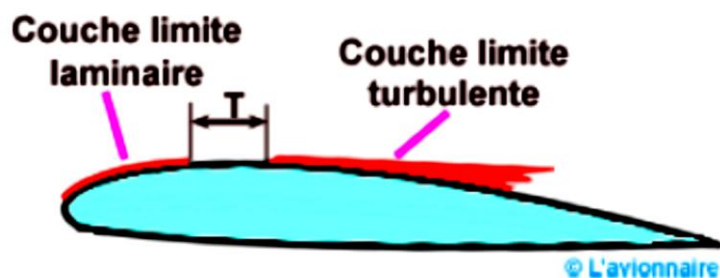
Lorsqu'un fluide se déplace autour d'un obstacle, les champs de vitesse et de pression sont perturbés par ce dernier. La couche limite est la zone de fluide contiguë à la paroi, dans laquelle se produit l'accommodation entre la vitesse nulle en paroi et la pleine vitesse locale du fluide libre. De nombreuses propriétés de l'écoulement (frottement, transferts thermiques et présence éventuelle de décollements) dépendent de cette couche limite. Cette couche permet de donner une interprétation à bon nombre de phénomènes que la théorie des fluides parfaits ne suffisait pas à expliquer. C'est la couche limite qui conditionne directement la résistance de frottement du corps. En revanche, en dehors de la couche limite on pourra considérer que le fluide a une viscosité nulle. Il existe donc près de la paroi une région dans laquelle la vitesse passe de 0 sur la paroi à la vitesse de l'écoulement de fluide parfait à une distance de l'ordre de  $Re^{-1/2}$  de la paroi. L'épaisseur d'une couche limite varie suivant l'état de la surface (plus la surface est lisse, plus la couche est mince); mais aussi suivant la vitesse du fluide.

On distingue deux types de couche limite :

La couche limite laminaire est caractérisée par le fait que toutes les vectrices vitesses sont parallèles à un même plan, l'écoulement se présente alors sous la forme de lames d'air glissant les unes sur les autres. Ces lames restent rectilignes sur une certaine longueur, puis s'estompent. On observe une telle couche limite vers le bord d'attaque d'un profil.

Assez rapidement les lames disparaissent et l'écoulement présente un caractère désordonné, due en partie aux aspérités qui existent toujours sur la paroi. La couche limite devient turbulente et les vecteurs vitesses ne sont plus parallèles entre eux.

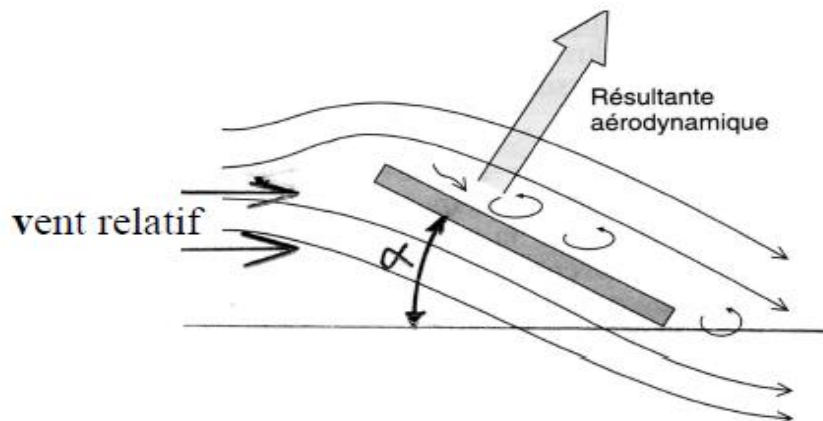
Sur un profil, il existe donc une zone où la couche limite est laminaire et une zone où la couche limite est turbulente. Sur un avion de transport l'épaisseur  $\delta$  de la couche limite qui se développe à la surface de son aile peut varier de quelques millimètres au bord d'attaque à quelques centimètres au bord de fuite. La zone où la couche limite laminaire devient turbulente est la zone de transition (**Figure II.9**).



**Figure II.9** : Schématisation de la couche limite. [16]

## II.5 Les surfaces portantes [17]

Tout corps en mouvement subit une force appelée résistance de l'air qui tend à s'opposer à son déplacement, nous avons appris comment réduire cette résistance au maximum. Ayant considéré les corps présentant les meilleures qualités de pénétration dans l'air, nous allons étudier à présent ceux dont le but essentiel est d'utiliser la résistance de l'air, considérée comme nuisible, pour porter dans l'air : il s'agit des surfaces portantes (**Figure II.10**).



**Figure II.10**: Exemple d'une surface portante. [17]

L'angle d'incidence est l'angle formé entre la corde et la direction des filets d'air (vent relatif), noté  $\alpha$ . Lorsque l'angle d'incidence de l'aile augmente, les conditions changent aussi bien sous l'intrados que sur l'extrados.

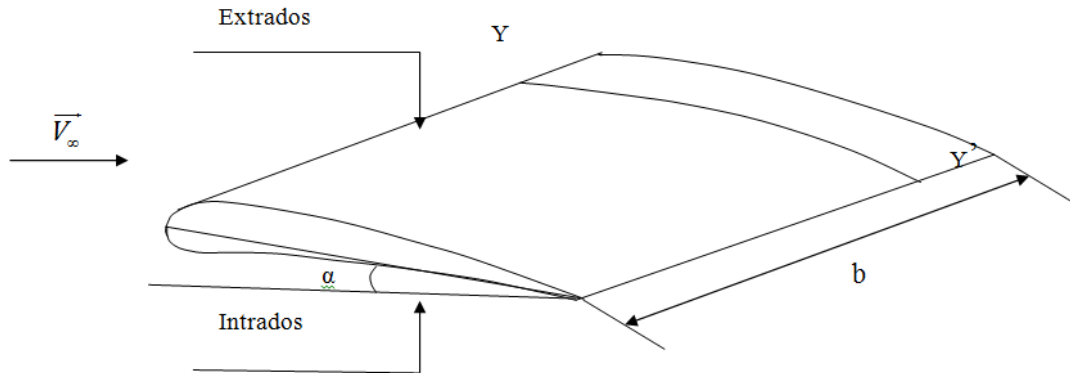


Figure II.11: Profil d'aile. [18]

Lorsque l'angle d'incidence est nul (aile parfaitement horizontale), on peut dire que l'intrados n'est soumis qu'à la pression statique, la pression dynamique n'agissant que dans la direction et le sens de l'écoulement qui est alors **parallèle** à l'intrados. On peut donc dire qu'au niveau de l'intrados, l'augmentation d'angle d'incidence entraîne une augmentation de la pression dans son ensemble, donc de la **portance**.

### II.6 Portance et traînée [12]

La portance aérodynamique est la composante de la force subie par un corps en mouvement dans un fluide qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement.

La traînée est la composante de la force qui s'oppose au mouvement de corps.

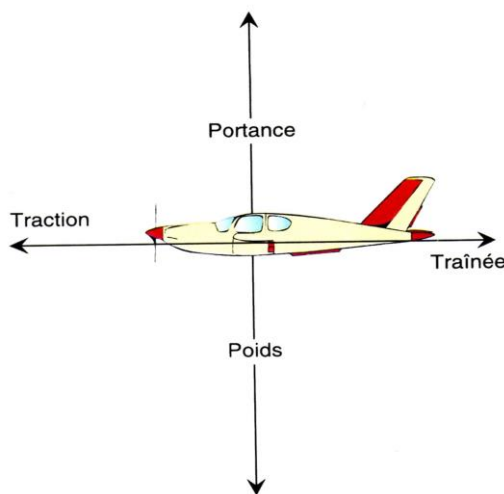


Figure II.12 : La Force de portance et de traînée. [12]

**II.6.1 Expression de la trainée**

La trainée est la force représentative de la résistance à l'avancement, elle est due essentiellement aux forces de frottement sur le profil, à la forme de profil, et elle prend en compte la trainée induite par la portance.

Elle est proportionnelle aux mêmes paramètres que la résistance de l'air, et elle s'écrit sous la forme :

$$R_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_x \quad (\text{II-1})$$

*C<sub>x</sub>*: coefficient de trainée

*ρ*: densité de l'air (Kg/m<sup>3</sup>)

*S*: surface de l'aile (m<sup>2</sup>)

*V*: vitesse (m.s<sup>-1</sup>)

**II.6.2 Expression de la portance**

La portance est la composante verticale de la résultante aérodynamique. On l'exprime par la relation :

$$R_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_z \quad (\text{II-2})$$

*C<sub>z</sub>*: coefficient de portance

*ρ*: densité de l'air (Kg/m<sup>3</sup>)

*S*: surface de l'aile (m<sup>2</sup>)

*V*: vitesse (m.s<sup>-1</sup>)

**II.7 Les différents facteurs influents la valeur de la trainée et de la portance****II.7.1 Effet de l'allongement**

La trainée totale d'une aile peut être regardée comme étant la somme de deux trainées particulières, de caractères assez différents :

**• La trainée de profil :**

Trouve ses origines dans le frottement superficiel de l'air visqueux sur la surface plus ou moins lisse de l'aile.

**Coefficient de trainée de profil (C<sub>x p</sub>) :**

$$C_{x p} = C_{x r} + C_{x f} \quad (\text{II-3})$$

*C<sub>x r</sub>* : coefficient de trainée de forme du profil

*C<sub>x f</sub>* : coefficient de trainée de frottement

- **La trainée induite (conséquence de portance) :**

C'est la différence de pression entre l'intrados et l'extrados. Il existe sur l'extrados une convergence des filets fluides vers le plan de symétrie de l'aile, tandis qu'au contraire sous l'intrados les filets sont déviés vers l'extérieur de l'aile. Ces différences de pression cherchent à se compenser, ce qui donne naissance à un mouvement tourbillonnaire qui affecte les bords marginaux de l'aile et qui s'étend fort loin en arrière : ce sont les "tourbillons marginaux" (**Figure II.13**).

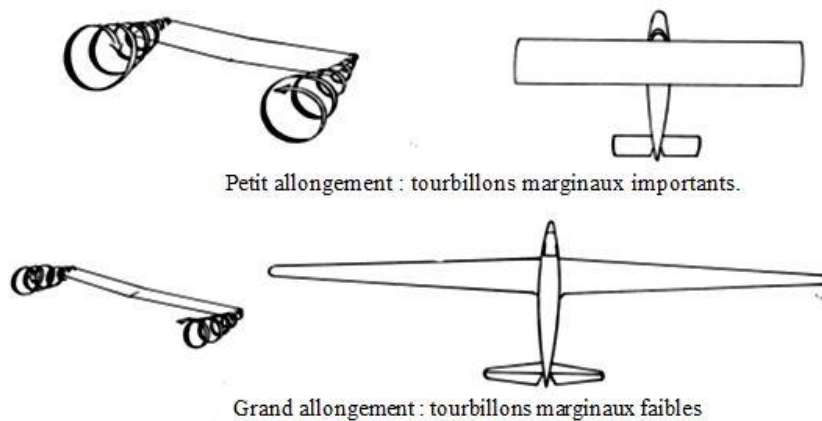
Un grand allongement est plus favorable aux faibles vitesses, alors qu'un petit allongement convient aux grandes vitesses.

**Coefficient de trainée induite ( $C_{xi}$ ) :**

$$C_{xi} = \frac{C_z^2}{\pi\lambda} \quad (\text{II-4})$$

$\lambda$  : l'allongement d'une aile rectangulaire

$C_z$  : Coefficient de portance

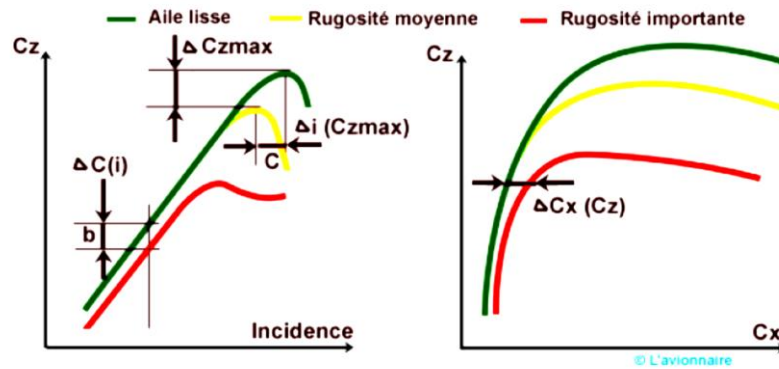


**Figure II.13 :** Tourbillons marginaux aux fonctions de l'allongement de l'aile. [12]

### II.7.2 Effet de la rugosité [19]

Si les pilotes connaissent les effets aérodynamiques néfastes du givre, de la neige ou du brouillard givrant adhérent à la surface de l'aile, ils sous-estiment en général (sauf les pilotes de planeurs très attentifs à la propreté des ailes) les larges accumulations de débris d'insectes, de la peinture écaillée ou une distribution de rivets grossiers sur la surface de l'aile. Pour une rugosité de l'extrados s'étendant sur toute l'envergure de l'aile vers le bord de fuite sur des longueurs variables, les effets caractéristiques d'une mauvaise rugosité sont :

- Une réduction du coefficient de portance maximum  $C_z \max$ , donc une augmentation de la vitesse de décrochage.
- Une réduction de l'incidence à laquelle se produit le décrochage.
- Une augmentation rapide de la trainée après décrochage.



**Figure II.14 :** Influence de la rugosité sur le coefficient de portance. [19]

Comme on peut s'y attendre, la zone du bord d'attaque de l'aile est la plus sensible à la rugosité de surface, mais les effets deviennent de plus en plus défavorables lorsque l'épaisseur de la rugosité augmente et qu'elle s'étend de plus en plus vers le bord de fuite. Ils peuvent engendrer une réduction importante de la portance à une incidence donnée et un accroissement de la traînée parasite de l'aile.

Les effets des différentes formes de rugosité de surface de l'aile sur le  $C_z$  max d'une aile varient en fonction de la position des dispositifs hypersustentateurs. Le braquage des volets de bord de fuite tend à accroître les effets de la rugosité de manière significative. Par contre les systèmes hypersustentateurs de bord d'attaque s'étendant sur toute l'envergure tendent à supprimer les effets défavorables des rugosités de faible amplitude, mais n'ont qu'une faible influence lorsque les rugosités deviennent importantes. Ce qui complique encore davantage la situation c'est que le décrochage précoce dû aux effets de la rugosité de surface se produit à une incidence inférieure à la normale. En résumé, un avion affecté par une rugosité de surface de l'aile décrochera prématurément et même, dans certain cas, avant d'atteindre l'incidence de déclenchement de l'avertisseur de décrochage.

## II.8 Evolution de la résultante aérodynamique en fonction de l'incidence [19]

La "polaire" est la courbe essentielle pour déterminer les caractéristiques d'un profil, d'une aile ou d'un avion complet. Elle montre comment varie la portance et la traînée, en fonction de l'angle d'incidence. La polaire est donc la "carte d'identité" aérodynamique de l'aile. Elle indique les caractéristiques de la voilure et permet des comparaisons avec d'autres. Le but étant d'obtenir le maximum de portance pour un minimum de traînée. Il est donc intéressant de calculer le rapport entre le coefficient de portance et le coefficient de traînée.

Ce rapport est appelé "finesse aérodynamique" qui s'écrit :

$$f = C_z / C_x = R_z / R_x = \operatorname{tg} \delta \quad (\text{II-5})$$

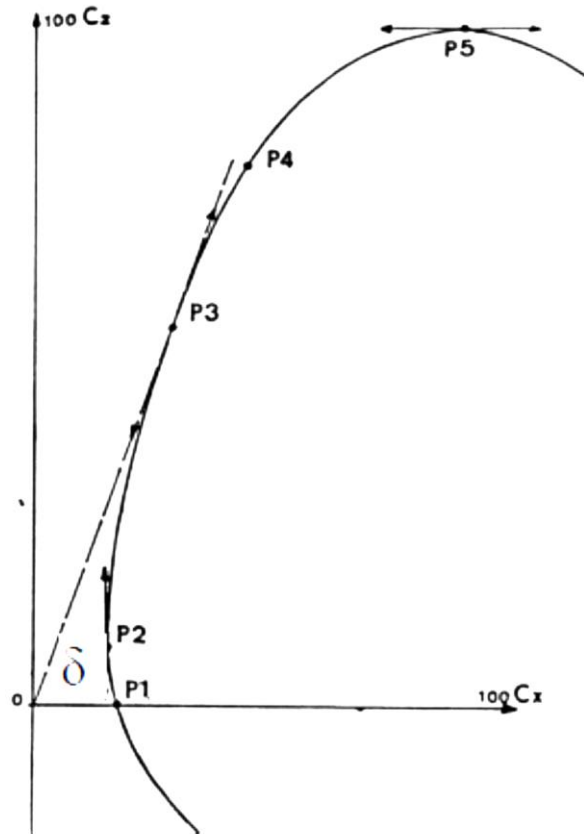


Figure II.15: La polaire. [19]

#### Points remarquables d'une polaire :

**P1 Cz nul** : point de portance nulle

**P2 Cx minimal** : point de trainée minimale. Il est déterminé par la tangente à la polaire menée parallèlement à l'axe des Cz.

**P3 finesse maximale** : elle est déterminée par la tangente à la polaire menée à partir de l'intersection des deux axes.

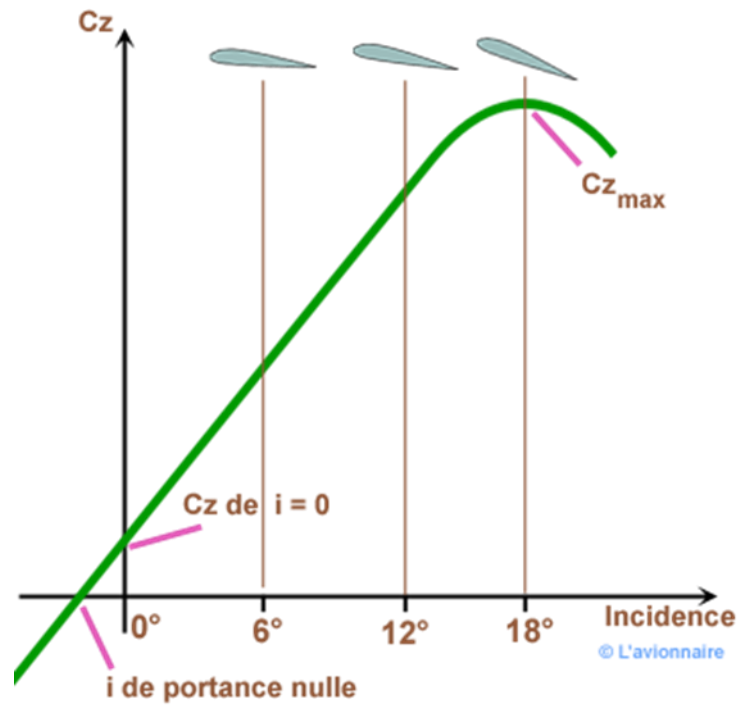
**P4 taux de chute minimal**: ce point détermine l'angle pour lequel le rapport  $\frac{C_x^2}{C_z^3}$  est minimal.

Il se détermine par calcul ou par graphique et permet de connaître la vitesse à adopter pour avoir le temps maximum de vol appelé également endurance maximum ou autonomie maximale.

**P5 Cz maximal** : point de portance maximale. Il est déterminé par la tangente à la polaire menée parallèlement à l'axe des Cx.

#### II.9 Courbe des coefficients de portance en fonction des angles d'incidences

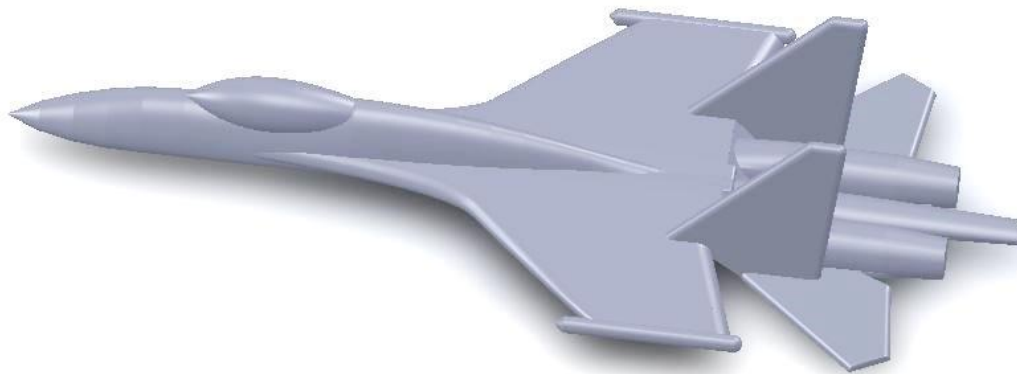
Augmentation du Cz par augmentation d'incidence jusqu'à une valeur maximale Cz max qui correspond à un angle d'incidence appelée **angle de décrochage** voir (Figure II.16).



**Figure II.16 :** Coefficient de portance en fonction de l'incidence. [19]

## Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de s'initier à l'étude aérodynamique et de définir l'effet de l'état de surface (rugosité) sur les résultantes aérodynamiques, à savoir la traînée et la portance, et tracer à la fin les différentes courbes du modèle étudié (**Figure II.17**).



**Figure II.17 :** Maquette Sukhoi SU-35.

# Chapitre III

## Matériels et Méthodes

### III. Introduction

Ce troisième chapitre, est consacré à la présentation des différentes techniques et matériels expérimentales utilisées pour bien mener notre étude.

