

# Université Mohamed Boudiaf - M'sila

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Numéro de série : .....

Numéro d'inscription : D.TF/3C/01/17

## Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT LMD

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Techniques de fabrication

## THEME

### Contribution à l'usinage des pièces de formes complexes.

Présentée Par

**ARSLANE Mustapha**

Soutenue le : / /

Devant le jury composé de :

<u>Nom &amp; Prénom</u>	<u>Grade</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Qualité</u>
Dr : .....	MCA	Univ. de M'sila	Président
Dr : Slamani Mohamed	Professeur	Univ. de M'sila	Encadreur
Dr : .....	Professeur	Univ. de Batna	Examineur
Dr : .....	MCA	Univ. de M'sila	Examineur
Dr : .....	MCA	Univ. de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2020/2021

## *Publications et Conférences*

- ✓ M. Arslane, M. Slamani, and J.-F. Chatelain, "Development and validation of a machining fixture for complex-shaped components based on Plückerian matrix approach and SDT concept," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, pp. 1697-1716, 2021. (journal catégorie A).
- ✓ M. Arslane, M. Slamani, "Conception et fabrication d'un montage d'usinage pour ailettes mobiles d'une turbine à gaz", "**International Conference on Advanced Mechanics and Renewable Enerfies**", organisée le 28-29 novembre 2018, à l'université M'hamed Bougara, Boumerdes, Algérie. Réf.paper: 221943.
- ✓ M. Arslane, M. Slamani, "Réalisation d'un montage d'usinage pour les pièces de formes complexes", "**International Seminar in Industrial Engineering and Applied Mathematics (ISIEAM ' 2018)**", organisé le 23-24 octobre 2018, à l'université 20 Août 1955 / Skikda, Algérie. Paper ID: ISIEAM-135.

## Remerciements

En tout premier lieu, je remercie Allah, tout puissant, de m'avoir donné la force pour continuer et terminer ce modeste travail, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé, sous la direction du **Monsieur Mohamed Slamani**, professeur au département de génie mécanique à l'université de M'sila, et chercheur au Mechanical Engineering Department, École de technologie supérieure, Montréal, Canada.

Ma plus grande gratitude va à mon encadreur, pour sa disponibilité et la confiance qu'il m'a accordée. J'ai profité pendant longtemps du savoir et du savoir-faire dont j'ai pu bénéficier au cours de nombreuses discussions. J'aimerais aussi le remercier pour l'autonomie qu'il m'a accordée, et ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

J'exprime toute ma reconnaissance à **Monsieur** ..... pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire de thèse. Que **Monsieur** ..... de l'université de ....., trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail. Que **Monsieur**....., professeur à l'université de....., trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail. Que **Monsieur** ..... maître de conférences à l'université de ..... Trouve ici l'expression de mes vifs remerciements pour avoir bien voulu juger ce travail.

Je tiens à remercier ma petite famille. Ma Mère, pour leur soutien et leur encouragement illimité durant ces longues années d'études. Je voudrais leur témoigner ma profonde reconnaissance.

Afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidé à la réalisation de ce modeste mémoire.

# Tables des Matières

# Table des matières

Liste des figures .....	ii
Liste des tableaux.....	vii
Introduction générale: .....	2
1. Motivation : .....	2
1.1 Contexte :.....	2
1.2 Problématique : .....	3
1.3 Objectifs : .....	3
2. Plan de la thèse :.....	3
CHAPITRE I:Revue de la littérature sur le processus d'élaboration des pièces de formes libres.	5
I.1 Le processus de conception et de fabrication assisté par ordinateur (le processus CFAO) : ...	6
I.1.1 Introduction :.....	6
I.1.2 Conception assistée par ordinateur (CAO), Computer-Aided Design (CAD) : .....	6
I.1.3 Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO), Computer-Aided Manufacturing (CAM): ...	7
I.1.4 Processus d'élaboration des composants de forme libre : .....	8
I.1.5 Structure du processus de développement de produits « PDP »: .....	9
I.1.5.1 Relation forme complexe - PDP :.....	10
I.1.6 Modélisation géométrique des formes complexes: .....	12
I.1.6.1 Un tout petit historique :.....	13
I.1.6.2 Notions sur les modèles géométriques : .....	14
I.1.6.3 Domaines d'application : .....	14
I.1.6.4 Catégories des modèles géométriques : .....	15
I.1.6.5 Types des modèles géométriques : .....	17
I.1.7 Surfaces et courbes pour la Modélisation [14]:.....	20
I.1.7.1 Surfaces et courbes polynomiales: .....	20
I.1.7.2 Courbes et surfaces Splines: .....	22
I.1.7.3 Courbes et surfaces Bézier:.....	24
I.1.7.4 Courbes et surfaces NURBS:.....	27
I.1.8 Méthodologie CFAO des pièces de formes complexes : .....	29
I.1.8.1 Conception des pièces de formes complexes :.....	30
I.1.8.2 Mise en forme des pièces de formes complexes : .....	31
I.2 Optimisation de l'usinage des pièces de formes complexes :.....	34
I.2.1 Introduction :.....	34
I.2.2 Optimisation par la compensation des erreurs machines :.....	34
I.2.3 Optimisation des montages d'usinage pour pièces complexes :.....	38

I.2.3.1 Principes et méthodes de mise et maintien en position des pièces de formes complexes :	39
I.2.3.2 Le choix des éléments ou appuis de positionnement (Locators) :	43
I.2.3.3 Le choix des éléments de fixation (Clamping) :	45
I.3 Procédés de fabrication de pièces de forme complexe :	46
I.4 Inspection des pièces de forme complexe :	49
Conclusion :	51
Chapitre II : Optimisation géométrique de la disposition des éléments d'appuis en se basant sur le concept de coordonnées plückeriennes.	53
II.1 Introduction :	54
II.2 Principe de l'approche :	54
II.3 Contexte et objectifs :	55
II.4 Choix de positions des éléments d'appuis :	57
II.4.1 Le modèle géométrique d'un MU :	57
II.4.1.1 <i>Mesure de déplacement</i> :	57
II.4.1.2 <i>Coordonnée de la ligne de Plücker</i> :	58
II.4.1.3 <i>Rang d'un système de lignes</i> :	60
II.4.1.4 <i>Théorème de Hunt</i> :	60
II.4.2 Méthodologie d'optimisation :	60
II.4.2.1 <i>Première étape d'optimisation</i> :	60
II.4.2.2 <i>Deuxième étape d'optimisation</i> :	68
II.4.2.3 <i>Troisième étape d'optimisation</i> :	72
II.5 Discussion des résultats :	75
Conclusion :	76
Chapitre III : Optimisation de la disposition des éléments d'appuis par algorithme génétique en se basant sur le concept de coordonnées plückeriennes.	77
III.1 Introduction :	78
III.2 Méthodologie de l'algorithme génétique (AG) :	78
III.3 Synthèse sur les travaux réalisés :	79
III.4 Méthodes d'optimisation de la disposition d'un montage :	81
III.5 Pièces pour études de cas :	82
a) Pièce 1 :	82
b) Pièce 2 :	83
III.6 La fonction objective (fitness function) :	83
III.7 Optimisation de la position de localisateurs par GA :	84
a) Etude de cas 1 :	85
b) Etude de cas 2 :	95
c) Présentation des résultats :	95

<b>III.8 Discussion des résultats :</b> .....	<b>98</b>
<i>a) Résultat pour l'étude de cas 1 :</i> .....	98
<i>b) Résultat pour l'étude de cas 2 :</i> .....	99
<b>Conclusion :</b> .....	<b>101</b>
<b>Chapitre IV: Implémentation de l'approche proposée pour le développement d'un montage d'usinage des pièces de formes complexes.</b> .....	<b>102</b>
<b>IV.1 Introduction :</b> .....	<b>103</b>
<b>IV.2 Procédés d'électro-usinage (ECM et EDM) :</b> .....	<b>105</b>
<b>IV.2.1 Le procédé du perçage électrochimique ECM :</b> .....	105
<b>IV.2.2 L'usinage par décharge électrique (électroérosion) EDM :</b> .....	107
<i>IV.2.2.1 Le principe de l'usinage EDM à fil :</i> .....	107
<b>IV.2 Stratégie de conception :</b> .....	<b>108</b>
<b>IV.3 Stratégie de fabrication :</b> .....	<b>113</b>
<b>Conclusion :</b> .....	<b>116</b>
<b>Chapitre V : Évaluation de la qualité du montage d'usinage développé.</b> .....	<b>118</b>
<b>V.1 Introduction :</b> .....	<b>119</b>
<b>V.2 La propriété d'équiprojectivité :</b> .....	<b>121</b>
<b>Définition :</b> .....	121
<b>V.3 La répétabilité (ou reproductibilité) :</b> .....	<b>122</b>
<b>V.4 Test de stabilité statique :</b> .....	<b>123</b>
<b>V.4.1 Présentation des résultats :</b> .....	124
<b>V.5 Evaluation de la qualité du MU basée sur le concept TPD :</b> .....	<b>131</b>
<b>V.5.1. Détermination des écarts de positionnement</b> .....	132
<b>V.5.2 Test de la répétabilité de localisation :</b> .....	134
<b>V.6 Test de la répétabilité de localisation par mesures directes:</b> .....	<b>136</b>
<b>V.6.1 Présentation des résultats :</b> .....	136
<b>V.7 Test destructif visuel :</b> .....	<b>142</b>
<b>V.7.1 Etapes du test :</b> .....	144
<b>V.5 Discussion des résultats :</b> .....	<b>147</b>
<b>V.5.1 discussion des résultats de la stabilité statique :</b> .....	147
<b>V.5.2 Discussion des résultats de la reproductibilité du MU :</b> .....	148
<b>V.5.3 Discussion des résultats du test destructif visuel :</b> .....	149
<b>Conclusion :</b> .....	<b>149</b>
<b>Conclusion générale et perspectives.</b> .....	<b>150</b>
<b>Conclusion générale :</b> .....	<b>151</b>
<b>Perspectives :</b> .....	<b>152</b>
<b>Bibliographie :</b> .....	<b>154</b>

## Liste des figures et tableaux

## Liste des figures

### Chapitre I

<i>Figure I.1 : Processus d'élaboration des composants de forme libre</i> .....	9
<i>Figure I.2 : Structure de référence d'un PDP mettant en évidence ses principaux processus liés à la conception de produits et impliquant des formes libres [3]</i> .....	10
<i>Figure I.3 : Exemple d'une aube soumise à des paramètres fonctionnels lors d'un processus d'optimisation de forme. Influence des algorithmes de génération de forme dans différents logiciels : (a) modèle initial de pale de ventilateur avec les trois sections utilisées pour optimiser la forme de pale, (b) zone aérodynamique modélisée avec le logiciel CAO A, (c) zone aérodynamique modélisée avec le logiciel CAO B avec les mêmes paramètres d'entrée que le logiciel A, (d) aérodynamique superposée montrant leurs différences de forme [3]</i> .....	12
<i>Figure I.4 : Résumé du processus de la modélisation géométrique d'un objet.</i> .....	13
<i>Figure I.5 : Exemples de géométries paramétriques</i> .....	16
<i>Figure I.6 : Exploitation d'images numériques pour la simplification et la déformation de modèles polyédriques [8]</i> .....	16
<i>Figure I.7 : Exemples d'objets décrits par des modèles implicites [10].</i> .....	17
<i>Figure I.8 : Représentation des modèles filaires</i> .....	18
<i>Figure I.9 : Représentation des modèles surfaciques [11].</i> .....	19
<i>Figure I.10 : Représentation de modèles volumiques.</i> .....	20
<i>Figure I.11 : Comparaison entre interpolation et approximation</i> .....	21
<i>Figure I.12 : Un patch de surface avec 16 points donnés [21].</i> .....	22
<i>Figure I.13 : Représentation d'une courbe spline.</i> .....	23
<i>Figure I.14 : Interpolation des données [20].</i> .....	23
<i>Figure I.15 : Approximation des données [20].</i> .....	24
<i>Figure I.16 : Une courbe de Bézier de degré 3 [24].</i> .....	25
<i>Figure I.17 : Une courbe de Bézier de degré 3 [24].</i> .....	26
<i>Figure I.18 : Surface Bézier [23].</i> .....	26
<i>Figure I.19 : Représentation de courbes B-splines rationnelles non uniformes (NURBS) de cinq puits (bleu foncé à bleu clair) qui s'étendent dans le sous-sol à partir du même site de puits de surface. Certains points de contrôle sont partagés entre différents puits pour s'assurer que différents puits partagent une partie d'une trajectoire commune [27]</i> .....	28
<i>Figure I.20 : (a) Un exemple de 24 points de contrôle, organisés en six rangées de quatre points (ou quatre rangées de six points), qui déterminent la géométrie globale d'une surface. (b) Surface de degré 2 définie par les points de contrôle en (a), avec des poids égaux pour tous les points de contrôle. Le côté droit de la surface est non monotone. (c) Une surface différente basée sur le même ensemble de</i>	

points de contrôle, avec le même poids, mais avec un degré de 3. Ce degré plus élevé donne une surface plus lisse [26].....29

Figure I.21 : Structure générique du flux numérique de CFAO « Ingénierie directe » [30]. .....30

Figure I.22 : Fraisage de surface à forme libre .....31

Figure I.23 : Génération de parcours d'outil iso-paramétrique adaptative .....32

Figure I.24 : Génération de trajectoire d'outil par intersection de surface avec un plan parallèle .....33

Figure I.25 : Génération de parcours d'outil à crête constante.....33

Figure I.26 : Douze degrés de liberté d'un corps libre .....40

Figure I.27 : Trois supports sur la surface de localisation principale restreignent cinq degrés de liberté .....40

Figure I.28 : L'ajout de deux localisateurs sur un côté restreint huit degrés de liberté.....41

Figure I.29 : L'ajout du localisateur final d'un autre côté restreint neuf degrés de liberté, complétant ainsi l'emplacement 3-2-1 .....41

Figure I.30 : Différents types de posage [82]. .....42

Figure I.31 : Différents modes de bridage [82]. .....42

Figure I.32 : Type de posage et mode de bridage pour une pièce complexe [69].....43

Figure I.33 : Appareils de mesure tridimensionnelle .....51

## Chapitre II

Figure II 1: Schéma de l'ailette montrant les positions possibles des positionneurs et les surfaces à usiner .....55

Figure II 2: Disposition réelle des éléments de positionnement et de serrage de notre montage sur une aube de turbine .....56

Figure II 3: Schématisation du nouveau référentiel après transfert.....56

Figure II 4: Ligne normale ( $N_i$ ) au point de contact  $P_i$ .....58

Figure II 5: Position de la ligne ( $N_i$ ) dans le système de coordonnées  $R$ .....58

Figure II 6: Positionnement des localisateurs et direction de la force de serrage dans l'aube de turbine .....61

Figure II 7: Présentation des trois bases géométriques .....62

Figure II 8: Présentation de la 1<sup>ère</sup> base géométrique avec les six vecteurs normaux .....63

Figure II 9: Présentation de la 2<sup>ème</sup> base géométrique avec les six vecteurs normaux.....63

Figure II 10: Présentation de la 3<sup>ème</sup> base géométrique avec les six vecteurs normaux.....64

Figure II 11: Représentation des trois plans orthogonaux. ....65

Figure II 12: Représentation des vecteurs normaux au niveau d'une section de la pale .....65

*Figure II 13: Représentation du vecteur normal et ces trois composantes* .....66

*Figure II 14: Variation du déterminant en fonction des bases géométriques* .....68

*Figure II 15: Représentation des six points d'Isostatisme et leurs vecteurs normaux associés* .....69

*Figure II 16: Angles d'inclinaison des différents plans avec leurs vecteurs normaux associés pour la section II*.....70

*Figure II 17: Variation du Déterminant D*.....71

*Figure II 18: Variation du Conditionnement K*.....71

*Figure II 19: Distribution des ailettes autour de l'axe turbine et les six points d'Isostatisme* .....72

*Figure II 20: Représentation des deux bandages intérieurs d'une ailette.* .....72

*Figure II 21: La pièce prismatique équivalente à la pale d'ailette.* .....73

*Figure II 22: Comparaison des déterminants D*.....74

*Figure II 23: Comparaison de conditionnement K*.....74

### **Chapitre III**

*Figure III 1: Organigramme de l'algorithme génétique standard (AG).* .....79

*Figure III 2: Système de conception automatisé [131].*.....81

*Figure III 3: Pièce pour étude de cas 1.* .....82

*Figure III 4: Pale aérodynamique d'aube de turbine pour l'étude de cas 2*.....83

*Figure III 5: Organigramme de l'optimisation des positions des localisateurs basée sur AG*.....85

*Figure III 6: Interface d'optimisation de l'AG*.....86

*Figure III 7: Disposition des 6 appuis / cas 1* .....87

*Figure III 8: Disposition des 6 appuis / cas 2* .....88

*Figure III 9: Disposition des 6 appuis / cas 3* .....89

*Figure III 10: Disposition des 6 appuis / cas 4* .....90

*Figure III 11: Disposition des 6 appuis / cas 5* .....91

*Figure III 12: Disposition des 6 appuis / cas 6* .....92

*Figure III 13: Disposition des 6 appuis / cas 7* .....93

*Figure III 14: Disposition des 6 appuis / cas 8* .....94

*Figure III 15: Présentation de 10 meilleures possibilités d'Isostatisme (3-2-1) d'un cube*.....97

*Figure III 16: Présentation de 10 meilleures possibilités d'Isostatisme d'une pale d'ailette*.....98

*Figure III 17: Représentation du vecteur unitaire  $n_i$  et ces trois composantes* .....99

*Figure III 18: Les trois plans orthogonaux de la pièce.* .....100

## Chapitre IV

Figure IV 1: Création d'un nouveau référentiel pour faciliter le positionnement et la tenue de la pièce .....	103
Figure IV 2: Les six points de référence de l'ailette objet d'étude .....	104
Figure IV 3: Dispositif d'usinage pour le perçage des trous de refroidissement au niveau de la pale d'ailette par ECD .....	104
Figure IV 4: Dispositif d'usinage destiné à usiner le pied de sapin par électroérosion à fil (EDM) ..	105
Figure IV 5: Processus de perçage (forage) électrochimique [137]. .....	106
Figure IV 6: Un schéma de principe du processus d'électroérosion à fil [139]. .....	108
Figure IV 7: Organigramme montrant les étapes de conception du MU [69].....	109
Figure IV 8: Analyse et vérification de la géométrie de l'ailette.....	110
Figure IV 9: Représentation des six appuis de positionnement.....	111
Figure IV 10: Les éléments de serrage et les supports de soutien.....	111
Figure IV 11: La plaque support principale .....	112
Figure IV 12: Les supports (tours) portant les appuis de positionnement. ....	112
Figure IV 13: CUV 5 axes type DMG.....	113
Figure IV 14: HMI Sinumerik 840d.....	113
Figure IV 15: Machine EDM à fil type ONA AF35 .....	113
Figure IV 16: Représentation DAO d'une opération de balayage 3 axes d'un appui horizontal .....	114
Figure IV 17: Représentation FAO des stratégies d'usinage utilisées. ....	115
Figure IV 18: Machine MMT type HEXAGON .....	115
Figure IV 19: Modèle CAO du montage d'usinage dans sa phase finale.....	116
Figure IV 20: Photo du montage d'usinage fabriqué tenant l'ailette mobile .....	116

## Chapitre V

Figure V 1: Illustration schématique des points de contact avec leurs vecteurs normaux associés ...	120
Figure V 2: Représentation schématique des points de mesure pour les tests de répétabilité .....	120
Figure V 3: Projection des moments vecteurs sur la droite AC. ....	121
Figure V 4: Représentation de la reproductibilité (répétabilité) des mesures [141]. ....	122
Figure V 5: Représentation de 20 points à mesurer sur l'ailette. ....	123
Figure V 6: Quantification de la mesure des bruits par un écart type expérimental.....	124
Figure V 7: Représentation des 4 points de la face inclinée. ....	125
Figure V 8: L'écart moyen « $\bar{I}$ » des 4 points de la face inclinée .....	125
Figure V 9: L'écart type « $S_i$ » des 4 points de la face inclinée .....	126

Figure V 10: La répétabilité « RPi » des 4 points de la face inclinée .....	126
Figure V 11: L'écart type « Si », selon l'axe X pour les 4 points de la face inclinée. ....	127
Figure V 12: L'écart type « Si », selon l'axe Y pour les 4 points de la face inclinée. ....	127
Figure V 13: L'écart type « Si », selon l'axe Z pour les 4 points de la face inclinée. ....	128
Figure V 14: L'écart moyen « $\bar{I}$ » des 16 points de la pale d'ailette. ....	128
Figure V 15: L'écart type « Si » des 16 points de la pale d'ailette. ....	129
Figure V 16: La répétabilité « RPi » des 16 points de la pale d'ailette.....	129
Figure V 17: L'écart type « Si », selon l'axe X pour les 16 points de la pale d'ailette. ....	130
Figure V 18: L'écart type « Si », selon l'axe Y pour les 16 points de la pale d'ailette. ....	130
Figure V 19: L'écart type « Si », selon l'axe Z pour les 16 points de la pale d'ailette. ....	131
Figure V 20: Choix de 6 points de mesure Mi.....	131
Figure V 21: Variabilité des trois petites rotations ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) .....	135
Figure V 22: Variabilité des trois petites translations ( $u, v, w$ ) .....	135
Figure V 23: L'écart moyen « $\bar{I}$ » des 4 points de la face inclinée. ....	137
Figure V 24: L'écart type « Si » des 4 points de la face inclinée .....	137
Figure V 25: La répétabilité « RPi » des 4 points de la face inclinée .....	138
Figure V 26: L'écart type « Si » sur l'axe X des 4 points de la face inclinée. ....	138
Figure V 27: L'écart type « Si » sur l'axe Y des 4 points de la face inclinée.....	139
Figure V 28: L'écart type « Si » sur l'axe Z des 4 points de la face inclinée.....	139
Figure V 29: L'écart moyen « $\bar{I}$ » des 16 points de la pale d'ailette. ....	140
Figure V 30: L'écart type « Si » des 16 points de pale d'ailette. ....	140
Figure V 31: La répétabilité « RPi » des 16 points de la pale d'ailette.....	141
Figure V 32: L'écart type « Si » sur l'axe X des 16 points de la pale d'ailette.....	141
Figure V 33: L'écart type « Si » sur l'axe Y des 16 points de la pale d'ailette. ....	142
Figure V 34: L'écart type « Si » sur l'axe Z des 16 points de la pale d'ailette. ....	142
Figure V 35: Représentation des trous de refroidissement et les plans de découpe par EDM .....	143
Figure V 36: Machine ECD pour le perçage électrochimique.....	143
Figure V 37: Disposition des trous de refroidissement à la sortie de la pale .....	144
Figure V 38: Disposition des trous de refroidissement à l'intersection Pale/Cavité .....	144
Figure V 39: Représentation des plans de découpe pour TD.....	145
Figure V 40: Représentation des trois sections de découpe.....	145
Figure V 41: Répartition des trous de refroidissement à l'intérieur de la pale aérodynamique .....	146
Figure V 42: Disposition des trous de refroidissement à l'intérieur de l'intersection cavité/pale .....	146
Figure V 43: Trous de centre (nouveau référentiel) après découpage par EDM.....	146

## Liste des tableaux

### Chapitre II

*Tableau II 1: Les six composantes des coordonnées plückeriennes .....67*

*Tableau II 2: Matrice de coordonnées plückeriennes pour chaque base géométrique .....67*

*Tableau II 3: Angles des plans orientés avec leurs vecteurs normaux associés.....69*

### Chapitre III

*Tableau III 1: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 1.....87*

*Tableau III 2: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 2.....88*

*Tableau III 3: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 3.....89*

*Tableau III 4: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 4.....90*

*Tableau III 5: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 5.....91*

*Tableau III 6: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 6.....92*

*Tableau III 7: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 7.....93*

*Tableau III 8: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 8.....94*

*Tableau III 9: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le 2ème cas d'étude de l'ailette. ....95*

*Tableau III 10: Résumé des résultats de l'étude de cas 1.....95*

*Tableau III 11: Résumé des résultats de l'étude de cas 2.....96*

# Acronymes

CAD: Computer aided design.

DAO: Dessin assisté par ordinateur.

CAM: Computer aided manufacturing.

FAO: Fabrication assistée par ordinateur.

DFM: Design for manufacturability.

CAS: Computer-aided styling.

PDPs: Product development process.

CAE: Computer-aided engineering.

DMUs : Digital mock-ups.

IAO : Ingénierie assistée par ordinateur.

CFAO : Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur.

CMAO : Conception de montages assistée par ordinateur

NURBS : B-Splines rationnelles non uniformes.

RE: Reverse engineering.

MMT : Machine de mesure tridimensionnelle.

STEP: STandard for Exchange of Product model data.

IGES: Initial Graphics Exchange Specification

STL: STereo-Lithography

B-Rep : Représentation par les bords

CSG: Constructive solid geometry

NURBS: Non-uniform rational basis spline

URP: Usinage Rapide de Prototypage

ECM: Electro-chemical machining

EDM: Electro-discharge machining

CUV : Centre d'usinage vertical

MU : Montage d'usinage

TPD : Torseur de petits déplacements

AG : Algorithme génétique

EA : Algorithme évolutionnaire

PSO: Particle swarm optimization

ACA: Ant colony algorithm

ANN: Artificial neural networks

FEM: Finite elements method

## Notations

$L_M$  : Matrice de localisation

$D$  : Déterminant de la matrice  $L_M$

$K$  : Conditionnement de la matrice  $L_M$

$R$  : Système de coordonnée

$p_i$  :  $i^{\text{ème}}$  point

$x_i, y_i, z_i$  : Trois coordonnées de  $p_i$

$N_i$  : La ligne normale dans le  $i^{\text{ème}}$  point

$\vec{n}_i$  : Vecteur unitaire de  $N_i$  dans le  $i^{\text{ème}}$  point

$n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}$  : Trois composantes de  $\vec{n}_i$

$\overrightarrow{OP}_i$  : Position du vecteur du  $i^{\text{ème}}$  point

$\vec{V}_{oi}$  : Produit vectoriel de  $\overrightarrow{OP}_i$  et  $\vec{n}_i$

$V_{oxi}, V_{oyi}, V_{ozi}$  : Trois composantes de  $\vec{V}_{oi}$

$\{P_j\}$  : Matrice de coordonnées plückeriennes.

# Introduction générale

---

## Introduction générale:

### 1. Motivation :

Les secteurs industriels ont connus ces dernières décennies un progrès remarquable en matière de développement technologique, vue la vaste gamme de pièces mécaniques produites par des manières qui, dans un passé récent, étaient impossible à réaliser avec la même précision et la même qualité qu'aujourd'hui. L'outil informatique joue un rôle important dans l'élaboration des logiciels allant de la conception à la fabrication, ce qui est devenu nécessaire d'intégrer ces outils au niveau des bureaux d'études, des entreprises ainsi que des universités pour faire face à la concurrence qui s'intense de jour en jour.

Le développement accru de logiciels informatique pour la modélisation des pièces et assemblages mécaniques (CAD / DAO), et d'outils pour l'assistance à la fabrication (CAM / FAO) permet l'utilisation efficace des moyens modernes de production, via l'automatisation des tâches et la formalisation des connaissances, ce qui réduira par la suite le temps d'acquisition de produit et lui donne une bonne qualité.

#### 1.1 Contexte :

Les produits de forme libre (complexe) sont obtenus soit par moulages, par injection ou par emboutissage selon la nature de la matière que les compose. Comme les aubes de turbine sont composées de surfaces de forme libre (surfaces sculptées) et une distribution de courbure irrégulière, leur production avec une précision et une qualité de surface élevées nécessite des technologies de fabrication modernes et avancées. La réalisation de pièces à géométries complexes telles que les aubes de turbine reste un sujet de recherche important généralement motivé par les exigences de l'utilisateur final de ces composants comme l'industrie énergétique et aérospatiale.

La qualité d'une pièce est influencée par la capacité d'un montage d'usinage à tenir et à positionner correctement la pièce en tenant compte des différentes conditions fonctionnelles lors de la fabrication. La conception de montage d'usinage est importante pour tenir la pièce correctement et optimiser les erreurs (mise en position, efforts...etc.), que la pièce peut affronter, lors de l'usinage ou assemblage pour assurer la qualité du produit.

La conception des montages d'usinage pour les pièces à géométrie complexe doit tenir compte de nombreux facteurs tels que les éléments de positionnement (locators), éléments de bridage (clamps), géométrie des éléments, propriétés des matériaux, orientation et position des

surfaces à usiner... etc. Très peu de montages d'usinage pour des pièces complexes peuvent fonctionner dès la première mise en œuvre sans modifications.

### **1.2 Problématique :**

Une rangée dans un étage de turbine contienne quelque fois une centaine d'ailettes, qui fonctionnent dans un milieu sévère (haute température, haute pression, sollicitations des forces centrifuges...etc). Ces ailettes doivent être bien réparties géométriquement tout autour de l'axe du rotor de la turbine, ce qui assure un flux d'air homogène à travers chaque étages d'ailettes, et par conséquent, sa influe positivement sur la stabilité de toute la machine. Suite à ce qui précède, un processus de production rigoureux de ces pièces nobles doit être mis en œuvre depuis l'état brut (Casting), passant par la phase de fabrication (Usinage), jusqu'à l'étape de revêtement de protection (Coating).

La fabrication des ailettes par toutes sortes d'usinage, soit : rectification, fraisage, EDM, ECM, même par Laser, nécessite un référentiel bien déterminé et presque unique pour tous type d'usinage. Ce référentiel est défini par le bureau d'études afin d'assurer la mise en position de l'ailette dans l'espace 3D au niveau de la roue (étage). La mise en position conventionnelle 3-2-1, qui est la stratégie souvent utilisée pour la conception des montages d'usinage destinés aux pièces de formes régulières, devienne inutile devant les pièces à géométrie complexe ou libre (free-form geometry), où le système de serrage (positions et forces) est entièrement basé sur l'expérience de concepteur et la méthode essai-erreur (trial-and-error).

### **1.3 Objectifs :**

L'apport de ce travail est donc de proposer une méthode d'automatisation du processus de conception de montages d'usinage pour réduire la dépendance à l'expérience du concepteur. La méthodologie de conception du nouveau dispositif d'usinage se concentrera sur une application industrielle mathématique soutenue par des essais expérimentaux visant à fournir un outil efficace et précis dans le traitement des conceptions de ces montages d'usinage notamment les appuis de positionnement et les éléments de serrage.

## **2. Plan de la thèse :**

Pour présenter notre travail, ce mémoire de thèse est composé de cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, nous exposons la synthèse de notre recherche bibliographique concernant trois domaines : Le processus de conception et de fabrication assisté par ordinateur. Dans lequel on va présenter le processus d'élaboration des composants de forme libre, les

différentes méthodes de modélisation géométrique, ainsi que la méthodologie CFAO des pièces de formes complexes. L'optimisation de l'usinage des pièces de formes complexes, qu'est centré autour de l'optimisation par la compensation des erreurs machines, les méthodes de mise et maintien en position des pièces, et le choix des éléments de positionnement et de fixation. Les procédés de fabrication, et d'inspection de pièces complexes.

Dans le deuxième chapitre nous présentons une approche d'optimisation géométrique de la disposition des éléments d'appuis d'une pièce de forme complexe (ailette mobile 2<sup>ème</sup> étage d'une turbine à gaz), en se basant sur le concept de coordonnées plückeriennes. La méthodologie proposée sera déroulée sur trois étapes d'optimisation. Ce chapitre sera terminé par une discussion des résultats et conclusion.

Le troisième chapitre présente une deuxième technique d'optimisation, par l'algorithme génétique, en se basant sur la maximisation du déterminant de la matrice de coordonnées plückeriennes (matrice d'information), comme fonction objective. Deux objets 3D ont été choisis pour appliquer cette technique, un cube 100x100x100 pour tester et paramétrer l'AG, et une pale d'ailette de turbine à gaz, pour appliquer l'optimisation. A la fin, une discussion des résultats qui contient une analyse détaillée de la technique proposée.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les étapes de conception et de réalisation de notre montage d'usinage développé, c'est la partie qui implémente la méthodologie proposée dans ce travail.

Le cinquième chapitre est dédié pour l'évaluation de la qualité du montage d'usinage développé, qu'a subis à plusieurs tests de stabilité, de répétabilité et à des tests destructifs, pour confirmer la performance du MU.

A la fin une conclusion qui permettra de mieux synthétiser les objectifs atteints et de présenter les éventuelles perspectives de ce travail.

CHAPITRE I:Revue de la littérature sur  
le processus d'élaboration des pièces de  
formes libres

## **I.1 Le processus de conception et de fabrication assisté par ordinateur (le processus CFAO) :**

### **I.1.1 Introduction :**

Ces dernières années, l'ingénierie simultanée est devenue une clé pratique pour améliorer la compétitivité d'un produit. La plupart des gens conviennent que le coût et la qualité d'un produit sont «verrouillés» dans la conception des assemblages ou pièces. De nombreuses entreprises recherchent activement des moyens d'intégrer les valeurs du cycle de vie du produit au début de son développement. En particulier, la conception pour la fabricabilité (design for manufacturability « DFM ») a fourni aux ingénieurs une méthodologie systématique pour réduire le temps de développement, réduire les défauts de production et les coûts, et cherche à incorporer dans les premières mesures de conception du produit qui peuvent éviter les problèmes de fabrication et simplifier considérablement le processus de production.

La conception et la fabrication assistées par ordinateur comprennent trois parties. La première partie sur la conception assistée par ordinateur (CAO) offre les chapitres sur la modélisation géométrique ; Ingénierie fondée sur les connaissances ; Technologie de platformage ; Ingénierie inverse ; et simulation du mouvement (Motion Simulation). La deuxième partie sur la fabrication assistée par ordinateur (FAO) couvre la technologie du Groupe et la fabrication cellulaire ; conception de montages assistés par ordinateur ; Fabrication assistée par ordinateur ; Simulation des processus de fabrication ; et conception assistée par ordinateur des outils de Matrices et moules (Computer Aided Design of Tools, Dies and Molds, « TDM »). La dernière partie comprend les chapitres sur la fabrication numérique ; fabrication additive ; et la conception pour la durabilité (Design for Sustainability).

### **I.1.2 Conception assistée par ordinateur (CAO), Computer-Aided Design (CAD) :**

La conception assistée par ordinateur (CAO) est un outil informatique utilisé pour le développement de dessins de conception / documentation pour la fabrication. Il fusionne la technologie informatique avec le dessin mécanique et comprend trois (3) fonctions principales cruciales pour la fabrication :

- Dessins au trait qui peuvent être créés et stockés pour référence future,
- Bibliothèques de symboles courants utilisés pour créer des dessins au trait facilement accessibles,

- Fonctions de traçage et de cotation qui éliminent des heures de dessin et de calcul manuels, et établissent une base de données permettant au modèle d'être tourné, inversé, développé ou contracté dans le programme informatique.

La CAO utilise la modélisation tridimensionnelle qui offre de nombreux avantages par rapport à la rédaction et à la conception manuelles :

- La productivité des concepteurs est augmentée,
- Le modèle de plan bidimensionnel est éliminé et
- Le temps et l'argent sont économisés grâce à l'élimination de la construction d'un modèle physique.

### **I.1.3 Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO), Computer-Aided Manufacturing (CAM):**

La FAO est un outil de conception et de fabrication de système qui analyse les données CAO afin de déterminer sa meilleure application. Après avoir analysé les données CAO, FAO les saisit directement dans la programmation de production, comme les machines CNC.

Les cinq (5) principaux domaines d'application de la FAO comprennent:

- Programmation de production
- Ingénierie de fabrication
- Ingénierie industriel
- Ingénierie des installations
- Ingénierie de la fiabilité

La FAO peut être utilisée pour automatiser une usine grâce à des systèmes tels que le contrôle en temps réel et la robotique. Étant donné que les processus de fabrication dans un système FAO sont contrôlés par ordinateur, un degré élevé de précision peut être atteint, ce qui n'est pas possible avec une interface humaine. Le système FAO, par exemple, définit la trajectoire de l'outil et exécute des opérations de précision sur la machine en fonction de la conception importée.

Certains systèmes FAO apportent une automatisation supplémentaire en gardant une trace des matériaux et en automatisant le processus de commande, ainsi que certaines tâches de maintenance telles que le remplacement d'outils. Un autre avantage de la fabrication assistée par ordinateur est que les machines peuvent être rapidement reprogrammées pour faciliter la personnalisation de masse : le processus de création de petits lots de produits conçus sur mesure

pour convenir à chaque client particulier. Les spécifications et les modifications de dessin peuvent être transmises rapidement de la conception à la fabrication et d'une machine à l'autre.

Les avantages de la FAO comprennent :

- Rationaliser le processus de transfert des informations de la création (CAO) aux besoins de chaque atelier de fabrication spécifique, et
- Économiser du temps et de l'argent.

#### **I.1.4 Processus d'élaboration des composants de forme libre :**

Le processus d'élaboration des composants de forme libre, doit garantir la fidélité ou bien la conformité des composants du produit et ses spécifications fonctionnelles exprimant l'étude initiale du concepteur (figure I.1). Le processus se divise en deux volets principaux, volet conception et volet réalisation. Tout d'abord un modèle géométrique de référence est construit à partir des exigences techniques et des spécifications fonctionnelles, ensuite ce modèle va se traiter par le module FAO en but de calculer et générer les trajectoires des outils qui nous permet d'usiner les pièces et les outillages nécessaires. Comme il est connu, le produit final ne correspond pas toujours à l'intention du concepteur, mais à une géométrie plus proche, vu que la construction du produit qui passe par la déclaration d'éléments géométriques au niveau du modelleur et s'appuie sur l'association des surfaces par interpolation entre deux courbes ou approximation d'éléments géométriques [1]. En outre, le choix adéquat des paramètres de la hauteur de crêtes (la discrétisation transversal), ainsi que la tolérance de flèche (la discrétisation longitudinal), assure et contribue clairement à l'obtention des surfaces réelles respectant les spécifications géométriques de défaut de forme et l'état de surface [2].

La définition complète du produit peut être considérée comme le résultat d'un processus où toutes les différentes exigences (fonctionnelles, esthétiques, économiques, faisabilité, etc.) sont satisfaites au mieux.

Pour cette raison, les processus de développement de produits PDPs (product development process) où des formes libres apparaissent et sont soumises à des exigences esthétiques et fonctionnelles, impliquent de nombreux acteurs, tâches et activités, actuellement pris en charge par des outils informatiques dédiés tels que : la conception assistée par ordinateur (CAO), stylisme assisté par ordinateur (computer-aided styling; CAS), ingénierie assistée par ordinateur (computer-aided engineering; CAE) et fabrication assistée par ordinateur (computer-aided manufacturing; CAM). Ces processus s'appuient souvent sur des maquettes numériques (digital mock-ups; DMUs) intégrant des modèles géométriques multi-représentations et multi-

résolutions pour façonner des composants et des produits complexes contenant notamment les surfaces de forme libre nécessaires [3].

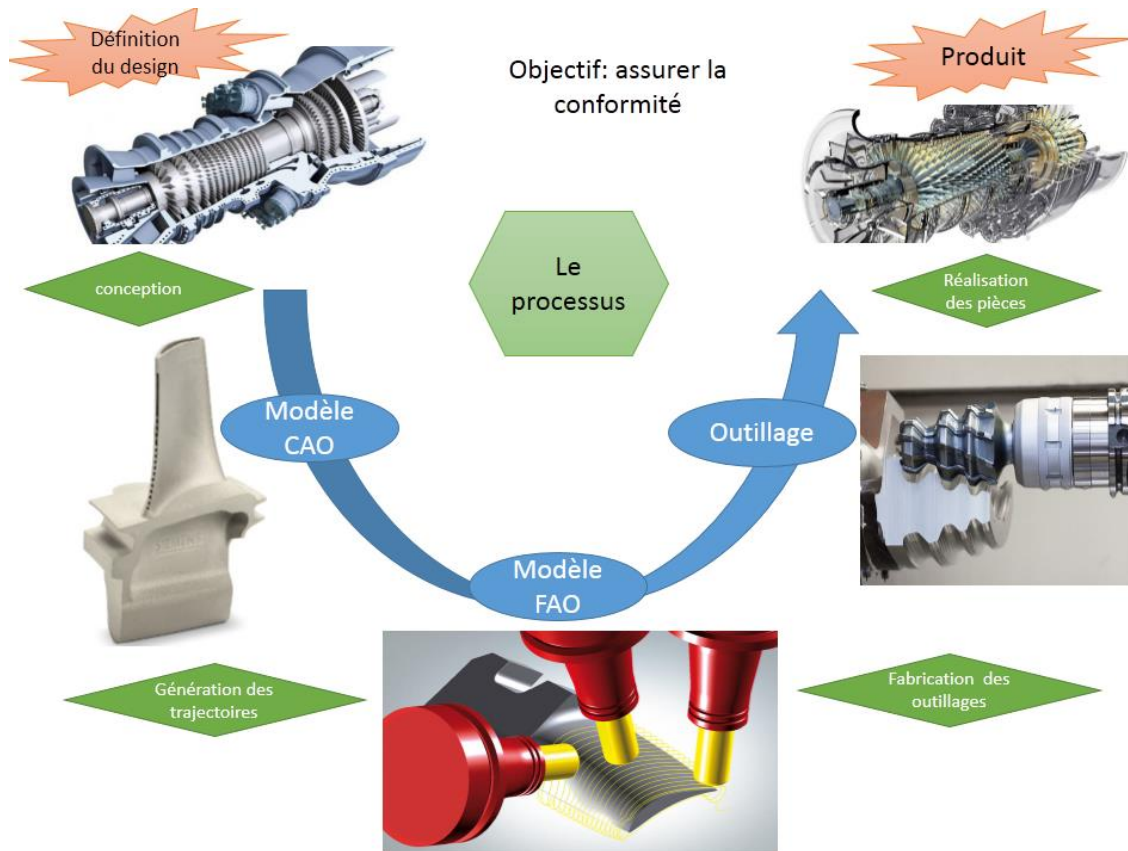


Figure I.1 : Processus d'élaboration des composants de forme libre

### I.1.5 Structure du processus de développement de produits « PDP »:

Le processus de conception de produits et, plus généralement, les PDPs, sont toujours des activités où de nouveaux outils et de nouvelles approches peuvent soutenir la création et l'innovation. Le but de cette section est de se concentrer sur le processus de conception, en tant que partie des PDP, et ses interactions avec d'autres processus pour identifier certaines configurations caractéristiques impliquant le traitement de surfaces de forme libre qui réduisent considérablement l'efficacité des activités de création et de conception et, par conséquent, celle des PDP. La figure I.2 illustre une structure générique d'un PDP qu'est proposée comme processus de référence et un cadre commun pour dériver les contextes où les difficultés de forme libre sont traitées.

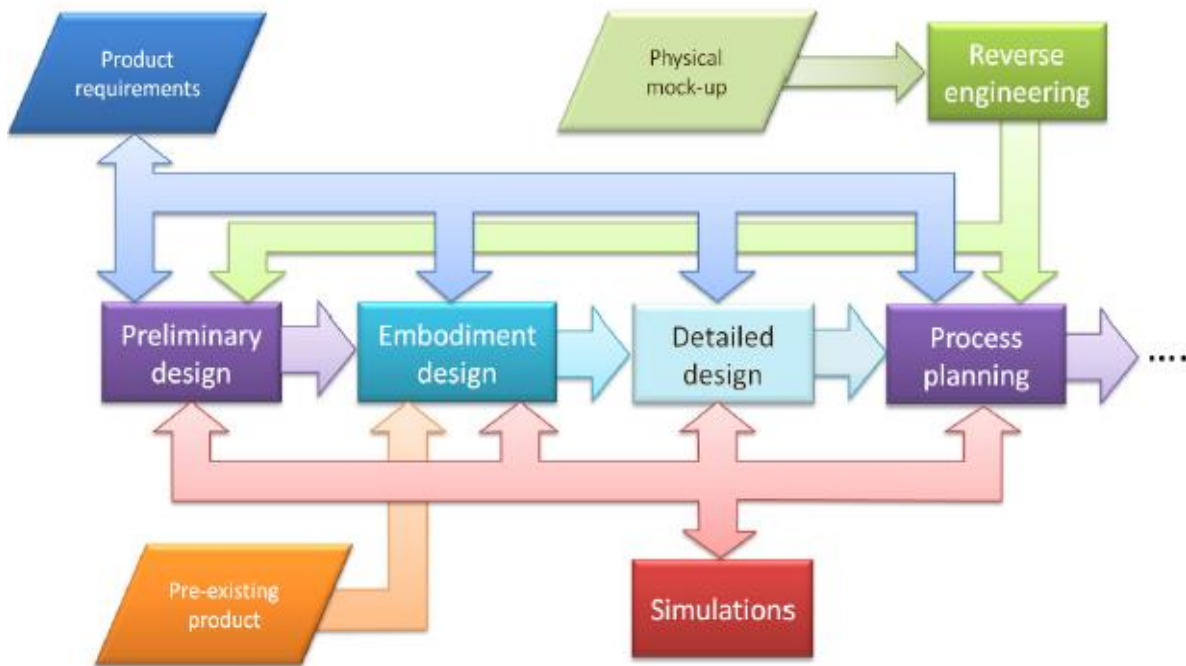


Figure I.2 : Structure de référence d'un PDP mettant en évidence ses principaux processus liés à la conception de produits et impliquant des formes libres [3]

### I.1.5.1 Relation forme complexe - PDP :

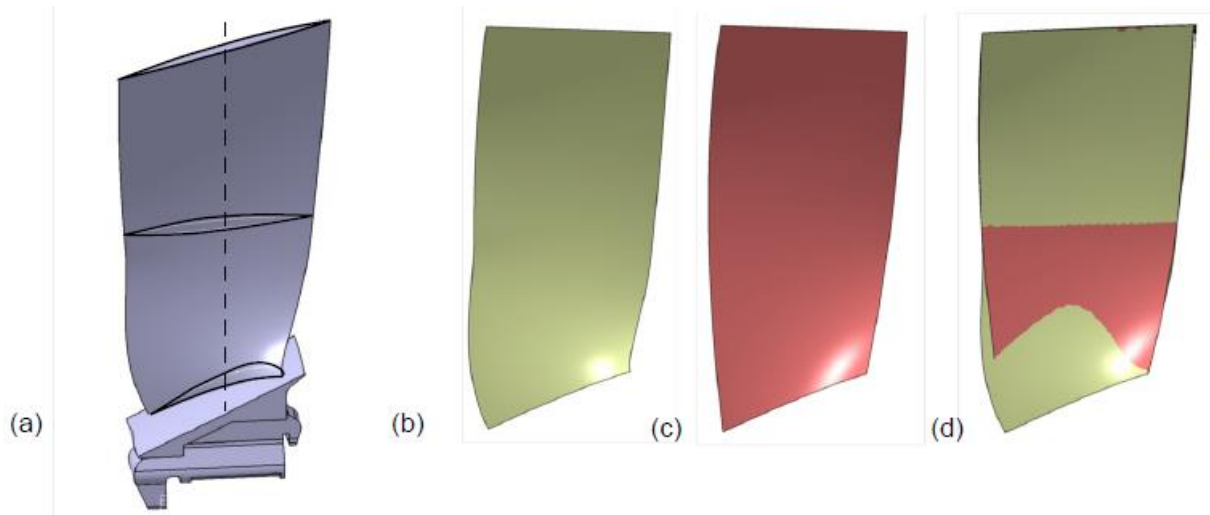
Cette section se concentre sur les représentations numériques d'un composant ou d'un produit pour mettre en évidence certains problèmes clés. Des modèles numériques existent à la plupart des étapes d'un PDP. La phase de conception préliminaire peut être considérée comme la seule où les modèles numériques peuvent ne pas être disponibles. Les machines dessinées à la main sont fréquemment utilisées pour définir des formes libres telles que la forme extérieure de plusieurs parties de l'industrie aéronautique, automobile...etc. Les outils de stylisme assisté par ordinateur (CAS) et de CAO sont encore loin de soutenir la créativité des concepteurs avec des interfaces utilisateur et des concepts appropriés. Certaines configurations reflètent le besoin de compromis à l'intérieur ou entre les processus PDP et ces compromis ont lieu tout au long d'un PDP. Les exigences relatives aux produits peuvent être subdivisées en deux catégories complémentaires, qualitatives et quantitatives. Des exigences quantitatives comme une puissance, une vitesse, etc., peuvent être soumises à des tolérances, qui expriment le compromis. Les exigences qualitatives comme l'esthétique ne peuvent pas être associées à des tolérances et les compromis sont plus subjectifs. Pour exprimer la notion de compromis au niveau des modèles numériques, c'est un moyen de poser des exigences sur ces représentations numériques. Leurs capacités à être facilement modifiées, c'est-à-dire ajouter/supprimer des détails de forme, modifier des dimensions ou appliquer des contraintes géométriques, font partie

de ces exigences. Parce que modifier une forme est également comparable à l'exploration d'un domaine de solution, faire savoir à l'utilisateur que certaines modifications de forme ne sont tout simplement pas possibles est aussi important que de fournir des solutions.

Par conséquent, les modifications de forme libre sont généralement fastidieuses car le paramétrage de l'opérateur et l'arbre de construction sont souvent manquants, ou partiellement manquants, et cela se combine avec des échecs de mise à jour fréquents car les surfaces de forme libre peuvent ne pas exister. C'est toujours le cas lorsque les modèles géométriques sont transférés entre différents systèmes logiciels, car il est souvent nécessaire d'effectuer les diverses activités PDP (voir Figure I.2). En effet, lors d'un transfert de modèle entre logiciels CAO (conception assistée par ordinateur) et IAO (ingénierie assistée par ordinateur), quel que soit le format standard utilisé, c'est-à-dire STEP ou IGES, l'arbre de construction d'un objet n'est pas transféré. Par conséquent, les modifications de forme deviennent de toute façon fastidieuses. Pour surmonter cette difficulté, les modifications de forme basées sur des processus de déformation sont une approche qui a été largement abordée (voir Section 1.6). Cependant, définir une structure qui peut être une représentation historique intrinsèque d'une génération de surface de forme libre est toujours un moyen d'améliorer considérablement sa génération, sa modification et l'optimisation de sa forme.

De plus, les pièces mécaniques peuvent être caractérisées par des surfaces de forme libre directement soumises à des exigences fonctionnelles. Une configuration caractéristique, où les exigences fonctionnelles sont des questions clés et peuvent être illustrées, est la définition des aubes de turboréacteur (voir Figure I.3). Ces composants sont caractérisés par des surfaces canoniques formant un sous-ensemble de leur forme et des surfaces de forme libre définissant au moins leur zone aérodynamique. Ces surfaces de forme libre sont généralement générées en interpolant des sections définissant des profils d'aube. Ce processus génératif contient à peine des paramètres dimensionnels par rapport aux zones définies par les surfaces canoniques. De plus, un arbre de construction peut ne pas être disponible pour la génération de cette zone aérodynamique. Une illustration de la relation entre les exigences fonctionnelles et une forme de pale est l'optimisation des performances de cette pale. Ici, l'optimisation des performances peut se réduire à une optimisation de la forme agissant sur le flux d'air autour de la pale ainsi que sur le comportement mécanique. En fait, la forme finale est un compromis entre les exigences aérodynamiques et mécaniques. Un tel processus d'optimisation nécessite des modifications de forme automatisées, d'où un paramétrage avec des variables dites de conception du problème d'optimisation. Par conséquent, la paramétrisation de la forme de la

pale et les variables de conception entrées dans le processus d'optimisation peuvent différer de celles utilisées lors du processus initial de génération du modèle de pale. Les dimensions prises comme variables de conception peuvent être considérées comme des paramètres fonctionnels. Par conséquent, l'absence d'arbre de construction nécessite des modifications interactives pour configurer les dimensions appropriées et les variables de conception correspondantes. Cette configuration est un peu similaire aux configurations où les arbres de construction sont perdus lorsque les modèles géométriques sont déplacés d'un environnement logiciel à un autre [3].



*Figure I.3 : Exemple d'une aube soumise à des paramètres fonctionnels lors d'un processus d'optimisation de forme. Influence des algorithmes de génération de forme dans différents logiciels : (a) modèle initial de pale de ventilateur avec les trois sections utilisées pour optimiser la forme de pale, (b) zone aérodynamique modélisée avec le logiciel CAO A, (c) zone aérodynamique modélisée avec le logiciel CAO B avec les mêmes paramètres d'entrée que le logiciel A, (d) aérodynamique superposée montrant leurs différences de forme [3]*

### **I.1.6 Modélisation géométrique des formes complexes:**

L'utilisation d'outils numériques pour la création de modèles 3D est désormais une pratique courante. Différents outils et approches sont disponibles grâce à des décennies de recherche et d'efforts dans divers secteurs, notamment la conception géométrique assistée par ordinateur, la géométrie computationnelle, l'infographie, l'acquisition et le traitement de signaux et de données et l'ingénierie électronique.