#### III.1 : Imprimante 3D de type Zortrax M200 Plus

L'imprimante 3D professionnelle "Zortrax M200 Plus" (**Figure III.1**) utilisé durant notre étude a été fabriquée par la société polonaise Zortrax qui fournit des solutions complètes pour l'impression 3D. Pour fabriquer des objets l'imprimante "Zortrax M200 Plus" fait passer le filament à travers la buse d'impression. Le matériau est alors projeté via la buse d'impression sous la forme d'une fine chaîne de matière fondue. Le mouvement de la buse d'impression est coordonné par la plaque d'impression qui s'abaisse progressivement à mesure que chaque couche se dépose, de sorte à ce qu'une nouvelle couche recouvre la précédente jusqu'à la fin de l'impression. [20]

##### III.1.1 Propriétés de l'imprimante Zortrax M200 Plus

- Imprimante 3D à une seule tête d'impression.
- Technologie : LPD (dépôt de plastique par couche) / FFF.
- Taille d'objet : 200 x 200 x 180 mm.
- Précision : 90-390 microns (pour une buse de 0,4 mm).
- Diamètre de la buse : 0,3mm, 0,4mm, 0,6mm.
- Large palette de matériaux : (Z-NYLON, Z-FLEX, Z-PLA Pro, Z-PETG, Z-PCABS, Z-SEMIFLEX, Z-ultrat, Z-HIPS, Z-VERRE, Z-ESD, Z-ASA Pro, Z-ABS)
- Ecran tactile intégré.
- Connectivité : USB, RJ45, Wifi.
- Température d'impression maximale (extrudeuse) : 290° C.
- Température maximale de la plateforme : 105 ° C.
- Caméra intégrée. [20]



Figure III.1 : Imprimante Zortrax M200 Plus. [20]

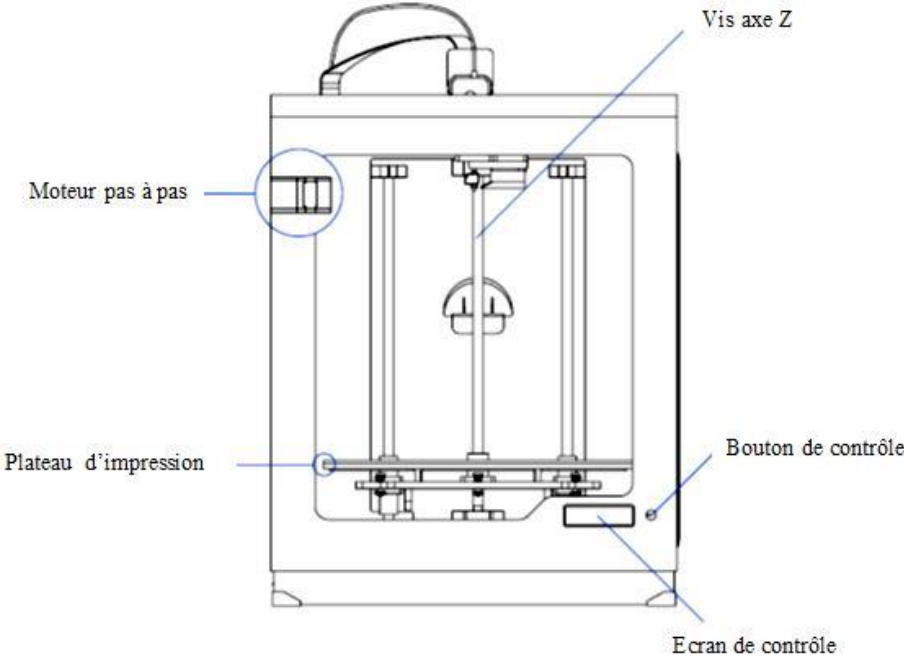


Figure III.2 : Vue de face de la Zortrax M200 Plus. [20]

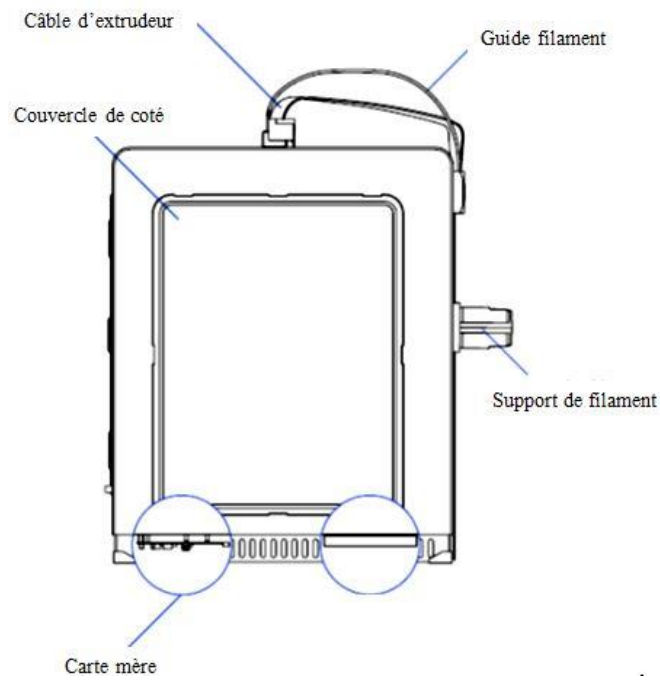


Figure III.3 : Vue de droite de la Zortrax M200 Plus. [20]

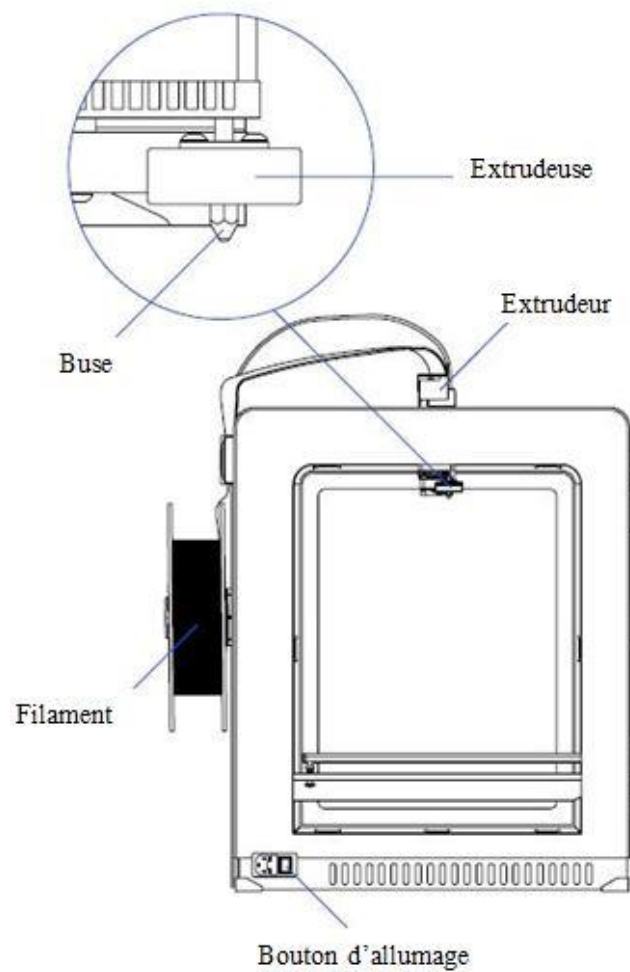


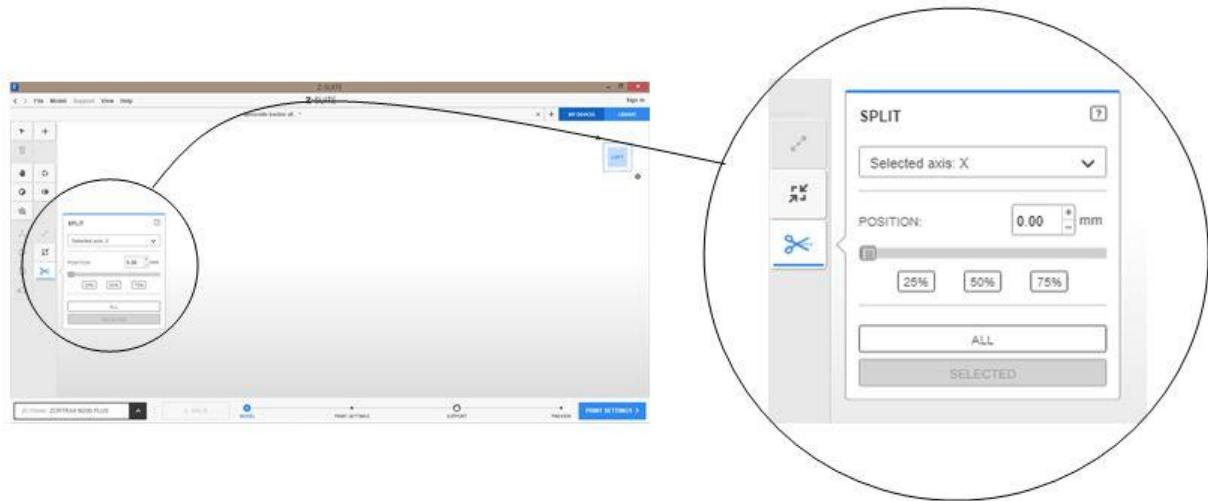
Figure III.4 : Vue de gauche de la Zortrax M200 Plus. [20]

**III.1.2 Les paramètres d'impression [20]**

C'est essentiel de bien connaître le fonctionnement de l'imprimante et surtout le significatif de tous les paramètres d'impression pour éviter les défauts de cette dernière.

**III.1.2.1 Fractionner un modèle**

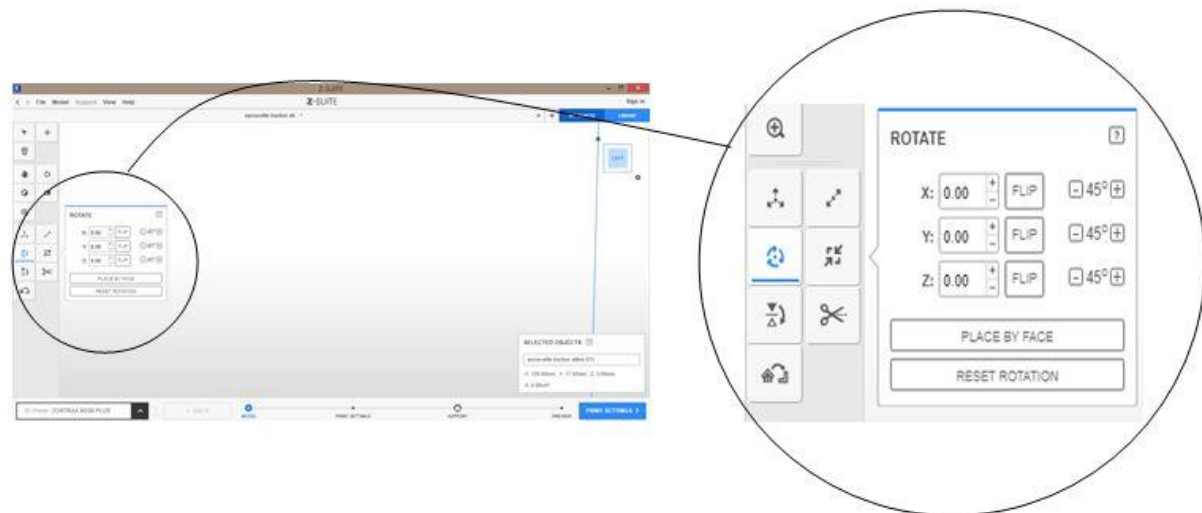
Si le modèle ne correspond pas à l'espace de travail, l'option « Split Model » permet de diviser l'objet en parties d'une façon à ce qu'il correspond à cet espace (**Figure III.5**).



**Figure III.5 :** Fractionnement d'un objet.

**III.1.2.2 Rotation d'un modèle**

L'option «Rotate Model», permet de faire pivoter un modèle dans l'espace de travail dans trois directions. Le pivotement du modèle s'effectue en ajoutant un angle ou en sélectionnant l'objet et en faisant glisser. On choisit l'un des trois axes: X, Y ou Z pour faire pivoter le modèle dans la direction souhaitée (**Figure III.6**).

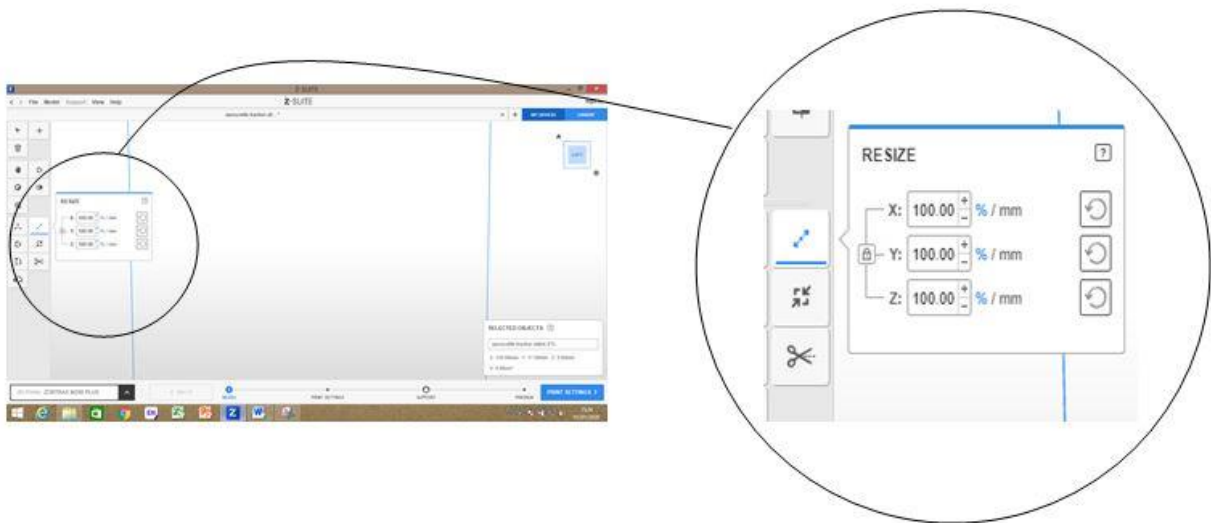


**Figure III.6 :** Rotation d'un objet.

### III.1.2.3 Redimensionner un modèle

On clique sur l'icône «Resize Model» pour mettre le modèle à l'échelle. Nous pouvons redimensionner le modèle en modifiant les paramètres du tableau ou en utilisant l'option « cliqué-glissé ». Afin d'agrandir notre modèle dans tous les axes, on déverrouille l'icône du « cadenas » pour modifier les dimensions suivant une direction indépendamment.

Pour acquérir la forme souhaitée d'un modèle, on clique sur le bouton «%» pour passer en «mm» par la suite on introduit la valeur exacte en millimètres. Cette option devient utile lorsqu'on veut modifier la hauteur, la largeur ou l'épaisseur du modèle d'une façon précise (**Figure III.7**).



**Figure III.7** : Redimensionnement d'un objet.

### III.1.2.4 Position d'impression

Le choix de l'orientation de l'impression peut fortement influencer l'aspect final de l'objet imprimé en 3D. En sélectionnant l'orientation appropriée, on peut facilement éliminer la plupart des défauts qui peuvent apparaître sur notre objet imprimé et, par conséquent, on obtient une surface beaucoup plus lisse.

### III.1.2.5 Épaisseurs des couches

C'est l'épaisseur de la couche déposée par la tête d'impression sur la table d'impression. On peut choisir l'épaisseur de couche d'impression en cliquant sur l'icône «Layer Thickness» (**Figure III.8**). Ce paramètre dépend du diamètre de la buse. Cela correspond à la hauteur de chaque couche déposée selon l'axe Z, on parle souvent de précision d'impression (ou encore de résolution). Celles-ci sont données en mm ou encore en microns ( $\mu\text{m}$ ). Généralement en FDM, on imprime des couches entre 90 et 390 microns.

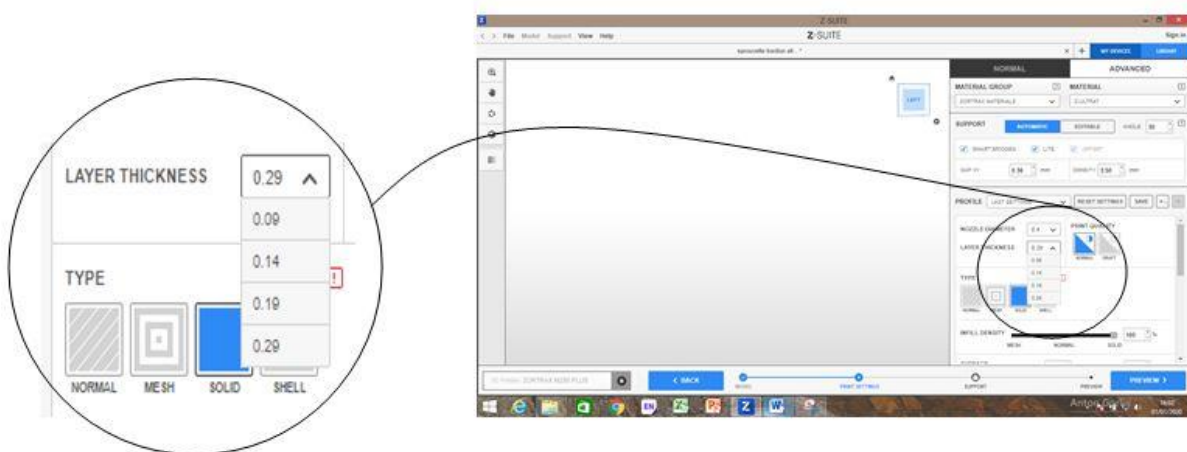


Figure III.8 : Choix d'épaisseur de couche.

III.1.2.6 Qualité High / Normal/ Draft

L'imprimante "Zortrax M200 Plus" permet d'imprimer des objets avec différentes qualités (Figure III.9). La haute qualité donne une meilleure apparence et qualité aux objets mais augmente le temps d'impression.

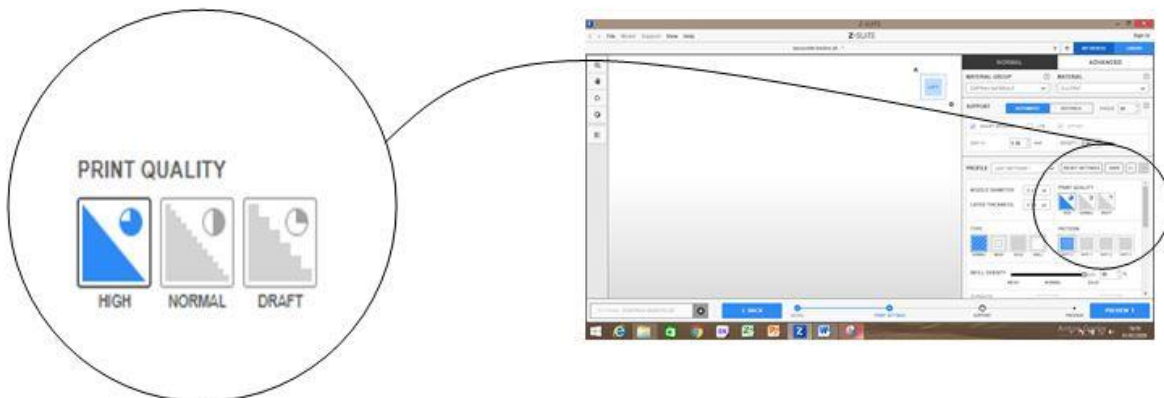


Figure III.9 : Les différentes qualités d'impression.

III.1.2.7 Remplissage

Choisir le modèle de remplissage: MAXIMUM / HAUT / MOYEN / BAS (Figure III.10). Le remplissage MAXIMUM permet d'imprimer avec le niveau de résistance le plus élevé. Mais plus le remplissage est important, plus il faut de temps et de matériel pour un même objet.

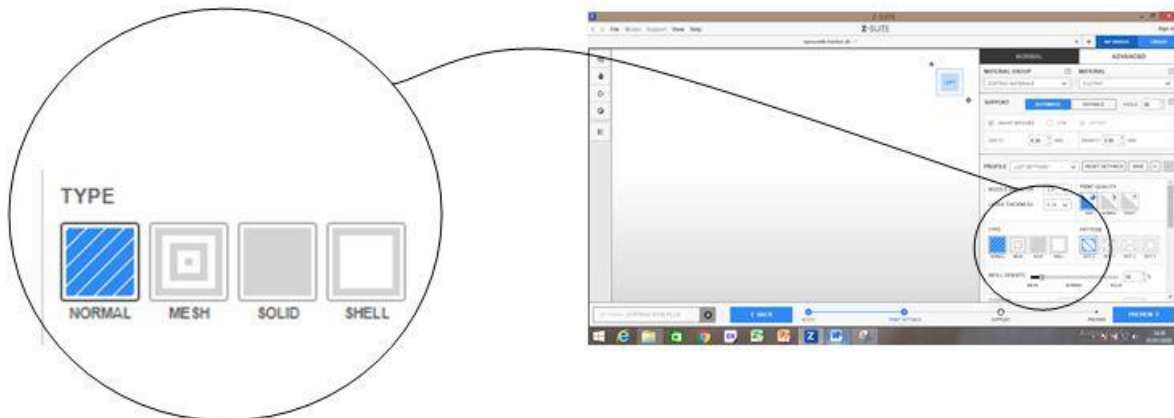


Figure III.10 : Les différents types de remplissage.

### III.1.2.8 Support

Cette option permet de sélectionner l'angle selon lequel la structure de support est générée (Figure III.11). 20 ° est l'option par défaut. Cela signifie que pour toutes les parties suspendues du modèle, la structure de support est générée à un angle de 20 °.

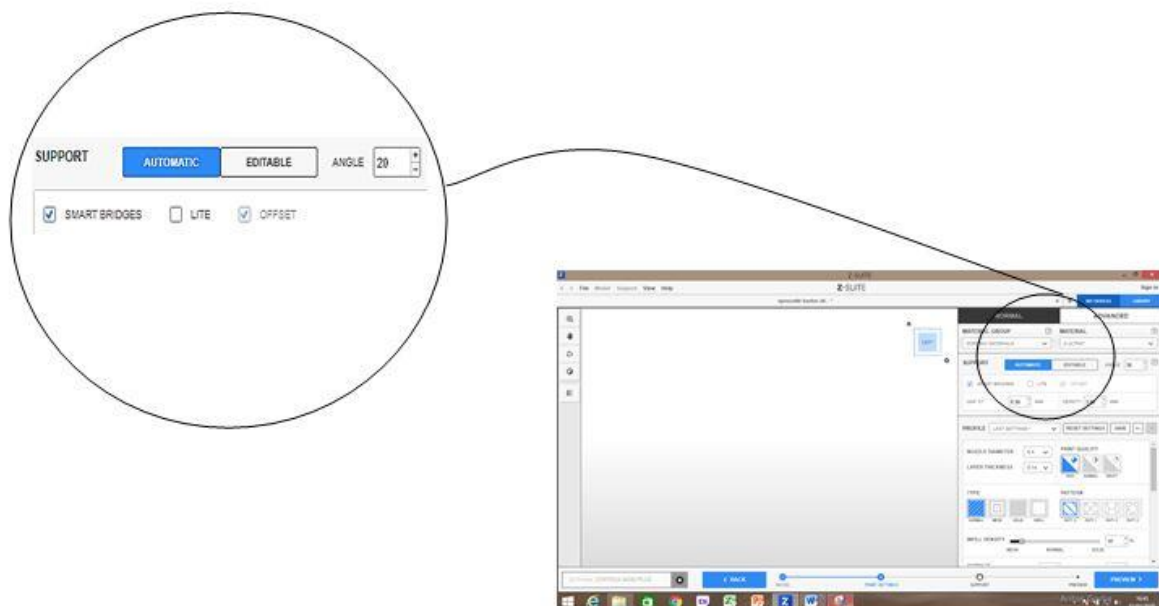


Figure III.11 : Configuration du support.

### III.1.2.9 SUPPORT LITE

En sélectionnant cette option pour générer la structure de support sans le périmètre extérieur. Support lite (Figure III.11) consomme moins de matière, plus facile à retirer. En activant cette option on risque de perdre la stabilité de notre modèle lors d'impression.

### III.1.3 Logiciel d'imprimante (Z-SUITE)

Z-SUITE est la solution logicielle exclusivement développée pour les imprimantes 3D de la marque Zortrax. Adapté aux débutants, ce logiciel intuitif permet de préparer en quelques clics seulement des modèles 3D fiables pour l'impression 3D grâce notamment à la pré-configuration des matériaux, à la correction automatique des erreurs de conception et à la génération automatique des supports.