En effet, alors qu'il y a quelques années la seule possibilité de créer un modèle était le dessin assisté par ordinateur ou les systèmes de CAO, de nouvelles méthodes existent maintenant pour le clonage numérique d'objets physiques. Ils vont des méthodes d'acquisition par balayage laser bien établies à l'utilisation récente de photos numériques pour reconstruire des représentations numériques d'objets réels. Chaque méthodologie exploite différentes représentations

géométriques et s'applique mieux à des utilisateurs et applications spécifiques. La figure I.4 présente un résumé du processus de la modélisation géométrique d'un objet quelconque.

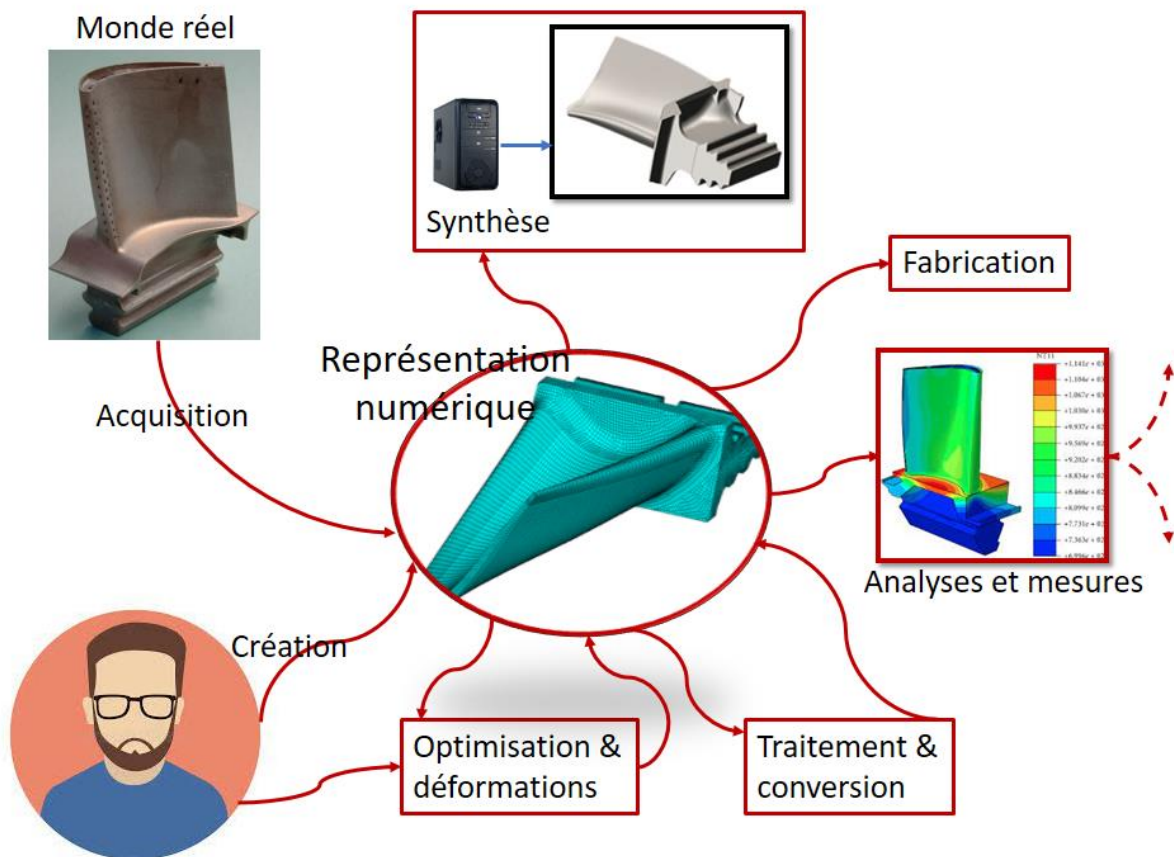


Figure I.4 : Résumé du processus de la modélisation géométrique d'un objet.

### I.1.6.1 Un tout petit historique :

- La modélisation surfacique appelée aussi (B-Rep : représentation par les bords), dans les années (1960-70) est développée par [4]:
  - De Casteljau (Citroën)
  - Bézier (Renault)
  - Coons (General Motors)
  - Ferguson (Boeing).
- La modélisation volumique appelée aussi (CSG : constructive solid geometry), années 1980 par :
  - Réquicha
  - Mäntylä
  - Hoffmann

### **I.1.6.2 Notions sur les modèles géométriques :**

Le processus de modélisation a pour objectifs d'effectuer des calculs au travers d'un modèle de simulation, qui consiste à passer d'un modèle primitif à un modèle de simulation adapté en passant par des modèles dites intermédiaires [5].

#### ***a) Modèle primitif :***

Le modèle primitif est le modèle le plus proche de la réalité que le concepteur a imaginé, il doit permettre de considérer les détails pertinents des choses et des phénomènes du réel par rapport à l'activité de modélisation. Si le modèle primitif n'est pas assez riche, il se peut que certaines fonctionnalités ne puissent pas être considérées pendant la simulation.

#### ***b) Modèle de simulation :***

Le modèle de simulation est un modèle adapté défini par le concepteur afin de simuler le comportement des fonctionnalités du système. Il se peut considérer comme le résultat d'un processus de simplification du modèle primitif. Le concepteur peut y avoir plusieurs modèles de simulation en fonction de la précision attendue en cherchant la minimisation des incertitudes, et des spécifications de la simulation.

#### ***c) Modèle intermédiaire :***

Le modèle intermédiaire est le résultat d'une étape du processus de modélisation conduisant du modèle primitif au modèle de simulation.

### **I.1.6.3 Domaines d'application :**

La modélisation géométrique nous entoure au quotidien dans :

- La CFAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur) : automobile, aéronautique, construction navale, sport, ...
- Le milieu médical : modélisation d'organe, simulation fonctionnelle, opératoire, chirurgie assistée, ...
- La simulation, la réalité virtuelle : robotique, simulateurs, mondes virtuels, ...
- Le monde du jeu : des exigences croissantes en qualité et performances
- Le calcul et la visualisation scientifique
- L'internet et ses applications graphiques
- La télévision
- Le cinéma

On trouve deux grandes familles de classement de la modélisation géométrique : Classement par catégories, et classement par types [6].

#### **I.1.6.4 Catégories des modèles géométriques :**

On distingue trois catégories de modèles géométriques qui peuvent être utilisés dans la conception des pièces et objets pour décrire ces surfaces frontières. Ils sont respectivement : Les modèles paramétriques, les modèles polyédriques et les modèles implicites.

Les modèles qui sont souvent utilisés dans la conception d'une pièce pour décrire ces surfaces frontières, sont les deux premiers. La dernière catégorie est généralement simple et rarement associée à des problèmes de déformation.

##### ***a) Les modèles paramétriques :***

La modélisation paramétrique est utilisée pour la modélisation et l'analyse d'objets avec saisie flexible. L'utilisation de modèles paramétriques permet d'éliminer la nécessité d'adapter de manière active le modèle après des modifications apportées à la conception initiale, elle permet aussi une optimisation générale.

Les surfaces sont générées à l'aide de formes polynômiales définies dans un espace bi-paramétrique, les B-Splines, les surfaces de Bézier ou les B-Splines rationnelles non uniformes (NURBS), sont les courbes et surfaces paramétriques les plus utilisées. A travers cette catégorie (appelée aussi Boundary Representation / B-Rep), on peut modéliser des objets complexes arbitraires par leurs frontières [7].

Pratiquement n'importe quelle propriété d'un modèle peut être définie en tant que paramètre : coordonnées, dimensions, classes de matériaux, sections, charges, etc.

Les paramètres permettent d'optimiser les objets de manière à obtenir la conception la plus économique possible, à minimiser l'effet de charge ou à maximiser/minimiser toute autre propriété du modèle 3D, la figure I.5 présente deux exemples de modèles géométriques paramétriques.

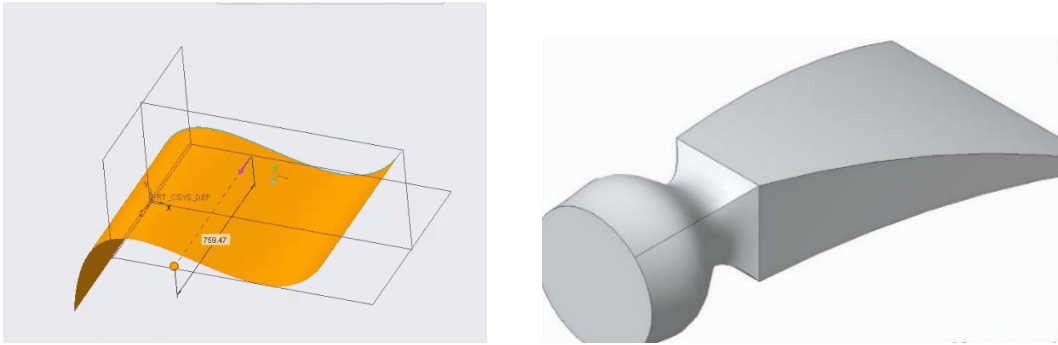


Figure 1.5 : Exemples de géométries paramétriques

**b) Les modèles polyédriques :**

Cette catégorie est basée sur la description des surfaces par un ensemble d'entités simples (faces planes polygonales), généralement elles sont triangulaires appelées facettes, qui se rencontrent selon des segments de droite appelés arêtes. Les extrémités des arêtes sont des points appelés sommets.

Pour les étapes de visualisation d'objets pendant les processus de conception de produits, on trouve que les modèles polyédriques sont couramment utilisés, ainsi que pour le calcul et la génération des trajectoires d'outils pendant l'usinage et d'analyse des assemblages par éléments finis. Les polyèdres comportent en général un nombre très important de sommets et de faces (environ plusieurs dizaines de millions), lorsque ils sont générés par construction de surfaces en décrivant des formes complexes par facettisation de modèles CAO paramétriques, ou bien à partir de nuages de points numérisés (techniques d'ingénierie inverse), ce qui conduit à envisager un traitement de simplification pour les rendre exploitables dans les circonstances précédentes [8], [9]. Voir figure I.6.

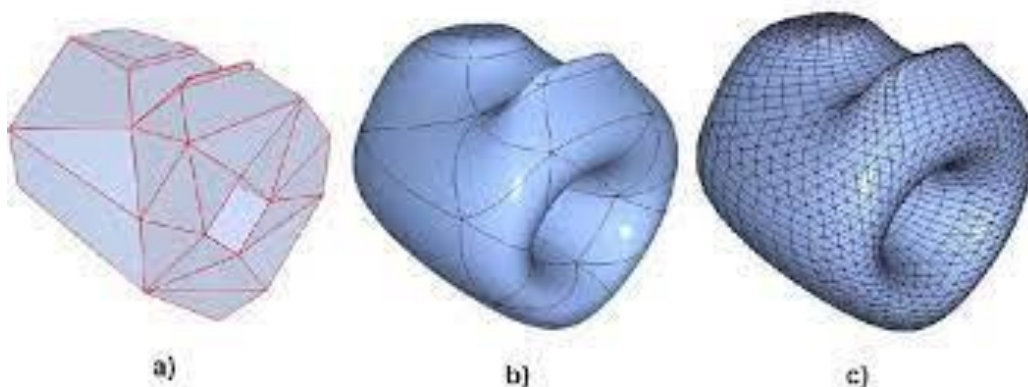


Figure I.6 : Exploitation d'images numériques pour la simplification et la déformation de modèles polyédriques [8]

### c) Les modèles implicites :

Une surface implicite appelée aussi iso-surface, est l'ensemble des points de l'espace  $E$   $(x,y,z)$  qui peut vérifier la fonction  $f(E) = c$ , où  $c$  : est une constante appelée "isovaleur". La surface implicite est définie directement par son équation analytique, et déformée grâce à des transformations matricielles. Pour faciliter le contrôle de la modélisation de ce type de surfaces, elles sont engendrées par des primitives géométriques "squelettes", qui peuvent être soit des points, soit des primitives géométriques simples. Les surfaces implicites permettent de représenter facilement des objets lisses ayant une forme libre, ou de topologie arbitraire [10].

Chaque squelette  $s_i$  est muni d'une fonction de distance  $f_i$ , appelée 'fonction potentielle'. La surface implicite  $S$  est définie par :

$$S = \{E \in \mathbb{R}^3 / f(E) = \sum_{s_i} f_i(r_i) = c\} \quad (I.1)$$

Où  $r_i$  est la distance de  $E$  à  $s_i$  et  $f_i$  est une fonction décroissante. Un exemple d'objets ainsi définis sont donnés sur la Figure I.7.

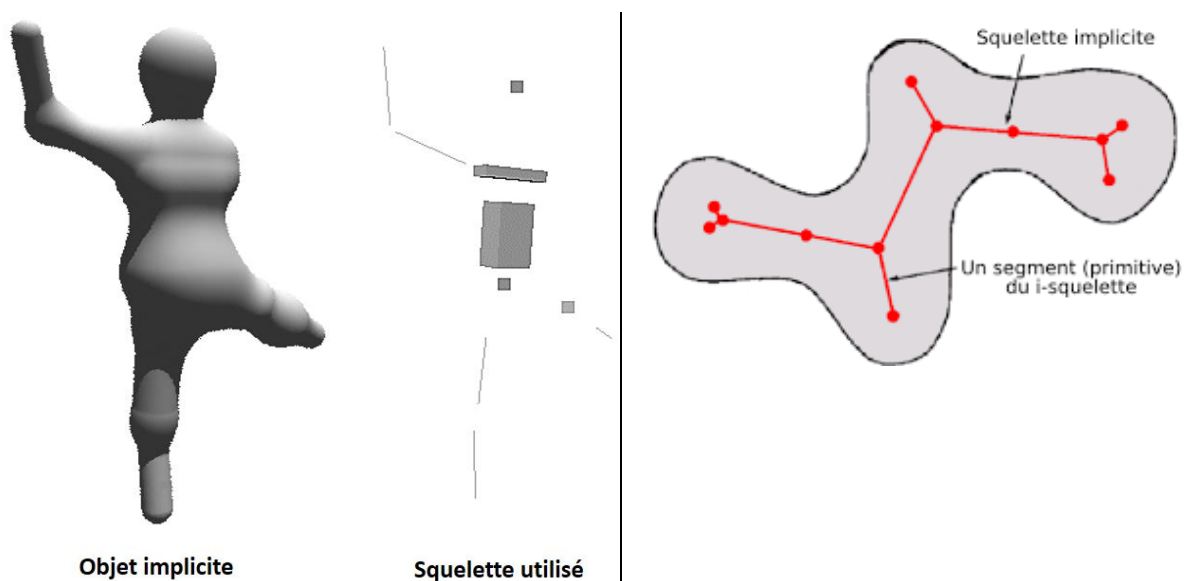


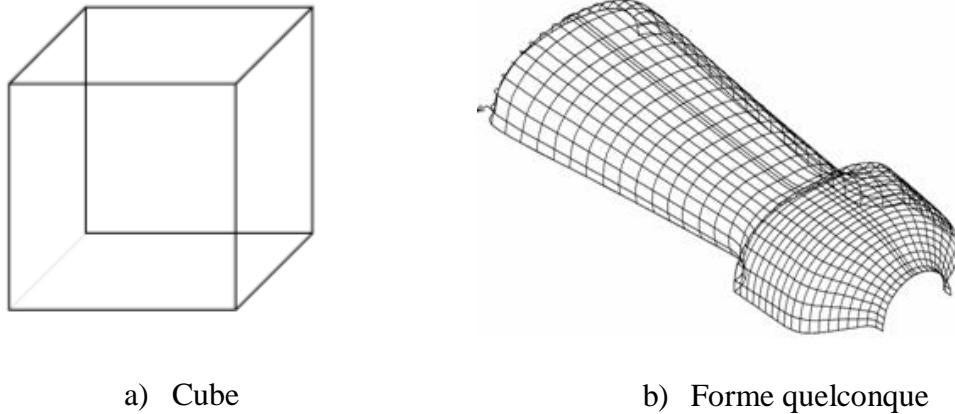
Figure I.7 : Exemples d'objets décrits par des modèles implicites [10].

### I.1.6.5 Types des modèles géométriques :

#### a) Modélisation FIL de FER ou WIREFRAME :

Le terme "fil de fer" vient des concepteurs utilisant fil métallique pour représenter la forme tridimensionnelle des objets solides. Le modèle "fil de fer", également appelé "modèle filaire"

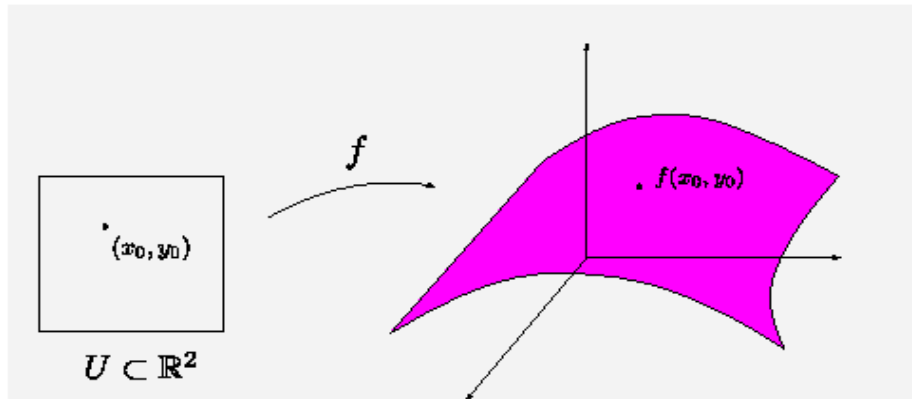
utilise les mêmes entités géométriques que le 2D, en y ajoutant une troisième dimension. Le modèle filaire peut être modélisé à partir de coins appelés points 3D, des arêtes ou segments linéaires entre les points, et les faces appelées polygones plats délimités par les arêtes ou les coins [11]. Voir la figure I.8.



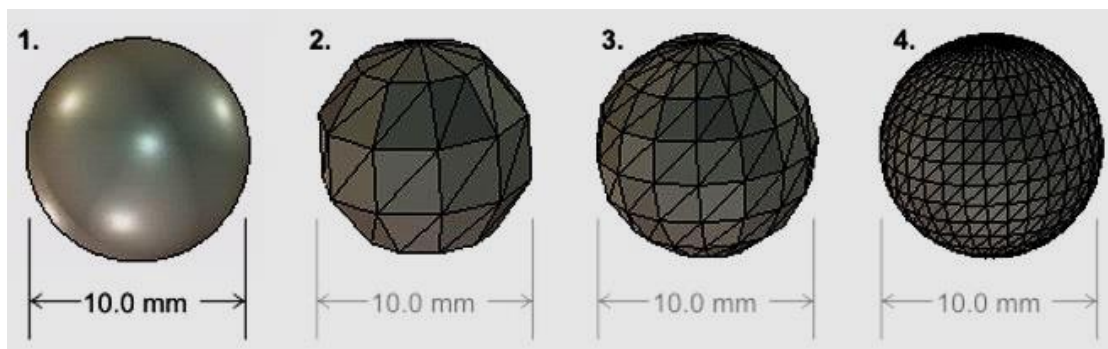
*Figure I.8 : Représentation des modèles filaires*

***b) Modélisation par des courbes et des surfaces :***

Deux types de modélisation sont distingués, la modélisation par un enveloppe de surface gauche définit par des fonctions polynomiales paramétrées (figure I.9-a) et la modélisation par un ensemble de plusieurs facettes planes simples (figure I.9-b). La première méthode de modélisation est utilisée quand la surface à définir est trop complexe pour être définie par des surfaces simples (planes, cylindriques, sphériques, coniques...). L'utilisation de ces fonctions paramétrées donne une excellente approximation de la surface réelle, du fait qu'on connaît mathématiquement tout point de la surface, l'utilisation de ce type de modélisation est indispensable pour l'usinage à commande numérique. La deuxième méthode est l'approche la plus couramment utilisée, d'où il est possible que l'utilisation d'un grand nombre de facettes nous permet d'obtenir une représentation correcte de l'objet [11].



a) surface gauche modélisée par fonctions

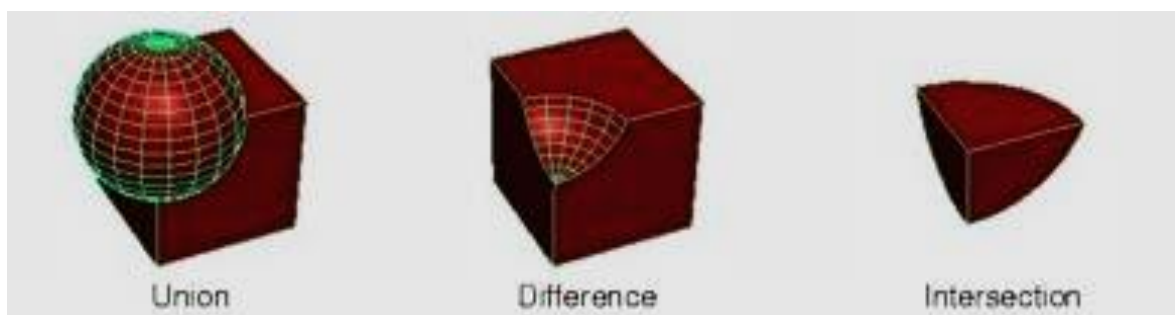


b) modèle par facettes simples

Figure I.9 : Représentation des modèles surfaciques [11].

### c) Modélisation volumique :

La modélisation volumique regroupe les avantages de modélisateurs filaire et surfacique, autrement dit, un modèle volumique possède les paramètres des faces de l'objet et les courbes qui délimitent ces faces. Ce type de modélisation a pour objectif de représenter un objet par des solides distincts (figure I.10), formant une intersection surfacique avec les trois plans de l'espace 3D, en utilisant les techniques de modélisation suivantes : modélisation cellulaire, modélisation par CSG, modélisation par frontières, et représentation multiple [12].



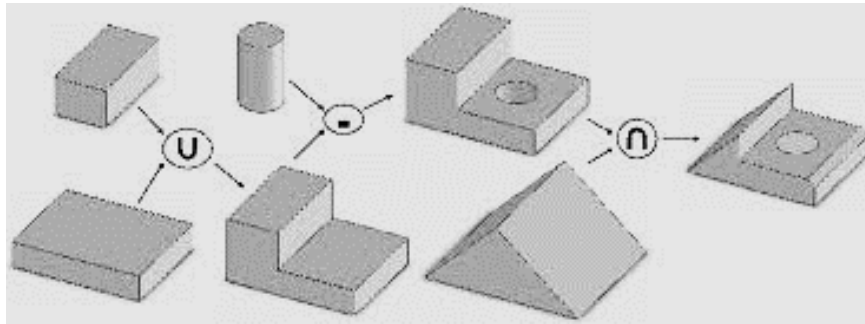


Figure 1.10 : Représentation de modèles volumiques.

Un objet pour être un solide, doit être représenté par des surfaces orientées et fermées, et doit avoir les propriétés nécessaires suivantes [13]:

- **Homogénéité:** un solide doit avoir un intérieur.
- **Finitude:** un solide doit occuper une portion finie de l'espace.
- **Rigidité:** un solide doit avoir une forme invariante quelles que soient sa position et son orientation.

### I.1.7 Surfaces et courbes pour la Modélisation [14]:

La modélisation d'un objet 3D possédant une forme libre, nécessite le choix d'entités géométriques plus ou moins complexes, tels que les courbes et / ou les surfaces. Dans la section suivante nous allons détailler brièvement les courbes et les surfaces les plus utilisés en modélisation.

#### I.1.7.1 Surfaces et courbes polynomiales:

Les courbes et les surfaces polynomiales ont été traitées et décrites avec détails dans les références [15], [16]. Pour mieux se rapprocher à la géométrie réelle d'un objet 3D, il faut augmenter au maximum le nombre des faces polygonales qui le consistent, afin de représenter ces détails fins graphique. Néanmoins, malgré que ça nous permette une simplicité conceptuelle, mais ça se répercute négativement sur le temps de calcul, le nombre élevé de points à manipuler pour modifier la surface, et l'espace mémoire requis pour les rendus.

A cet effet, il est recommandé d'utiliser les équations mathématiques pour représenter de tels objets graphiques. Dans la plus part des applications, les courbes et les surfaces cubiques (degré 3 maximum dans chaque direction), sont les plus convenables pour la modélisation. Plus le degré du polynôme est élevé pour décrire des courbes complexes, plus on aura un grand nombre de coefficients dont la signification physique est difficile à maîtriser [14], [17].

Fergusson (1963) [18], était le premier qu'avait introduit l'utilisation des courbes cubiques paramétriques dans le domaine de l'aéronautique (Boeing Co) sous forme de segments, par les équations suivantes :

$$\vec{r} = \vec{r}(u) = \sum_{i=0}^n u^i \vec{a}_i \quad (I.2)$$

Où :

$n$  : est le degré de la courbe.

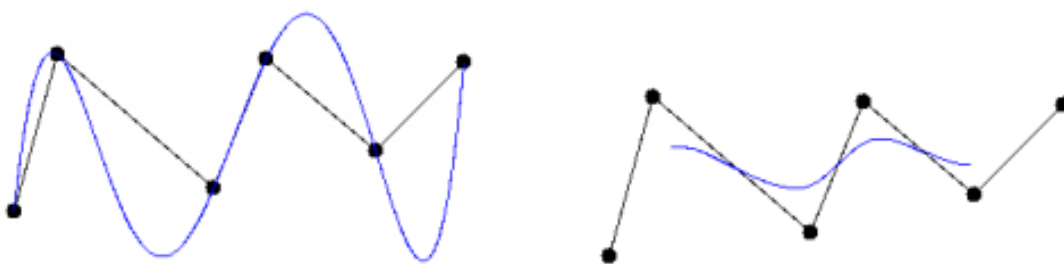
Le vecteur  $\vec{r}$  : représente l'ensemble des points de la courbe lorsque  $u$  varie de 0 à 1.

Les vecteurs  $\vec{a}_i$  : sont les paramètres de la courbe.

Les courbes de degré supérieur à 3 sont rarement utilisées en raison des oscillations qu'elles introduisent et du contrôle local difficile. A cet effet l'utilisation d'un enchaînement avec une continuité étudiée de courbes simples pour représenter une courbe complexe est souhaitée.

Il faut distinguer deux notions pour l'ajustement d'une courbe à un ensemble de points donnés [19], [20].

- Si la courbe passe par tous les points de contrôle ( $a_i$ ), on a affaire à un problème d'interpolation, figure I.11 a.
- Si la courbe ne passe pas forcément par les points de contrôle ( $a_i$ ), on a affaire à un problème d'approximation, figure I.11 b.



a. Interpolation

b. Approximation

Figure I.11 : Comparaison entre interpolation et approximation

Un patch de surface peut avoir la représentation paramétrique suivante [21] :

$$P = P(u, w) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n u^i w^j P_{ij} \tag{I.3}$$

Pour le cas cubique (polynômes de degré 3), un tel double polynôme peut être exprimé de manière compacte en notation matricielle.

$$P(u, w) = [u^3, u^2, u, 1]N \begin{bmatrix} P_{33} & P_{32} & P_{31} & P_{30} \\ P_{23} & P_{22} & P_{21} & P_{20} \\ P_{13} & P_{12} & P_{11} & P_{10} \\ P_{03} & P_{02} & P_{01} & P_{00} \end{bmatrix} N^T \begin{bmatrix} w^3 \\ w^2 \\ w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{I.4}$$

Le patch de surface correspondant est donc appelé bi-cubique. On sait que la surface bi-cubique a la forme (figure I.12):

$$P(u, w) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} u^i w^j \tag{I.5}$$

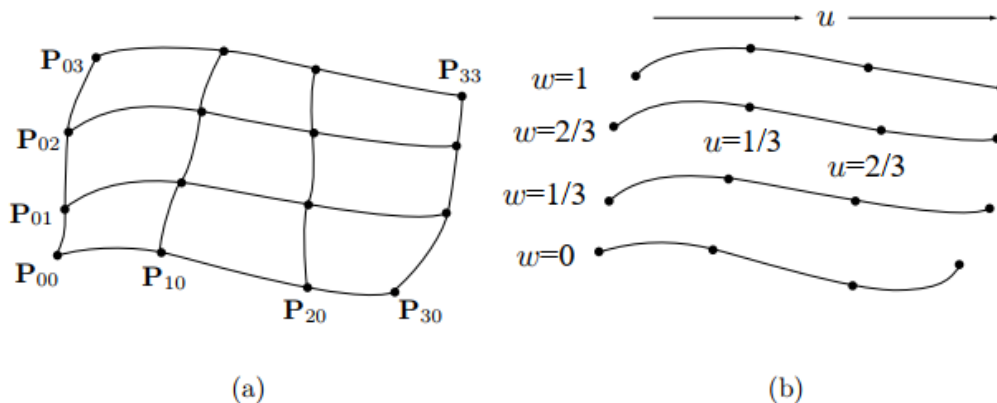


Figure I.12 : Un patch de surface avec 16 points donnés [21].

Nous supposons que les points sont (approximativement) également espacés sur le carré de surface rectangulaire, comme le montre la figure 3.5a.

### I.1.7.2 Courbes et surfaces Splines:

Les courbes et surfaces splines sont des modèles mathématiques qui permettent d'associer une représentation continue à un ensemble discret de points (figure I.13) d'un espace affine (habituellement  $\mathbb{R}^3$ ). L'idée est d'améliorer les techniques d'interpolation numérique en utilisant des polynômes définis par morceaux [20].

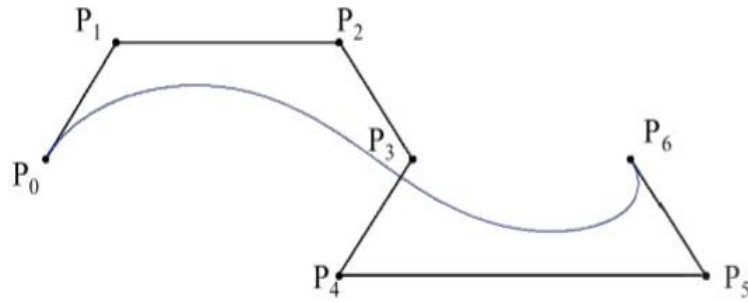


Figure I.13 : Représentation d'une courbe spline.

La courbe spline est définie par la courbe  $C$  d'équation :

$$\forall t \in [0,1], C(t) = \sum_{k=0}^n F_k(t)P_k \quad (\text{I.6})$$

D'où :

$P_k$  : ensemble de points de contrôle de  $\mathbb{R}^3$ .

$F_k$  : ensemble de fonctions d'influence :  $[0,1] \rightarrow \mathbb{R}$ .

La surface spline est définie par la surface  $S$  d'équation :

$$\forall (u, v) \in [0,1]^2, S(u, v) = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^m F_{ij}(u, v)P_{ij} \quad (\text{I.7})$$

D'où :

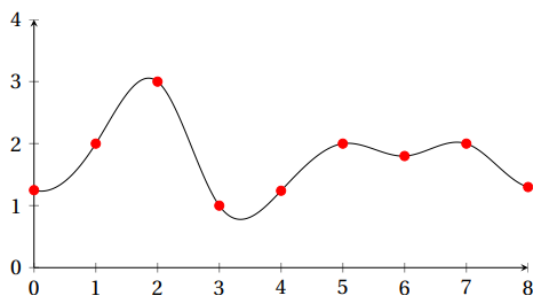
$P_{ij}$  : ensemble de points de contrôle de  $\mathbb{R}^3$ .

$F_{ij}$  : ensemble de fonctions d'influence  $[0,1]^2 \rightarrow \mathbb{R}$ .

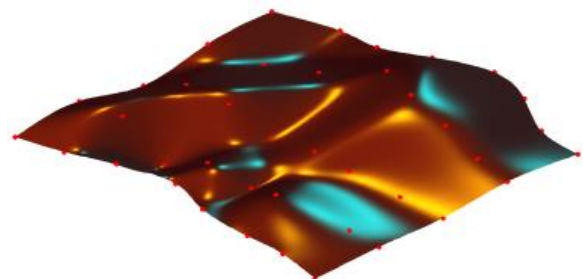
Si toutes les fonctions d'influence  $F_k$ , vérifient la propriété suivante :

$$\exists T_k \in [0,1], F_k(T_k) = 1 \text{ et } F_{k'}(T_k) = 0, \forall k' \neq k \quad (\text{I.8})$$

On parle donc de spline d'interpolation figure I.14 :



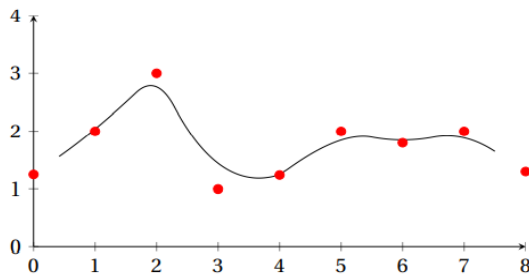
a) avec courbes splines



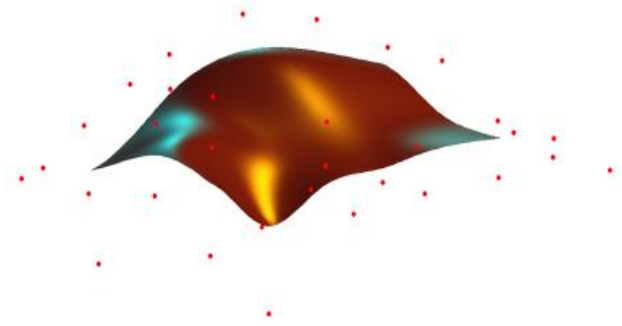
b) avec surfaces splines

Figure I.14 : Interpolation des données [20].

Si non, on parle de spline d'approximation figure I.15 :



a) Avec courbes splines



b) avec surfaces splines

Figure I.15 : Approximation des données [20].

Il faut étudier la continuité aux points de raccordement de deux morceaux d'une courbe spline [22].

Deux types de continuité sont distingués :

Continuité paramétrique notée  $C^n$  :  $C^0$ ,  $C^1$ ,  $C^2$ .

$$C^0: C(t_k^-) = C(t_k^+)$$

$$C^1: C^0 \text{ et } C'(t_k^-) = C'(t_k^+)$$

$$C^2: C^1 \text{ et } C''(t_k^-) = C''(t_k^+)$$

Continuité géométrique notée  $G^n$  :  $G^0$ ,  $G^1$ ,  $G^2$ .

$$G^0: C(t_k^-) = C(t_k^+)$$

$$G^1: G^0 \text{ et } \exists \beta \in R^+ / C'(t_k^+) = \beta C'(t_k^-)$$

$$G^2: G^1 \text{ et } \exists \chi \in R / C''(t_k^+) = \beta^2 C''(t_k^-) + \chi C'(t_k^-)$$

### I.1.7.3 Courbes et surfaces Bézier:

En 1959, un employé de l'entreprise automobile Citroën, Paul de Faget de Casteljau, a eu l'idée simple d'itérer des combinaisons affines de maillages polygonaux pour obtenir des surfaces lisses adaptées à la modélisation de châssis de voiture. Presque simultanément, l'employé de Peugeot Pierre Bézier a travaillé sur l'intersection de cylindres partiels pour atteindre les mêmes objectifs. Les deux versions, qui produisaient des courbes égales, sont aujourd'hui connues sous le nom de courbe de Bézier puisque Pierre Bézier a été le premier à rédiger un article public sur le sujet [23].

Une courbe de Bézier de degré «  $n$  » est définie par :

$$C(u) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(u)P_i \quad 0 \leq u \leq 1 \tag{I.9}$$

Les coefficients géométriques  $P_i$  sont appelés points de contrôle. Les fonctions de base  $B_{i,n}$ , sont les polynômes de Bernstein classiques au  $n^{i\text{ème}}$  degré donnés par :

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \tag{I.10}$$

Pour la conception interactive de formes, les points de contrôle de la courbe de Bézier transmettent beaucoup d'informations géométriques comme on peut le voir avec la figure I.16.

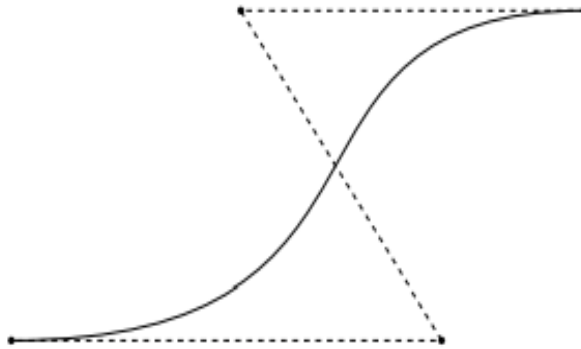


Figure I.16 : Une courbe de Bézier de degré 3 [24].

Pour évaluer la courbe à  $u \in (0, 1)$ , nous itérons simplement les  $n+1$  points de contrôle et calculons l'influence correspondante. Cela peut également être exprimé sous forme matricielle pour ceux qui sont plus familiers avec l'algèbre linéaire.

$$C(u) = UM_B G_B \tag{I.11}$$

Où  $U$  est un vecteur de  $[u^n, u^{n-1}, \dots, u, 1]$ ,  $M_B$  est la matrice de base de Bézier, et  $G_B$  est un vecteur avec les  $n+1$  points de contrôle.

La courbe de Bézier rationnelle peut également être définie comme :

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,n}(u)w_i P_i}{\sum_{i=0}^n B_{i,n}(u)w_i} \tag{I.12}$$

Les  $P_i$  et  $B_{i,n}$  sont définis comme précédemment, les  $W_i$  sont des scalaires appelés poids. Lorsque les poids sont variés, un point de contrôle « attirera » ou « repoussera » d'avantage la

courbe. Ceci est mieux expliqué avec un exemple. Quatre courbes de Bézier sont dessinées sur la figure I.17. La seule différence entre elles, est le poids du point de contrôle  $P_2$ .

Le poids de 0,5 fait sortir la courbe de la limite tracée par ses points de contrôle. Avec un poids égal à 1, la courbe est équivalente à celle représentée sur la figure I.16. Le poids de 2 a tendance à éloigner la courbe du deuxième point et le poids de 10 la pousse encore plus loin [24].

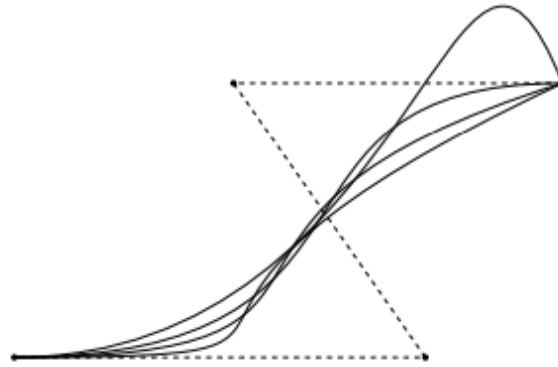


Figure I.17 : Une courbe de Bézier de degré 3 [24].

La surface de Bézier est simplement une extension de la courbe de Bézier dans deux directions paramétriques (figure I.18), un produit tensoriel de deux courbes. Il est évalué par :

$$C(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} B_{i,n}(u) B_{j,m}(v) \tag{I.13}$$

Où les directions paramétriques ont respectivement le degré  $n$  et  $m$ , bien qu'il arrive souvent que  $n = m$ . Cela donne  $(n + 1)(m + 1)$  points de contrôle.

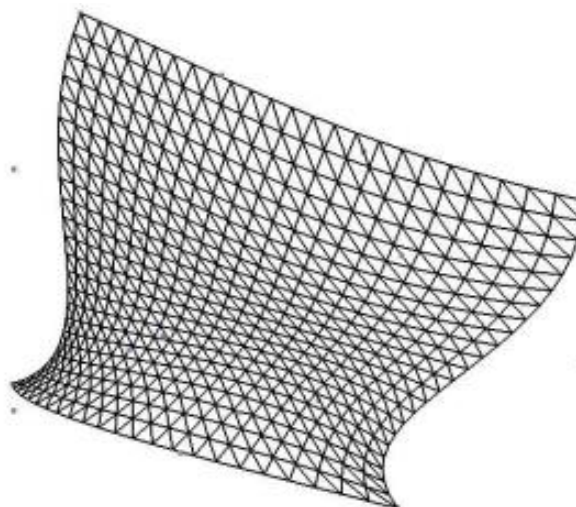


Figure I.18 : Surface Bézier [23].

### I.1.7.4 Courbes et surfaces NURBS:

La courbe ou la surface NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) est une classe de courbes et de surfaces paramétriques. Les NURBS sont utilisés pour des raisons de calcul telles que la facilité de traitement par un ordinateur [24]. Les NURBS sont un moyen puissant de spécifier des courbes et des surfaces complexes à l'aide d'un petit nombre de points de contrôle [25].

Une courbe NURBS au  $P^{i\text{ème}}$  degré  $C(u)$  définit un point qui trace une trajectoire dans l'espace 3D lorsque la valeur du paramètre scalaire  $u$  varie dans la plage  $[a, b]$  [26].

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i} \quad u \in [a, b] \quad (\text{I.14})$$

Où un ensemble de  $n$  points de contrôle ( $P_i$ ) avec les coordonnées  $(x_i, y_i, z_i)$  forme un polygone de contrôle, et  $(w_i)$  sont les poids des points de contrôle respectifs. L'augmentation du poids  $w_i$  rapproche la ligne du point de contrôle  $P_i$ .  $N_{i,p}(u)$  est la  $i^{\text{ème}}$  fonction de base B-spline de degré  $p$  (ordre  $p+1$ ), défini récursivement comme :

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+p}-u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1}-u}{u_{i+p+1}-u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (\text{I.15})$$

Les courbes NURBS sont définies par l'Equation (I.14), qui donne une interpolation entre une série de points de contrôle (Figure I.19). La forme de la courbe résultante est fonction de la localisation en  $x, y$  et  $z$  des points de contrôle, des poids individuels des points de contrôle, des plages d'influence paramétriques des points de contrôle [vecteur de nœud, Eq. (I.17)] et le degré  $p$  de la courbe [27].

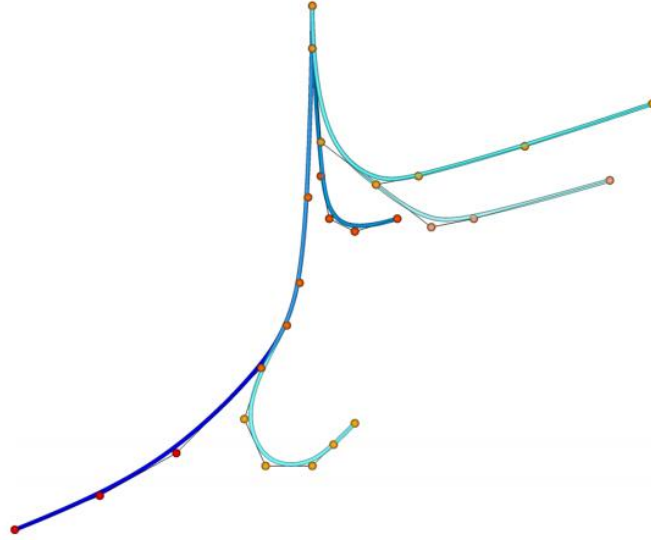


Figure I.19 : Représentation de courbes B-splines rationnelles non uniformes (NURBS) de cinq puits (bleu foncé à bleu clair) qui s'étendent dans le sous-sol à partir du même site de puits de surface. Certains points de contrôle sont partagés entre différents puits pour s'assurer que différents puits partagent une partie d'une trajectoire commune [27]

Une surface NURBS est définie comme un produit tensoriel de deux courbes NURBS de paramètre  $u$  et  $v$ . Une surface NURBS  $S(u, v)$  de degré  $p$  et  $q$ , respectivement pour la direction  $u$  et  $v$ , est une fonction rationnelle par morceaux bi-variée à valeur vectorielle [26].

$$\mathbf{S}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} \mathbf{P}_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}} \quad u, v \in [0, 1] \quad (\text{I.16})$$

Où  $(P_{ij})$  est un tableau 2D de points de contrôle (ou grille de contrôle),  $(w_{ij})$  sont les poids, et les  $N_{i,p}(u)$  et  $N_{j,q}(v)$  sont les B- non rationnels base spline telle que définie par la formule (I.12), qui est générée sur les vecteurs de nœuds  $U$  et  $V$ .

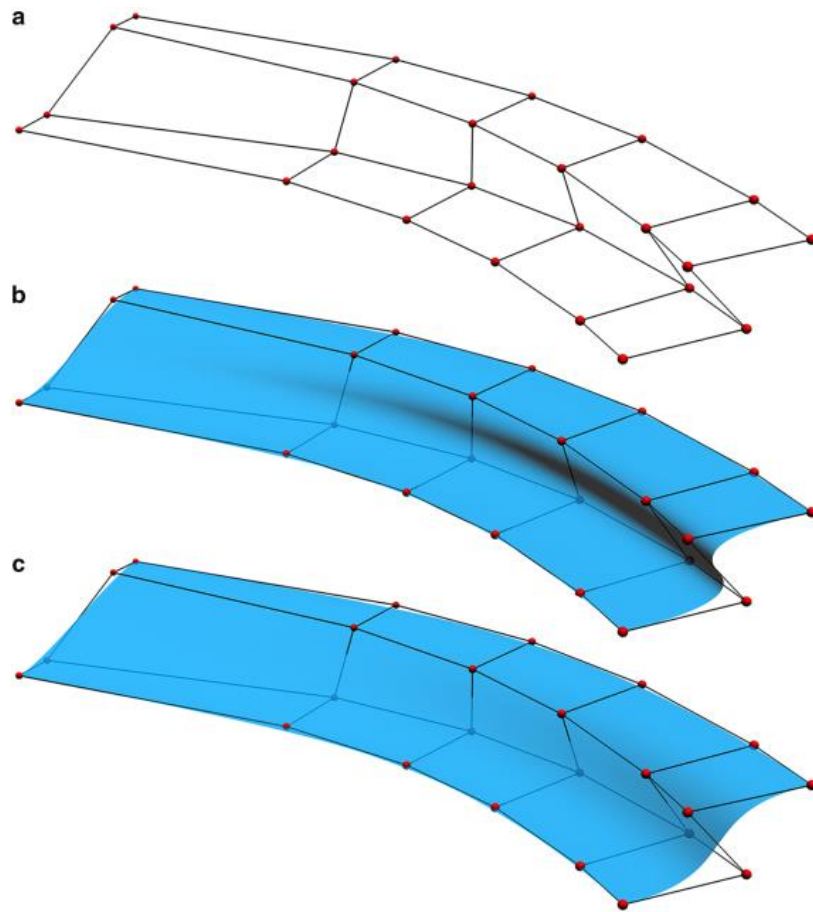
$$U = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right\} \quad (\text{I.17})$$

$$V = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, v_{q+1}, \dots, v_{s-q-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1} \right\} \quad (\text{I.18})$$

Où :  $r = n + p + 1$  et  $s = m + q + 1$

L'exemple d'une surface NURBS illustré à la figure I.20, montre comment la position du point de contrôle et le degré de la surface affectent la forme de la surface. Le même réseau de

points de contrôle (Fig. I.20 a) est utilisé pour générer une surface de degré 2 et 3, respectivement (Fig. I.20 b, c)



*Figure I.20 : (a) Un exemple de 24 points de contrôle, organisés en six rangées de quatre points (ou quatre rangées de six points), qui déterminent la géométrie globale d'une surface. (b) Surface de degré 2 définie par les points de contrôle en (a), avec des poids égaux pour tous les points de contrôle. Le côté droit de la surface est non monotone. (c) Une surface différente basée sur le même ensemble de points de contrôle, avec le même poids, mais avec un degré de 3. Ce degré plus élevé donne une surface plus lisse [26]*

Dans [28], ont utilisés l'approximation par les équations paramétriques de NURBS, à partir d'un nuage de points pour passer d'une représentation discrète vers la modélisation CAO de la chambre de combustion de la tête du piston du moteur F4L912 fabriqué au complexe moteur et tracteur de oued hamimime Constantine / Algérie.

### **I.1.8 Méthodologie CFAO des pièces de formes complexes :**

Les surfaces sculptées appelées aussi les surfaces de forme libre ou les surfaces complexes, ont vu des applications dans de nombreux domaines et sont largement fabriquées actuellement, en particulier dans l'aérospatiale, l'automobile, l'électronique, le médical, l'industrie artistique et même dans le secteur de l'énergie pour la fabrication d'aubes de turbine.

La méthodologie CFAO est l'ensemble de « maillons » intégrés dans une chaîne numérique qui s'appuie sur l'utilisation et le développement d'outils, d'équipements et de moyens informatiques, permettant l'association, le traitement et la conversion des données de nature informatique, et le passage simplifié de la phase de conception à la phase de fabrication et de production. Ces étapes de passage entre les maillons d'une « chaîne numérique de CFAO » constituent ce qu'on appelle le cœur du « flux numérique » [29], [30]. La chaîne et flux numériques peuvent se détaillés comme suit :

### I.1.8.1 Conception des pièces de formes complexes :

Les surfaces complexe se caractérisent par leur forme lisse et peuvent inclure des caractéristiques géométriques, telles que des creux, des bossages ou autres, pour répondre à des exigences telles qu'un flux d'air optimisé ou une forme ergonomique souhaitable. De nombreux programmes de conception assistée par ordinateur (CAO) contiennent des fonctions intégrées qui permettent la modélisation et la simulation de surfaces sculptées sous la forme de B-splines rationnelles non uniformes (NURBS), permettant aux surfaces sculptées d'être mieux acceptées dans l'industrie.

Dans la CFAO pour l'usinage, deux types de chaîne numérique sont considérés [30], chaîne numérique directe (ingénierie directe), où le concepteur réalise directement son idée dans un logiciel CAO vers un modèle 3D (figure I.21). Par contre, dans la chaîne numérique indirecte (ingénierie inversée), le modèle 3D est obtenu à partir de la numérisation par un système d'acquisition (scanner 3D par exemple) d'un prototype physique du produit futur.

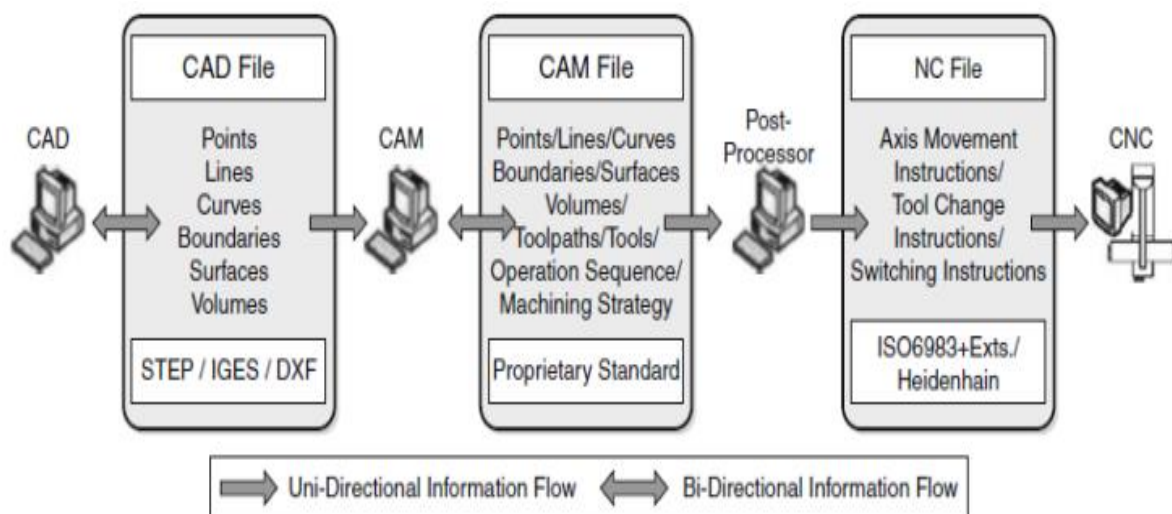


Figure I.21 : Structure générique du flux numérique de CFAO « Ingénierie directe » [30].

### I.1.8.2 Mise en forme des pièces de formes complexes :

Dans cette section nous allons se limiter uniquement sur la mise en forme par enlèvement de copeaux (l'usinage). Généralement, une fraiseuse CNC à 3 ou 5 axes est utilisée à cette fin avec une variété d'outils pour usiner soit la pièce souhaitée elle-même, soit le moule correspondant. Le processus de fabrication d'une surface de forme libre n'est pas une tâche facile, car la génération de trajectoire d'outil dans la technologie FAO actuelle est généralement basée sur le calcul géométrique, de sorte que la trajectoire d'outil n'est pas optimale. La géométrie peut également ne pas être décrite explicitement de sorte que l'apparition d'erreurs et de discontinuités dans la structure solide ne peut être évitée.