### III.1.4 Matériau d'impression utilisé

Le filament d'imprimante 3D Z-ULTRAT est un mélange de plastique ABS unique à ZortraxEcosystem. Conçu pour une durabilité et une excellente qualité de surface, le matériau convient parfaitement chaque fois que la qualité est essentielle. Utilisé pour des prototypes fonctionnels, des pièces d'utilisation finale ou pour imprimer des produits grand public en 3D. Peu importe la raison, les modèles imprimés en 3D avec Z-ULTRAT dureront plus longtemps que ceux en ABS standard. Ce support d'impression 3D résiste aux températures élevées et aux impacts. Sa dureté exceptionnelle permet de tester des modèles dans des conditions réelles, le matériau peut être facilement post-traité avec de l'acétone ou par un traitement mécanique. Ce thermoplastique permet d'obtenir de manière fiable les propriétés des objets fabriqués avec la technologie de moulage par injection. [20]

Récipient	bobine
Poids	800 g. ± 5%
Diamètre	1,75 mm
Module de flexion	1,85 GPa
Dureté Shore (D)	73,4
Température de transition vitreuse	106.40 ° C

**Tableau III.1** : Caractéristiques de filament Z-Ultrat. [20]



**Figure III.12** : Bobine filament Z-Ultrat. [20]

#### **Applications :**

- Prototypes fonctionnels
- Pièces finales
- Les produits de consommation
- Prototypes de boîtier
- Parties mécaniques
- Outils et pièces détachées
- Sculptures et accessoires
- Les pièces doivent être durables et stables dans le temps

#### **III.2 Logiciel solidworks 2013**

Solidworks est un logiciel de conception assistée par ordinateur, appartenant à la société Dassault Systèmes. Il utilise le principe de conception paramétrique et génère trois types de fichiers qui sont liés: la pièce, l'assemblage, et la mise en plan. Ainsi toute modification sur un de ces trois fichiers sera répercutée sur les deux autres. Le logiciel Solidworks permet de :

- Concevoir des objets en 3D de manière très précise.
- Développer des produits
- Vérifier la conception de votre fichier
- Détenir une bibliothèque de vos fichiers 3D
- Mettre en place des mises en plan 2D
- Créer des images et animations de vos objets 3D
- Estimer le coût de la fabrication de vos objets 3D [21]

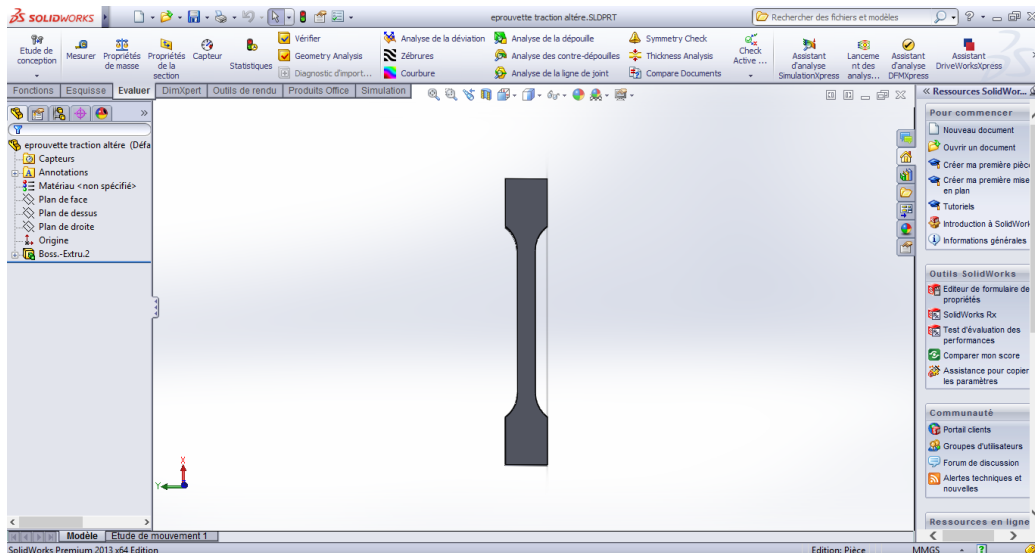


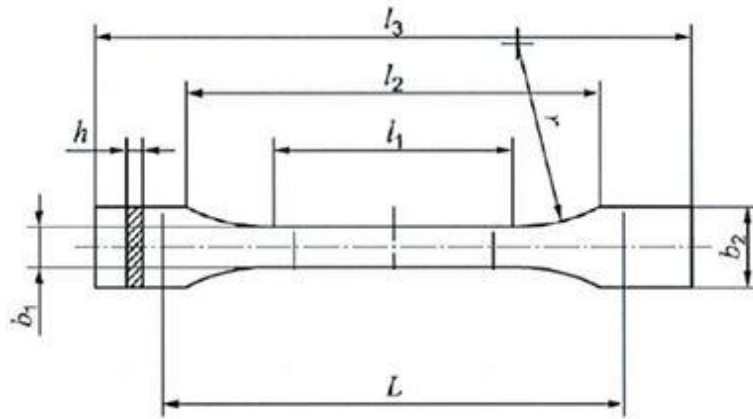
Figure III.13 : Eprouvette conçue avec Solidworks 2013.

### III.3 Machine de traction

Les essais de traction sont effectués sur une machine universelle de type Zwick/Roell (Figure III.14) muni d'un capteur de force de 10 kN et d'un extensomètre. Cette machine est pilotée par ordinateur avec un logiciel test expert 12.0. Les éprouvettes sont réalisées en forme d'haltère conformément à la norme NF EN ISO 527 type B. (Figure III.15).



Figure III.14 : Machine de traction.



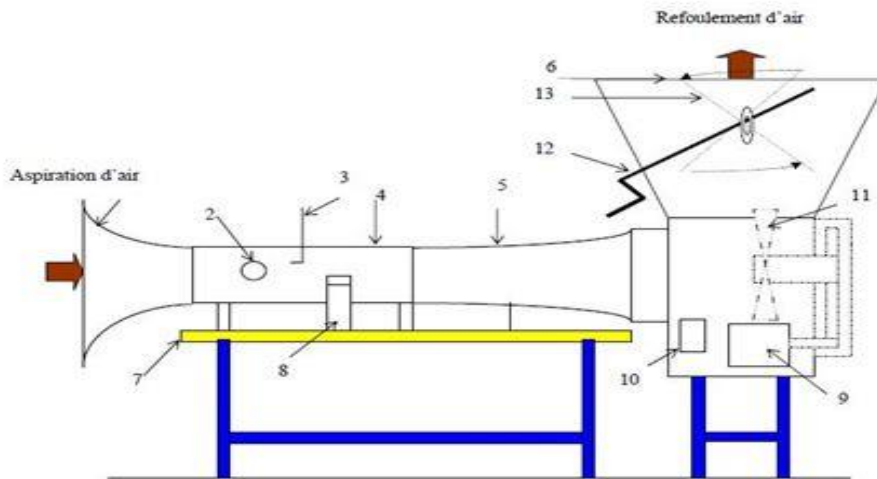
**Figure III.15:** Dimensions de l'éprouvette haltère.

### III.4 Soufflerie DeltaLab EA103

Les mesures de la portance et de la trainée ont été faites sur la soufflerie DeltaLab EA103 (**Figure III.16** et **Figure III.17**). La soufflerie subsonique DeltaLab EA103 est un outil pédagogique de Haut niveau technique pour réaliser des expériences en aérodynamique. Cette soufflerie génère un écoulement d'air dans une veine d'essai transparente (300x300mm). Différents accessoires (profils d'ailes, tube de Pitot, maquette d'avion...) se fixent dans la veine d'essai pour vérifier les lois de l'aérodynamique subsonique. Les dimensions et la masse de la soufflerie sont 4 000 x 2 100 x 1000mm et 350 kg, son alimentation est de 350/440 V triphasé, 50 Hz. [22]



**Figure III.16 :** Soufflerie Deltalab EA 103. [22]



- |                  |                          |                          |
|------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1- Convergent    | 6- Diffuseur             | 11- Turbine              |
| 2- Hublot        | 7- Table                 | 12- Variateur de vitesse |
| 3- Tube de Pitot | 8- Balance aérodynamique | 13- Vanne papillon       |
| 4- Veine d'essai | 9- Moteur électrique     |                          |
| 5-Divergent      | 10- Interrupteur         |                          |

Figure III.17: Description de la soufflerie DeltaLab EA103. [22]

III.4.1 Instruments de mesure

III.4.2 Le tube de Pitot

Il permet la détermination de la vitesse locale grâce à la mesure d'une différence entre la pression statique au point m et la pression totale au point a. L'application de l'équation de Bernoulli entre ces deux points nous permet d'écrire :

$$P_a = P_m + \frac{1}{2} \rho V_m^2 \tag{III-1}$$

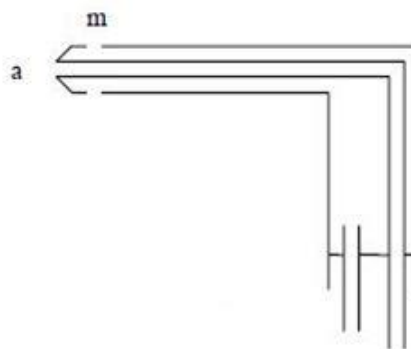


Figure III.18 : Tube de Pitot. [22]

Et sur le manomètre nous avons :

$$P_a = P_m + \rho_h g \Delta H \quad (\text{III-2})$$

$$\text{D'où : } V_m = \sqrt{\frac{2(P_a - P_m)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2\rho_h g \Delta H}{\rho}} \quad (\text{III-3})$$

Avec :

$P_a$ : Pression d'arrêt au point a.

$P_m$  : Pression statique au point m.

$\rho$  : Masse volumique de l'air à la température d'essai.

$\rho_h$  : Masse volumique de l'huile.

$\Delta H$ : Dénivellation de l'huile lue sur le manomètre.

### III.4.3 Balance aérodynamique [22]

Pour mesurer les efforts aérodynamiques (portance et traînée) s'exerçant sur la maquette, on utilise une balance aérodynamique à jauges de contraintes (**Figure III.19**), cette dernière se compose essentiellement des éléments suivants:

- **Pied-support :**

Ce pied support permet d'avoir une balance autoporteuse indépendante de la veine. Il transmet des efforts aérodynamiques à la table de manipulation à laquelle il est lié rigidement.

- **Platine:**

La platine permet d'orienter le fléau dynamométrique par rapport à la veine d'essais.

- **Fléau dynamométrique:**

Cette pièce maîtresse de la balance est équipée de jauges de déformation collées sur des surfaces sollicitées en flexion par les actions dynamométriques. Le découplage des actions de portance et traînée, est réalisée par câblage des jauges. La balance ne comporte aucune liaison partielle, et n'est donc sujette à aucune hystérésis de frottement.

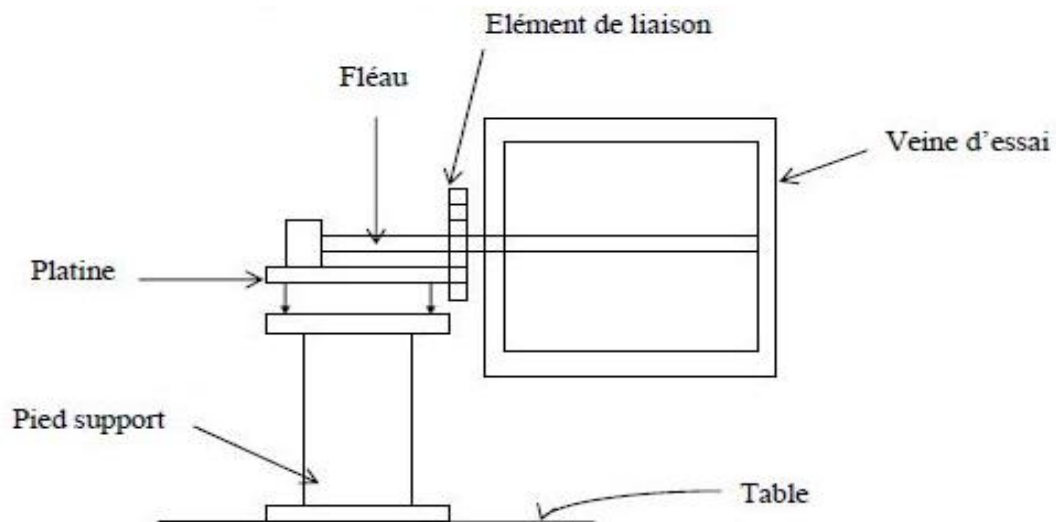


Figure III.19 : Balance aérodynamique. [22]

#### III.4.4 Indicateur de contraintes [22]

Cet appareil électronique (Figure III.20) nous permet de transformer le déséquilibre du pont de WHEATSTONE  $\Delta E$  dû à la déformation mécanique des jauges en un signal électronique qui sera traité en traversant plusieurs étages (amplification, filtrage, conversion,...); par la suite il sera obtenu sous forme d'une tension à la sortie Out Put de l'appareil, ainsi on pourra obtenir les deux principaux efforts s'exerçant sur l'aile à savoir la portance et la traînée, par conséquent les deux coefficients aérodynamiques correspondants  $C_z$  et  $C_x$ .

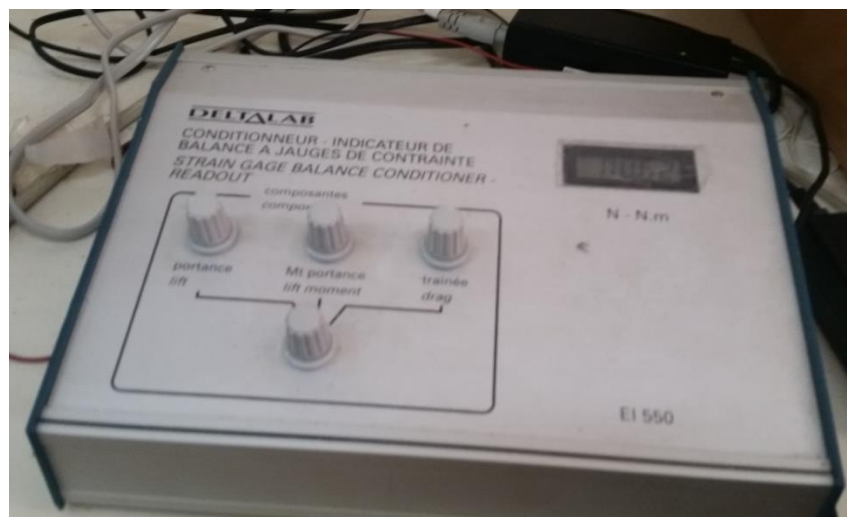


Figure III.20 : Indicateur de contrainte.

### III.4.5 Micro-ordinateur et chaîne d'acquisition des données [22]

Le signal électronique obtenu à la sortie Out Put de l'indicateur de contrainte, sera reçu par une interface installée sur le port arrière d'un micro-ordinateur, ou on a chargé un logiciel approprié à la chaîne d'acquisition qui nous permet d'enregistrer la valeur du signal et de la traiter par la suite en calculant sa valeur moyenne après chaque essai d'une durée donnée.



Figure III.21 : Chaîne d'acquisition des données.

### III.5 Logiciel XFlow-2019x

XFlow est un logiciel de simulation numérique de mécanique des fluides (CFD) développé par la société NextLimit Technologies. Xflow ne nécessite pas de maillage mais s'appuie sur une approche particulière afin de résoudre des problèmes de mécanique des fluides très complexes dans de nombreux domaines tels que l'Aéronautique, la Défense, la Bioingénierie, l'Energie.

Grâce à son approche particulière sans maillage, XFlow peut facilement résoudre des problèmes complexes de dynamique des fluides. Il peut par exemple simuler l'écoulement de gaz et liquides, les transferts de masse et de chaleur, les structures mobiles, les écoulements diphasiques ou à surface libre et les interactions fluide-structure.

L'un des principaux avantages de l'utilisation d'une méthode de simulation "sans maillage" est le gain de temps qui est beaucoup plus important puisqu'il est généralement fastidieux de réaliser un maillage, notamment pour une géométrie complexe. De plus, l'interface Xflow est très simple d'utilisation. Le fonctionnement du code utilisé dans XFlow est basé sur la théorie de Lattice-Boltzmann et sur une approche Lagrangienne.

La MLB adopte une approche statistique pour décrire le mouvement particulaire global : on s'intéresse en particulier à la fonction densité de probabilité  $f(x,e,t)$ , qui correspond à la probabilité de trouver à un instant  $t$  une particule avec une vitesse  $e$  et à une position  $x$  de l'espace. En effet, la description du mouvement d'un fluide à l'échelle macroscopique par une résolution du mouvement particulaire microscopique est impossible du fait de la très grande densité particulaire à l'échelle macroscopique ( $2.687 \cdot 10^{19}$  molécules par  $\text{cm}^3$ ). De plus, une telle approche n'est pas non plus nécessaire puisque les variables macroscopiques comme la pression, la vitesse ou la température en un point donné résultent d'une moyenne statistique sur un large échantillon de particules.

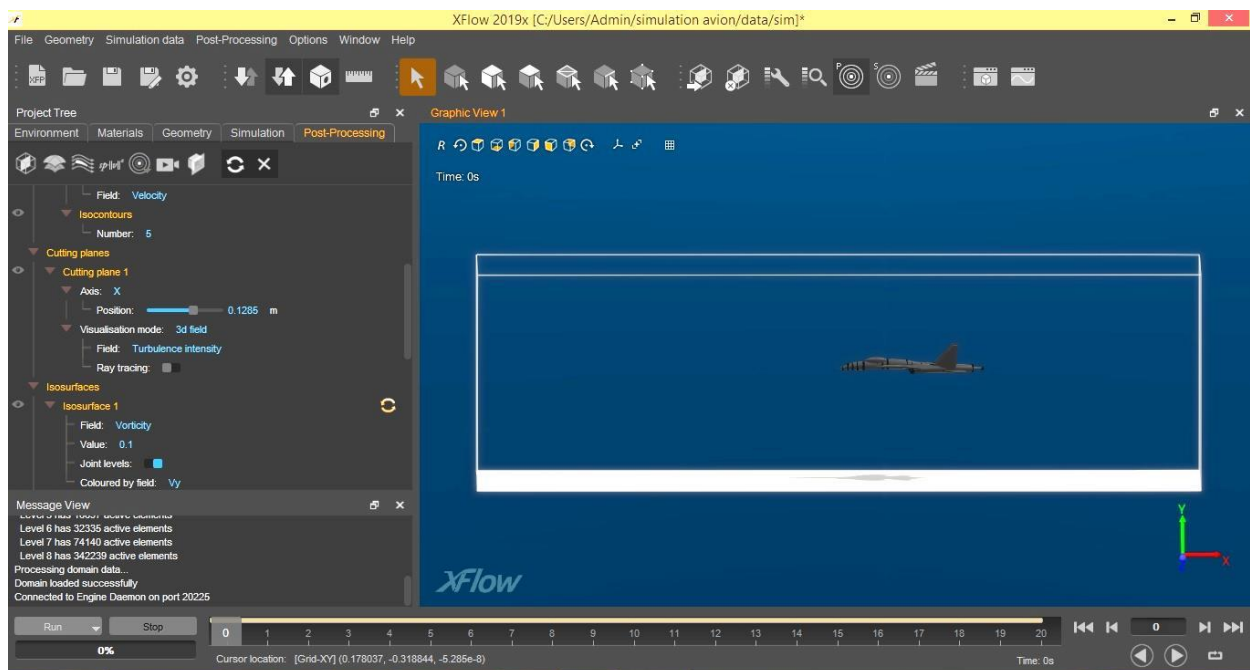


Figure III.22 : L'Interface de logiciel Xflow.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les machines, logiciels et méthodes utilisés dans l'étude expérimentale. Les étapes de réalisation et les différents résultats obtenus sont présentés dans le chapitre suivant.

# Chapitre IV

## Etude expérimentale

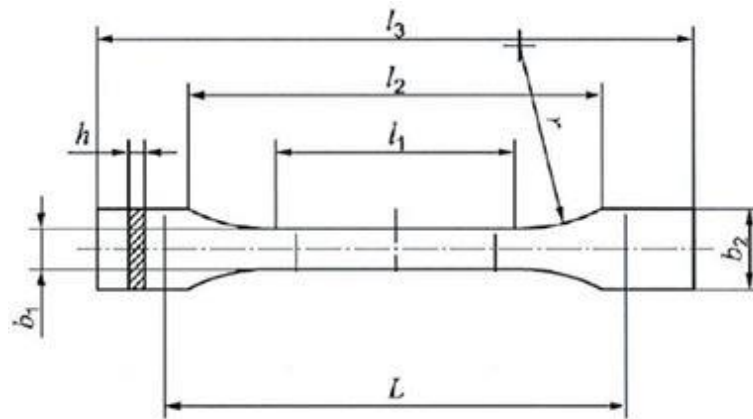
## IV. Introduction

Afin d'étudier le procédé d'impression 3D, nous intéressons à deux aspects qui sont considérés comme la faiblesse de l'impression 3D ; l'adhésion entre les couches et l'état de surface des pièces imprimées. Pour ce faire, nous allons étudier l'influence l'orientation du plan d'impression par rapport à la direction de chargement et l'épaisseur de couche d'impression. Nous comparons quelques propriétés mécaniques du matériau, par la suite nous allons étudier l'effet de l'état de surface (rugosité) en aérodynamique.

### IV.1 Influence de la position et l'épaisseur de couche d'impression

#### IV.1.1 Conception et réalisation des éprouvettes

Comme nous avons précisé dans le chapitre précédent, les éprouvettes ont été réalisées en forme d'haltère conformément à la norme NF EN ISO 527 type B aux dimensions mentionnées dans la **Figure VI.1** et le **Tableau VI.1**.



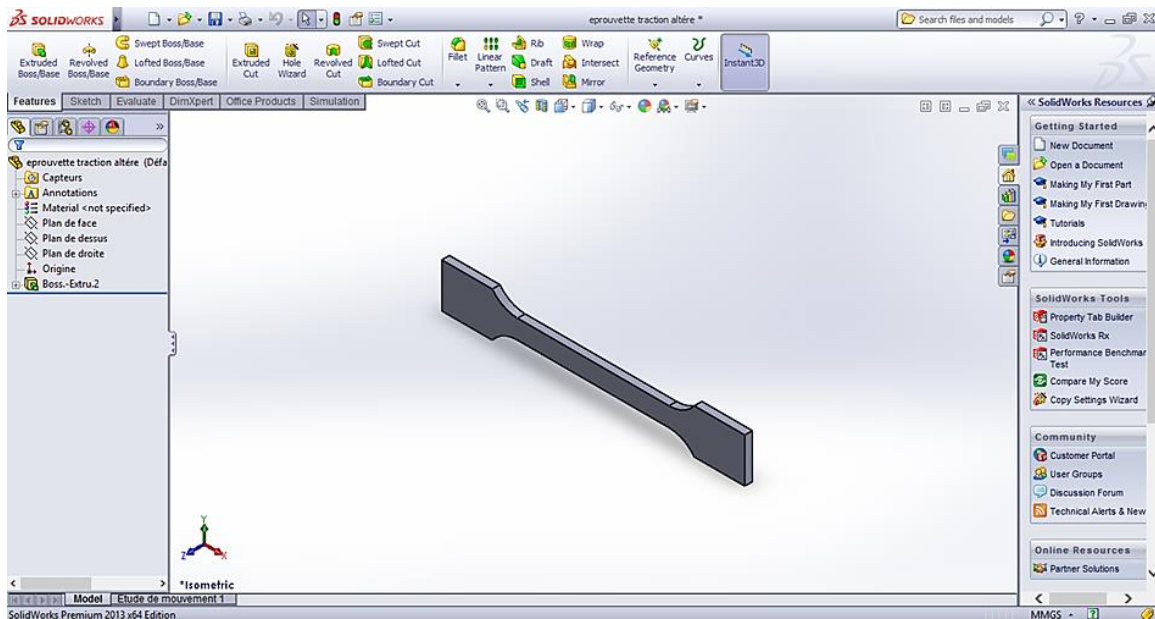
**Figure IV.1** : Eprouvette de type 1BA.

Type d'éprouvette 1BA		
l3	Longueur totale	$\geq 120$
l1	Longueur de la partie étroite à faces parallèles	$60 \pm 0.5$
r	Rayon	12.5
l2	Distance entre les parties larges à faces parallèles	$80 \pm 2$
b2	Largeur aux extrémités	$17 \pm 0.5$
b1	Largeur de la partie étroite	$7 \pm 0.5$
h	Epaisseur	$\geq 2$

**Tableau IV.1** : Dimensions en millimètre d'une éprouvette selon la norme ISO527 1BA.

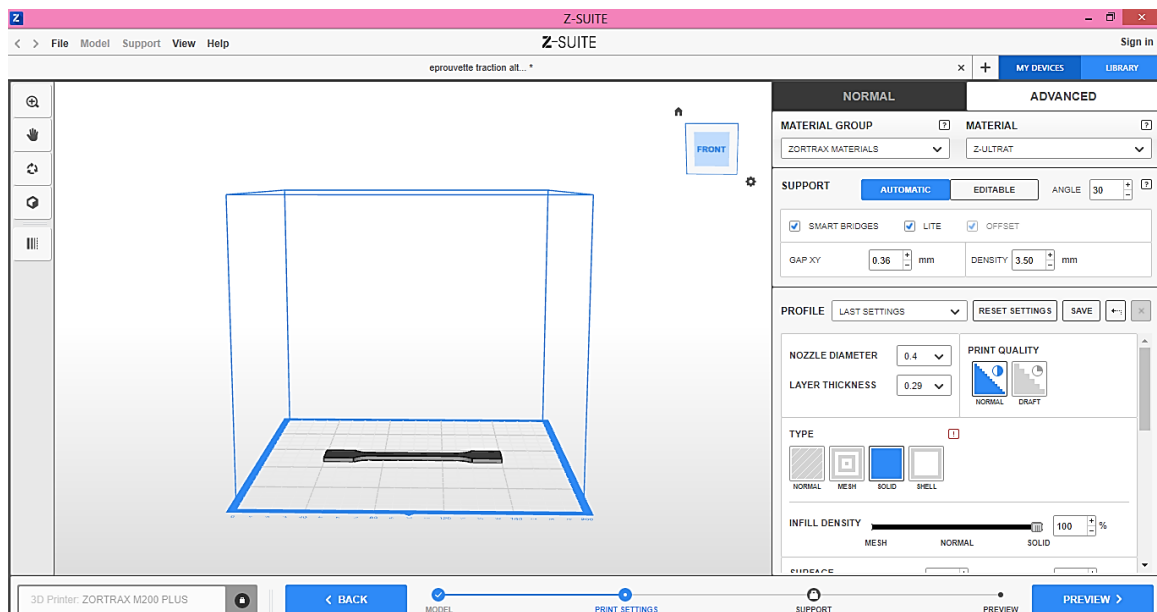
La réalisation des éprouvettes se fait suivant plusieurs étapes :

- **Etape 1 :** Conception de la géométrie de l'éprouvette sur Solidworks, le fichier obtenu est enregistré sous format **.Stl**. (**Figure IV.2**).



**Figure IV.2 :** Conception de l'éprouvette sur Solidworks.

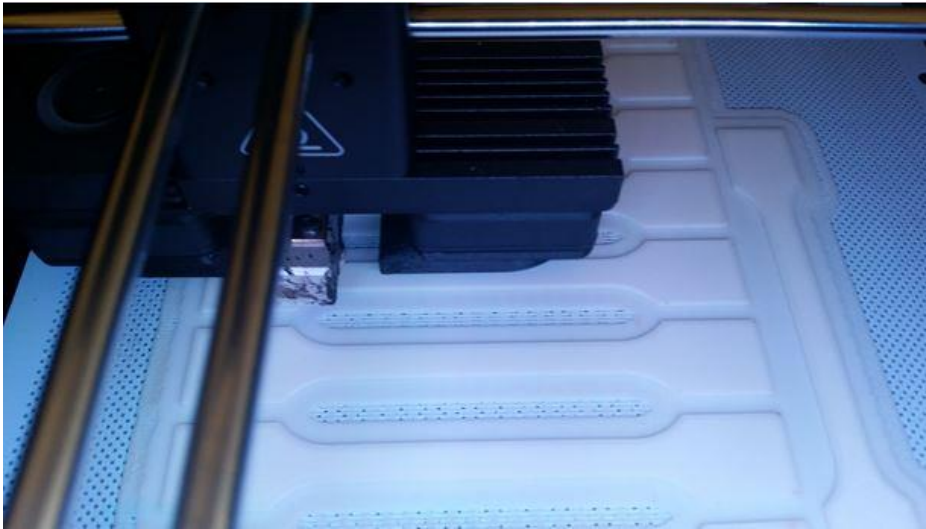
- **Etape 2 :** Exécution de fichier **.Stl** dans le logiciel Z-Suite pour sélectionner le matériau d'impression et configurer les différents paramètres d'impression (**Figure IV.3**). Une fois la configuration est terminée, le fichier est enregistré sous format **.Zcodex** par la suite il est transmis à l'imprimante par clé USB ou par câble RJ45 ou bien par WIFI.



**Figure IV.3 :** Préparation de l'éprouvette pour l'impression sur le logiciel Z-Suite.

- **Etape 3 :** Impression des éprouvettes (**Figure IV.4**).

La figure IV.4 est une photo prise en cours d'impression



**Figure IV.4 :** Impression des éprouvettes.

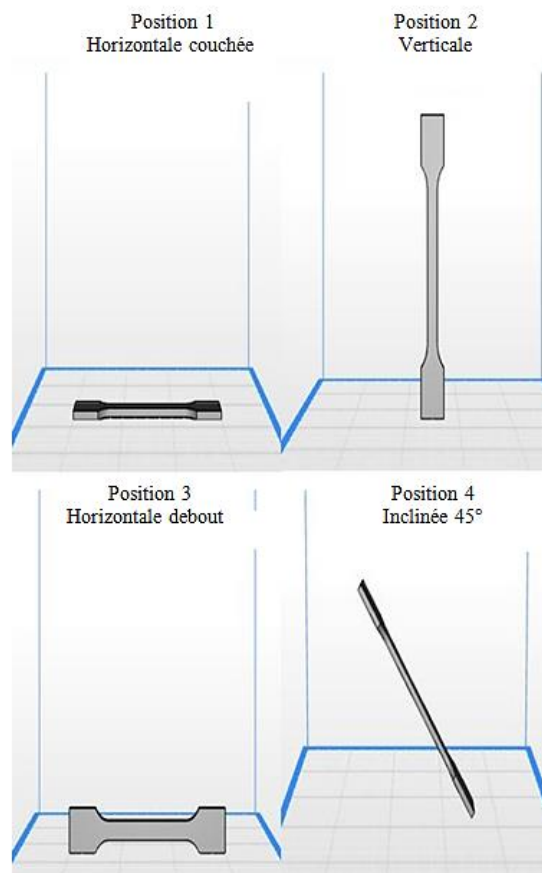
- **Etape 4 :** Retrait des éprouvettes de la machine et enlèvement de support (**Figure IV.5**)

Une fois l'impression des éprouvettes est achevée, nous procédons au retrait de plateau d'impression.



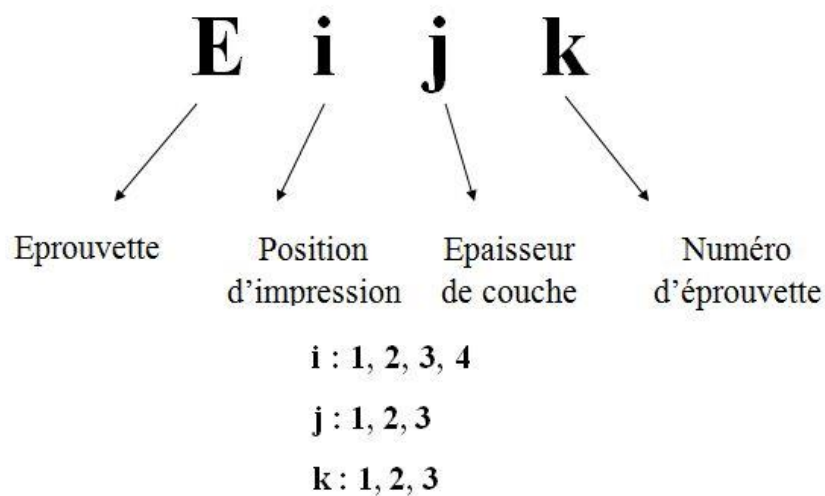
**Figure IV.5 :** Retrait des éprouvettes.

Les éprouvettes ont été imprimées selon différentes position voir (**Figure IV.6**), et aussi avec différentes épaisseurs de couche (0.09, 0.14, 0.29mm). Pour chaque position nous avons imprimé neuf éprouvettes réparties en 3 éprouvettes pour chaque épaisseur.



**Figure IV.6 :** Les différentes positions d'impression.

Pour la numérotation des éprouvettes nous avons choisis une abréviation présentée sur la **Figure IV.7**



**Figure IV.7 :** Abrévation de la numérotation des éprouvettes.

### IV.1.2 Essai de traction

L'essai de traction est le plus couramment utilisé pour mettre en évidence les caractéristiques d'un matériau. On soumet une éprouvette de longueur initiale  $L_0$  et de section  $S_0$ , à un effort croissant  $F$ .

On mesure l'allongement de l'éprouvette à l'aide d'un extensomètre. Et éventuellement la variation de section à l'aide d'un capteur diamétral.

On calcule alors la contrainte et la déformation conventionnelles :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (\text{IV-1})$$

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (\text{IV-2})$$

Les éprouvettes ont été testées selon les recommandations de la norme ISO 527 à une vitesse de 1mm/min, avec une longueur utile de l'éprouvette  $L_u=80\text{mm}$  les essais sont répétés 3 fois. Cet essai a été effectué au sein de l'unité de recherche d'université de Boumerdes.

### IV.1.3 Résultats des essais de traction

Les courbes contrainte/déformation et les différents résultats obtenus de nos éprouvettes sont présentés dans les figures et les tableaux suivants.

#### a) Résultats de la première position d'impression

Eprouvette	$\varepsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	Module E (MPa)
E111	6,923	23	1441
E112	4,790	24	1451
E113	5,640	23	1339
	<b>5,785</b>	<b>23</b>	<b>1410</b>
<b>Moyenne</b>	$\pm$ <b>1,073</b>	$\pm$ <b>1</b>	$\pm$ <b>62</b>
E121	1,890	21	1659
E122	2,600	20	1499
E123	2,380	21	1584
	<b>2,289</b>	<b>21</b>	<b>1581</b>
<b>Moyenne</b>	$\pm$ <b>0,360</b>	$\pm$ <b>1</b>	$\pm$ <b>80</b>
E131	4,960	24	1534
E132	4,890	24	1483
E133	4,110	23	1516
	<b>4,651</b>	<b>24</b>	<b>1511</b>
<b>Moyenne</b>	$\pm$ <b>0,474</b>	$\pm$ <b>1</b>	$\pm$ <b>25</b>

**Tableau IV.2 :** Caractéristiques des éprouvettes de la première position d'impression.

Les courbes contrainte-déformation sont données sur les figures IV.8-IV.11

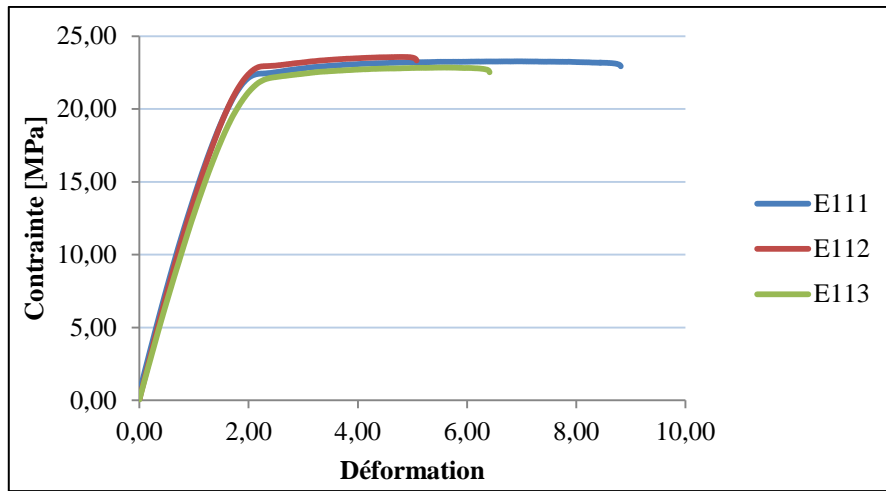


Figure IV.8 : Courbes de première position épaisseur de couche 0,09 mm.

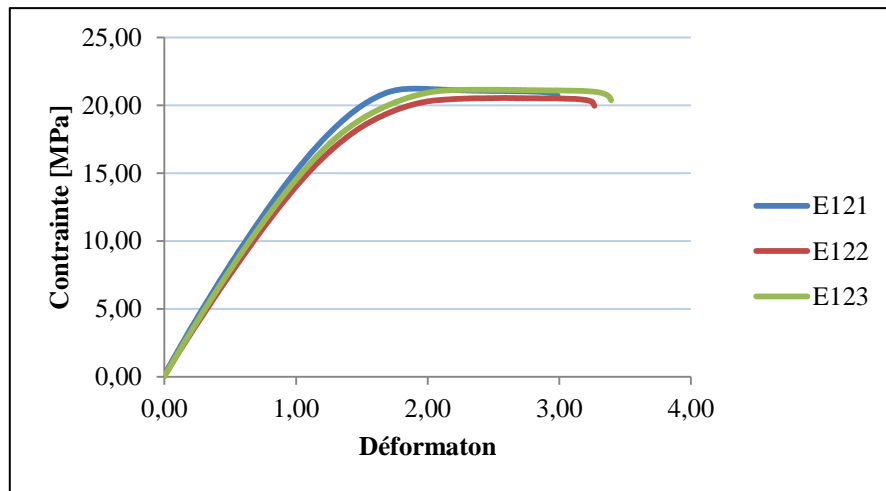


Figure IV.9 : Courbes de première position épaisseur de couche 0,14 mm.

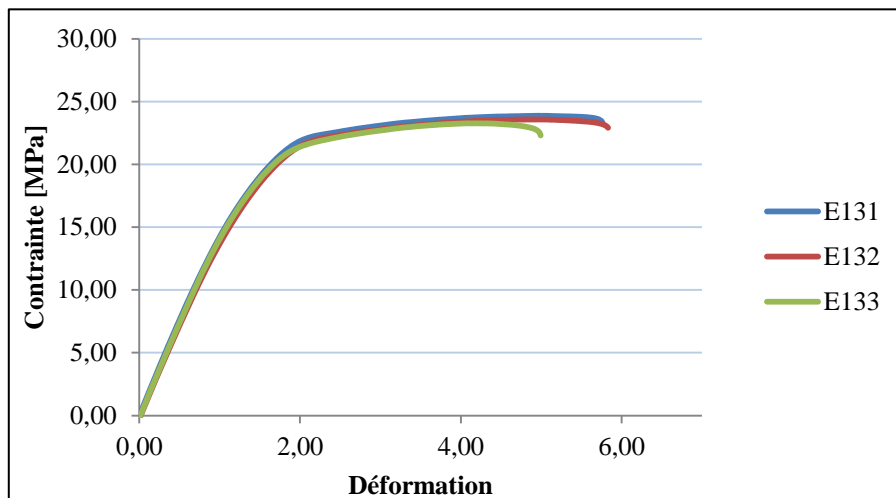
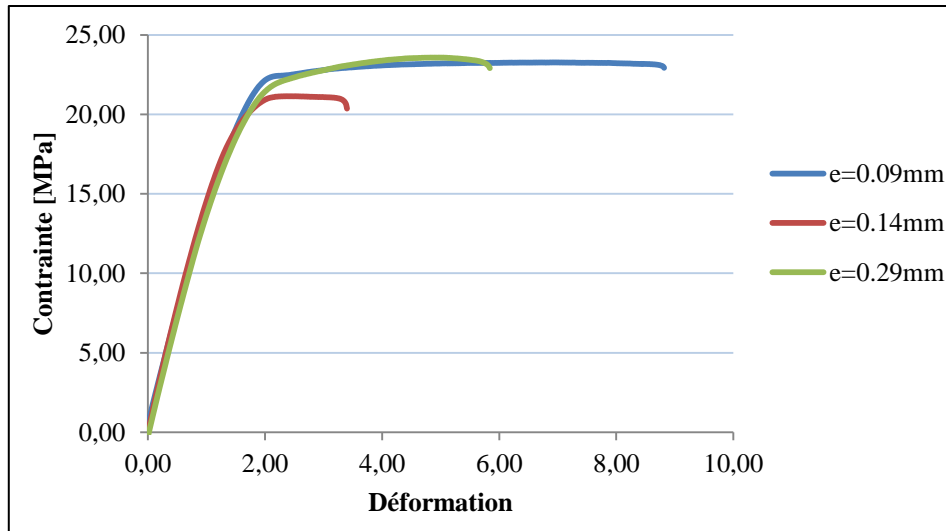


Figure IV.10 Courbes de première position épaisseur de couche 0,29 mm.



**Figure IV.11 :** Courbes de la première position d'impression avec les différentes épaisseurs de couche d'impression.

**b) Résultats de la deuxième position d'impression**

Eprouvette	$\epsilon_{\max}$ (%)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	Module E(MPa)
E211	1,474	21	1734,13
E212	1,490	22	1703,58
E213	1,540	22	1742,25
<b>Moyenne</b>	<b>1,501</b> ± <b>0,035</b>	<b>22</b> ± <b>1</b>	<b>1727</b> ± <b>20</b>
E221	1,390	22	1863
E222	1,210	18	1750
E223	1,150	22	2170
<b>Moyenne</b>	<b>1,248</b> ± <b>0,125</b>	<b>20</b> ± <b>2</b>	<b>1928</b> ± <b>217</b>
E231	0,760	8	1065
E232	0,910	9	1118
E233	0,900	8	1053
<b>Moyenne</b>	<b>0,857</b> ± <b>0,081</b>	<b>8</b> ± <b>1</b>	<b>1079</b> ± <b>35</b>

**Tableau IV.3 :** Caractéristiques des éprouvettes de la deuxième position d'impression.

Les figures IV.12, IV.13, IV.14 et IV.15 représentent les courbes contrainte-déformation des éprouvettes imprimées selon la deuxième position

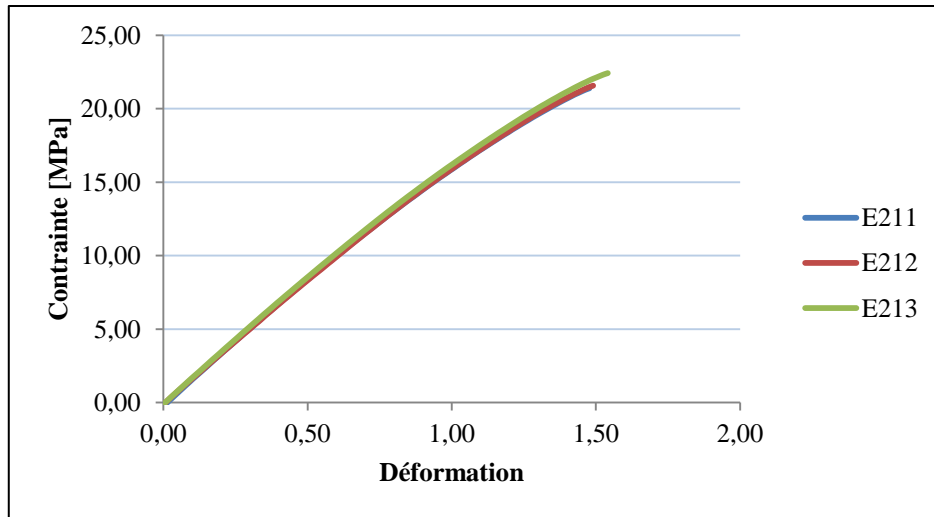


Figure IV.12 : Courbes de la deuxième position épaisseur de couche 0,09 mm.

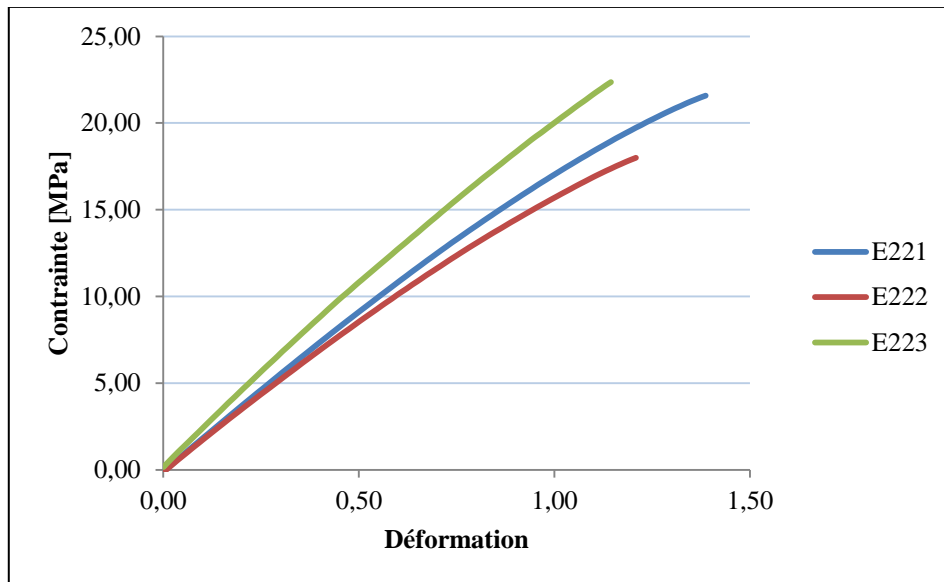


Figure IV.13 : Courbes de la deuxième position épaisseur de couche 0,14 mm.

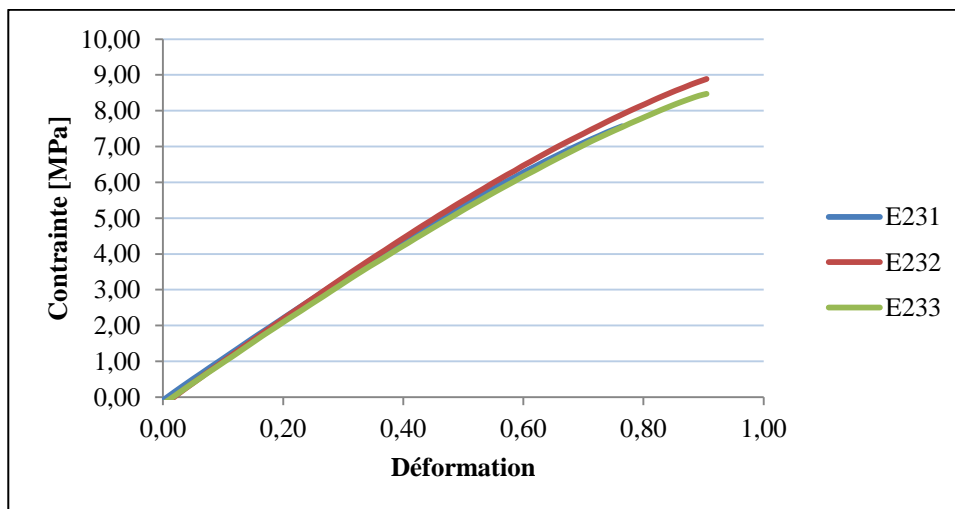
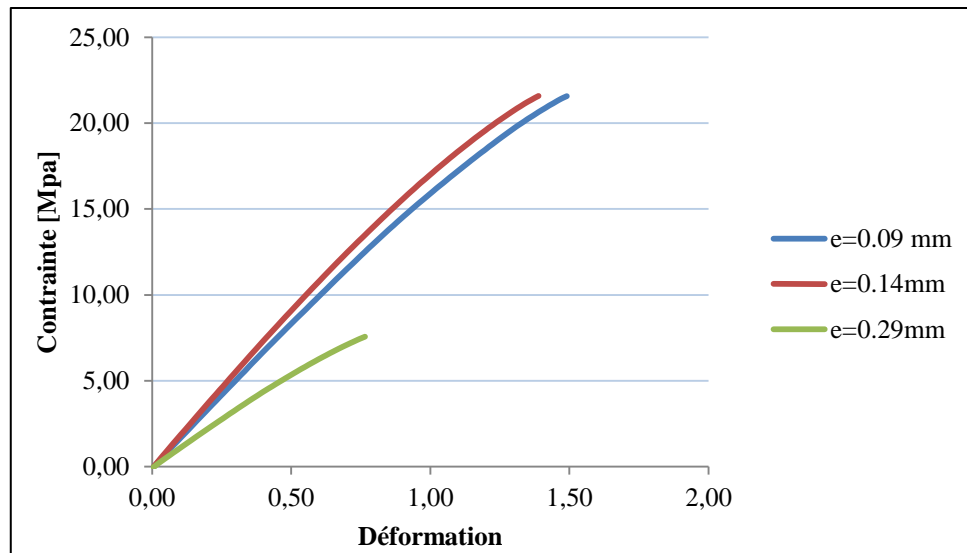


Figure IV.14 : Courbes de la deuxième position épaisseur de couche 0,29 mm.