Les surfaces de forme libre (figure I.22), sont usinées à l'aide de différentes méthodes de génération de trajectoire d'outil telles que la génération de trajectoire d'outil iso-planaire adaptative, la génération de parcours d'outil iso-crête constante (constant scallop tool path generation), la méthode iso-paramétrique adaptative, l'iso-courbure, l'isophote et par d'autres méthodes. Les différentes méthodes sont choisies en fonction des paramètres à optimiser [31], [32].

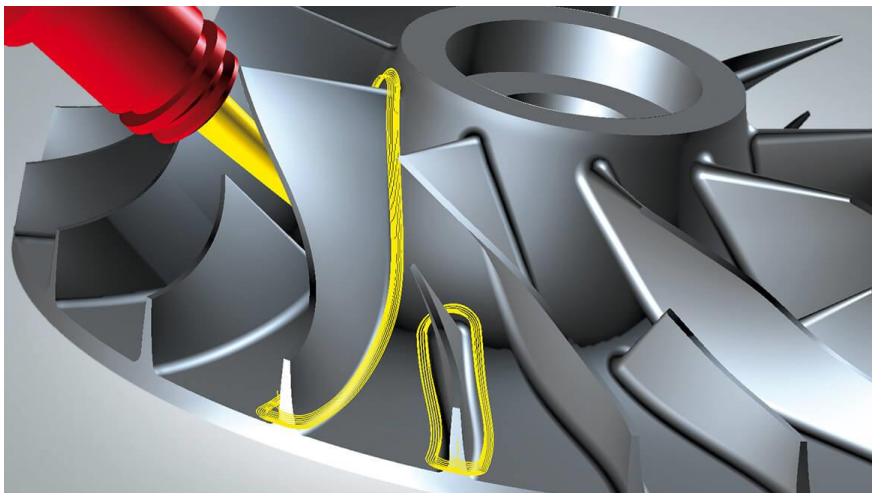


Figure I.22 : Fraisage de surface à forme libre

#### a) Différentes méthodes de génération de trajectoire d'outil :

Trois méthodes de génération de trajectoire d'outil sont couramment utilisées pour l'usinage des surfaces sculptées et le traitement des problèmes de collision [33], [34]:

1. Méthode iso-paramétrique adaptative de trajectoire d'outil : La méthode iso-paramétrique est la plus ancienne de ces trois méthodes et a été proposée par Loney et

Ozsoy [35]. Une surface de conception est une surface paramétrique tridimensionnelle exprimée par deux variables,  $u$  et  $v$ . Cette méthode génère un chemin de contact de coupe (CC) sur la surface de conception en choisissant une variable paramétrique initiale  $u$  ou  $v$  et en la maintenant constante tout en augmentant la valeur de l'autre variable paramétrique qui décrit la surface. Les courbes générées sont appelées iso-courbes. L'avantage d'utiliser des iso-courbes est que ces courbes ne se coupent pas et recréent le contour de la surface paramétrique. La variable paramétrique suivante serait choisie de manière à ce que la prochaine courbe iso-paramétrique n'ait pas de points avec une hauteur de crête supérieure à celle spécifiée [36]. Cette méthode est mathématiquement pratique et elle garantit que toute la surface est couverte par des passes d'usinage. Cependant, selon la surface, les trajectoires d'outils générées par cette méthode peuvent être très denses dans certaines zones, comme l'indiquent Elber et Cohen [37]. figure I.23.

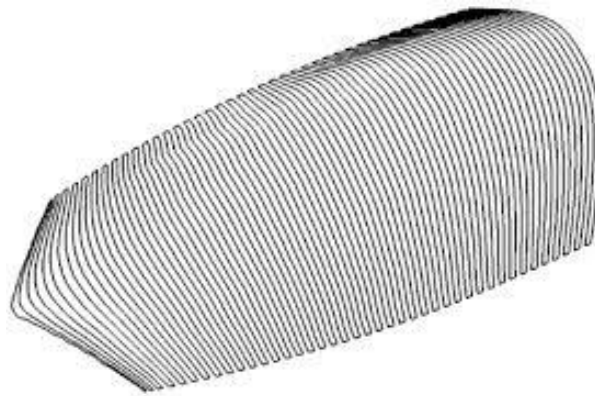


Figure I.23 : Génération de parcours d'outil iso-paramétrique adaptative

2. Méthode de trajectoire d'outil iso planaire : La méthode iso-planaire a été proposée pour la première fois par Huang et Oliver [38], comme une amélioration par rapport à la méthode iso-paramétrique. Cette méthode consiste à utiliser une série de plans parallèles dont les intersections avec la surface de conception généreraient les trajectoires d'outils CC (contact cutter) [39]. La séparation entre les plans d'intersection offre un meilleur contrôle sur la hauteur de crête résultante que la méthode iso-paramétrique car la séparation est contrôlée par une distance cartésienne entre les plans au lieu d'utiliser des courbes paramétriques figure I.24.

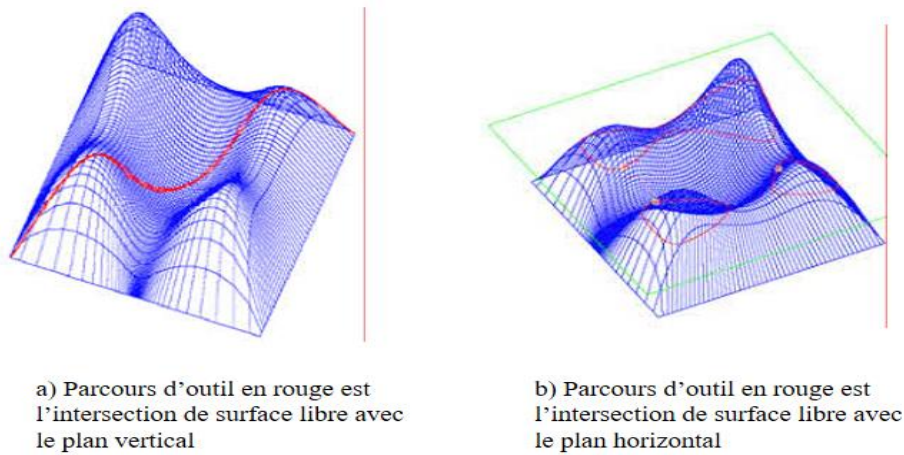


Figure I.24 : Génération de trajectoire d'outil par intersection de surface avec un plan parallèle

3. Méthode Isocrête constante (constant scallop tool path generation method) : C'est une méthode mathématique qui génère une trajectoire d'outil isocrête qu'a été proposée par Suresh et Yang [40]. La méthode isocrête repose sur la génération des trajectoires d'outil adjacentes en fonction de la courbe de crête créée par la trajectoire d'outil précédente. Cette méthode garantit que la hauteur de crête des points des courbes de feston reste aussi élevée que la tolérance spécifiée. De cette façon, les trajectoires d'outil générées ne provoquent pas d'usinage redondant, résultant en une trajectoire d'outil avec une longueur totale plus petite que les trajectoires d'outil générées par les méthodes iso-paramétriques ou iso-planaires. La crête générée entre deux trajectoires d'usinage adjacentes est constante [41]–[43]. figure I.25

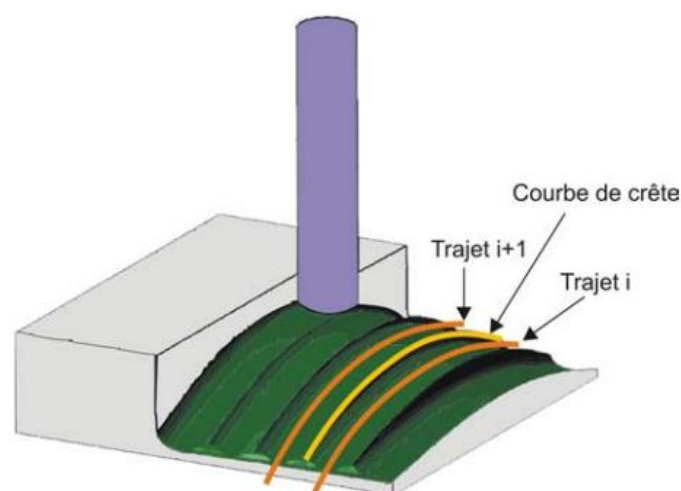


Figure I.25 : Génération de parcours d'outil à crête constante

### ***b) Génération de G-code par le post-processeur technologique :***

Une combinaison de segments de droites, d'arcs et de courbes, est faite sous la forme d'une géométrie filaire, qui représente les trajectoires d'usinage que l'outil devra suivre. En sortie du processeur technologique [44], un fichier CL (cutter location file) ou APT est obtenu [45], [46]. Enfin, ces fichiers obtenus seront traduits par le post-processeur technologique dans la majorité des cas en fichier G-code interprétable par la commande numérique associée à la machine CNC (ISO 6983, 2009).

## **I.2 Optimisation de l'usinage des pièces de formes complexes :**

### **I.2.1 Introduction :**

La trajectoire d'outil créée par les logiciels de FAO est généralement générée sans tenir compte d'aucun processus mécanique. Ce qui entraîne des risques multiples tels que l'endommagement de l'outil, la déviation de l'outil, vibrations, ... etc. Ce qui engendre des erreurs dimensionnelles, géométriques, et d'autres relatives à l'état de finition de surface, et par conséquent met en cause la qualité de produit final. Ceci peut être évité par différentes méthodes d'optimisation en tenant compte des paramètres de processus tels que la vitesse d'avance, la vitesse de la broche, les profondeurs de passe, le diamètre de l'outil, et d'autres paramètres de réglage.

Il y'en a d'autres facteurs à mettre en considération qui peuvent causer les mêmes erreurs, sont dues aux erreurs relatives à la machine-outil CNC, la déformation de la pièce à usiner, et une mauvaise mise et maintien en position (montage d'usinage) [47], [48] etc. dans cette partie on va discuter les erreurs relatives à la compensation des erreurs des machines-outils à commande numérique, ainsi que l'optimisation des montages d'usinage notamment ce qui concerne la mise en position (iso-stabilité) et le maintien en position (clamping).

### **I.2.2 Optimisation par la compensation des erreurs machines :**

Actuellement, la plupart des contrôleurs à commande numérique par ordinateur (CNC) ne disposent pas de la fonction nécessaire pour compenser les erreurs d'usinage pour les surfaces de forme libre [48]. La réduction des erreurs d'usinage est un objectif commun pour l'industrie de l'usinage. Pour une machine-outil à trois axes, il existe 21 erreurs géométriques différentes, dont les erreurs de positionnement linéaire et angulaires pour chaque axe, ainsi que planaire. Les erreurs linéaires incluent la précision de positionnement et la répétabilité sont généralement causées par le mécanisme d'entraînement (vis, crémaillère ou moteur linéaire, etc...). Les

erreurs angulaires sont des erreurs dans lesquelles le point d'intérêt tourne autour des axes X, Y et Z respectivement, elles ne peuvent pas avoir d'effet significatif sur l'application, mais elles sont amplifiées par la distance de la table ou de la glissière. Les principales causes d'erreurs angulaires, sont les imprécisions dans les guides linéaires et des surfaces de montage mal usinées [49]. Ces erreurs peuvent être minimisées par étalonnage avec l'utilisation de l'interférométrie laser par exemple.

En plus des erreurs géométriques, les erreurs dynamiques générées pendant le processus d'usinage affectent également la précision de l'usinage. Ces erreurs sont généralement causées par les forces de coupe variables, les vibrations de la machine et l'usure incertaine des outils de coupe [50]. Généralement, les contrôleurs à commande numérique par ordinateur (CNC) d'une machine-outil ne peuvent pas faire face à ces erreurs. La chaleur générée lors de l'usinage peut également affecter la précision de l'usinage [51].

Les fabricants et utilisateurs de machines-outils sont parfaitement familiarisés avec la détermination de la précision et de la répétabilité de leurs machines conformément aux principales normes nationales et internationales de performance des machines. Ces normes concernent la mesure de la répétabilité et du positionnement précis des parties mobiles d'une machine à commande numérique (NC) le long ou autour de chacun des axes linéaires et rotatifs à tour de rôle. Depuis la publication de la norme internationale, couplée à la connaissance de plusieurs milliers d'exercices d'étalonnage de machines-outils dans le monde et aux nouvelles recommandations de l'ISO Genève, le groupe de travail (ISO / TC39 / SC2 / WG2) chargé de réviser la norme internationale a fait d'autres recommandations de grande envergure sur le sujet de la mesure de la précision et de la répétabilité des machines-outils. La précision du positionnement et la mesure de la répétabilité des axes linéaires et rotatifs peuvent être évaluées conformément aux normes britanniques et internationales BS3800 et ISO 230-2. Ces normes sont utilisées dans les tests de type de machines spécifiques, les tests d'acceptation de machines nouvellement installées, les tests de comparaison d'une gamme de machines, la vérification périodique (c'est-à-dire le réétalonnage annuel) et la compensation d'erreur linéaire du contrôleur de la machine-outil pour assurer une précision continue [52].

De nombreuses méthodes de compensation d'erreur machines ont été proposées pour l'usinage des surfaces de forme libre. Slamani et al [53], proposent une approche de modélisation pour la prédiction d'erreurs volumétriques prenant en compte les erreurs géométriques et servodynamiques dans une machine-outil à cinq axes à grande vitesse. Les fonctions polynomiales sont utilisées pour représenter puis prédire les erreurs géométriques.

Un modèle simple de fonction de transfert de second ordre est utilisé pour modéliser et prédire l'erreur dynamique d'asservissement. Les erreurs dynamiques d'asservissement sont ajoutées aux erreurs géométriques de position de l'axe et propagées à l'outil et à la pièce à l'aide de transformations matricielles. La validité du concept d'intégration d'erreur est testée pour une trajectoire de mouvement à trois axes XYZ. Poniatowska [33], a proposé une méthode pour compenser les erreurs systématiques sur la surface usinée. Un modèle d'usinage, qui représente la moyenne de plusieurs surfaces usinées dans des conditions répétables, a été utilisé comme base de compensation. Une analyse de régression et des méthodes statistiques spatiales ont été utilisées pour éliminer les effets aléatoires. Le modèle a ensuite été utilisé pour reconstruire le modèle de conception assistée par ordinateur (CAO) de la surface. La nouvelle trajectoire d'outil de coupe peut être générée pour supprimer les erreurs systématiques. Slamani et al [54], ont présentés une technique pour évaluer les erreurs volumétriques sur une machine-outil à cinq axes pour le mouvement impliquant deux axes linéaires et un axe rotatif à des vitesses d'avance sélectionnées en utilisant des données provenant de deux sources. La première source de données est obtenue par une procédure de contrainte de point final programmée avec mesure des erreurs de positionnement volumétrique 3D entre un point sur le porte-outil et un autre fixé au référentiel de la table machine. Les tests consistent à maintenir la coïncidence nominale de ces deux points tout en exerçant les trois axes. La deuxième source de données est le signal de retour de position du codeur fourni par le contrôleur de la machine. Des tests ont été effectués à des vitesses d'avance faibles et élevées pour évaluer l'effet des erreurs géométriques et dynamiques. Les fonctions polynomiales sont utilisées pour représenter puis prédire les erreurs géométriques. Les erreurs géométriques prédites sont ensuite ajoutées aux erreurs dynamiques fournies par les erreurs d'asservissement des signaux de retour de position et propagées au point central de l'outil et sont comparées aux erreurs volumétriques mesurées. Chen et al [55], ont utilisé la méthode d'analyse d'indépendance spatiale pour décomposer les erreurs d'usinage mesurées en ligne en erreurs systématiques et en erreurs aléatoires. Pour les erreurs systématiques, les codes de commande numérique (NC) peuvent être modifiés pour la compensation d'erreur. Slamani et al. [56], ont montrés que lors d'un fraisage en bout d'un alésage à grande vitesse, le décalage d'échelle dynamique provient de la différence de réponse dynamique de chaque axe et à des vitesses d'avance élevées, provoque une ovalisation de la trajectoire le long de l'axe avec la réponse dynamique la plus rapide. Pour étudier cette erreur, une approche expérimentale est utilisée à différentes vitesses d'avance et rayons de trajectoire pour une machine-outil à grande vitesse avec des moteurs linéaires. Les résultats montrent que la non-concordance d'échelle dynamique provoque des erreurs de rondeur et de taille de rayon.

Un modèle simple du second ordre est utilisé avec succès pour prédire le décalage d'échelle dynamique et une stratégie est proposée et testée pour le compenser au niveau du code G.

Cho et al. [57], ont effectué une compensation d'erreur de surface d'usinage via un système de mesure sur machine. Ils ont effectué plusieurs usinages pour obtenir la distribution des erreurs. Sur la base de la relation entre les conditions de coupe et l'erreur de surface, une tentative a été faite pour corriger la trajectoire de l'outil afin de réduire les erreurs à l'aide d'un algorithme itératif. Slamani et al. [58], proposent une stratégie de compensation conçue pour améliorer la précision du processus d'alésage de la fraise en bout, puis comparée expérimentalement au processus plus traditionnel des barres d'alésage. Les tests effectués sur deux machines-outils montrent que les commandes d'avance et les contrôleurs ont un impact significatif sur les erreurs de contournage circulaire. Pour les deux machines testées, les pics et jeu d'inversion dominant. De plus, les deux machines présentent des erreurs dynamiques de taille de rayon qui suivent de près un modèle empirique simple. De plus, ce modèle simple est utilisé pour prédire l'erreur de taille de rayon pour les deux machines testées avec de bons résultats expérimentaux. Les pics d'inversion et le jeu sont compensés en ajustant finement la compensation du contrôleur indigène pour ces erreurs. Les erreurs restantes sont causées par la déflexion de l'outil, la déformation thermique, l'erreur géométrique et d'autres facteurs. La comparaison entre un alésage usiné par fraisage en bout à grande vitesse et un usiné à l'aide d'une barre d'alésage révèle que les deux procédés donnent des résultats très similaires en termes d'erreurs de faux rond et de dimension de rayon. Il est conclu qu'un processus de fraisage en bout à grande vitesse mérite d'être considéré comme un substitut à la barre d'alésage pour l'usinage d'alésage, donnant presque la même qualité de surface avec un gain de productivité significatif. Gu et al. [59], ont développé la méthode de décalage global pour compenser les erreurs d'usinage d'une machine-outil à cinq axes. La méthode était basée sur la mesure hors machine de pièces usinées à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (CMM), et un processeur de compensation a été utilisé pour calculer les paramètres permettant au contrôleur de la machine-outil d'effectuer la compensation. Chen et al. [60], ont décomposé les erreurs d'usinage en erreurs systématiques et erreurs aléatoires en utilisant la méthode de décomposition en mode empirique, et les erreurs systématiques peuvent ensuite être compensées en utilisant les données de mesure hors ligne. Huang et al. [61], ont développé un algorithme de compensation itératif pour modifier le code CN en fonction des erreurs géométriques, de sorte que la trajectoire d'outil réelle générée par le code CN compensé et la trajectoire d'outil conçue se situent dans la tolérance. Msaddek et al [62], ont présenté une

méthode de compensation par l'insertion des nœuds pour réduire les erreurs causées par les interpolations B-spline et C-spline sur la surface d'usinage.

Slamani et al [63], ont proposé une méthode statistique qu'est appliquée pour estimer, de manière optimale, les coefficients du modèle polynomial incluant l'effet de l'hystérésis de mouvement. Cette méthode est appliquée aux données expérimentales directes d'étalonnage des erreurs de mouvement articulaire obtenues par interférométrie laser. Ces expériences ont été menées sur les joints prismatiques de trois types de machines-outils qui utilisent une variété de technologies de guidage, telles que les roulements à rouleaux ou hydrauliques. Les résultats ont montré que les modèles polynomiaux de degré trois à quatre sont adéquats pour la majorité des erreurs de mouvement articulaire testées. De plus, l'hystérésis de mouvement est généralement bien modélisée par une constante bien que dans certains cas un polynôme quadratique ait été nécessaire.

Certains chercheurs ont étudié l'effet de la chaleur sur la précision et la qualité de pièces, pendant l'opération de l'usinage. Chen [64], a utilisé un réseau de neurones artificiels pour prédire l'erreur thermique et a utilisé un contrôleur sur PC pour envoyer les informations de compensation au contrôleur CNC pour effectuer une compensation d'erreur en temps réel. Slamani et al. [65], ont étudié expérimentalement, l'effet des conditions de coupe sur la génération de chaleur, sur la base de « Taguchi » et des techniques de conception factorielle complètes. Une analyse statistique quantitative et qualitative est utilisée pour identifier les relations entre la génération de chaleur et les paramètres de coupe, la génération de chaleur et la région de coupe et enfin, la génération de chaleur et l'opération d'usinage. Les résultats ont montré que l'approche proposée peut détecter avec succès l'importance ou la non-signification de la variation de température entre les différentes zones de coupe et les opérations d'usinage.

D'autres travaux de recherches relatifs à l'optimisation de l'usinage robotisé, par la compensation des erreurs machines, et le choix optimal des paramètres, peuvent être trouvés dans [66][67][68].

### **I.2.3 Optimisation des montages d'usinage pour pièces complexes :**

Les pièces de forme complexe comme les aubes de turbines à gaz, sont composées de surfaces libres avec une distribution de courbure irrégulière, leur production avec une précision et une qualité de surface élevée nécessite des technologies de fabrication avancées modernes. Avec l'avènement de la technologie d'usinage CNC multi-axes haute performance, la finition des

aubes de turbine devient non seulement réalisable mais également rentable. Néanmoins, dans la pratique, certains défis particuliers restent à relever pour la mise en œuvre à grande échelle de ce processus, notamment la détection des collisions, le maintien, les exigences de finition à tolérance étroite, l'interchangeabilité, les vibrations et la déformation. Habituellement, la plupart de ces problèmes peuvent être résolus grâce à un montage d'usinage bien conçu et fabriqué [69].

Il est bien connu que les systèmes d'usinage affectent directement la productivité, les coûts et la qualité des produits. Généralement, 10 à 20 % du coût total d'un système de fabrication est associé à la conception et à la fabrication d'un dispositif d'usinage [70], [71].

De plus, le montage d'usinage peut représenter jusqu'à 70 à 80 % du cout total d'outillage, et le temps nécessaire à la planification de la production pour la conception et la fabrication du montage d'usinage est d'environ 80 à 90 % [72].

Environ 40% des pièces usinées sont rejetées en raison de montages mal conçus. Cependant, ce pourcentage devrait augmenter lors de l'usinage de pièces à géométrie complexe [73]. Heureusement, la recherche sur les montages d'usinage flexibles et la conception de montages assistée par ordinateur peuvent réduire considérablement les coûts liés aux montages d'usinage [74], [75]. Des informations plus détaillées sur le sujet du montage d'usinage peuvent être trouvées dans [76]–[78].

### **1.2.3.1 Principes et méthodes de mise et maintien en position des pièces de formes complexes :**

Pour avoir un montage d'usinage approprié pour de telles pièces ayant des surfaces sculptées, plusieurs facteurs doivent être pris en compte tels que le type, la géométrie et le matériau des éléments de support et de positionnement (locators) ainsi que le type de mécanismes de serrage (clamping). La méthode de fixation de base (plan-ligne-point ou 3–2–1) la plus couramment utilisée pour les pièces à géométrie régulière [79], [80] devient inutile pour les pièces à géométrie complexe.

Pour produire des pièces finies précises, il est nécessaire de fournir un montage d'usinage approprié, capable de localiser, de fixer et de maintenir une succession de pièces ayant la même géométrie dans des positions identiques. Il est également destiné à assurer l'usinage de diverses opérations dans diverses machines-outils. De tels montages peuvent être dans certains cas des équipements coûteux et complexes.

**a) Configuration de montage d'usinage :**

La configuration du montage d'usinage se compose principalement de localisateurs et de pinces. La fonction de chaque positionneur est de fournir une localisation déterministe de la pièce tandis que la fonction de chaque pince est d'exercer une force appropriée sur la surface de la pièce pour l'empêcher de perdre le contact avec les positionneurs. La plupart des montages dédiés aux pièces prismatiques sont conçues selon le principe de localisation 3-2-1.

Ici, 3-2-1 fait référence à 3 appuis sur la surface de localisation principale, 2 appuis sur la surface de localisation secondaire et 1 repère sur la surface de localisation tertiaire de la pièce. Les douze degrés de liberté d'un corps libre dans l'espace sont illustrés à la figure I.26, et sur douze, neuf degrés de liberté sont restreints en utilisant le principe de localisation 3-2-1 comme illustré aux figures I.27, I.28 et I.29 [81].