**Figure IV.15 :** Courbes de la deuxième position d'impression avec les différentes épaisseurs de couche d'impression.

**c) Résultats de la troisième position d'impression**

Eprouvette	$\varepsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	Module E(MPa)
E311	1,998	26	1754
E312	2,100	27	1711
E313	2,040	26	1684
	<b>2,043</b>	<b>26</b>	<b>1716</b>
<b>Moyenne</b>	$\pm$ <b>0,050</b>	$\pm$ <b>1</b>	$\pm$ <b>35</b>
E321	2,080	33	2043
E322	2,050	32	2066
E323	2,020	33	2072
	<b>2,051</b>	<b>32</b>	<b>2060</b>
<b>Moyenne</b>	$\pm$ <b>0,032</b>	$\pm$ <b>1</b>	$\pm$ <b>15</b>
E331	2,130	27	1732
E332	2,070	27	1741
E333	2,100	27	1738
	<b>2,102</b>	<b>27</b>	<b>1737</b>
<b>Moyenne</b>	$\pm$ <b>0,031</b>	$\pm$ <b>1</b>	$\pm$ <b>4</b>

**Tableau IV.4 :** Caractéristiques des éprouvettes de la troisième position d'impression.

Les courbes contrainte-déformation sont données sur les figures IV.16, IV.17, IV.18 et IV.19

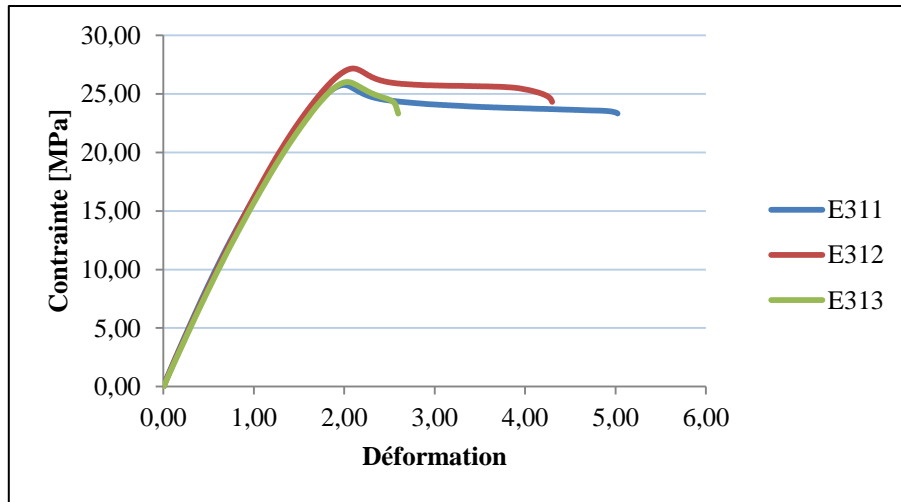


Figure IV.16 : Courbes de la troisième position épaisseur de couche 0,09 mm.

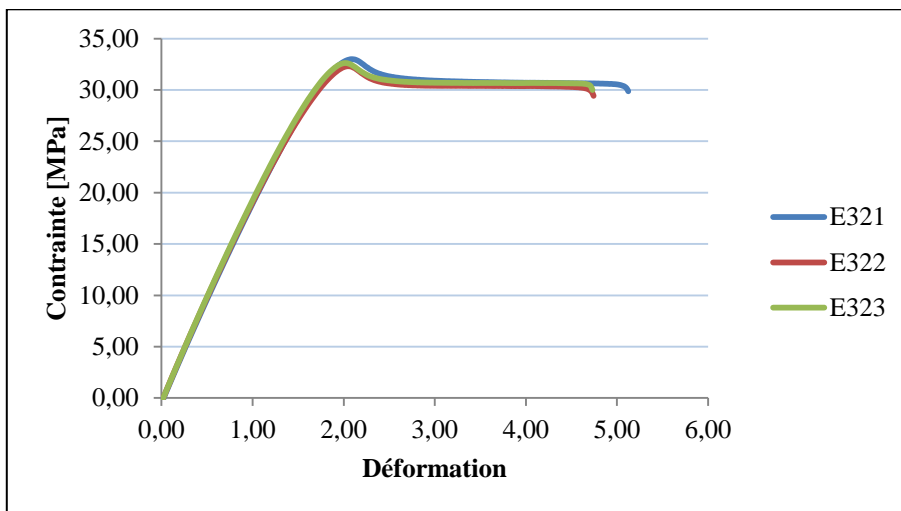


Figure IV.17 : Courbes de la troisième position épaisseur de couche 0,14 mm.

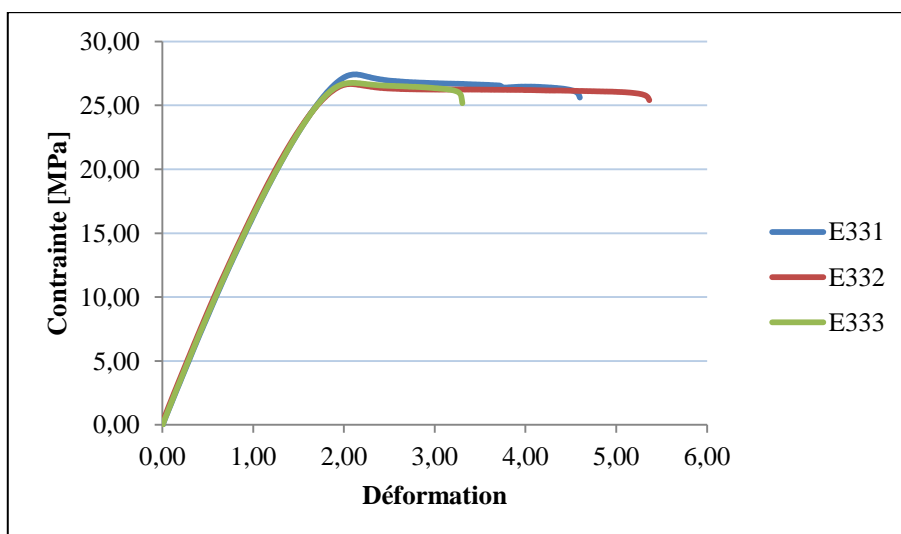


Figure IV.18 : Courbes de la troisième position épaisseur de couche 0,29 mm.

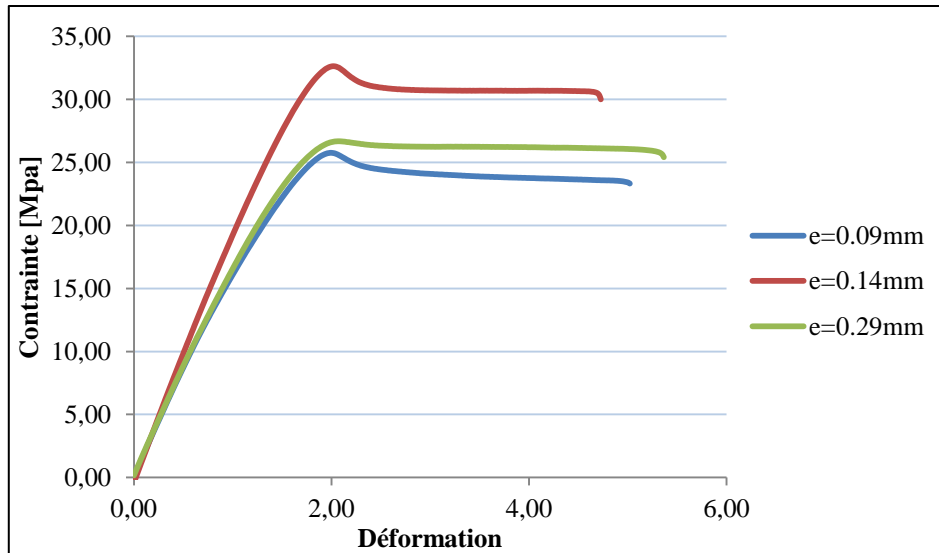


Figure IV.19 : Courbes de la troisième position d'impression avec les différentes épaisseurs de couche d'impression.

d) Résultats de la quatrième position d'impression

Eprouvette	$\epsilon_{\max}$ (%)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	Module E(MPa)
E411	1,591	17	1397
E412	1,580	18	1441
E413	1,400	17	1418
<b>Moyenne</b>	<b>1,522</b>	<b>17</b>	<b>1419</b>
	±	±	±
	<b>0,107</b>	<b>1</b>	<b>22</b>
E421	1,500	13	1189
E422	1,460	12	1196
E423	1,410	13	1185
<b>Moyenne</b>	<b>1,458</b>	<b>13</b>	<b>1190</b>
	±	±	±
	<b>0,046</b>	<b>1</b>	<b>6</b>
E431	0,850	7	900
E432	0,880	7	951
E433	0,880	8	1018
<b>Moyenne</b>	<b>0,870</b>	<b>7</b>	<b>956</b>
	±	±	±
	<b>0,014</b>	<b>1</b>	<b>59</b>

Tableau IV.5 : Caractéristiques des éprouvettes de la quatrième position d'impression.

Les figures IV.20, IV.21, IV.22 et IV.23 représentent les courbes contrainte-déformation des éprouvettes imprimées selon la quatrième position

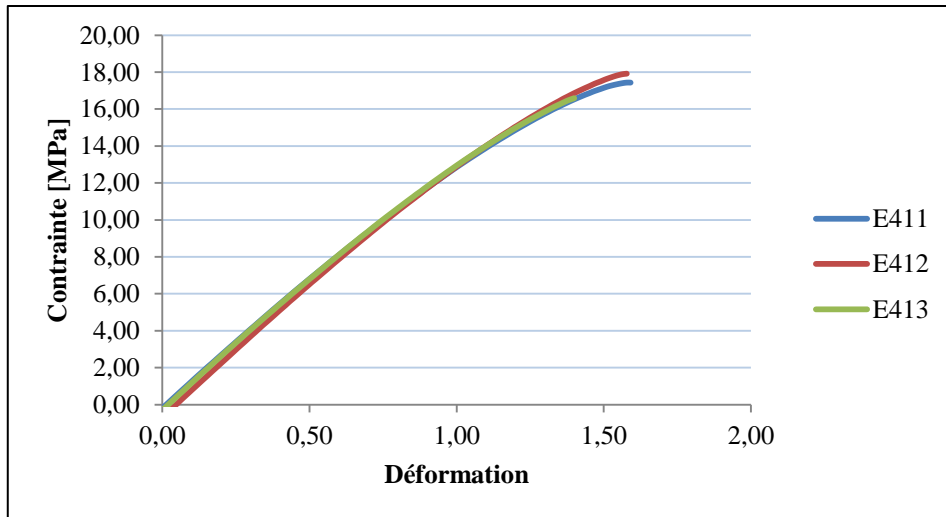


Figure IV.20 : Courbes de la quatrième position épaisseur de couche 0,09 mm.

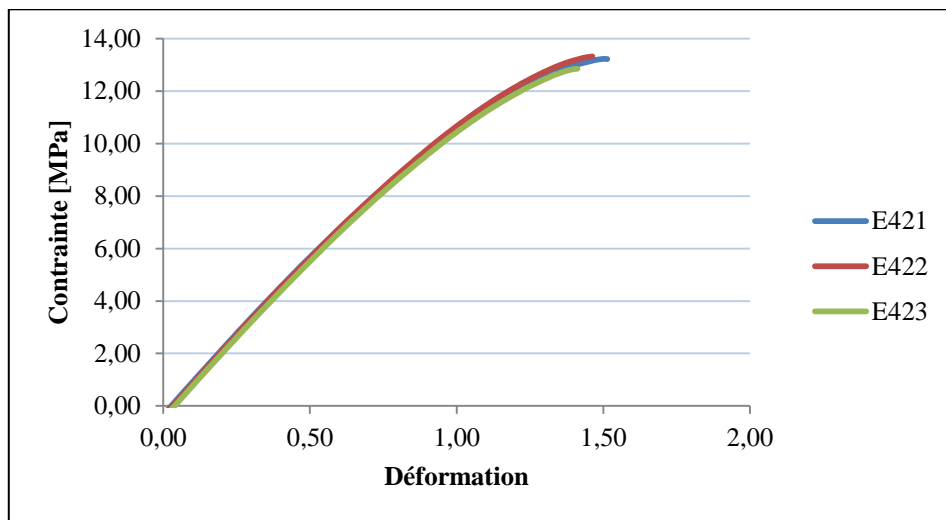


Figure IV.21 : Courbes de la quatrième position épaisseur de couche 0,14 mm.

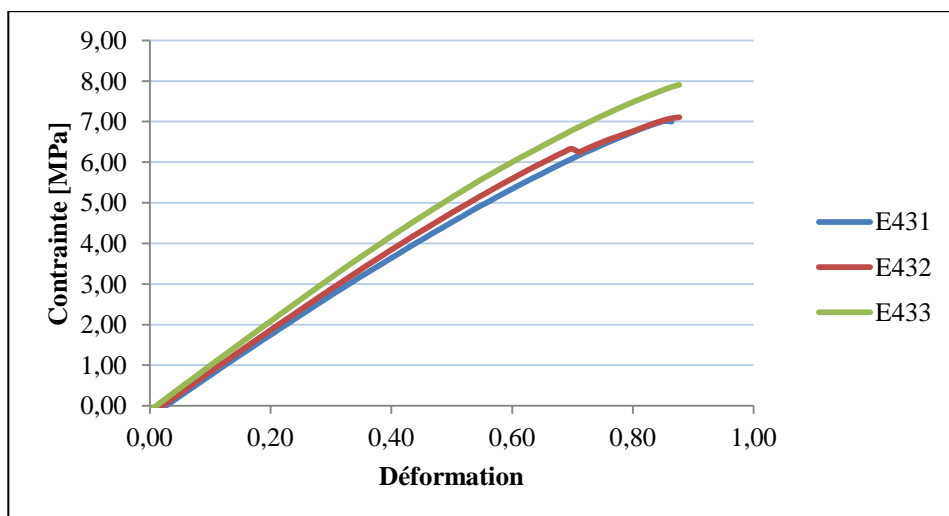
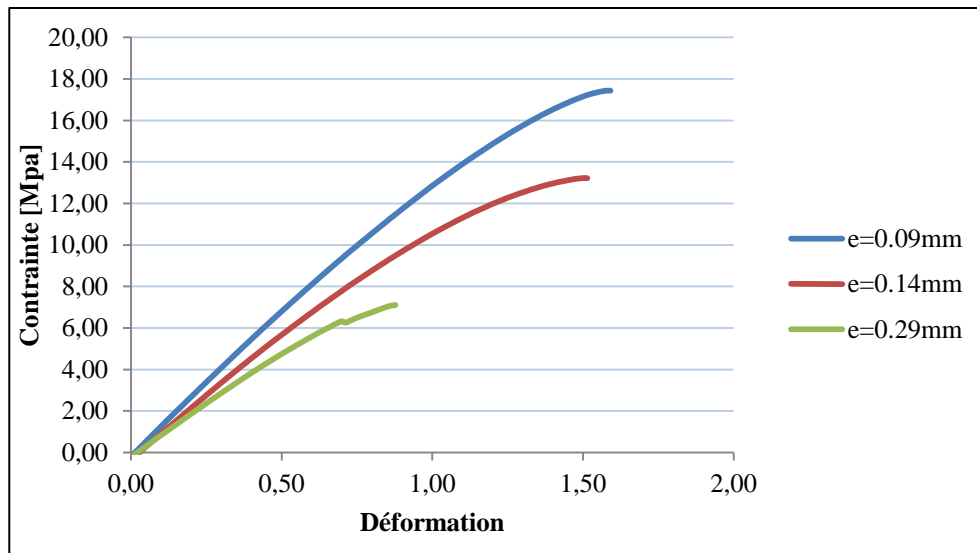


Figure IV.22 : Courbes de la quatrième position épaisseur de couche 0,29 mm.



**Figure IV.23** : Courbes de la quatrième position d'impression avec les différentes épaisseurs de couche d'impression.

#### IV.1.4 Interprétations des résultats

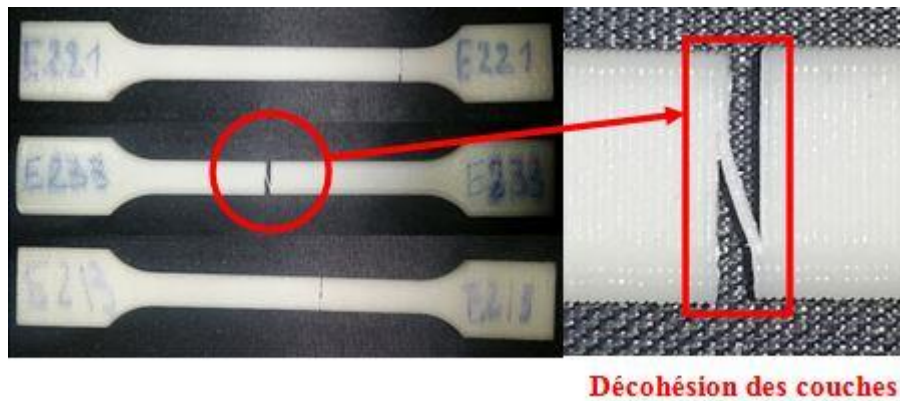
a. Les figures IV.8, IV.9 et IV.10 représentent les courbes d'évolution contrainte/déformation des échantillons imprimés selon la première position (horizontale couchée) avec les différentes épaisseurs de couches. Nous distinguons ; une première zone linéaire correspondant au comportement élastique du matériau dont la loi de Hooke est applicable, une deuxième partie non linéaire jusqu'à la rupture correspondant à un comportement plastique du matériau. Les caractéristiques mécaniques des échantillons sont données par le Tableau IV.2. L'analyse visuelle des éprouvettes endommagées, nous montre la rupture totale des échantillons comme indiquer sur la figure IV.24.



**Figure IV.24** : Eprouvettes de la première position à la fin d'essai.

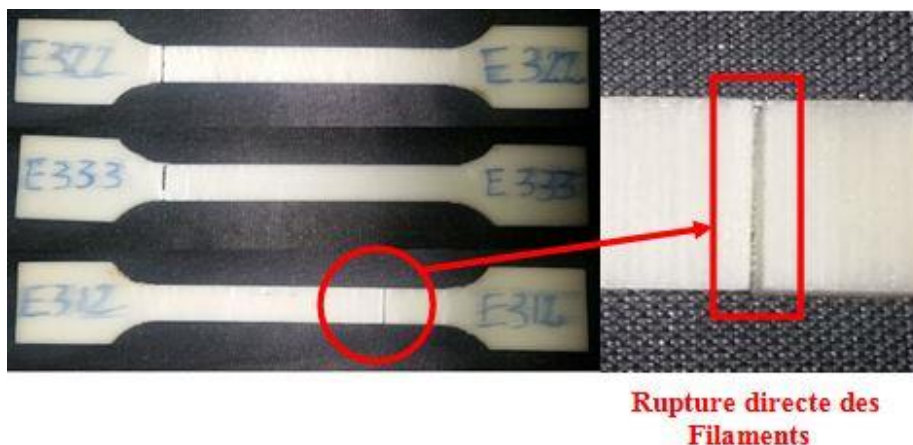
Les figures IV.12, IV.13 et IV.14, donnent le comportement à la rupture en traction des échantillons imprimés selon la deuxième position (verticale). Nous distinguons; une zone

linéaire correspondant au comportement élastique jusqu'au point de rupture qui se situe à un seuil de contrainte de 22 MPa et une déformation de 1.5% pour l'épaisseur 0.09mm, 20 MPa et 1.2% pour l'épaisseur 0.14mm et de 8 MPa et 0.8% pour l'épaisseur 0.29mm. L'analyse visuelle des éprouvettes endommagées, montre un décollage des couches comme indiqué sur la figure IV.25. On note ici que les caractéristiques obtenues pour cette position sont les caractéristiques d'interface.



**Figure IV.25** Eprouvettes de la deuxième position à la fin d'essai.

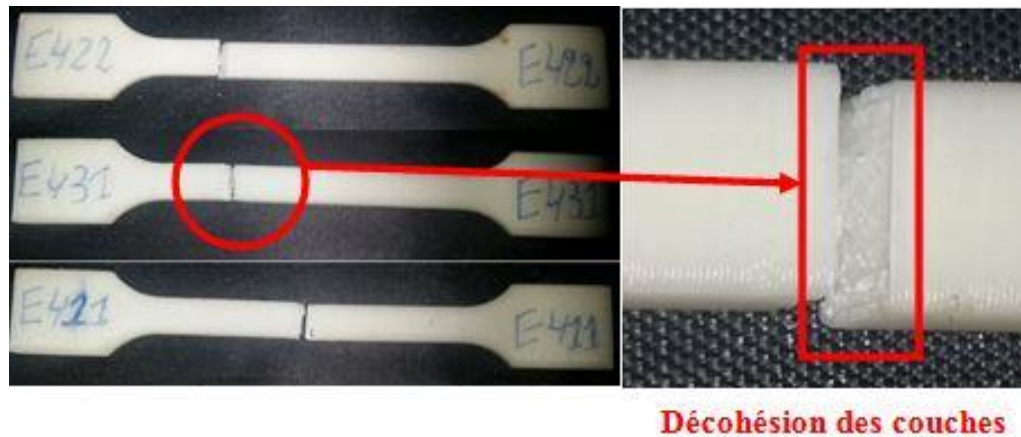
Les figures IV.16, IV.17 et IV.18 représentent les courbes d'évolution de la contrainte en fonction de la déformation des échantillons imprimés selon la troisième position (horizontale debout). Ces courbes présentent une zone linéaire due au comportement élastique du matériau suivi d'une phase non linéaire correspondant à un comportement plastique du matériau. Les éprouvettes endommagées qui sont représentées sur la figure IV.26, nous montre que la rupture des échantillons dans la direction parfaitement perpendiculaire à la direction de sollicitation, cela reflète un comportement ductile du matériau.



**Figure IV.26** : Eprouvettes de la troisième position à la fin d'essai.

Les figures IV.20, IV.21 et IV.22 montrent les courbes contraintes/déformations des échantillons imprimés selon la quatrième position (inclinée). Nous distinguons deux zones, une

première correspondant au comportement élastique du matériau et une deuxième petite zone représente un comportement plastique du matériau jusqu'au point de rupture situé à un seuil de contrainte de 17 MPa et une déformation de 1.5 % pour l'épaisseur de couche 0.09mm, une contrainte 13 MPa et une déformation 1.4 % pour l'épaisseur 0.14mm et d'une contrainte de 7 MPa et 0.8 % de déformation pour l'épaisseur 0.29mm. Ce type de comportement caractérise les matériaux quasi-fragiles. L'analyse des échantillons endommagés, nous montre la décohésion des couches comme indiquer sur la figure IV.27.



**Figure IV.27 :** Eprouvettes de la quatrième position à la fin d'essai.

D'après les résultats des tableaux IV.2, IV.3, IV.4 et VI.5, toutes les éprouvettes testées présentent un comportement similaire pour la même épaisseur et position d'impression avec une légère dispersion de la contrainte à rupture, ceci est dû principalement à l'existence de défauts qui influencent la résistance à la rupture. Les modules de Young sont obtenus par la courbe de tendance de régression linéaire de la partie élastique.

#### IV.1.5 Comparaison des résultats

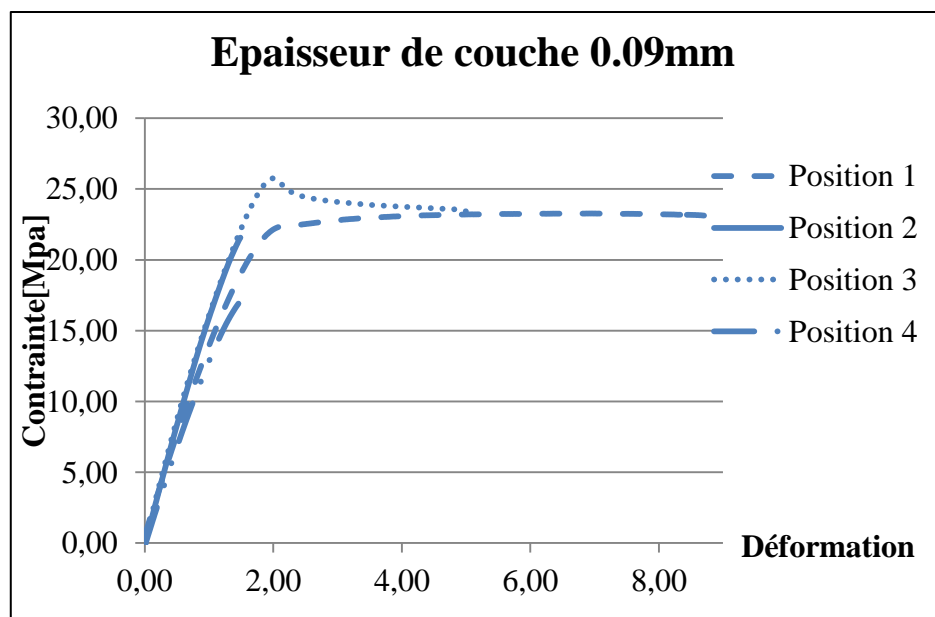
La figure IV.11 donne une comparaison des comportements des différents échantillons imprimés selon la première position avec différentes épaisseurs de couche testés en traction. Les éprouvettes représentent un comportement similaire avec une légère dispersion de la contrainte. Les meilleurs caractéristiques ont été obtenus pour l'épaisseur de 0,29 mm avec une contrainte de 24 MPa et une déformation ultime de 4,6 %.

La comparaison des comportements des différents échantillons imprimés selon la deuxième position avec différentes épaisseurs de couches sont représentés sur la figure IV.15. Nous observons que les échantillons imprimés avec une épaisseur de 0,09 et 0,14mm ont un comportement similaire et des caractéristiques mécaniques très proches ; par contre les échantillons imprimés avec une épaisseur de 0,29 mm donnent des propriétés très faibles.

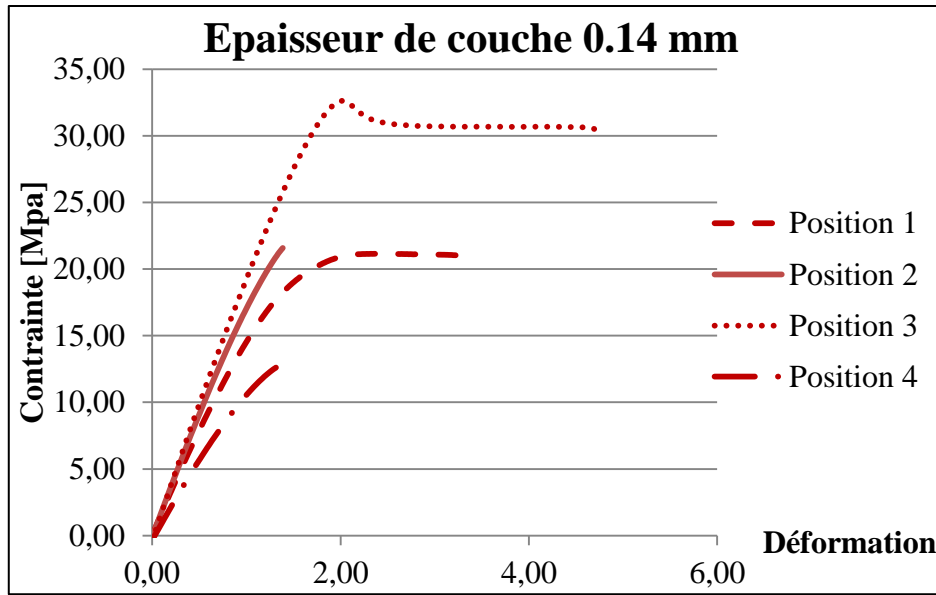
La figure IV.19 donne une comparaison des comportements des différents échantillons imprimés selon la troisième position avec différentes épaisseurs de couche testés en traction. Les meilleurs caractéristiques sont obtenues par les échantillons imprimés avec une épaisseur de couche de 0,14 mm, suivi par les échantillons ayant une épaisseur de 0,29 mm.

La figure IV.23 donne une comparaison des comportements des différents échantillons imprimés selon la première quatrième avec différentes épaisseurs de couche testés en traction. Les meilleures caractéristiques sont obtenues par les échantillons imprimés avec une épaisseur de couche de 0,09 mm. On note ici qu'en augmentant l'épaisseur de couche d'impression on perd en résistance.

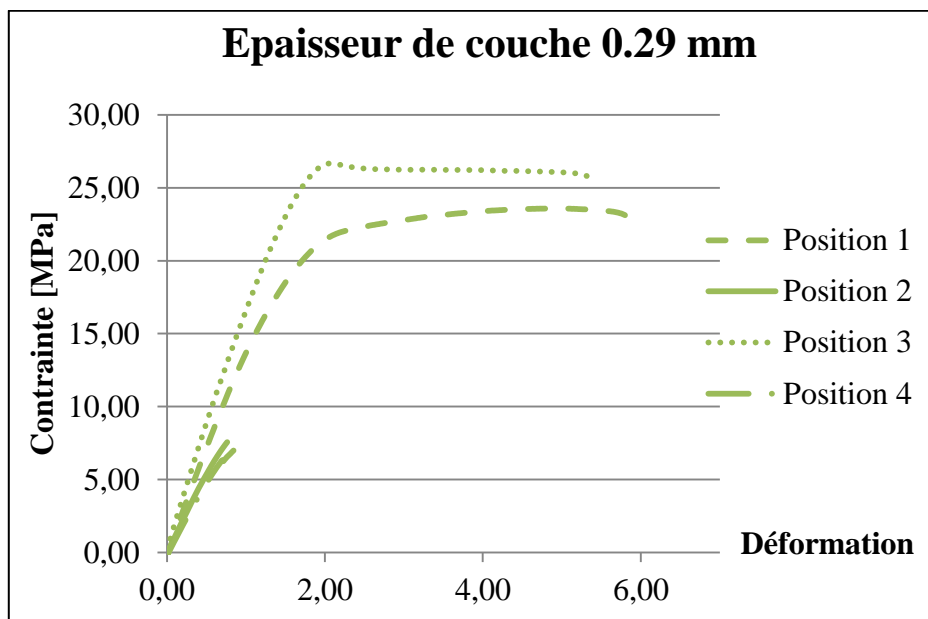
Les figures IV.28, IV.29, IV.30 représentent des comparaisons du comportement des échantillons imprimés suivant différentes position avec la même épaisseur de couche testés en traction. Les meilleurs caractéristiques ont été données par la première et la troisième position représentés par des tirets et points respectivement. Dans ce cas la sollicitation est appliquée sur les couches qui sont orientées dans la même direction de sollicitation, ce qui donne un comportement ductile du matériau. Dans le cas de la deuxième et la quatrième position représentées par une ligne continue et un point tiret, c'est l'interface inter couches qui est sollicitée jusqu'à une rupture brutale des échantillons, cela donne un comportement quasi-fragile. Les modules de Young obtenu par une régression linéaire de la courbe de tendance et les contraintes maximales extraits des courbes de comparaisons sont représentés sur les histogrammes des figures IV.31, IV.32, ..., IV.35 et IV.36.



**Figure IV.28 :** Evolution contraintes-déformations des éprouvettes imprimées suivant différentes positions pour une épaisseur de couche 0.09mm.



**Figure IV.29 :** Evolution contraintes-déformations des éprouvettes imprimées suivant différentes positions pour une épaisseur de couche 0.14mm.



**Figure IV.30 :** Evolution contraintes-déformations des éprouvettes imprimées suivant différentes positions pour une épaisseur de couche 0.29mm.

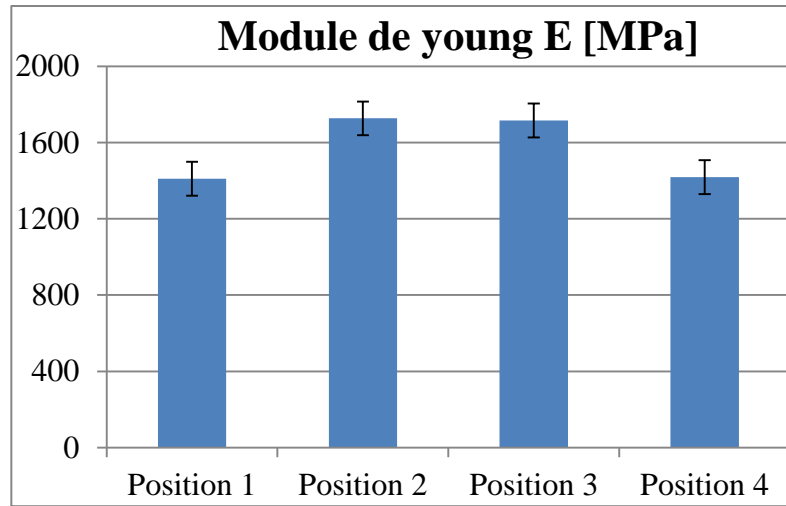


Figure IV.31 : Modules de Young des différentes positions pour l'épaisseur 0.09mm.

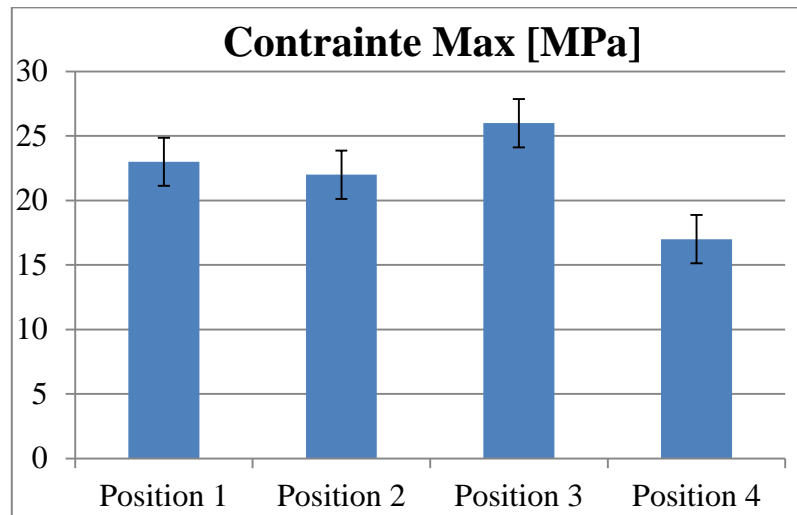


Figure IV.32 : Contrainte maximale des différentes positions pour l'épaisseur 0.09mm.

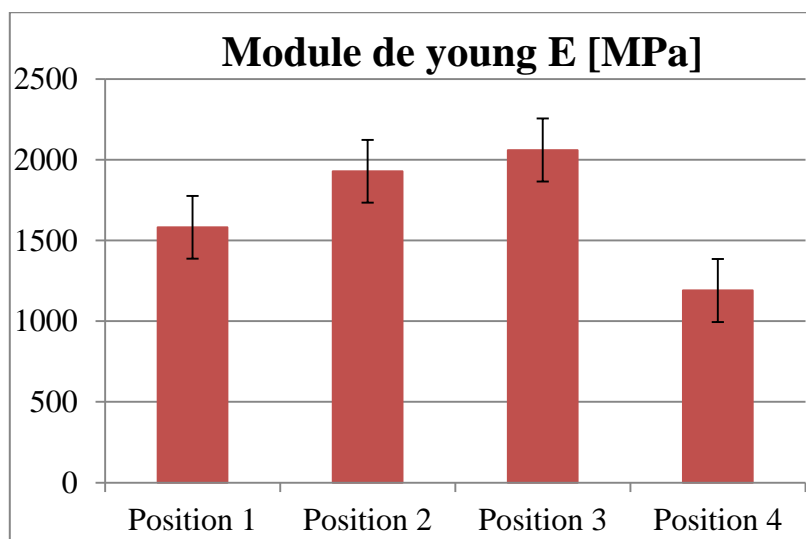


Figure IV.33 : Modules de Young des différentes positions pour l'épaisseur 0.14mm.

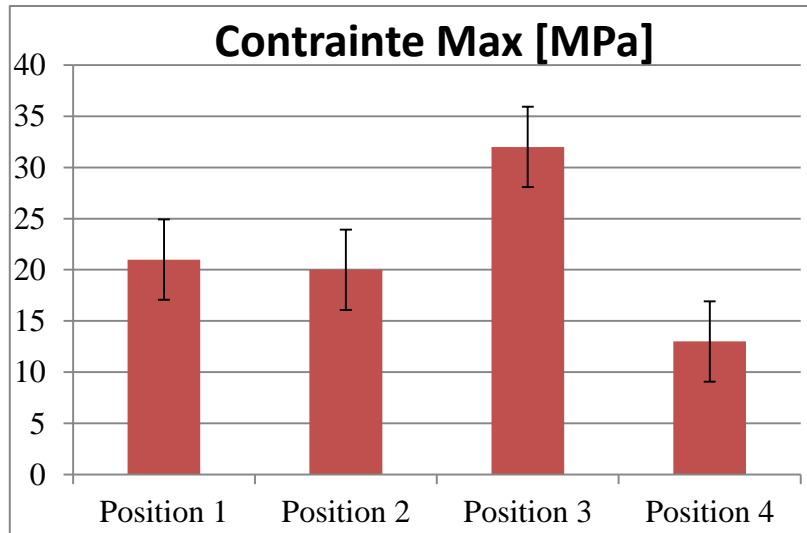


Figure IV.34 : Contrainte maximale des différentes positions pour l'épaisseur 0.14mm.

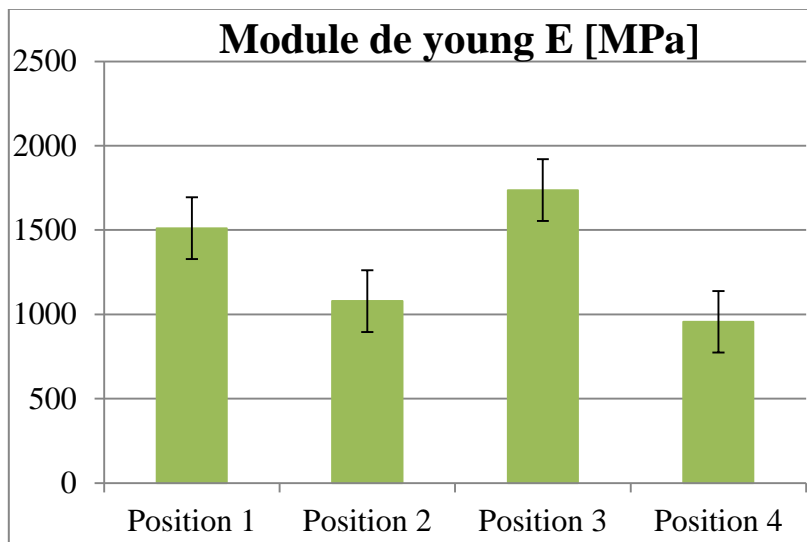


Figure IV.35 : Modules de Young des différentes positions pour l'épaisseur 0.29mm.

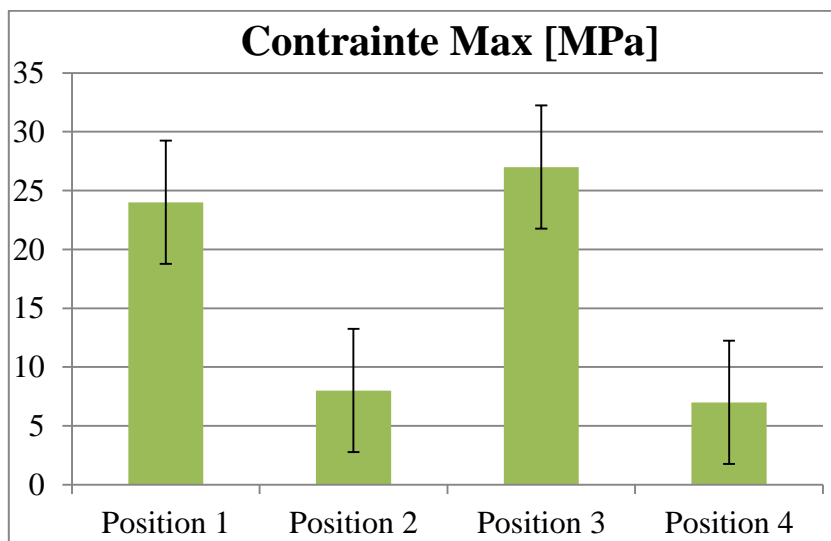


Figure IV.36 : Contrainte maximale des différentes positions pour l'épaisseur 0.29mm.

## IV.2 Effet de l'état de surface en aérodynamique

Afin d'étudier l'effet de l'état de surface des pièces imprimées en 3D, nous avons opté pour les essais d'aérodynamique. Pour ce faire, nous avons décidé la réponse d'un avion imprimé avec la Zortrax M200 Plus au cours d'un essai au niveau de la soufflerie du département. Pour mener à bien ce travail nous avons comparé le comportement de l'avion avant et après traitement de surface.

### IV.2.1 Conception et réalisation de la maquette d'avion

Nous avons choisis un avion militaire modèle Sukhoi Su-35 (**Figure IV.37**) qui possède une géométrie un peu compliquée dans l'objectif d'étudier l'influence de la rugosité sous l'effet des forces aérodynamiques.

Pour la réalisation du Su-35 nous avons suivis les mêmes étapes que les éprouvettes. Cependant le modèle CAO à été téléchargé sur le site « <https://grabcad.com/> ». Notre travail concernant le modèle CAO a porté essentiellement sur le réglage des dimensions et quelques petits détails du modèle.



**Figure IV.37** : Maquette d'avion Sukhoi Su-35.

### IV.2.2 Traitement de l'état de surface de la maquette d'avion

Comme indiqué précédemment, nous avons comparé la réponse de l'avion avant et après traitement de surface.

#### IV.2.2.1 Traitement à la vapeur d'acétone

Afin de diminuer la rugosité de notre maquette, nous avons d'abord opté pour un traitement chimique utilisant l'acétone, un produit qui s'attaque malheureusement aux matériaux ABS.

Pour réaliser ce traitement, nous mettons notre maquette dans une boîte avec un papier mouillé d'une petite quantité d'acétone sur les parois de la boîte. Nous fermons la boîte et nous la laissons jusqu'à ce que nous obtenions le résultat voulu (**Figure IV. 38**).



**Figure IV.38** : Traitement à la vapeur d'acétone.

Malheureusement, ce traitement n'a pas donné les résultats voulu dans notre cas. La maquette a été complètement déformée, (**Figure IV.39**) avant que nous obtenons l'état de surface voulu.



**Figure IV.39** : Maquette déformée après traitement à la vapeur d'acétone.

#### IV.2.2.2 Revêtement avec la résine polystyrène

Comme le traitement à la vapeur d'acétone n'a pas été concluant, nous avons eu recours à une autre technique de traitement de surface. Cette nouvelle technique consiste à reverter la maquette avec une fine couche d'un mélange résine polystyrène et cobalt avec une quantité de 2% de durcisseur. Le revêtement se fait manuellement avec un petit pinceau. Avec cette technique nous avons obtenu une amélioration de l'état de surface (**Figure IV.40**).



**Figure IV.40** : Maquette après revêtement.

### IV.2.3 Essai en soufflerie

L'essai aérodynamique en soufflerie a été fait dans l'objectif de mesurer les coefficients de portance et de trainée de notre maquette. Nous avons fait des essais sur la maquette dans son état brut avec une rugosité importante, ainsi que sur la maquette revêtue (avec une rugosité réduite). Pour chaque essai nous avons varié l'angle d'incidence de  $0^\circ$  à  $45^\circ$  avec une incrémentation de  $5^\circ$  et une vitesse de  $V_0=15$  m/s fixe. Pour chaque angle l'essai a été répété 3 fois.

### IV.2.4 Résultats des essais

Les différents résultats obtenus sont présentés sur les tableaux et les figures suivants.

Incidence	Portance (N)	Trainée (N)	Surface (m <sup>2</sup> )	Vitesse (m/s)	$\rho_{\text{air}}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Coeff de portance $C_z$	Coeff de trainée $C_x$
0	-0,4007	0,1193	0,0197	15	1,292	-0,1397	0,0416
5	0,1281	0,5546	0,0197	15	1,292	0,0446	0,1933
10	0,4065	0,6372	0,0197	15	1,292	0,1417	0,2221
15	0,6273	0,7615	0,0197	15	1,292	0,2187	0,2654
20	0,8060	0,9366	0,0197	15	1,292	0,2809	0,3264
25	0,9219	1,0991	0,0197	15	1,292	0,3213	0,3831
30	1,0165	1,3024	0,0197	15	1,292	0,3543	0,4539
35	1,0055	1,4676	0,0197	15	1,292	0,3505	0,5115
40	0,9512	1,5764	0,0197	15	1,292	0,3316	0,5495
45	0,8218	1,6255	0,0197	15	1,292	0,2865	0,5666

**Tableau IV.6** : Portance et trainée à  $V=15$  m/s maquette sans revêtement.

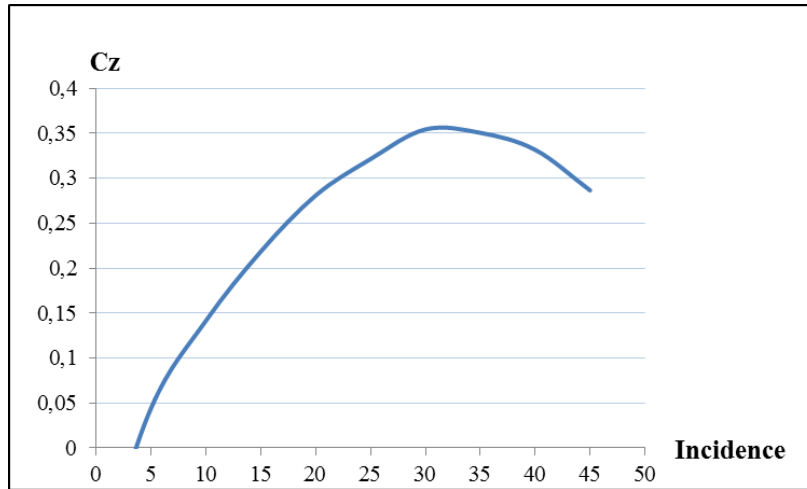


Figure IV.41 : Coefficient de portance ( $C_z$ ) en fonction des incidences maquette sans revêtement.

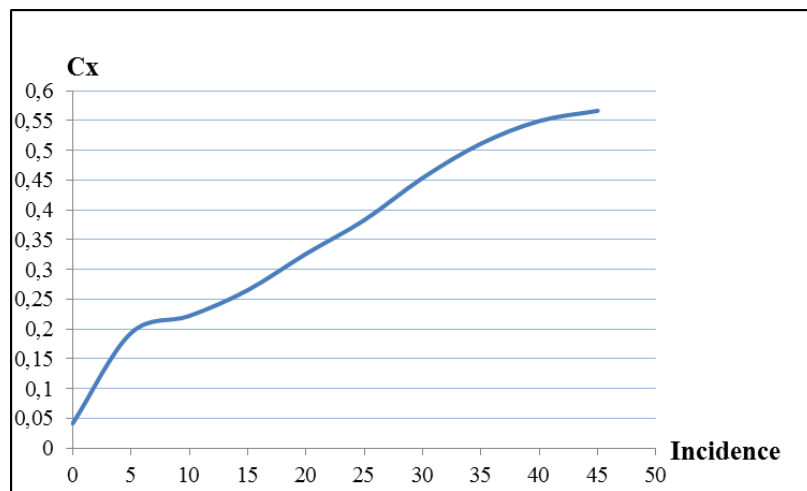


Figure IV.42 : Coefficient de traînée ( $C_x$ ) en fonction des incidences maquette sans revêtement.