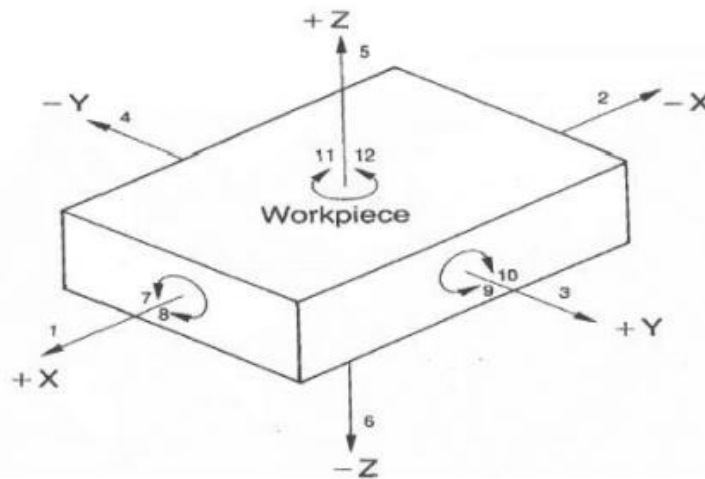


Figure I.26 : Douze degrés de liberté d'un corps libre

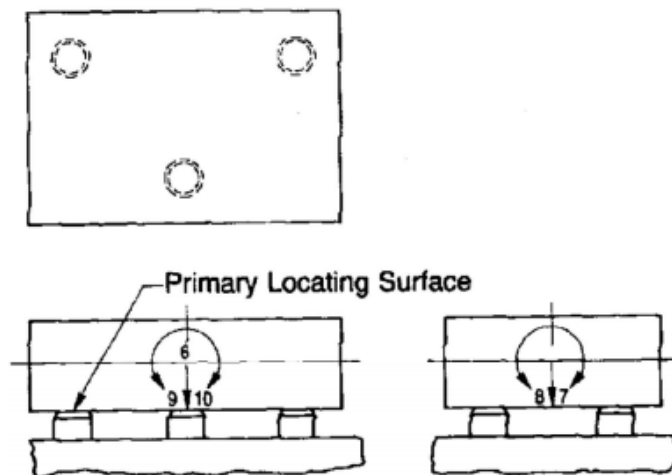


Figure I.27 : Trois supports sur la surface de localisation principale restreignent cinq degrés de liberté

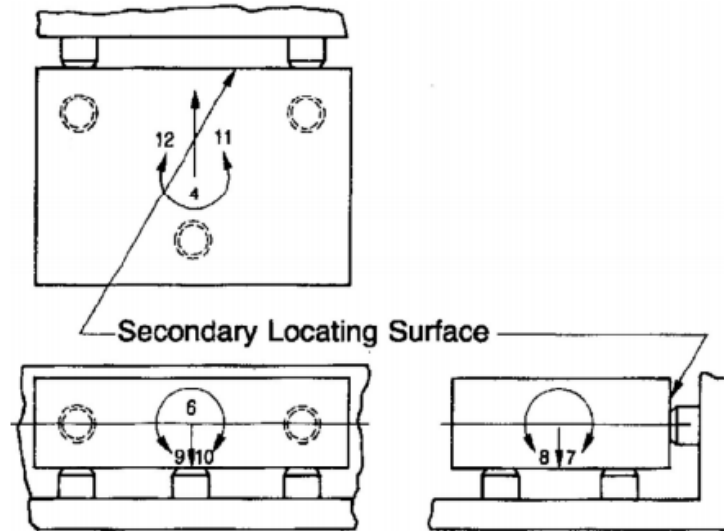


Figure I.28 : L'ajout de deux localisateurs sur un côté restreint huit degrés de liberté

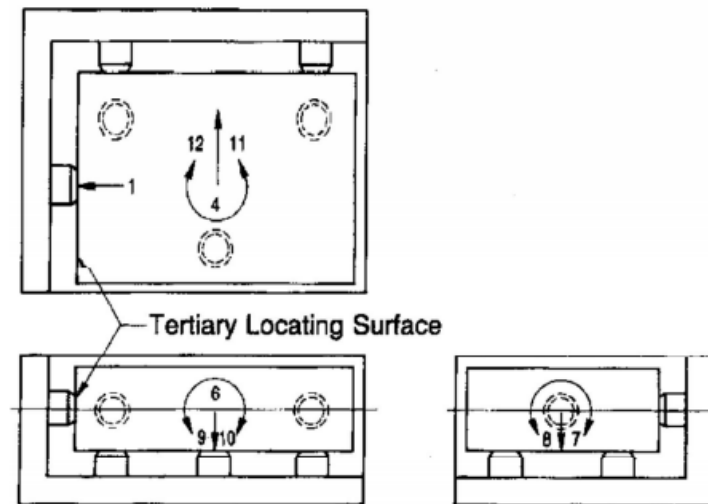


Figure I.29 : L'ajout du localisateur final d'un autre côté restreint neuf degrés de liberté, complétant ainsi l'emplacement 3-2-1

### b) Différents types de posages :

Pour garantir un bon positionnement des usinages sur la pièce en respectant l'iso statisme et assurant le maximum de précision et de stabilité durant l'usinage, la pièce doit être positionnée précisément dans l'espace de travail de la machine-outil. A cet effet, une combinaison d'appuis peut construire plusieurs types de posage (figure I.30) tels que, 3-2-1r (plan, linéaire, butée), de type 3-2-1c (plan, centreur, locating) ou de type 4-1-1 (pivot, butée, butée), [82].

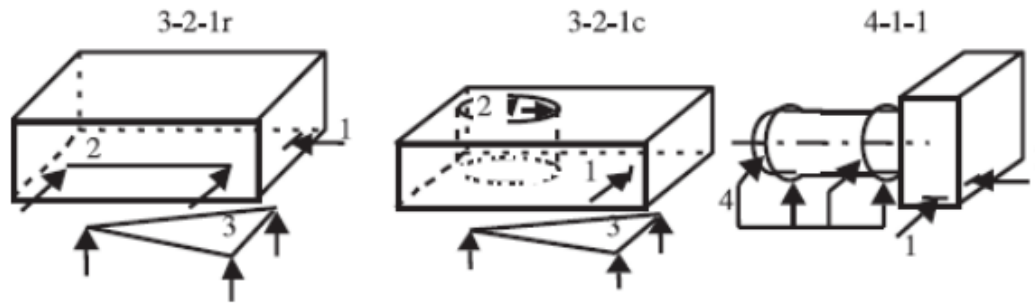


Figure I.30 : Différents types de posage [82].

### c) Différents modes de bridages :

Afin d'éliminer tout risque de déplacement dû aux sollicitations mécaniques extérieures comme les efforts de coupe, le poids de la pièce et les forces d'inertie durant l'usinage, la pièce doit être maintenue sur ces appuis, par un mode de fixation qui peut être de mode bride lorsque l'effort de bridage est opposé à l'appui plan prépondérant, de mode étau lorsque l'effort de bridage est opposé à l'appui linéaire d'orientation et de mode mandrin lorsque la géométrie d'appui participe aussi au bridage (figure I.31) [83].

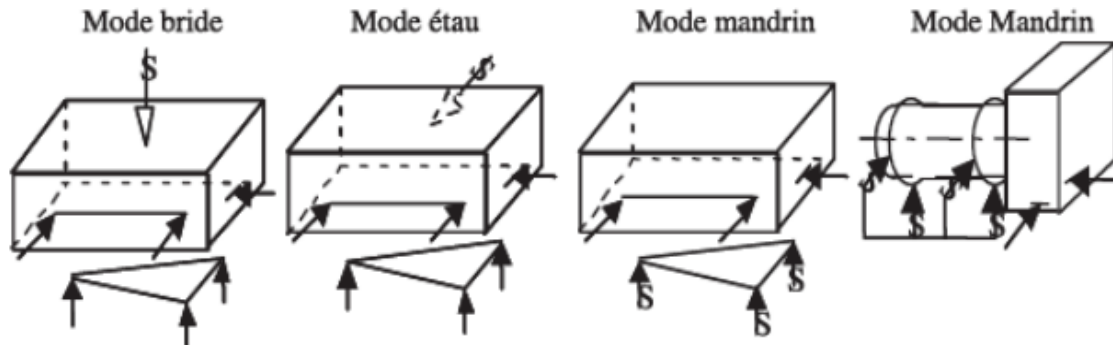


Figure I.31 : Différents modes de bridage [82].

### d) Isostatisme pour pièce de forme complexe :

La méthode de fixation de base (3-2-1) utilisée pour les pièces standards devient inutile pour les pièces de formes libres (figure I.32). Cependant, le grand défi auquel sont confrontés les fabricants de pièces complexes est la répétabilité et la reproductibilité de leurs montages d'usinage.

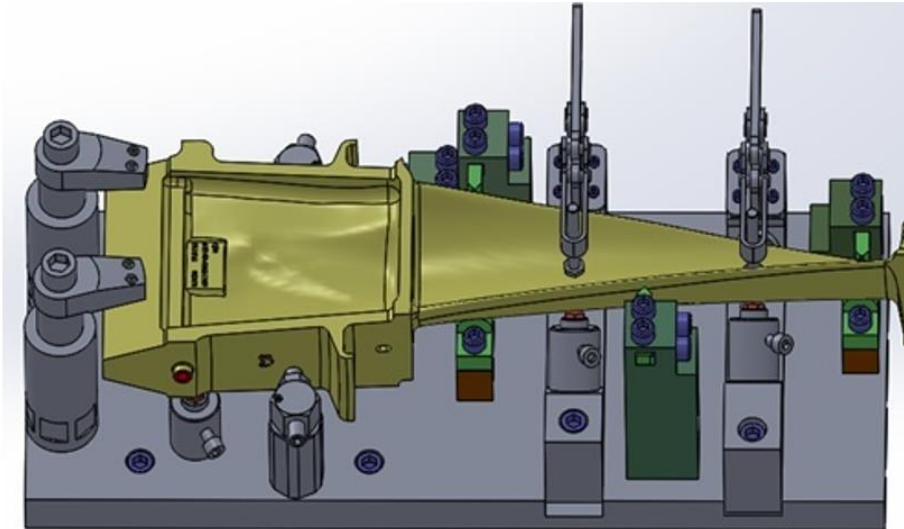


Figure I.32 : Type de posage et mode de bridage pour une pièce complexe [69].

Fréquemment, les positions des éléments de serrage et les forces de serrage attribuées à ces éléments sont entièrement basées sur l'expérience du concepteur et la méthode d'essai et d'erreur (trial-and-error method). Généralement, les forces de serrage sont appliquées arbitrairement aux pièces « juste pour être dans des endroits libres et sécurisés ». Par conséquent, des déformations considérables sont souvent causées par la conception non optimisée des éléments de serrage et des forces. Pour produire des pièces finies précises, il est nécessaire de fournir un montage d'usinage approprié, capable de localiser, de fixer et de maintenir une succession de pièces ayant la même géométrie dans des positions identiques. Il est également destiné à assurer l'usinage de diverses opérations dans diverses machines-outils. Tels montages peuvent être dans certains cas des équipements coûteux et complexes [69].

A cet effet, un bon choix des éléments de positionnement et des éléments de fixation est nécessaire.

### **I.2.3.2 Le choix des éléments ou appuis de positionnement (Locators) :**

Pour la nature des appuis, On distingue deux situations :

- soit les pièces sont faites de manière régulière et précise (géométrie bien définie).
- soit au contraire elles présentent des irrégularités (forme complexe) par rapport au modèle idéal.

Si une pièce est irrégulière, il faut alors que les contacts soient réduits au minimum. On utilise pour cela des liaisons sphère-plan combinées, ou des liaisons linéaires rectilignes. Par contre,

lors du serrage, les efforts seront concentrés sur de petites surfaces, ce qui risque de marquer la pièce. Si une pièce est réalisée de manière précise, alors on peut utiliser des grandes surfaces de contact. Cela permet de répartir les efforts de serrage et donc d'éviter de marquer la pièce. Le grand défi auquel sont confrontés les fabricants de pièces complexes est la répétabilité et la reproductibilité de leurs montages d'usinage. Plusieurs travaux de recherche ont été menés pour répondre à la problématique liée à la mise en position et à l'usinage de pièces complexes.

Arslane et al. [69], ont développés et réalisés un montage d'usinage dédié au maintien en position d'une aube de turbine à gaz, suivant une nouvelle approche d'optimisation, en utilisant la méthode des coordonnées plückeriennes pour choisir le placement du localisateur de pièces de forme complexe, sur la base de la maximisation du déterminant et de la minimisation de facteur de conditionnement de la matrice de localisation (matrice d'information). Les performances du montage développé en termes de répétabilité de localisation sont évaluées sur la base du concept du torseur de petit déplacement (TPD). Les résultats montrent la validité du montage développé.

Wang Y et al. [84], ont proposé une méthode basée sur l'analyse par éléments finis (FEA) pour concevoir un montage d'usinage pour les aubes de turbine en tenant compte de la géométrie de contact complexe et de l'état de contact de la paire montage-composant à l'aide d'éléments de contact surface à surface. Afin de présenter une approche fondamentale de la modélisation et de l'analyse des performances du système de fixation des aubes turbine.

Wang H et al. [85], ont proposé une méthodologie pour améliorer les performances d'usinage des aubes de turbine à parois minces basée sur l'intégration de la méthode d'analyse de tolérance de localisation géométrique et de prédiction de déformation structurelle basée sur les éléments finis dans un seul cadre. Ils ont validé leur méthode numériquement et par des expériences d'usinage réelles. Ils ont affirmé que la méthode et le montage d'essai proposés ont démontré leur importance.

Zirmi et al. [86], ont proposé une méthode de choix et de mise en contact des éléments technologiques avec la pièce lors de la conception du dispositif d'usinage. La méthode est basée sur la maximisation de l'aire du triangle d'appui obtenu par les trois points de contact, qui est formulée comme un problème d'optimisation sous contraintes non linéaires. Afin d'obtenir une qualité d'usinage et une précision des pièces élevées, Strems et al. [87], ont développé un modèle basé sur l'analyse métrologique d'un montage et d'une pièce.

Une combinaison de la méthode cinématique, de l'algorithme génétique et de la conception heuristique a été utilisée par Bausch et John [88], pour générer une conception de dispositif de transfert de données pour les aubes de turbine. La précision de positionnement du montage conçu a été comparée expérimentalement au montage existant pour la même pièce. Ils ont constaté que le montage conçu fournit des résultats plus précis. Ivanov et al. [89], ont proposé une méthode pour augmenter l'efficacité d'usinage des pièces de type prothèse, par l'optimisation de la conception d'un montage d'usinage flexible basé sur le choix approprié des éléments de montage.

Duret et al. [90], ont proposé une méthode basée sur le déterminant et le conditionnement pour évaluer la qualité des montages d'usinage. Ils ont appliqué leur méthode sur un modèle de base pour les pièces prismatiques simples (plan-ligne-point) et le modèle de Boys pour les pièces cylindriques. Ils ont affirmé que leurs indicateurs proposés sont simples, robustes et atteignent une application pratique élevée. Cependant, l'applicabilité de la méthode à d'autres types de pièces telles que les pièces de forme complexe n'a pas été vérifiée. Vukelic et al. [91], ont proposé une méthode pour optimiser le placement des éléments de positionnement et les éléments de serrage de la fixation pour l'usinage de pièces en plastique en utilisant une déformation minimale des pièces comme fonction objective.

### **1.2.3.3 Le choix des éléments de fixation (Clamping) :**

Les problèmes liés à la stabilité de la pièce sur son support lors de l'usinage, les comportements dynamique du système d'usinage, ainsi que les séquences et les forces de serrage, ont une grande influence sur la rigidité et la performance globale du système de fixation. Plusieurs travaux de recherche sont consacrés pour traiter ce volet de recherche.

Tao et al. [92], et Cecil [93], ont abordé le problème lié à l'optimisation des forces de serrage, et à la conception des éléments de fixation en tenant compte de la stabilité et de l'équilibre de la pièce. L'effet des forces de serrage et d'usinage sur la déformation de la pièce est traité par Krishnakumar et Melkote [94]. Ils ont proposé une technique d'optimisation basée sur l'algorithme génétique pour trouver la disposition optimale du montage qui minimise la déformation de la pièce usinée lors de l'usinage.

Dongbo et al. [95], ont étudié l'usinage CNC d'aubes à paroi mince de forme par le contrôle de la fixation et de la déformation. Leur montage d'usinage conçu est analysé numériquement à l'aide d'éléments finis et testé expérimentalement. Ils ont constaté que la déformation principale de la fixation de la pale se produit dans les quatre têtes de serrage.

Une méthode multi-objective mise en œuvre avec ANSYS a été utilisée par Cioata et al. [96], pour optimiser la position et l'amplitude de la force de serrage lors de fraisage d'un canal dans une pièce prismatique. Au cours de leur processus d'optimisation, ils minimisent le déplacement total maximal et la contrainte équivalente maximale dans la pièce usinée. Ils ont constaté que dans certaines zones, l'amplitude de la force de contact est proche de zéro, par conséquent, ils ont conclu que ces zones doivent être évitées pour appliquer des forces de serrage.

La déformation statique des pièces usinées due à la force de serrage est discutée par Gonzalo et al. [97]. Ils ont utilisé le concept de montage intelligent pour minimiser la déformation de la pièce. Bien que leur approche donne des résultats satisfaisants, il existe quelques limitations liées à la taille et à la complexité des systèmes dans certaines applications.

La conception et la fabrication de montages d'usinage pour les pièces avec des surfaces de forme libre et une géométrie complexe posent plusieurs défis en termes de choix de placement du localisateur, de répétabilité et de précision du positionnement, et d'interchangeabilité des pièces usinées. Comme présenté ci-dessus, diverses approches et techniques d'optimisation existent et sont appliquées dans de nombreux types de recherche publiés ; cependant, des montages d'usinage robustes et fiables pour relever les défis industriels sont toujours nécessaires.

De plus, jusqu'à présent, seuls quelques travaux traitent des performances des montages d'usinage qui affectent la précision dimensionnelle et géométrique des pièces usinées [98], [99].

### **I.3 Procédés de fabrication de pièces de forme complexe :**

L'expression "fabrication de forme libre" décrit un nombre croissant de technologies et de processus qui fabriqueront une partie de n'importe quelle géométrie directement à partir d'un modèle CAO solide avec ou sans aucun outil, montage ou intervention humaine. La technologie est devenue commercialement disponible à la fin des années 1980 avec l'apparition des machines de « stéréo-lithographie ». Depuis lors, un certain nombre d'autres machines et procédés sont apparus. La fabrication des formes libres a de nombreux noms, le prototypage rapide est le plus courant ; cependant, la fabrication de formes libres solides, la réalisation rapide de produits et la fabrication en couches sont également couramment utilisées [100]. Concernant la fabrication des surfaces de forme libre par usinage, de nouveaux procédés ont été proposés.

Bo et al. [101], ont proposé un algorithme pour trouver des patches sur des surfaces de forme libre qui peuvent être usinées par le flanc d'un outil de coupe conique, et ils ont étendu leur

travail pour trouver le chemin initial pour l'usinage CNC de flanc à cinq axes avec un outil de coupe général [102], Calleja et al. [103], ont également développé un algorithme pour générer les trajectoires de fraisage de flanc pour l'usinage de surfaces de forme libre à l'aide d'un outil de fraisage conique. L'utilisation du flanc d'un outil de coupe peut augmenter l'efficacité de la fabrication des surfaces de forme libre. Étant donné que les surfaces d'engrenage peuvent être traitées comme des surfaces de forme libre, nous pouvons également trouver les informations relatives à la fabrication de surfaces de forme libre à partir de la fabrication d'engrenages. Alvarez et al. [104], ont présenté des stratégies d'usinage et des paramètres utilisés à différentes étapes pour fraiser les surfaces d'engrenages coniques en spirale à l'aide du logiciel NX CAD/CAM.

Ferhat et al. [105], ont présenté une initiative de reproduire un objet de forme complexe tel que les empreintes d'un moule, le modèle CAO est développé suivant le processus de l'ingénierie inversée (Reverse Engineering) qu'est composée de trois étapes : 1) digitalisation, 2) traitement du nuage de points et 3) reconstruction du modèle CAO de l'objet. Azzam [106], a proposé une méthode qui consiste à recalculer la trajectoire d'outil du modèle nominale d'une prothèse, sur un modèle digitalisé par une technique de mesure sans contact. Un brut de prothèse obtenu par moulage qu'a subi des déformations, à cause des contraintes résiduelles générées par le processus de transformation de phase du gradient de température, lors du refroidissement. L'adaptation de la trajectoire est basée sur l'algorithme ICP (Iterative Closest Point), pour aligner et recalculer la surface brute mesurée sur la trajectoire d'outil nominale, en but d'enlever la surépaisseur désirée sur la surface brute.

Pessoles & Tournier [107], ont proposé une technique de polissage automatique sur un centre de fraisage 5 axes afin d'utiliser les mêmes moyens de production de l'usinage au polissage et de réduire les coûts. Et ils ont développé des algorithmes spéciaux pour calculer les emplacements des fraises 5 axes sur des cavités de forme libre afin d'imiter les compétences des travailleurs. Celles-ci sont basées à la fois sur les courbes de remplissage et les courbes trochoïdales. La force de polissage est assurée par la conformité de l'outil passif lui-même et mise en place par calibration entre déplacement et force à partir d'un capteur de force. La conformité de l'outil permet d'éviter les effets d'erreur cinématique sur la pièce lors des déplacements de l'outil 5 axes. L'efficacité de la méthode en termes de qualité de rugosité de surface et de simplicité de mise en œuvre est démontrée par des expérimentations sur un centre d'usinage 5 axes avec table rotative et inclinable.

Makki et al. [108], ont traité de la faisabilité de la duplication directe d'objets physiques par rapport à une approche classique basée sur la rétro-ingénierie. L'acquisition de la surface de l'objet est réalisée à l'aide de dispositifs optiques. Des algorithmes de génération de trajectoire d'outil directement à partir du nuage de points ont été développés en usinage 3 axes. Une simulation n-buffer complétée par l'usinage réel souligne que la duplication directe est efficace en termes de conformité à la géométrie. L'étape de reconstruction de surface étant supprimée, le procédé proposé est plus rapide et plus simple à mettre en œuvre. La dernière étape concerne l'extension à l'usinage 5 axes discrets. Le problème principal est lié à la détermination des configurations des pièces et à la segmentation correspondante du nuage de points.

Pechard et al. [109], ont traité la génération de trajectoires de fraisage 5 axes optimisées. Ils ont remarqué que dans le cadre de l'usinage à grande vitesse 5 axes, les trajectoires oscillatoires peuvent pénaliser l'efficacité du processus. De plus, le contrôle de la régularité de la trajectoire est aussi essentiel que le contrôle des écarts géométriques. A cet effet, la méthode Geo5XF basée sur la représentation surfacique de la trajectoire de l'outil a été développée. En fraisage en dépouille, cette surface, également appelée surface d'usinage (SU), est le lieu géométrique de la surface réglée des axes de l'outil définissant la trajectoire. Basée sur un premier positionnement, la méthode vise à minimiser globalement les écarts géométriques entre la surface enveloppe du mouvement de l'outil et la surface conçue en déformant la surface d'usinage, tout en préservant la régularité de la trajectoire. L'énergie de déformation de la SU est utilisée comme indicateur de la régularité. Ainsi, dans la plupart des cas, les résultats obtenus avec Geo5XF montrent que des trajectoires d'outils à énergie minimale conduisent à un temps d'usinage minimal. Comme les écarts géométriques ne sont pas minimisés pour des trajectoires d'outils à énergie minimale, ils ont trouvé un compromis pour trouver la meilleure solution.

Lartigue et al. [110], ont résumé des travaux pour définir des formats de trajectoire d'outil bien adaptés à l'usinage à grande vitesse (HSM). Les avantages de l'utilisation de formats polynomiaux natifs, calculés directement à partir du modèle CAO, sont mis en évidence. En particulier, les formats de surfaces polynomiales sont présentés comme un format générique pour la trajectoire de l'outil. Les illustrations montrent que les formats de surface représentent un bon compromis entre le temps d'usinage de polissage et la qualité de surface.

Tournier et al. [111], ont conclu qu'il est difficile d'atteindre le niveau de qualité recherché par l'extraction de la géométrie nominale, ou sa re-modélisation sous forme de trajets d'usinage et que son suivi par la commande numérique demande de nombreuses approximations. A cet effet, ils ont introduit donc un modèle surfacique de trajectoire d'usinage qui permet de la

surface de classe A à l'usinage sur la machine-outil de garantir l'exigence de qualité requise et la conformité aux exigences fonctionnelles.

En fraisage 5 axes sur des surfaces sculptées, Tournier & Duc [42], ont présenté une nouvelle méthode de calcul des trajectoires d'outil à hauteur de crête constante. Du fait que, les méthodes de calcul des trajectoires d'outil iso-crêtes sont basées sur des approximations. La hauteur de crête tentée est modélisée dans un plan donné pour assurer un calcul rapide de la trajectoire de l'outil. Ils ont proposé une approche différente, basée sur le concept de surface d'usinage, qui assure un calcul plus précis. Dans leur approche, la surface d'usinage définit la trajectoire de l'outil comme une surface, qui s'applique en fraisage 3 ou 5 axes avec les outils de coupe habituellement utilisés. La surface d'usinage définit une modélisation bi-paramétrique d'une surface géométrique d'un point particulier de l'outil, et la surface isocrête permet de retrouver facilement les emplacements des centres d'outil isocrête. Dans ce contexte, une implémentation des algorithmes se fait sur une surface de forme libre avec une fraise spéciale en fraisage 5 axes.

Salloum [112], a proposé une approche qui consiste à fabriquer des pièces de forme complexe qui font parties des mécanismes prototypes fonctionnels. Cette approche a comme principe la décomposition de la pièce complexe en plusieurs pièces simples assemblées, appelées "strates assemblées", réalisables sur machine d'usinage à grande vitesse 5 axes, sur des montages d'usinage standards. Les pièces simples vont devoir être assemblées dans un mécanisme, ce qui implique qu'elles présentent des surfaces fonctionnelles, ce qui pose un problème de choix du tranchage pour éviter ces zones fonctionnelles. Cette approche appelée URP (Usinage Rapide de Prototypage), se différencie des autres méthodes de strato-conception par : 1) des couches épaisses assemblées dans toutes les directions, 2) des surfaces de jonction pas forcément planes, 3) des usinages réalisés dans l'épaisseur de plaques.

## **I.4 Inspection des pièces de forme complexe :**

La précision dans l'usinage à commande numérique par ordinateur (CNC) est cruciale pour les fabricants dans leur quête d'une meilleure productivité. Lors de la planification du processus d'usinage, divers facteurs doivent être pris en compte, de la conception de la pièce à la fabrication et enfin à l'inspection, qui influencent tous la qualité finale de la pièce.

En ingénierie, les pièces avec des surfaces de forme libre sont généralement mesurées par des machines de mesure de coordonnées tridimensionnelles (MMT), un bras de mesure tridimensionnelle de haute précision, scanner optique, et scanner de tomodensitométrie (TDM) ou computed tomography (CT) scanner [113], [114], (figure I.33 a, b, c et d). La technique de

balayage optique et la tomodensitométrie se sont développées rapidement ces dernières années. Cependant, en raison de l'effet de nombreux facteurs tels que la rugosité de surface ou l'état de la lumière, l'application de ces techniques est relativement limitée. En fait, en raison de sa grande précision et de sa flexibilité, la MMT est toujours l'appareil le plus couramment utilisé dans les applications industrielles [115].

En règle générale, l'inspection d'une surface de forme libre avec une MMT consiste à comparer un certain nombre de points de mesure avec le modèle CAO nominal [116]. Les surfaces étant mesurées point par point, le temps et les coûts d'inspection sont directement proportionnels au nombre de points de mesure. Cependant, les gens choisissent toujours d'augmenter le nombre de points de mesure pour améliorer la précision de l'inspection, ce qui entraîne une augmentation du temps et des coûts d'inspection [117].

Pour résoudre ce problème, les chercheurs ont consacré leurs efforts dans ce domaine. Selon que le nombre de points de mesure est déterminé ou non à l'avance, ces recherches peuvent être grossièrement classées en deux grandes catégories [118]. Dans la première catégorie, le nombre et les positions des points de mesure sont planifiés en temps réel pendant le processus de mesure. Dans la deuxième catégorie, la position et le nombre de points de mesure sont déterminés à partir du modèle CAO nominal. Jotic et al. [119], ont divisés Les méthodes de mesure en deux catégories : les mesures avec contact et les mesures sans contact. Bien que les deux méthodes de mesure soient largement utilisées dans l'acquisition de données en mesure ou en ingénierie inverse (RE), il a été montré que chaque technique a ses propres caractéristiques et limites [120].

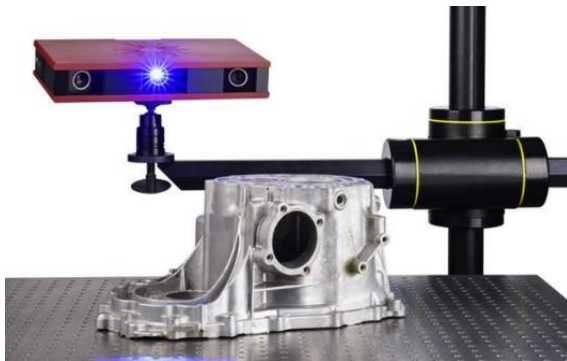
Les méthodes des machines à mesurer tridimensionnelles tactiles (MMT) sont largement utilisées pour la métrologie dimensionnelle en raison de leur grande précision. Pour des applications d'ingénierie inverse sur des pièces de forme complexe usinées, le processus de génération de l'ensemble initial de points prend beaucoup de temps [121]. La vitesse de mesure, de l'ordre de 60 points maximum par minute et la limitation de l'accessibilité des MMT représentent un sérieux inconvénient pouvant entraîner une baisse de compétitivité industrielle [122]. Une approche alternative est représentée par la numérisation sans contact des surfaces basée sur des techniques optiques, par exemple le balayage laser. Une méthode de triangulation est appliquée sur une surface mesurée pour obtenir des données de nuage de points au scanner laser 3D. Les avantages de cette méthode de mesure permettent de générer un grand nombre de points en temps opportun. Cela en fait un choix courant dans les applications RE et les méthodes de contrôle qualité des surfaces de forme libre [123].



a) machine MMT à contact et à distance



b) Bras de mesure tridimensionnelle à contact et à distance



c) scanner optique à distance



d) Station CT à distance

*Figure I.33 : Appareils de mesure tridimensionnelle*

## Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le processus d'élaboration des pièces de forme complexes. Dans un premier lieu, nous avons abordé le processus CFAO et les différents volets en relation, notamment les problèmes liés à la conception et la modélisation des pièces de forme libre. Dans un second lieu, on a présenté les différents facteurs influençant l'usinage des pièces de forme complexe, comme les erreurs machines, le bon choix de montage d'usinage et les éléments en relation. Dans un troisième lieu, la présentation des différents procédés récents pour la fabrication des pièces de forme complexe. Finalement, le volet inspection des pièces de forme complexe qu'est le plus important dans le processus d'élaboration.

La contribution de ce travail, est donc de proposer une méthode pour automatiser le processus de conception de montage d'usinage, pour réduire la dépendance à l'expertise du concepteur humain. La méthodologie de conception du nouveau montage d'usinage se concentrera sur une application industrielle consistant en l'usinage d'une ailette mobile située dans le deuxième étage d'une turbine à gaz GE FRAME 9000.

# Chapitre II : Optimisation géométrique de la disposition des éléments d'appuis en se basant sur le concept de coordonnées plückeriennes.

## II.1 Introduction :

Dans l'industrie manufacturière, il existe plusieurs types de pièces de formes complexes possédant diverses fonctions. Les aubes de turbine (ailettes et directrices) sont l'un des composants les plus importants des turbines à gaz. Cependant, ces aubes ont des formes complexes et une courbure de surface irrégulière qui les rendent difficiles à usiner. La production de ce type de pièces est assez compliquée et nécessite un contrôle élevé du processus d'usinage, une programmation CNC avancée, des outils innovants et des montages spéciaux permettant de maintenir exactement et de manière rigide dans une position unique de la pièce pendant l'usinage. Afin d'améliorer la productivité et de réduire le temps de fonctionnement, augmentant ainsi la qualité des pièces, le montage d'usinage doit répondre à plusieurs exigences telles que permettre un emplacement correct avec sécurité et répétabilité de la pièce ainsi que maintenir la conformité et l'interchangeabilité des pièces usinées. La contribution de ce travail est donc de proposer une méthode pour automatiser le processus de conception de montage d'usinage pour réduire la dépendance à l'expertise du concepteur humain. La méthodologie de conception du nouveau montage d'usinage se concentrera sur une application industrielle consistant en l'usinage d'une ailette mobile située dans le deuxième étage d'une turbine à gaz GE FRAME 9000. Dans cette partie on va présenter une approche d'optimisation qui réside dans l'application de la méthode des coordonnées plückeriennes pour choisir le placement du localisateur de pièces de forme complexe. Le choix de l'emplacement du localisateur pendant le processus de conception de l'appareil est effectué sur la base de la maximisation du déterminant et de la minimisation du numéro de condition de la matrice de localisation (matrice d'information).

## II.2 Principe de l'approche :

L'approche proposée pour le développement d'un montage d'usinage des pièces de formes complexes, est une nouvelle approche d'optimisation, qui utilise la méthode des coordonnées plückeriennes pour choisir le placement du localisateur de pièces de forme complexe, sur la base de la maximisation du déterminant et de la minimisation de facteur de conditionnement de la matrice de localisation (matrice d'information). Selon Duret et al. [90], deux indicateurs de qualité puissants peuvent être utilisés pour évaluer la répétabilité de la localisation de la pièce et, par conséquent, évaluer la qualité d'un montage d'usinage. Ces indicateurs sont le déterminant  $D$  (fonction objective principale) de la matrice d'information de placement des localisateurs et son conditionnement  $K$  (fonction objective secondaire).

### II.3 Contexte et objectifs :

La fabrication d'aubes de turbines par tout type d'usinage tel que meulage, fraisage, EDM (électroérosion), ECM (usinage électrochimique), et même par Laser, nécessite un référentiel bien défini et unique. Ce référentiel est généralement défini par le concepteur pour assurer le positionnement des aubes dans l'espace 3D au niveau de la roue (étage) du rotor de turbine. Le montage d'usinage de cette étude de cas est conçu en se référant à ce référentiel spécifié dans le modèle 3D (IGES) de l'aube de turbine à gaz (coulée).

Ce montage d'usinage contiendra six (06) éléments de positionnement indépendants, ce qui éliminera les six (06) degrés de liberté de l'ailette. Les six points seront répartis sur la surface de fixation au niveau de la pale (Figure II.1) sur la base d'une approche d'optimisation discutée dans ce travail.

Un tel montage est destiné à être utilisé dans un centre d'usinage vertical (VMC) 5 axes pour établir le système de référence au pied de la pale, et également pour contrôler la pale après usinage à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).

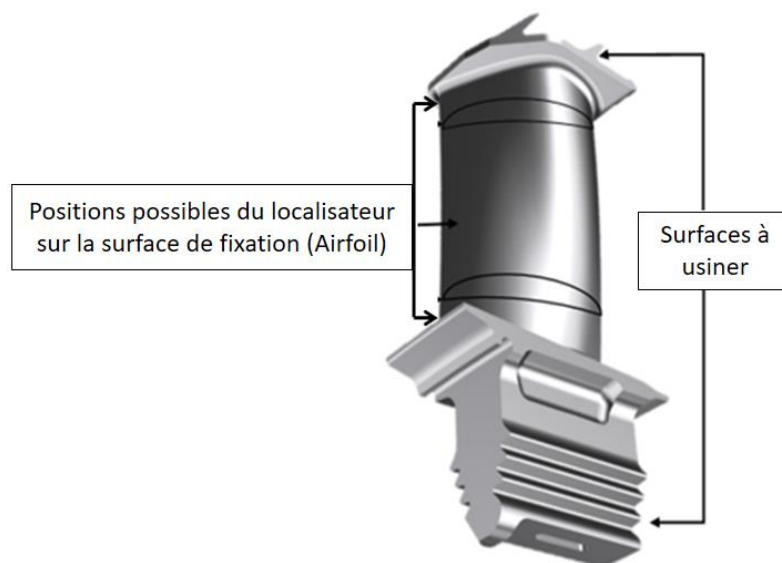


Figure II 1: Schéma de l'ailette montrant les positions possibles des positionneurs et les surfaces à usiner

La figure II.2, montre une aube de turbine, où les éléments de positionnement et les éléments de serrage sont placés sur la pale d'ailette (le profil aérodynamique) aux sections AA, BB et CC. Les surfaces à usiner en pied (Root) et en chapeau (Tip) de l'ailette sont également représentées sur cette figure. L'effet des sections AA, BB et CC sur la répétabilité de la localisation est également discuté dans cette étude.

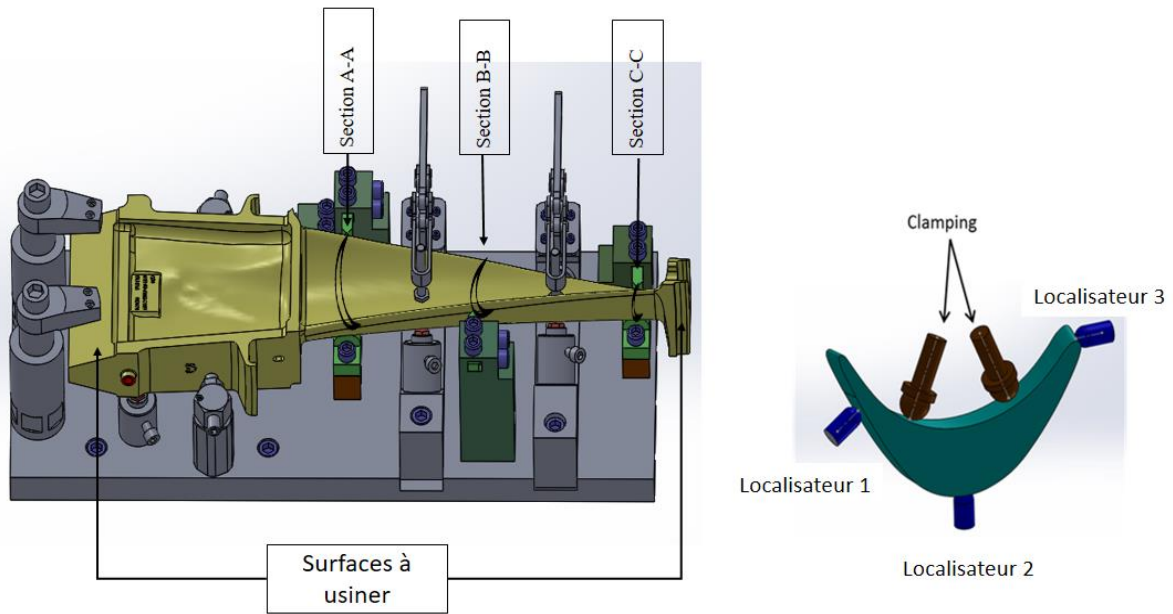


Figure II 2: Disposition réelle des éléments de positionnement et de serrage de notre montage sur une aube de turbine

L'objectif principal de cette étude à travers ce montage est de créer un nouveau système de référence sur le pied de l'ailette par le transfert et l'élimination de cinq éléments de positionnement équivalents aux cinq degrés de liberté (03 translations et 02 rotations) situant sur la pale de l'ailette. Les nouveaux éléments de positionnement sont des contacts coniques, l'un doit être fixe et l'autre mobile (Figure II.3).

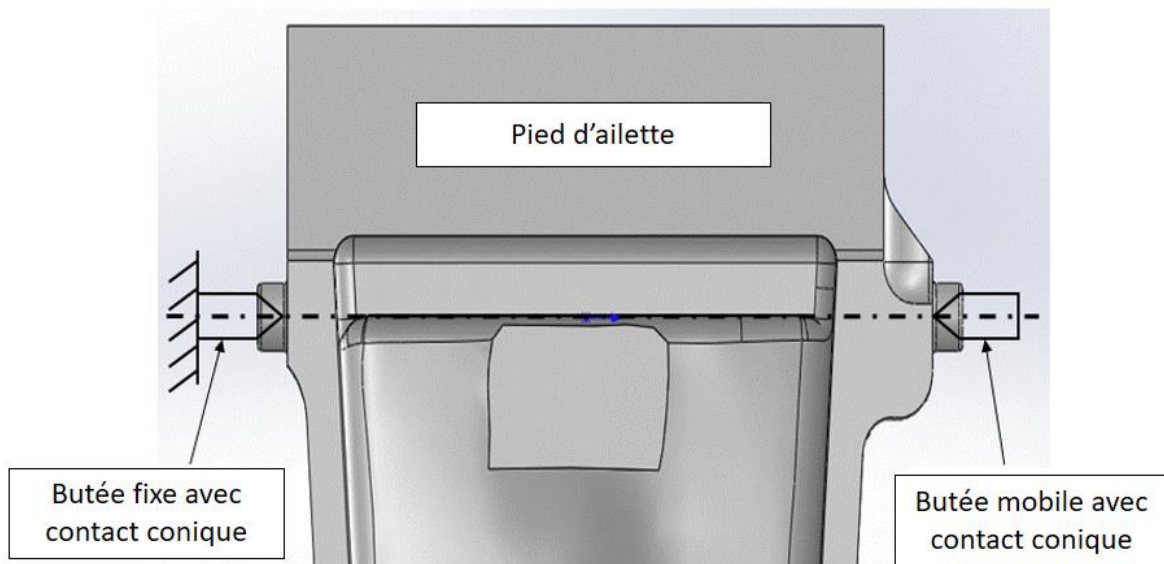


Figure II 3: Schématisation du nouveau référentiel après transfert

## II.4 Choix de positions des éléments d'appuis :

Au cours de ce travail, nous supposons que la pièce à usiner se comporte comme un corps rigide et que notre étude se limite uniquement à la pale de l'aube (la partie contenant les six points d'appuis). La qualité du montage d'usinage sera évaluée en vérifiant deux indicateurs de qualité, qui sont le déterminant  $D$  et le conditionnement  $K$  de la matrice des coordonnées de Plücker (matrice d'information). Donc, la matrice d'information est utilisée pour déterminer le placement du localisateur pendant le processus de conception [69].

### II.4.1 Le modèle géométrique d'un MU :

Le modèle géométrique de cet montage est basé sur le concept de torseur de petits déplacements TPD (Small Displacement Torsor, SDT) [124], [125]. Un TPD s'exprime à l'aide de deux vecteurs : le vecteur  $\vec{\Omega}_{S/R}$  comprend trois petites rotations ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) et le vecteur  $\vec{D}_o$  comprend trois petites translations ( $u, v, w$ ) dans un système de coordonnées ( $O x y z$ ).

#### II.4.1.1 Mesure de déplacement :

Un solide, non contraint dans l'espace, a trois translations et trois rotations. Il a six degrés de liberté. Le déplacement d'une pièce sur un montage caractérise l'ensemble de positions qui sont proches de la position cible. Si les déplacements sont faibles (par rapport à sa dimension géométrique), la transformation géométrique qui passe d'une position cible à une position réelle (ou vice versa) peut être modélisée par un TPD [90].

$$\{D\} = \left\{ \vec{\Omega}_{S/R} \quad \vec{D}_o \right\} = \left\{ \begin{array}{cc} \alpha & u_o \\ \beta & v_o \\ \gamma & w_o \end{array} \right\}_o \quad (\text{II.1})$$

Un déplacement global peut être défini par six scalaires correspondants. A noter que le déplacement en translation (en mm) est modélisé par un champ de couple.

$$\vec{D}_{Pi} = \vec{D}_o + \vec{\Omega}_{S/R} \wedge \vec{OP}_i \quad (\text{II.2})$$

Elle peut être réécrite sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} u_{Pi} \\ v_{Pi} \\ w_{Pi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_o \\ v_o \\ w_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{Pi} \\ y_{Pi} \\ z_{Pi} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

La mesure de la qualité de la localisation dépend de ces six scalaires de grandeur. Le choix des points de contact du couple pièce-montage influencera fortement cette mesure.

### II.4.1.2 Coordonnée de la ligne de Plücker:

Pour définir les données de la matrice d'information de placement des localisateurs, un point de contact  $P_i$  entre la pièce et le montage d'usinage est d'abord défini, et après avoir défini le plan tangent, la droite normale  $N_i$  passant par le point de contact  $P_i$  est ensuite créée comme le montre la figure II.4 [69].

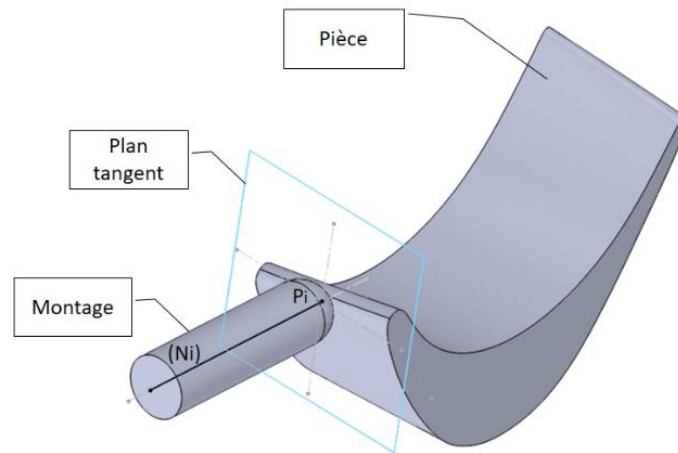


Figure II 4: Ligne normale  $(N_i)$  au point de contact  $P_i$

NB : le point  $P_i$  peut être pris n'importe où sur la droite normale  $(N_i)$ .

En supposant que l'ensemble machine-outil/montage d'usinage soit associé à un système de coordonnées  $R (O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ , par conséquent, chaque droite normale peut être définie par ses coordonnées plückeriennes [69], [126], comme le montre la figure II.5.

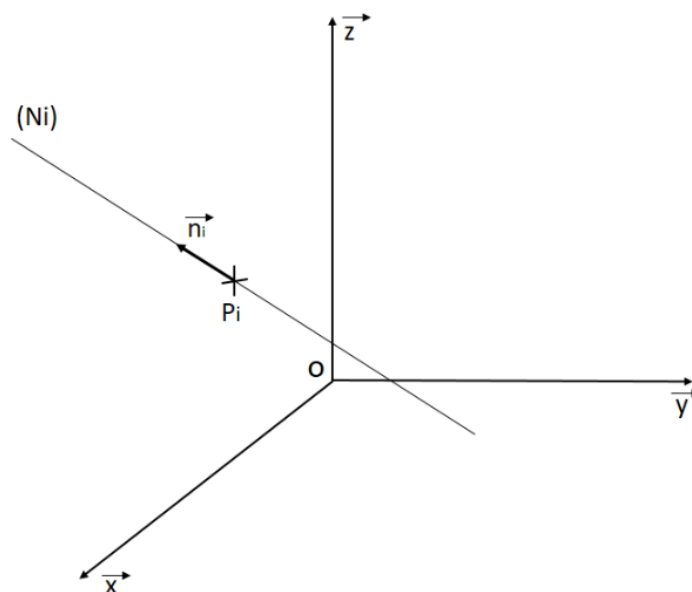


Figure II 5: Position de la ligne  $(N_i)$  dans le système de coordonnées  $R$

$$\vec{n}_i \begin{vmatrix} n_{xi} \\ n_{yi} \\ n_{zi} \end{vmatrix} \quad \text{Et} \quad \overrightarrow{OP}_i \begin{vmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{vmatrix}$$

Où  $\vec{n}_i$  est le vecteur d'unité de  $N_i$ .

Le produit vectoriel est calculé comme suit :

$$\vec{V}_{oi} = \overrightarrow{OP}_i \wedge \vec{n}_i \quad (\text{II.4})$$

Les coordonnées plückeriennes sont définies par les six quantités scalaires (composantes) suivantes [126].

$$\{Pi\} = \begin{cases} \vec{n}_i \\ \overrightarrow{OP}_i \wedge \vec{n}_i \end{cases} = \begin{cases} n_{xi} \\ n_{yi} \\ n_{zi} \\ y_i \cdot n_{zi} - z_i \cdot n_{yi} \\ z_i \cdot n_{xi} - x_i \cdot n_{zi} \\ x_i \cdot n_{yi} - y_i \cdot n_{xi} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Ces six composants sont dépendants et ont la relation suivante :

$$\begin{cases} n_{xi}^2 + n_{yi}^2 + n_{zi}^2 = 1 \\ \vec{n}_i \cdot \vec{V}_0 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Donc,

$$n_{xi}(y_i n_{zi} - z_i n_{yi}) + n_{yi}(z_i n_{xi} - x_i n_{zi}) + n_{zi}(x_i n_{yi} - y_i n_{xi}) = 0 \quad (\text{II.7})$$

Selon Duret [126], la matrice d'information de placement du localisateur peut être présentée comme suivant en développant la relation (II.5):

$$\{Pi\} = \begin{vmatrix} n_{x1} & n_{x2} & n_{x3} & n_{x4} & n_{x5} & n_{x6} \\ n_{y1} & n_{y2} & n_{y3} & n_{y4} & n_{y5} & n_{y6} \\ n_{z1} & n_{z2} & n_{z3} & n_{z4} & n_{z5} & n_{z6} \\ y_1 \cdot n_{z1} - z_1 \cdot n_{y1} & V_{ox2} & V_{ox3} & V_{ox4} & V_{ox5} & y_6 \cdot n_{z6} - z_6 \cdot n_{y6} \\ z_1 \cdot n_{x1} - x_1 \cdot n_{z1} & V_{oy2} & V_{oy3} & V_{oy4} & V_{oy5} & z_6 \cdot n_{x6} - x_6 \cdot n_{z6} \\ x_1 \cdot n_{y1} - y_1 \cdot n_{x1} & V_{oz2} & V_{oz3} & V_{oz4} & V_{oz5} & x_6 \cdot n_{y6} - y_6 \cdot n_{x6} \end{vmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$V_{oxi} = y_i n_{zi} - z_i n_{yi} \quad (\text{II.9})$$

$$V_{oyi} = z_i n_{xi} - x_i n_{zi} \quad (\text{II.10})$$

$$V_{oz i} = x_i n_{yi} - y_i n_{xi} \quad (\text{II.11})$$

### ***II.4.1.3 Rang d'un système de lignes:***

Les six lignes normales ( $N_1$ ) à ( $N_6$ ) forment un système de lignes. L'ordre des plus grands déterminants non nuls, que l'on peut extraire de la matrice (II.8) à partir des coordonnées linéaires de Plücker, appartient au système linéaire. Il est nommé rang d'un système de lignes, notation « r ».

$$\text{Rank } \{P_i\} = r$$

NB : le rang maximum d'un système de lignes est de 6.

### ***II.4.1.4 Théorème de Hunt :***

*Théorème* : Soit r le rang du système de droites (S) (droites normales aux contacts), les degrés de liberté restants entre deux solides sont définis à l'aide de l'équation suivante :

$$d = 6 - r. \tag{II.12}$$

## **II.4.2 Méthodologie d'optimisation :**

### ***II.4.2.1 Première étape d'optimisation :***

A partir de la matrice  $6 \times 6$  de (II.8), le déterminant associé est calculé. Si ce déterminant est nul, cela signifie que le rang du système ( $\text{rank } P_i$ ) n'est pas égal à 6, le mécanisme conserve des degrés de liberté et, par conséquent, le montage d'usinage ne remplit pas parfaitement ces fonctions.

Le deuxième indicateur de qualité est le conditionnement K de la matrice  $\{P_i\}$ . Il est bien connu qu'une matrice est bien ou mal conditionnée selon que son conditionnement est petit (proche de 1) ou grand. Les matrices mal conditionnées ont souvent un conditionnement élevé et un déterminant proche de 0.

Pratiquement, la force de serrage (Figure II.6) peut affecter la localisation de la pièce et doit être prise en compte lors de la conception et de l'évaluation de la qualité d'un montage d'usinage.

Pour l'équilibre statique, les forces de réactions du montage d'usinage sur la pièce ( $F_1, F_2, \dots, F_6$ ) à chaque point de contact sont  $\sum \vec{F}_i$  et un torseur de force externe qui est modélisé par la force de serrage  $\vec{P}$  [126] :

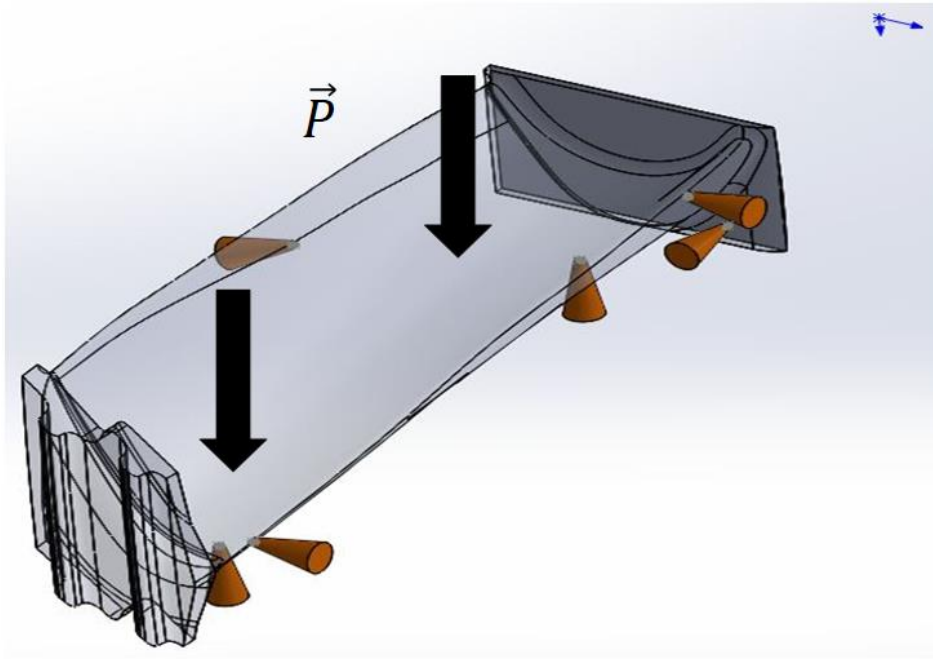


Figure II 6: Positionnement des localisateurs et direction de la force de serrage dans l'aube de turbine

La résultante sur la pièce peut être représentée comme suit :

$$\sum_i F_i \cdot \vec{n}_i = -\vec{P} \quad (\text{II.13})$$

$$\sum_i \overrightarrow{OM}_i \wedge F_i \cdot \vec{n}_i = -\overrightarrow{OM}_p \cdot \vec{P} \quad (\text{II.14})$$

Elle peut être réécrite dans les équations suivantes :

$$[\text{Coord\_Plück}] \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_x \\ -P_y \\ -P_z \\ -y_p \cdot P_z + z_p \cdot P \\ -z_p \cdot P_x + x_p \cdot P \\ -x_p \cdot P_y + y_p \cdot P \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Donc,

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} = [\text{Coord\_Plück}]^{-1} \begin{bmatrix} -P_x \\ -P_y \\ -P_z \\ -y_p \cdot P_z + z_p \cdot P \\ -z_p \cdot P_x + x_p \cdot P \\ -x_p \cdot P_y + y_p \cdot P \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

La variabilité du calcul des forces de contact est étroitement liée au conditionnement K de la matrice de transformation. Où « Coord\_Plück » est la matrice de transformation  $\{Pi\}$ .