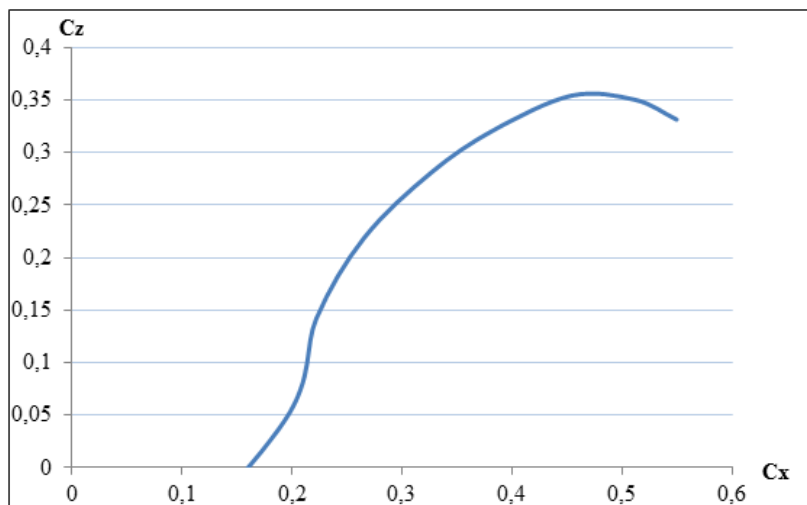


Figure IV.43 :  $C_z$  en fonction de  $C_x$  (la polaire) de la maquette sans revêtement.

Incidence	Portance (N)	Trainée (N)	Surface (m <sup>2</sup> )	Vitesse (m/s)	$\rho_{\text{air}}$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Coeff de portance Cz	Coeff de trainée Cx
0	-0,1368	0,3639	0,0197	15	1,2920	-0,0477	0,1269
5	0,2829	0,4320	0,0197	15	1,2920	0,0986	0,1506
10	0,5241	0,5096	0,0197	15	1,2920	0,1827	0,1776
15	0,7270	0,6260	0,0197	15	1,2920	0,2534	0,2182
20	0,9187	0,8121	0,0197	15	1,2920	0,3202	0,2831
25	1,0380	0,9860	0,0197	15	1,2920	0,3618	0,3437
30	1,0626	1,1421	0,0197	15	1,2920	0,3704	0,3981
35	0,9690	1,2040	0,0197	15	1,2920	0,3378	0,4197
40	0,8820	1,2958	0,0197	15	1,2920	0,3074	0,4517
45	0,8098	1,4130	0,0197	15	1,2920	0,2823	0,4925

Tableau IV.7 : Portance et trainée à V=15 m/s maquette revêtue.

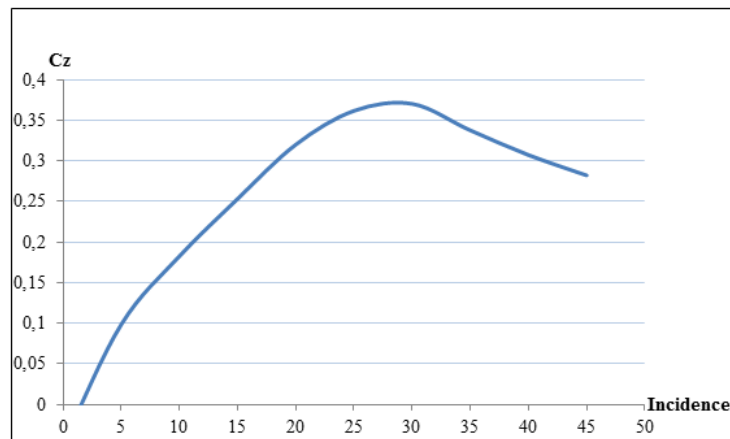


Figure IV.44 : Coefficient de portance (Cz) en fonction des incidences maquette revêtue.

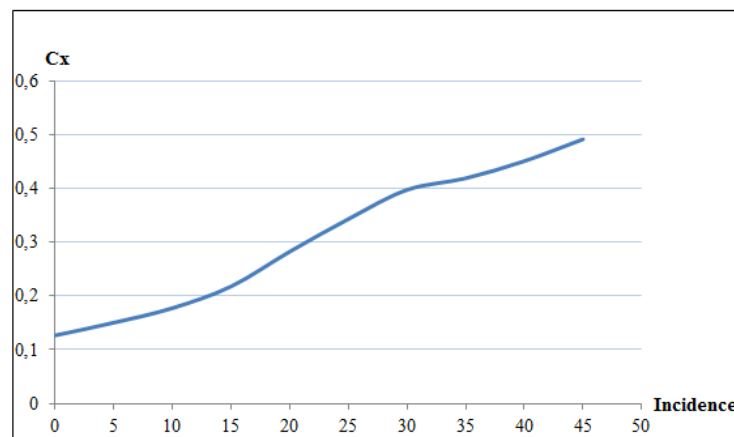
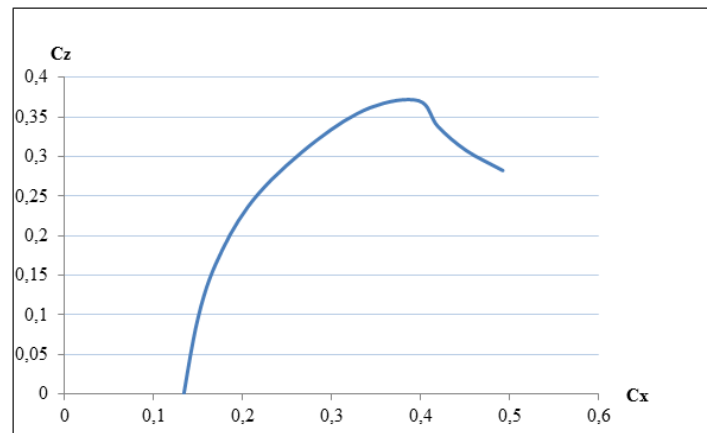


Figure IV.45 : Coefficient de trainée (Cx) en fonction des incidences maquette revêtue.



**Figure IV.46 :**  $C_z$  en fonction de  $C_x$  (la polaire) de la maquette revêtue.

### IV.2.5 Interprétation des résultats

Les figures IV.41 et IV.44 représentent les courbes d'évolution des coefficients de portance en fonction de l'angle d'incidence de la maquette d'avion non revêtue (rugosité importante) et de la maquette revêtue. Les courbes sont en progression jusqu'à un seuil maximal puis elles commencent à diminuer. Ce seuil correspond à la portance maximale, il est obtenu pour un angle d'incidence de  $30^\circ$ , appelé angle de décrochage.

Les courbes d'évolution du coefficient de trainée en fonction de l'angle d'incidence de la maquette non revêtue et de la maquette revêtue représentées sur la figure IV.42 et IV.45, montrent une progression continue de la trainée jusqu'à une valeur maximale d'environ 0,56 à un angle de  $45^\circ$  pour la maquette non revêtue, et de 0,49 à un même angle pour la maquette revêtue.

Les figures IV.43, IV.46 représentent les courbes d'évolution du coefficient de portance en fonction du coefficient de trainée (la polaire) de la maquette non revêtue. Les courbes progressent progressivement jusqu'à une valeur maximale puis elles commencent à diminuer.

### IV.2.6 Comparaison des résultats

La figure IV.47 permet de faire une comparaison entre les courbes de portance de la maquette dans les deux cas (revêtue et non revêtue). Comme on peut voir sur cette figure, la portance obtenue pour la maquette est élevée par rapport à celle obtenue pour la maquette non revêtue.

La figure IV.48 représente une comparaison entre les coefficients de trainée de la maquette revêtue et la maquette non revêtue. Nous constatons que les coefficients de trainée de la maquette non revêtue sont élevés en comparaison avec ceux de la maquette revêtue. On peut voir aussi une augmentation rapide de la trainée dans le cas de la maquette non revêtue à partir de l'angle de décrochage  $30^\circ$ . Ce résultat peut-être dû à la rugosité.

La figure IV.49 permet de faire une comparaison entre les polaires de chaque maquette. Les résultats donnés par la maquette revêtue sont meilleurs que ceux de la maquette non revêtue.

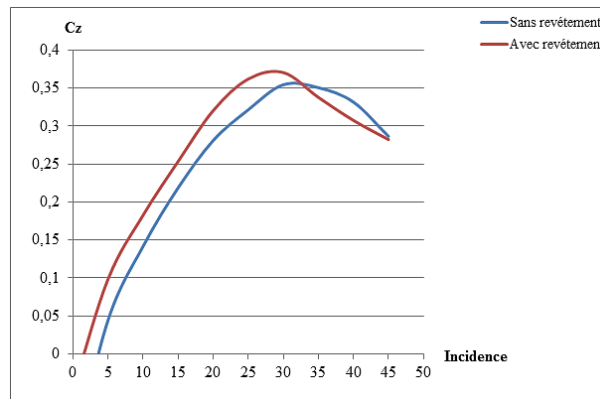


Figure IV.47 : Coefficient de portance ( $C_z$ ) en fonction des incidences.

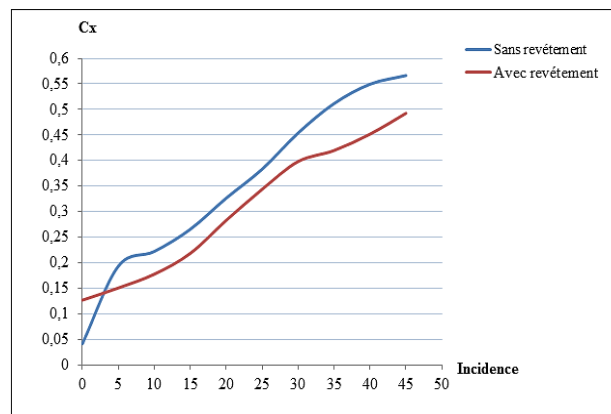


Figure IV.48 : Coefficient de traînée ( $C_x$ ) en fonction des incidences.

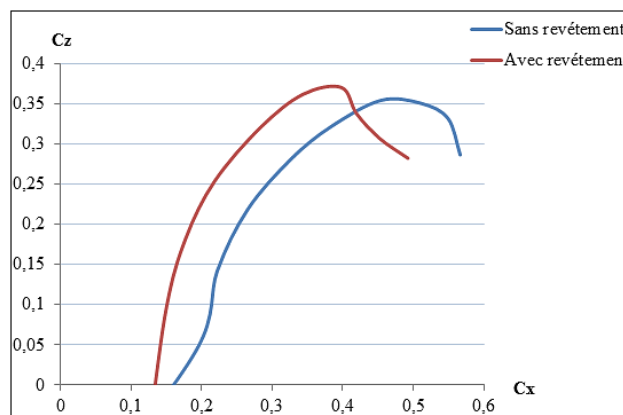


Figure IV.49 : Polaires.

### IV.3 Simulation de l'aérodynamique de la maquette d'avion

Afin de comprendre les phénomènes qui surviennent lors des essais d'aérodynamique de la maquette d'avion, nous avons décidé de réaliser des simulations en utilisant le logiciel XFlow 2019. Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus.

IV.3.1 Description du problème

La maquette d’avion modélisée en 3D en utilisant le logiciel SolidWorks est d’abord importée dans le code de calcul XFlow2019. Nous avons considéré quatre (04) incidences de l’avion : 0° (horizontale), 10°, 30° et 45°. Nous avons reproduit les mêmes conditions que les essais : vitesse 15m/s, les dimensions de la veine d’essai (1\*0,3\*0,3m).

IV.3.2 Résultats des simulations

a. Vorticité :

La vorticité  $\omega$  est le module de la courbe de vitesse il est exprimée en 1/s

$$\omega = \left| \vec{v} \times \vec{v} \right|$$

Les figures suivantes représentent l’évolution de la vorticité au cours de la simulation

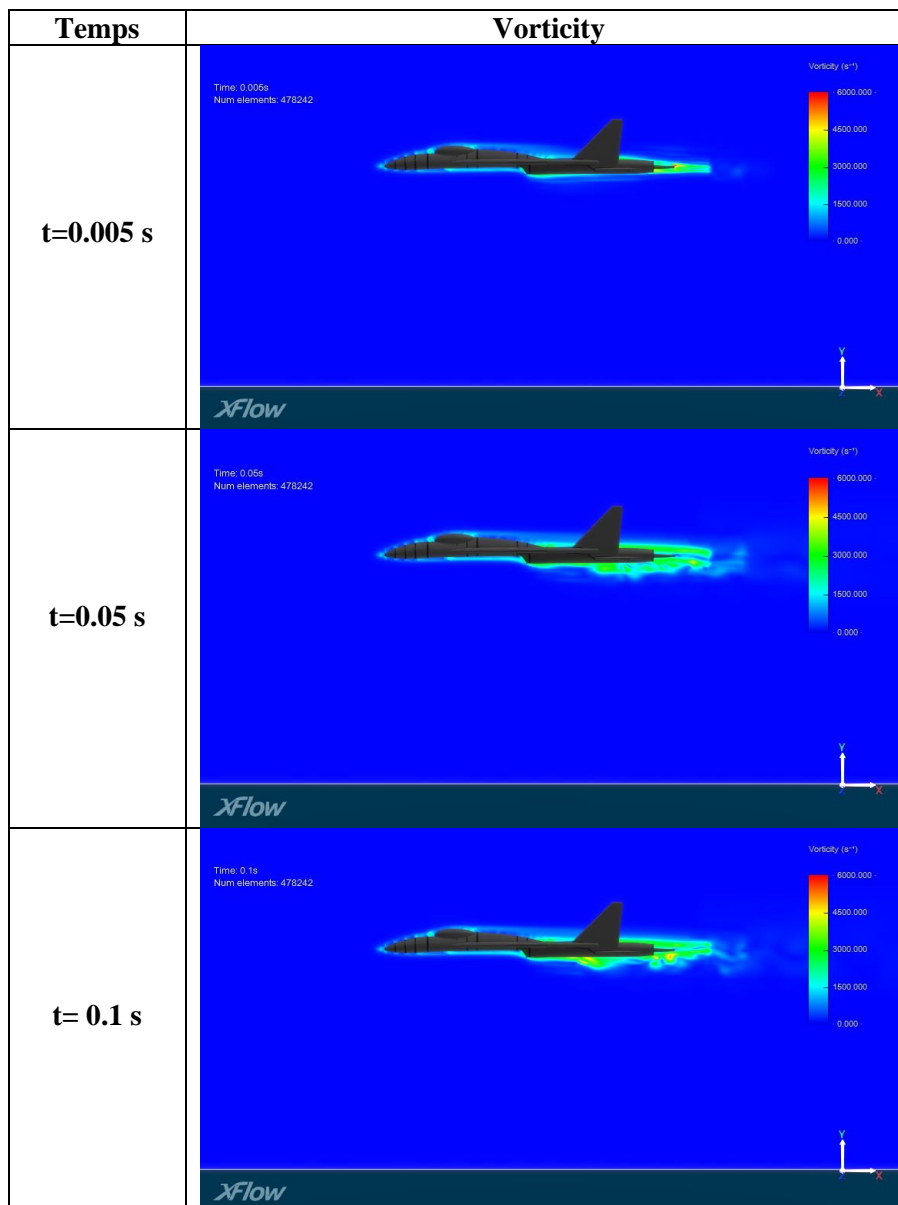


Figure IV.50 : La vorticité pour une incidence de 0°.

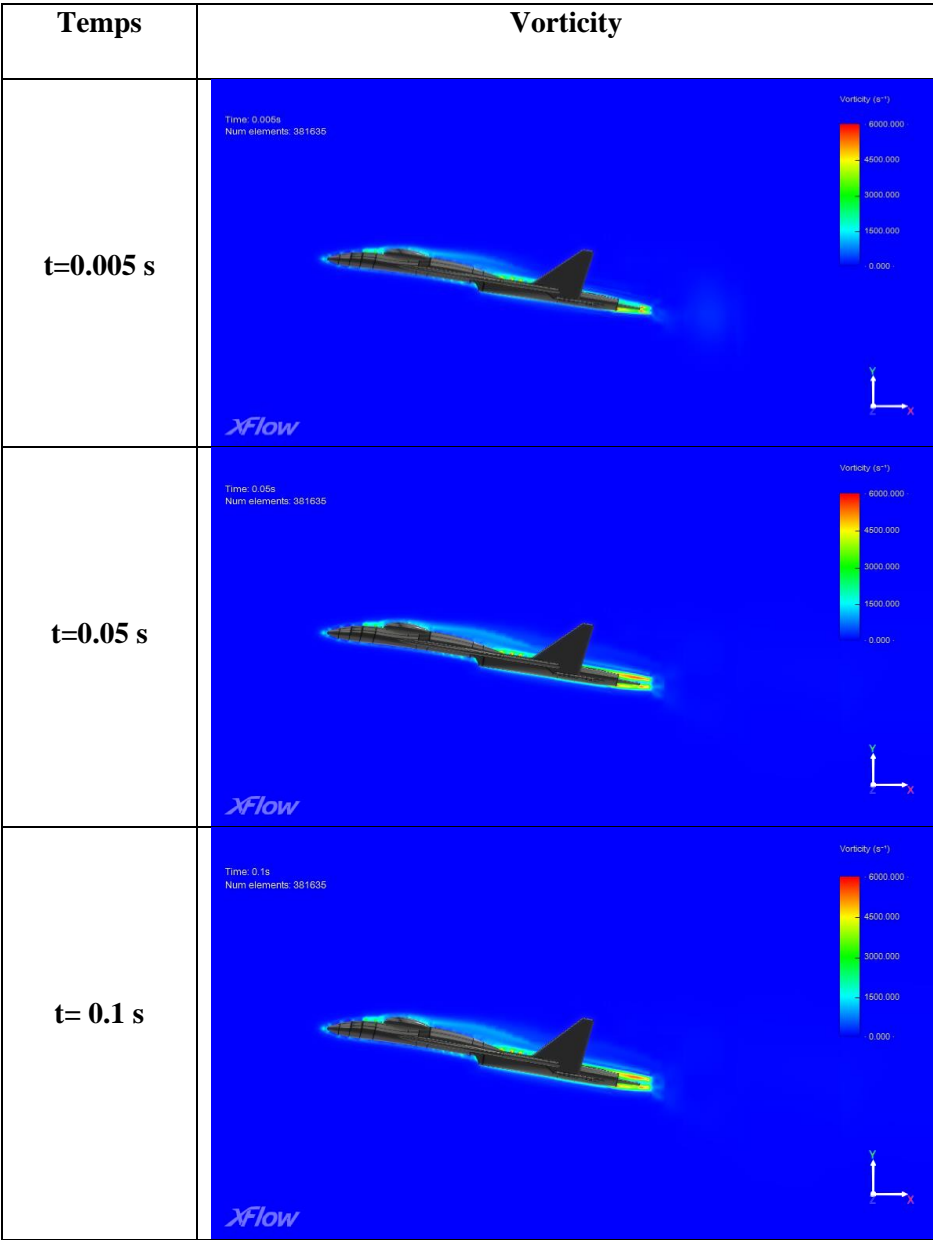


Figure IV.51 : La vorticité pour une incidence de 10°.

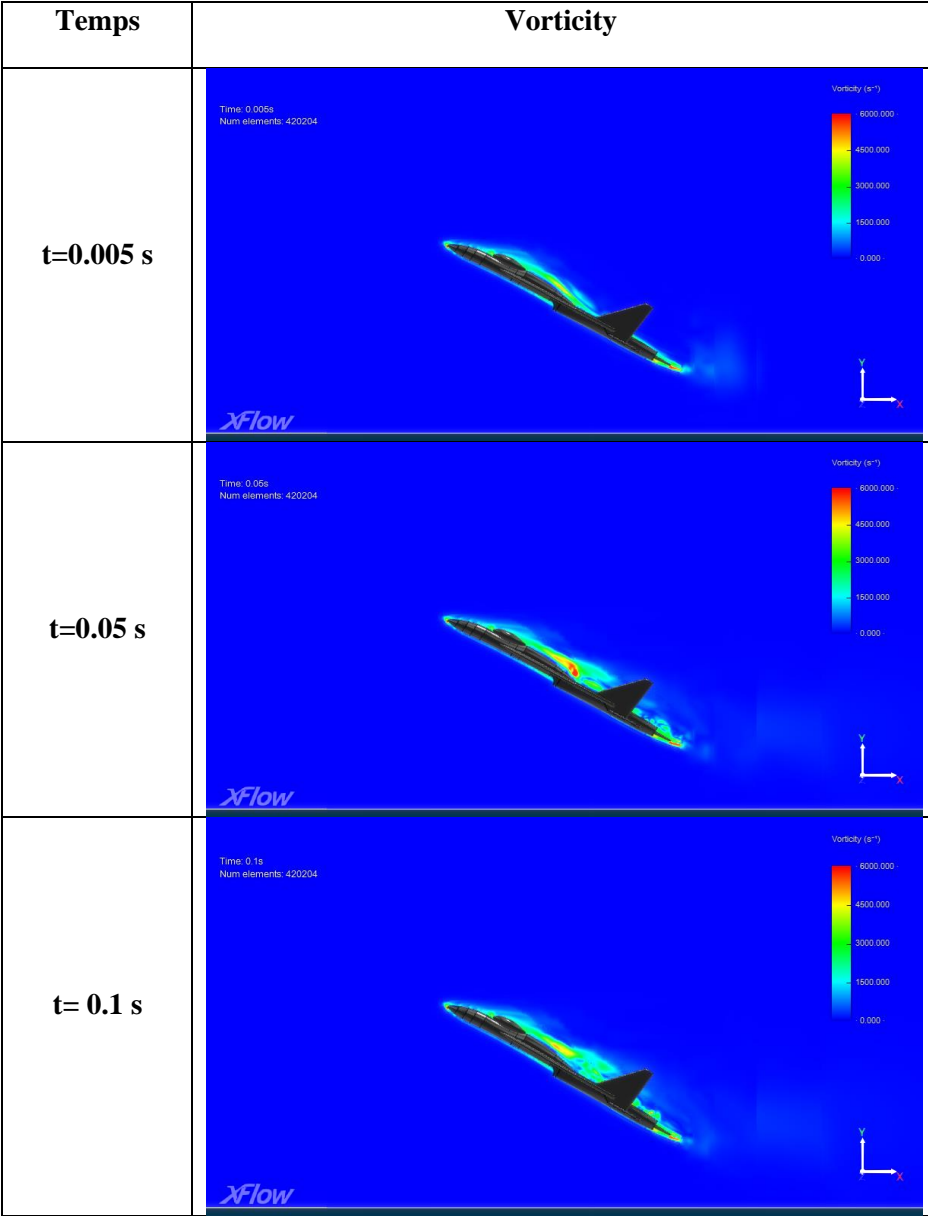


Figure IV.52 : La vorticité pour une incidence de 30 .

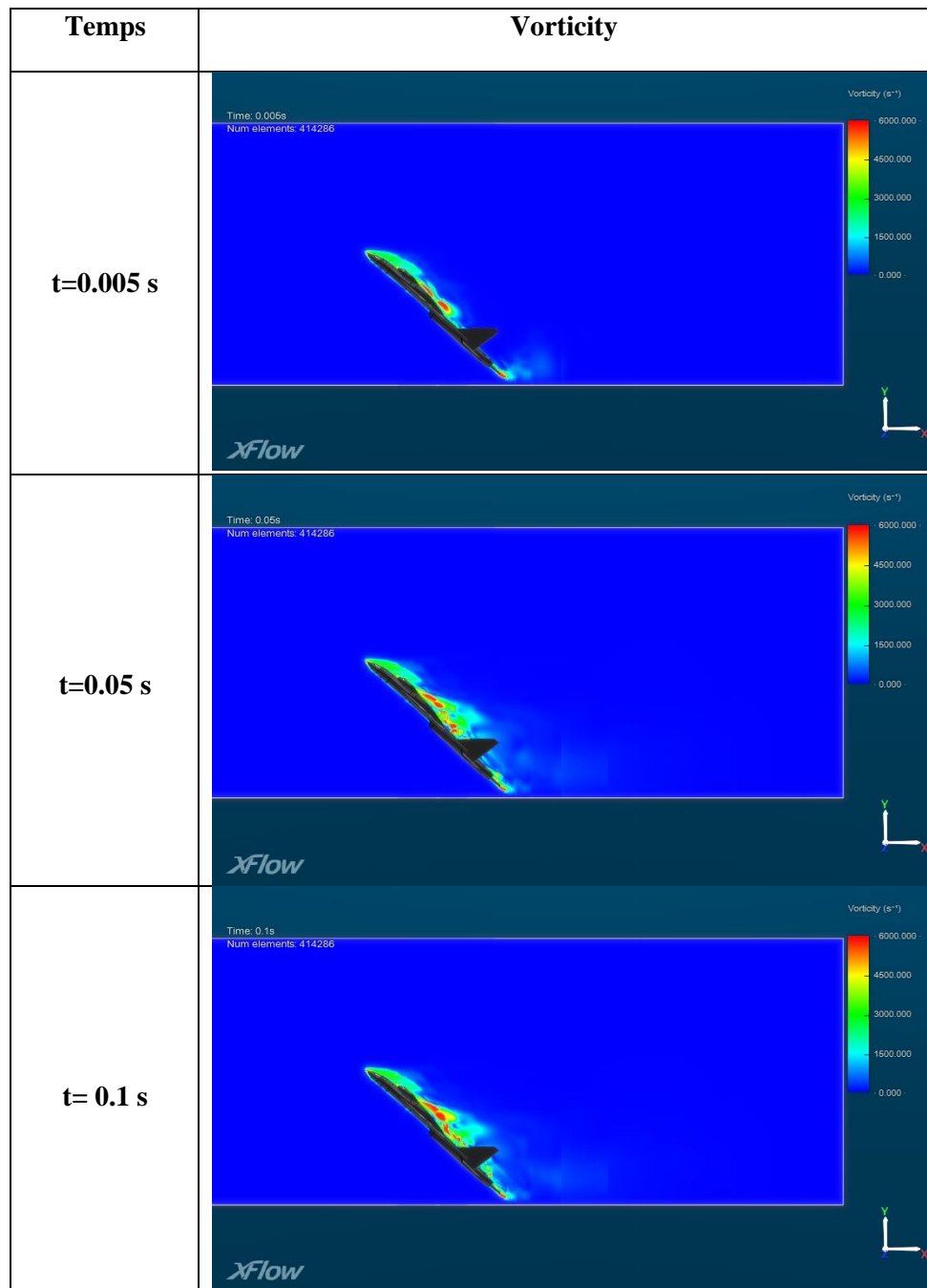


Figure IV.53 : La vorticité pour une incidence de 45 .

### b. Turbulence intensité

Les figurent qui suivent représentent l'évolution de la turbulence intensité au cours de la simulation

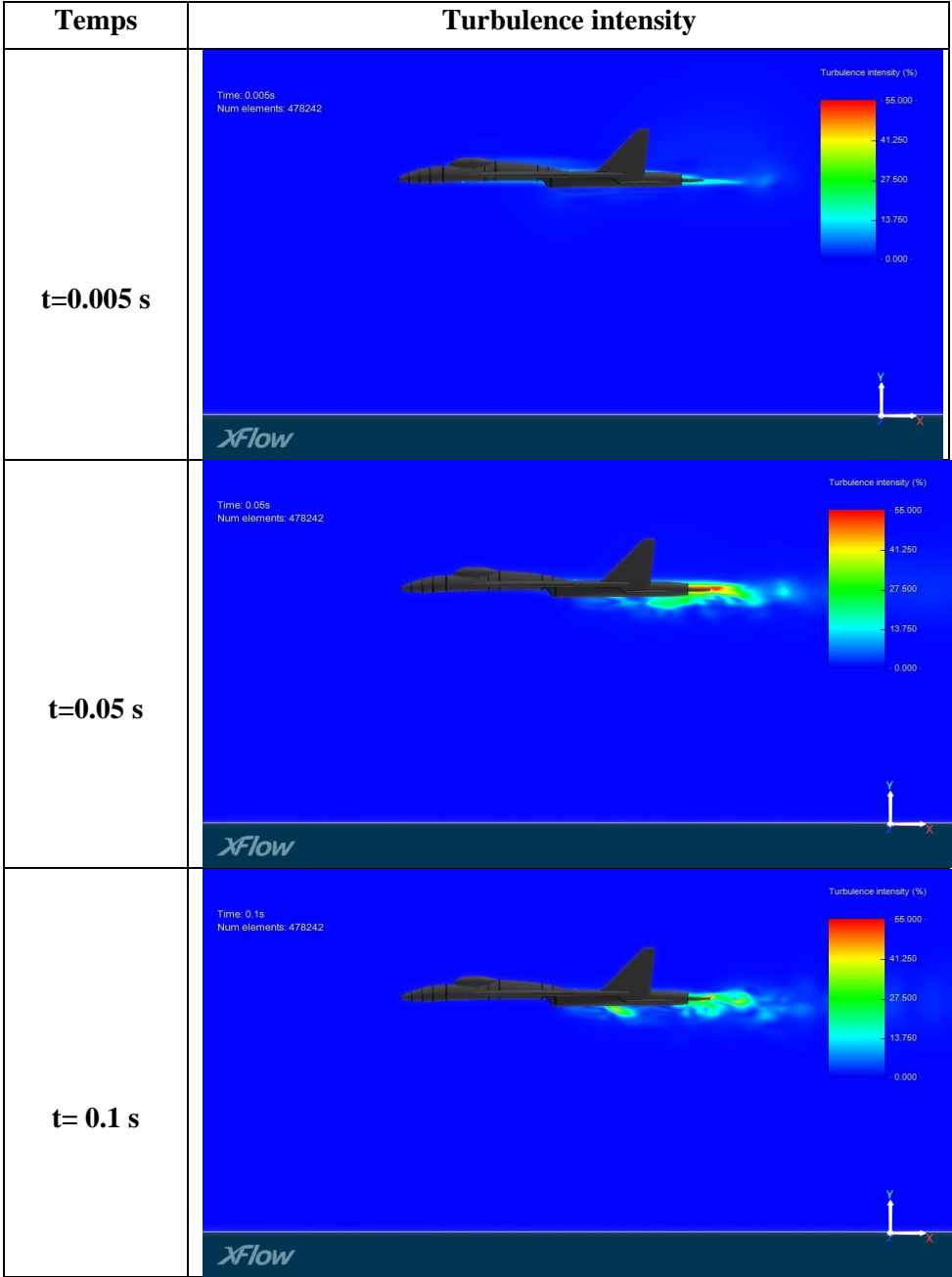


Figure IV.54 : La turbulence pour une incidence de 0°.

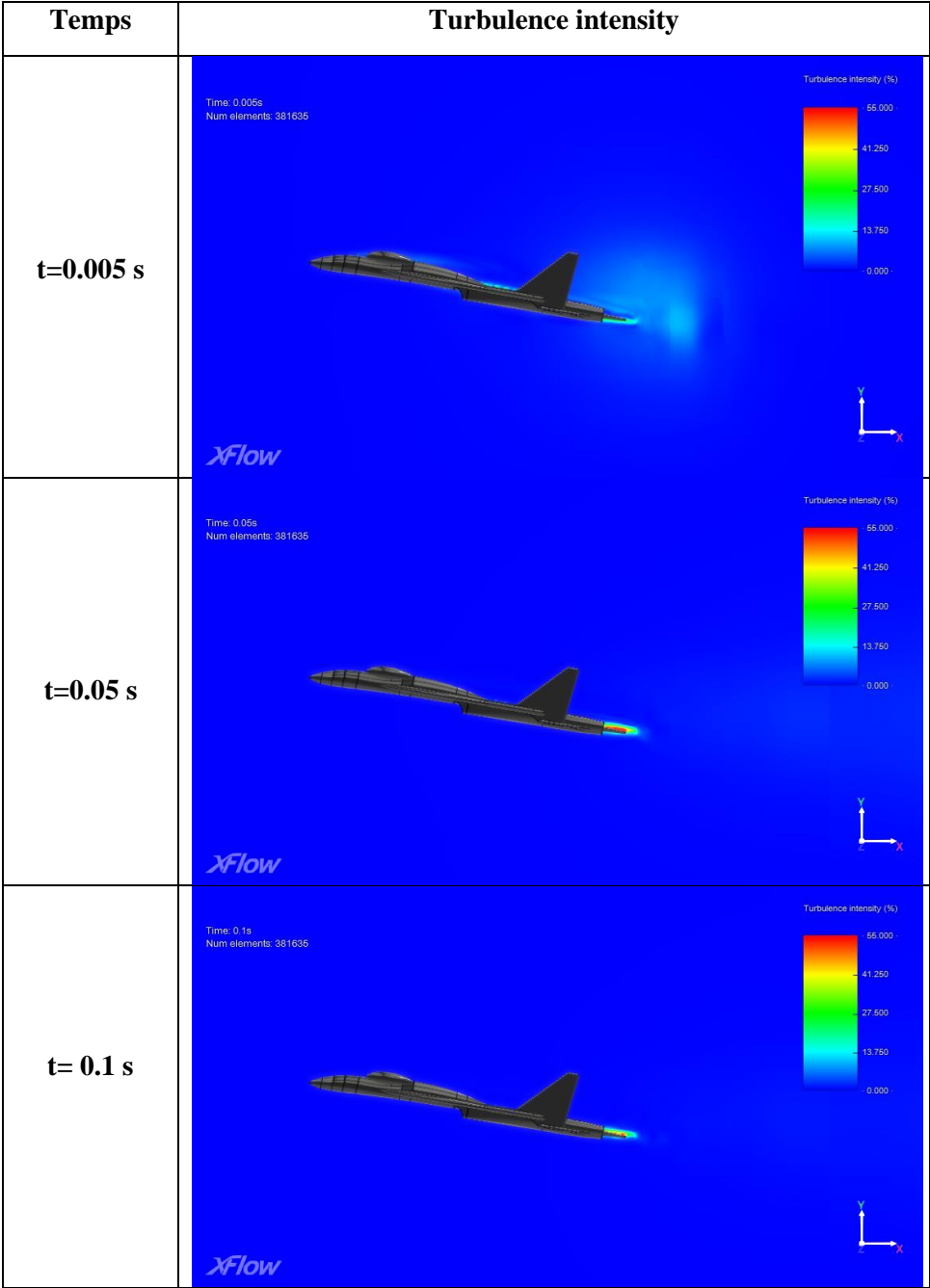


Figure IV.55 : La turbulence pour une incidence de 10°.

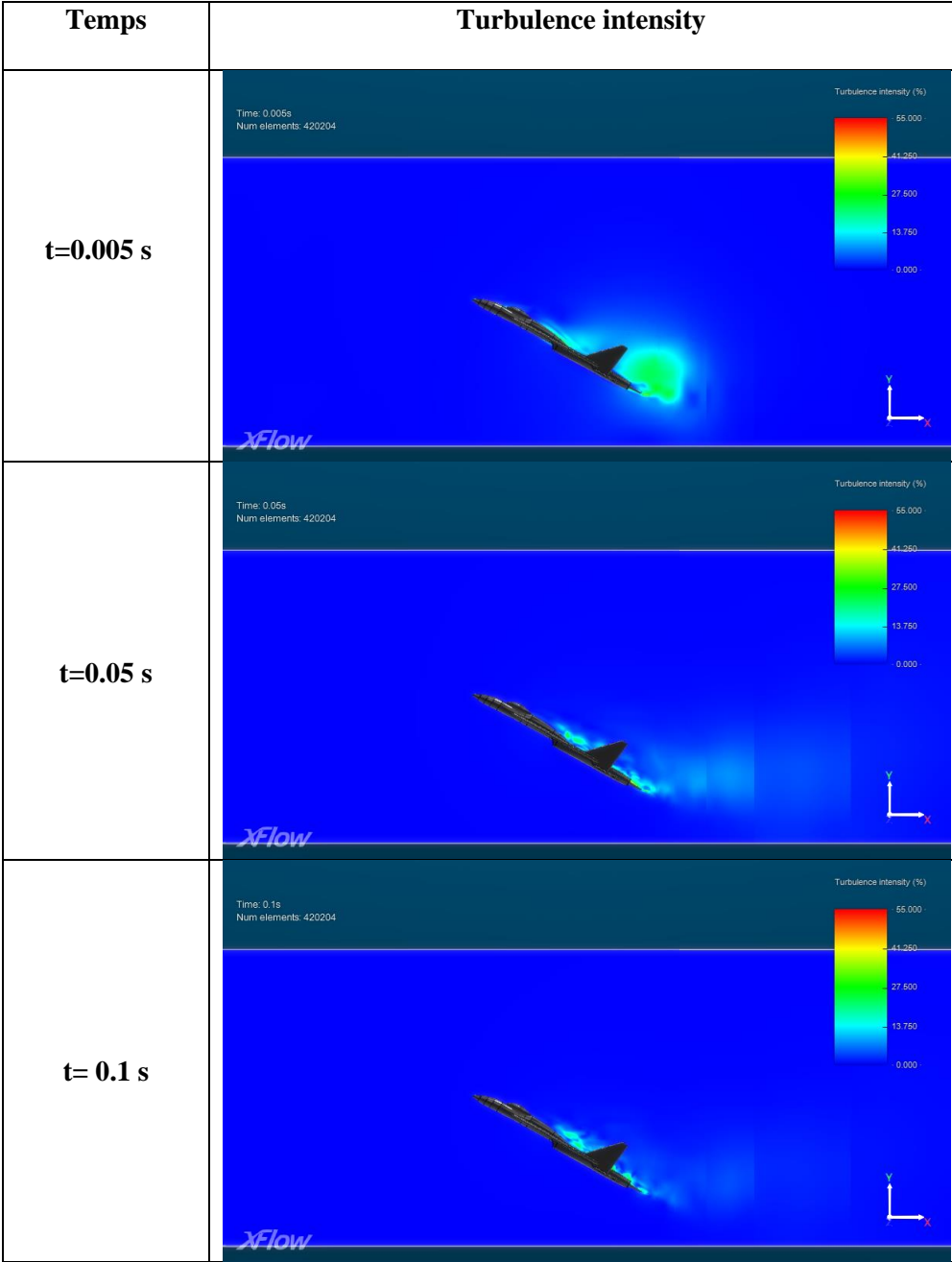


Figure IV.56 : La turbulence pour une incidence de 30°.

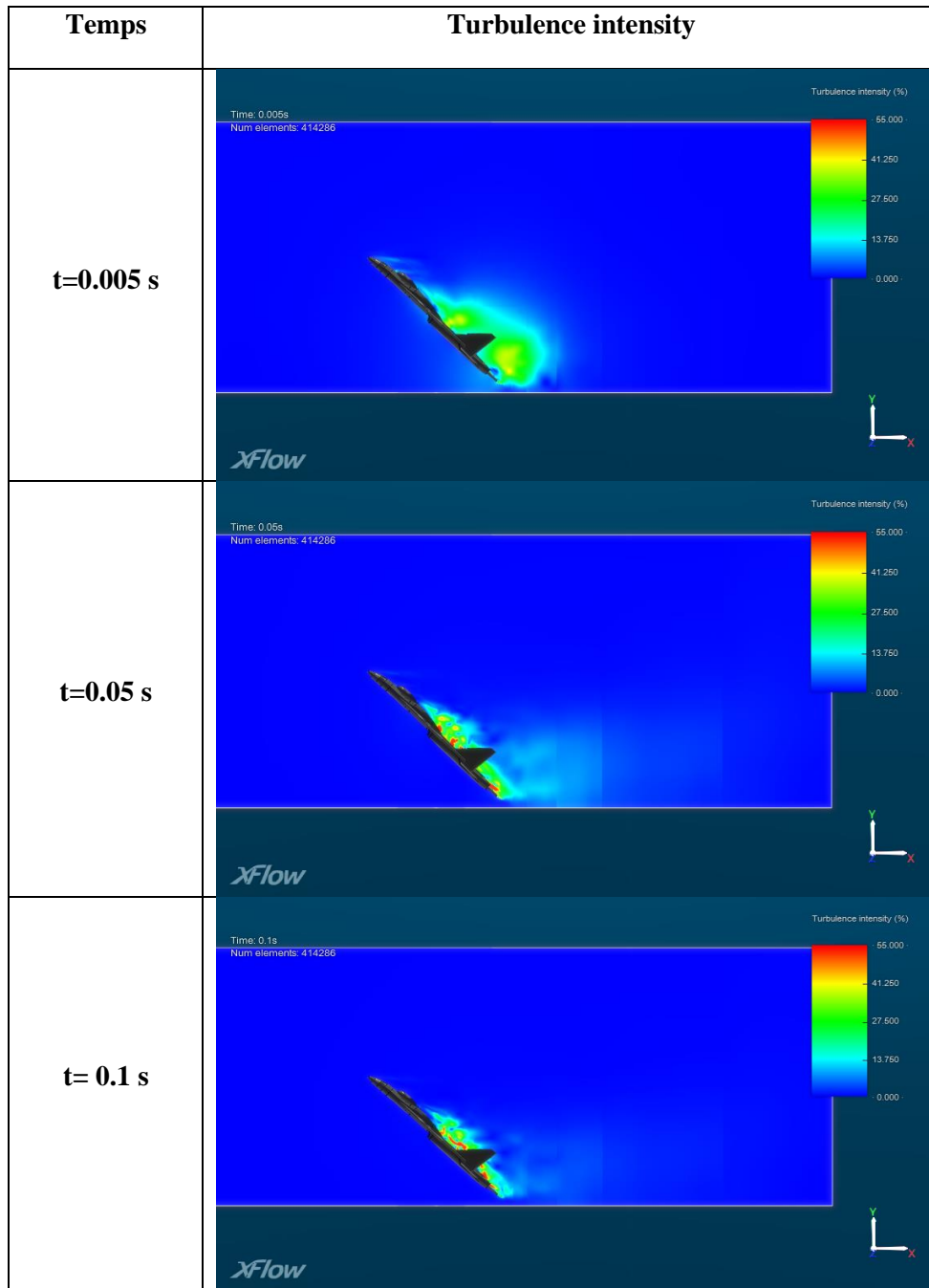


Figure IV.57 : La turbulence pour une incidence de 45°.

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux résultats obtenus au cours de notre préparation du mémoire de master. Nous avons pu d’abord montrer l’influence du plan d’impression sur le comportement et la résistance des pièces imprimées en 3D. Dans la partie aérodynamique, nous avons constaté que l’état de surface des pièces imprimées n’est pas fini : un revêtement est nécessaire.

# Conclusion générale et perspectives

### **Conclusion générale et perspectives**

Nous nous sommes intéressés dans ce mémoire, d'une part à la caractérisation des échantillons de matériau Z-Ultrat (à base d'ABS) utilisé par impression 3D et plus précisément par la méthode FDM (dépôt de matière fondue) et d'une autre part à l'étude de l'effet de l'état de surface d'une maquette d'avion soumise à des forces aérodynamiques. Ainsi nous avons procédé en premier lieu à l'impression des éprouvettes normalisées selon différentes positions et avec différentes épaisseur de couche. Dans la deuxième partie, nous avons procédé à la réalisation de la maquette d'avion dans le but de faire un essai en soufflerie avec une maquette non revêtue et une autre revêtue.

Après caractérisation nous avons constaté que les caractéristiques mécaniques diffèrent d'une position à l'autre et d'une épaisseur de couche à l'autre. A partir de l'étude comparative que nous avons réalisé, nous avons remarqué que les caractéristiques issues des échantillons imprimés selon la troisième position sont les meilleurs en comparaison aux autres positions d'impression. Nous avons observé aussi, que le changement d'épaisseur des couches d'impression influe sur les caractéristiques du matériau étudié.

Les comparaisons des résultats obtenus lors de l'essai en soufflerie, nous a permis de trouver un rapport direct entre les forces aérodynamiques et l'état de surface. C'est-à-dire pour une surface rugueuse la portance diminue et la traînée augmente ; une surface lisse, pour la même maquette, donne une amélioration de la portance et une diminution de la traînée. Nous rajoutons que l'état de surface des pièces imprimées n'est pas fini, ce qui nécessite un revêtement.

Comme perspectives à ce travail, il serait utile de tester d'autres plans d'impression et de varier un certain nombre de paramètres d'impression afin d'obtenir un meilleur aspect physique et une structure présentant de meilleures performances mécaniques et minimiser le phénomène de la rugosité. Il est intéressant aussi d'utiliser d'autres techniques de traitement d'état de surface pour obtenir une meilleur finition des pièces imprimées.

# Références Bibliographique

# Les références bibliographiques

**[1] BRETEAU, T.**

Fabrication Additive Métallique Technologies et Opportunités, report. INSA Rouen, France, 2015.

**[2] Amrane, L., M. Berroubache, and M. Kaci**

Initiation à la fabrication additive (impression 3d) par la technique «fused deposition modeling»(FDM). 2019, Université Abderrahmane Mira-Bejaia.

**[3] Blum, G., M.d. Blois, and N. Tadjine**

L'impression 3D: de l'émerveillement technique aux enjeux organisationnels, économiques et sociétaux. 2017.

**[4] Lefeez, S.**

Innovations techniques: accès, financement et organisation industrielle. Les Champs de Mars, 2018(1): p. 389-395.

**[5] Yosofi, M.**

Méthodologie de caractérisation prédictive des procédés de fabrication additive avec une approche technique, économique et environnementale. 2018, Ecole centrale de Nantes.

**[6] Mécastyle.**

Les différents processus Fabrication additive - Impression 3D. 2019; Available from: <https://www.fabrication-additive.fr/fabrication-additive-processus>.

**[7] Lefevre, G.**

Fabrication additive métallique. 2015; Available from: <https://www.a3dm-magazine.fr/news/fabrication-additive-metallique/procede-de-fabrication-additive-ebm>.

**[8] Bouffaron, P.**

Impression 3D: Les prémisses d'une nouvelle (r) évolution industrielle? Ambassade de France aux Etats-Unis, Washington, USA, 2014.

**[9] Rivoire, D.**

Revue technologie n 203 Spécial réforme du collège de 2015.

**[10] André, J.-C.**

De la fabrication additive à l'impression 3D/4D 1: Des concepts aux réalisations actuelles. Vol. 1. 2018: ISTE Group.

**[11] Mirabel, M. and B. Paque.**

Analyse des opportunités de l'impression 3D dans l'industrie automobile.

**[12] PARIS, A.**

AÉRODYNAMIQUE MÉCANIQUE DU VOL PERFORMANCES AVION. Comité Départemental Aéronautique 35, Edition 2017.

**[13] RIVEST, L.**

Aérodynamique et contrôle. Génie de la production automatisée École de technologie supérieure, Hiver 2015.

**[14] Deborah, T.d.M.**

L'aérodynamique: du vol à voile à la navette spatiale.

**[15] Eggleston, B., et al.**

Thick supercritical airfoils with low drag and natural laminar flow. Journal of aircraft, 1987. 24(6): p. 405-411.

**[16] Dubois, M. and P. Bergé.**

Instabilités de couche limite dans un fluide en convection. Evolution vers la turbulence. Journal de Physique, 1981. 42(2): p. 167-174.

**[17] Pandit Pagwiwoko, C.**

Vibrations aeroélastiques des surfaces portantes. 1991, Ecully, Ecole centrale de Lyon.

**[18] Chekhab, R.**

Etude numérique et expérimentale d'un écoulement autour d'un profil NACA 23012. 2011.

**[19]** L'avionnaire. Aérodynamique. 2019; Available from: <https://www.lavionnaire.fr/>.

**[20]** Center, Z.s. Manuels et documents Available from: <https://support.zortrax.com/>.

**[21]** SYSTEME, D. SOLIDWORKS. 2019; Available from: <https://www.solidworks.com/>.

**[22] Boumrar, I.**

Comportement des Ailes Delta à Apex privilégiés avec et sans Fuselage-Etude Expérimentale et Simulation Numérique. 2012, Université Mouloud Mammeri.