Le conditionnement K de la matrice « Coord\_Pluck » peut être calculé pour l'utiliser comme un nouvel indicateur de qualité du montage d'usinage.

$$K = \left\| [Coord\_Plück] \right\|_E \left\| [Coord\_Plück]^{-1} \right\|_E \tag{II.17}$$

$$\left\| [Coord\_Plück] \right\|_E = \sqrt{\sum_i \sum_j Cp_{ij}^2} \tag{II.18}$$

D'où  $(Cp_{ij})$  est un élément de la matrice de « Coord\_Plück ».

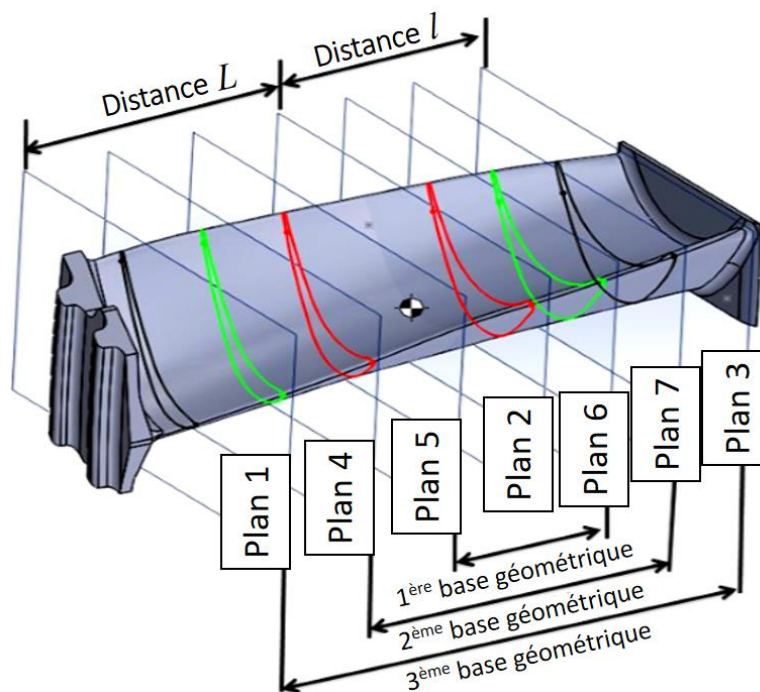


Figure II 7: Présentation des trois bases géométriques

Comme le montre la Figure II.7, la pale de forme aérodynamique de l'ailette (zone potentielle de placement des localisateurs), est géométriquement divisée en trois bases géométriques. Chaque base géométrique est représentée par deux courbes Splines en couleur différente aux deux autres.

La 1<sup>ère</sup> base géométrique (figure II.8) est la plus petite parmi les trois bases géométriques. Elle est représentée par deux courbes splines en couleur rouge. La courbe spline (section I) est distante de  $1/3 L$ , et la courbe spline (section II) est distante de  $1/3 l$ , par rapport au centre de gravité de la pale.

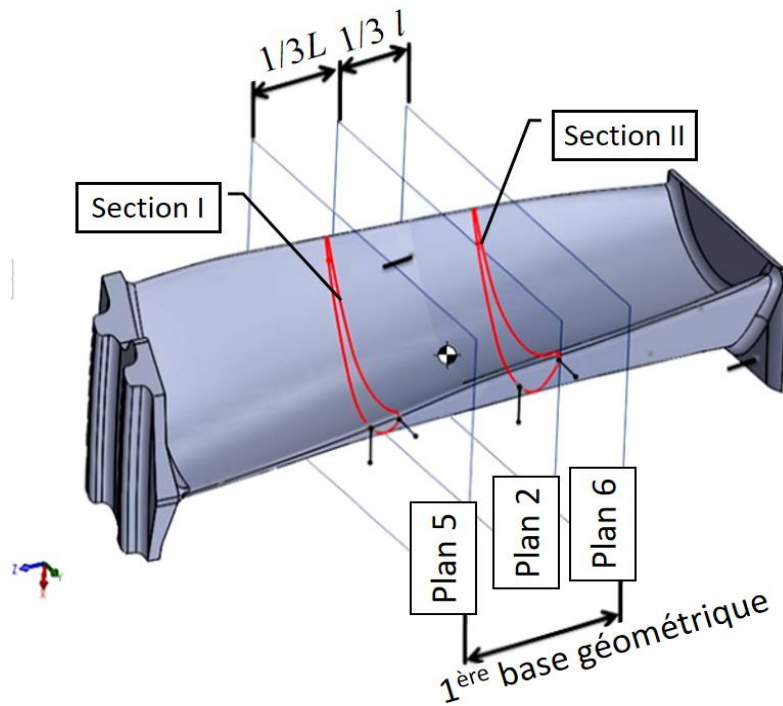


Figure II 8: Présentation de la 1<sup>ère</sup> base géométrique avec les six vecteurs normaux

La 2<sup>ème</sup> base géométrique (figure II.9), est représentée par deux courbes splines en couleur verte. La courbe spline (section I) est distante de  $2/3 L$ , et la courbe spline (section II) est distante de  $2/3 l$ , par rapport au centre de gravité de la pale.

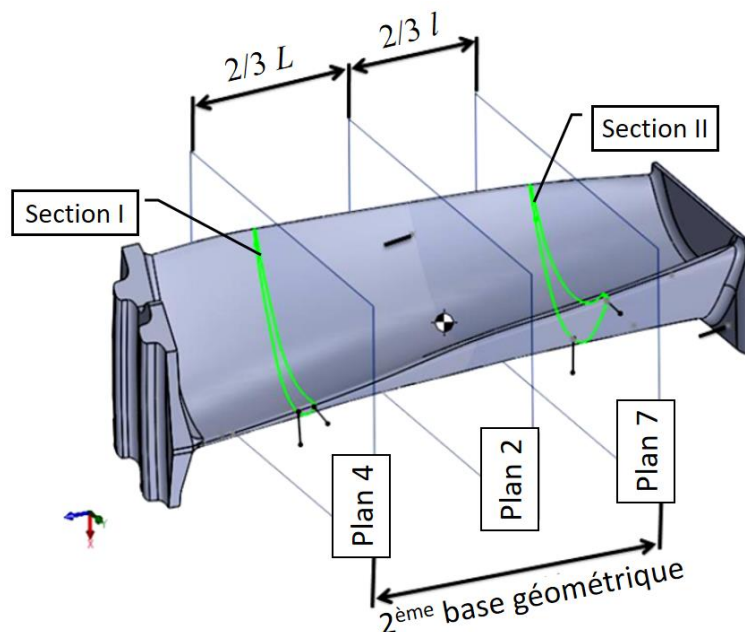


Figure II 9: Présentation de la 2<sup>ème</sup> base géométrique avec les six vecteurs normaux

La 3<sup>ème</sup> base géométrique (figure II.10) est la plus grande parmi les trois bases géométriques. Elle est représentée par deux courbes splines en couleur noire. La courbe spline (section I) est

distante de  $L$ , et la courbe spline (section II) est distante de  $l$ , par rapport au centre de gravité de la pale.

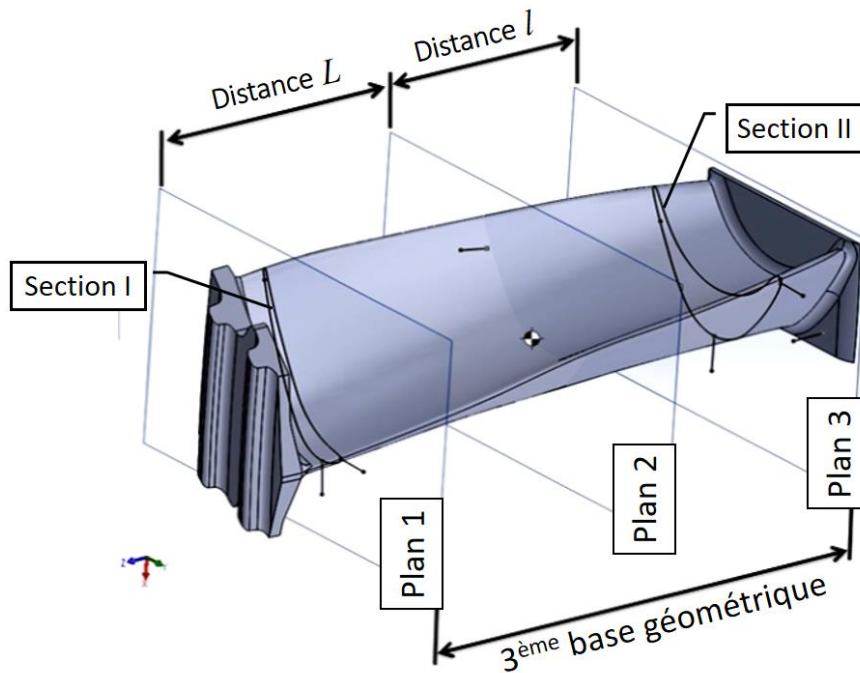


Figure II 10: Présentation de la 3<sup>ème</sup> base géométrique avec les six vecteurs normaux

Les courbes splines de la section I, pour les bases géométriques (1, 2 et 3), sont obtenus respectivement par l'intersection des plans transversaux (plan5, plan4 et plan1), avec la pale de l'ailette. Les courbes splines de la section II, pour les bases géométriques (1, 2 et 3), sont obtenus respectivement par l'intersection des plans transversaux (plan6, plan7 et plan3), avec la pale de l'ailette. Les six vecteurs normaux ( $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_4$  et  $n_5$ ) en couleur noir, qui correspondent respectivement aux points ( $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_4$  et  $p_5$ ), sont les résultantes de l'intersection des plans longitudinaux avec l'enveloppe de la pale au niveau de chaque courbe spline suivant le principe illustré auparavant relatif à la figure II.4.

Les vecteurs normaux ( $n_1$  et  $n_4$ ), appartiennent respectivement aux sections (I et II), pour chaque base géométrique. Ils sont obtenus par l'intersection des plans longitudinaux tangentiels parallèles au plan orthogonal ZX (figure II.11), et la courbe spline de la section I. Les vecteurs normaux ( $n_4$  et  $n_5$ ), appartiennent respectivement aux sections (I et II), pour chaque base géométrique. Ils sont obtenus par l'intersection des plans longitudinaux tangentiels parallèles au plan orthogonal ZY (figure II.11), et la courbe spline de la section II (figure II.12).

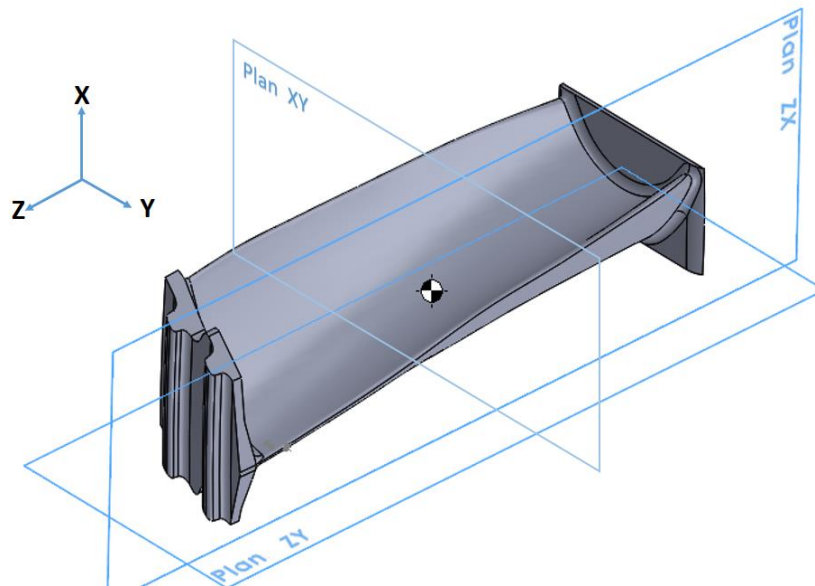


Figure II 11: Représentation des trois plans orthogonaux.

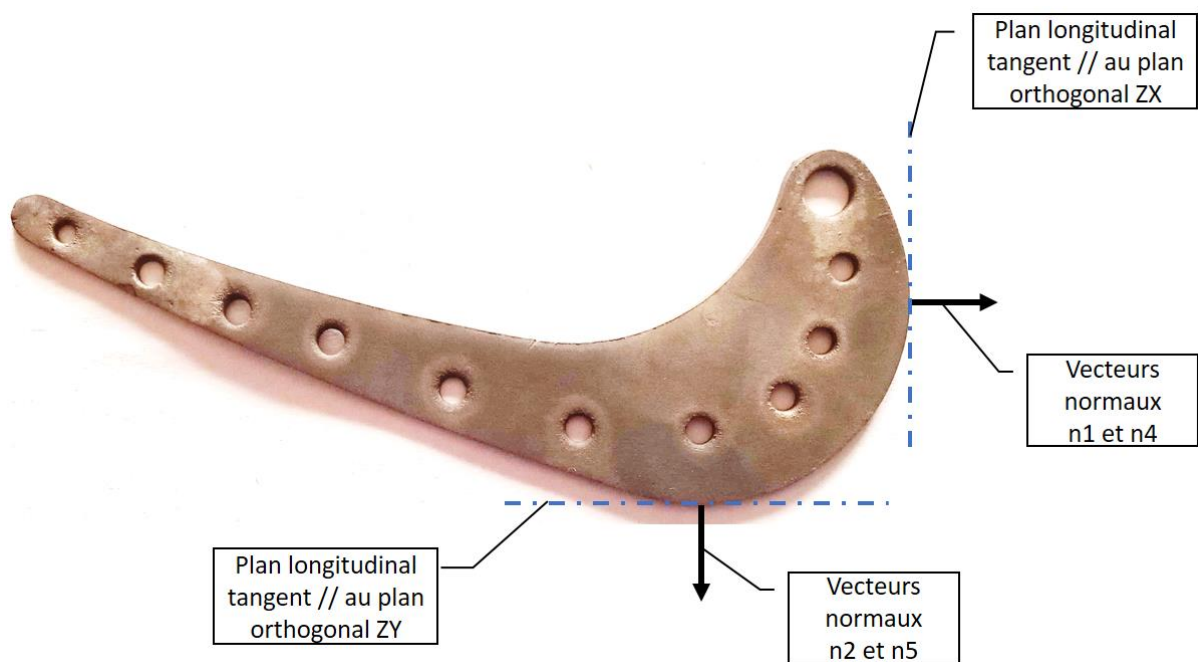


Figure II 12: Représentation des vecteurs normaux au niveau d'une section de la pale

Le vecteur normal  $\vec{n}_i$ , est un vecteur d'unité qui se compose de trois vecteurs ( $\vec{n}_{xi}$ ,  $\vec{n}_{yi}$ ,  $\vec{n}_{zi}$ ) composantes projetés sur les trois plans orthogonaux du système orthonormé  $R(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  figure II.13.

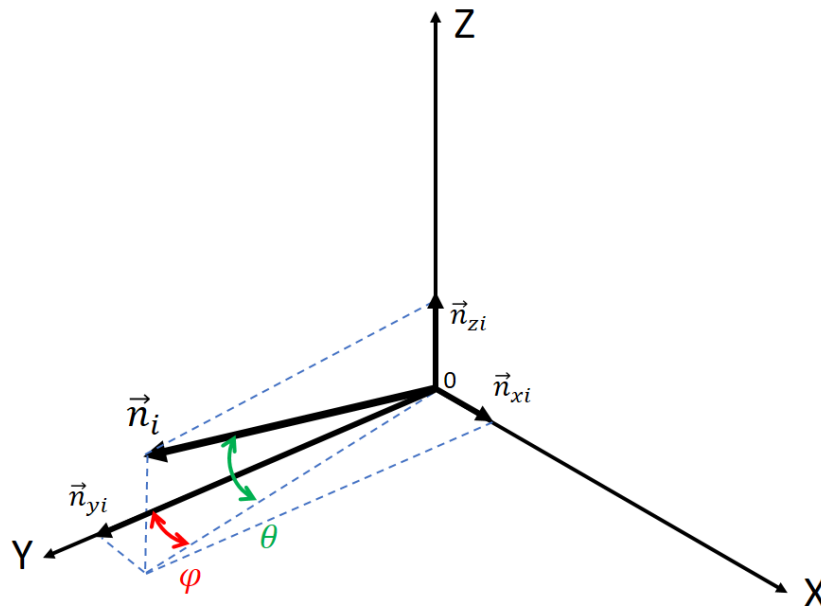


Figure II 13: Représentation du vecteur normal et ces trois composantes

Les trois vecteurs composantes ( $\vec{n}_{xi}$ ,  $\vec{n}_{yi}$ ,  $\vec{n}_{zi}$ ), peuvent être calculés comme suit :

$$\vec{n}_{xi} = \vec{n}_i \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \quad (\text{II.19})$$

$$\vec{n}_{yi} = \vec{n}_i \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \quad (\text{II.20})$$

$$\vec{n}_{zi} = \vec{n}_i \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi \quad (\text{II.21})$$

$$|\vec{n}_i| = \sqrt{n_{xi}^2 + n_{yi}^2 + n_{zi}^2} = 1 \quad (\text{II.22})$$

Les six composantes des coordonnées plückeriennes (tableau 1) pour chaque base géométrique ont ensuite été identifiées (coordonnées cartésiennes  $X_i$ ,  $Y_i$  et  $Z_i$  des six points de référence, et les trois composantes de chaque vecteur normal ( $\vec{n}_{xi}$ ,  $\vec{n}_{yi}$ ,  $\vec{n}_{zi}$ ). Les trois matrices de transformation  $\{P_i\}$  ont été développées (tableau 2). Seule la base géométrique qui maximise le déterminant et minimise le conditionnement de la matrice de transformation est prise en considération lors du processus de conception.

La base géométrique se traduit dans le volume inclut entre les six de points de référence, donc plus que ce volume est grand, plus que le déterminant est max.

Tableau II 1: Les six composantes des coordonnées plückeriennes

	Pt <sub>1</sub>	Pt <sub>2</sub>	Pt <sub>3</sub>	Pt <sub>4</sub>	Pt <sub>5</sub>	Pt <sub>6</sub>
x <sub>i</sub>	x1	x2	x3	x4	x5	x6
Y <sub>i</sub>	y1	y2	y3	y4	y5	y6
Z <sub>i</sub>	z1	z2	z3	z4	z5	z6
n <sub>xi</sub>	n <sub>x1</sub>	n <sub>x2</sub>	n <sub>x3</sub>	n <sub>x4</sub>	n <sub>x5</sub>	n <sub>x6</sub>
n <sub>yi</sub>	n <sub>y1</sub>	n <sub>y2</sub>	n <sub>y3</sub>	n <sub>y4</sub>	n <sub>y5</sub>	n <sub>y6</sub>
n <sub>zi</sub>	n <sub>z1</sub>	n <sub>z2</sub>	n <sub>z3</sub>	n <sub>z4</sub>	n <sub>z5</sub>	n <sub>z6</sub>

A partir de tableau 1, la matrice de coordonnées plückeriennes tableau 2 pour chaque base géométrique peut être établie comme suit :

$$\{Pi\} = \begin{cases} n_{xi} \\ n_{yi} \\ n_{zi} \\ y_i \cdot n_{zi} - z_i \cdot n_{yi} \\ z_i \cdot n_{xi} - x_i \cdot n_{zi} \\ x_i \cdot n_{yi} - y_i \cdot n_{xi} \end{cases} \quad (II.23)$$

Tableau II 2: Matrice de coordonnées plückeriennes pour chaque base géométrique

	Pt <sub>1</sub>	Pt <sub>2</sub>	Pt <sub>3</sub>	Pt <sub>4</sub>	Pt <sub>5</sub>	Pt <sub>6</sub>
n <sub>xi</sub>	n <sub>x1</sub>	n <sub>x2</sub>	n <sub>x3</sub>	n <sub>x4</sub>	n <sub>x5</sub>	n <sub>x6</sub>
n <sub>yi</sub>	n <sub>y1</sub>	n <sub>y2</sub>	n <sub>y3</sub>	n <sub>y4</sub>	n <sub>y5</sub>	n <sub>y6</sub>
n <sub>zi</sub>	n <sub>z1</sub>	n <sub>z2</sub>	n <sub>z3</sub>	n <sub>z4</sub>	n <sub>z5</sub>	n <sub>z6</sub>
V <sub>oxi</sub>	V <sub>ox1</sub>	V <sub>ox2</sub>	V <sub>ox3</sub>	V <sub>ox4</sub>	V <sub>ox5</sub>	V <sub>ox6</sub>
V <sub>oyi</sub>	V <sub>oy1</sub>	V <sub>oy2</sub>	V <sub>oy3</sub>	V <sub>oy4</sub>	V <sub>oy5</sub>	V <sub>oy6</sub>
V <sub>oz1</sub>	V <sub>oz1</sub>	V <sub>oz2</sub>	V <sub>oz3</sub>	V <sub>oz4</sub>	V <sub>oz5</sub>	V <sub>oz6</sub>

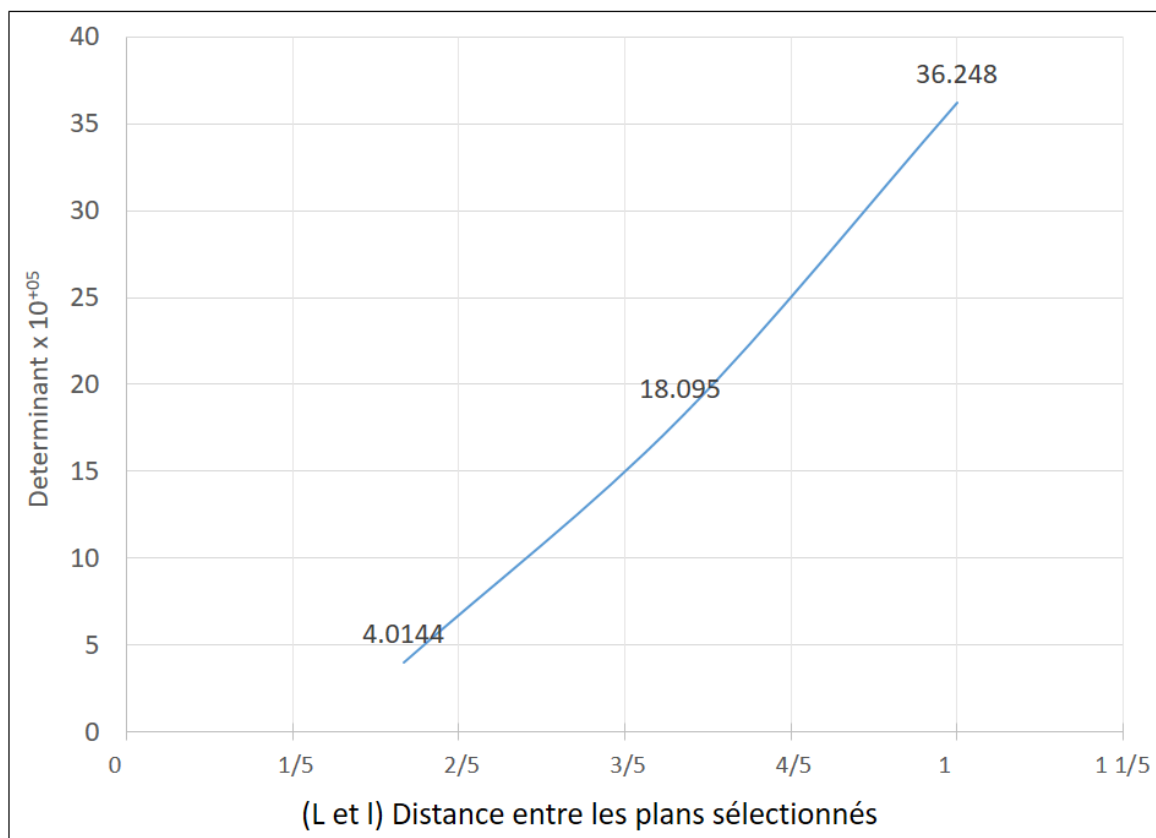


Figure II 14: Variation du déterminant en fonction des bases géométriques

La figure II.14 montre la variation du déterminant de la matrice « Pi » en fonction de la dimension de la base géométrique (six points de positionnement de l'aube de turbine). On peut observer sur cette figure que la 3<sup>ème</sup> base géométrique fournit un déterminant max de  $3,6 \times 10^6$ . On peut également conclure de cette figure que, plus que la « base géométrique » est grande, plus la valeur de déterminant est max aussi.

#### II.4.2.2 Deuxième étape d'optimisation :

Afin d'avoir des résultats d'optimisation plus précis, les angles d'orientation des plans contenant les quatre points de localisation (P1, P2, P4 et P5) situés dans la base géométrique sélectionnée et liés successivement aux vecteurs normaux (n1, n2, n4, et n5) comme le montre la figure II.15 sont inclus dans la procédure d'optimisation.

Pour atteindre cet objectif, les angles d'inclinaison des plans tangentiels à la spline de la section I (contenant P1 et P2) et de la section II (contenant P4 et P5) présentés dans la figure II.15 varient selon la séquence présentée dans le tableau 3. En conséquence, les vecteurs normaux de chaque nouveau plan incliné sont calculés et représentés sur la figure II.16.

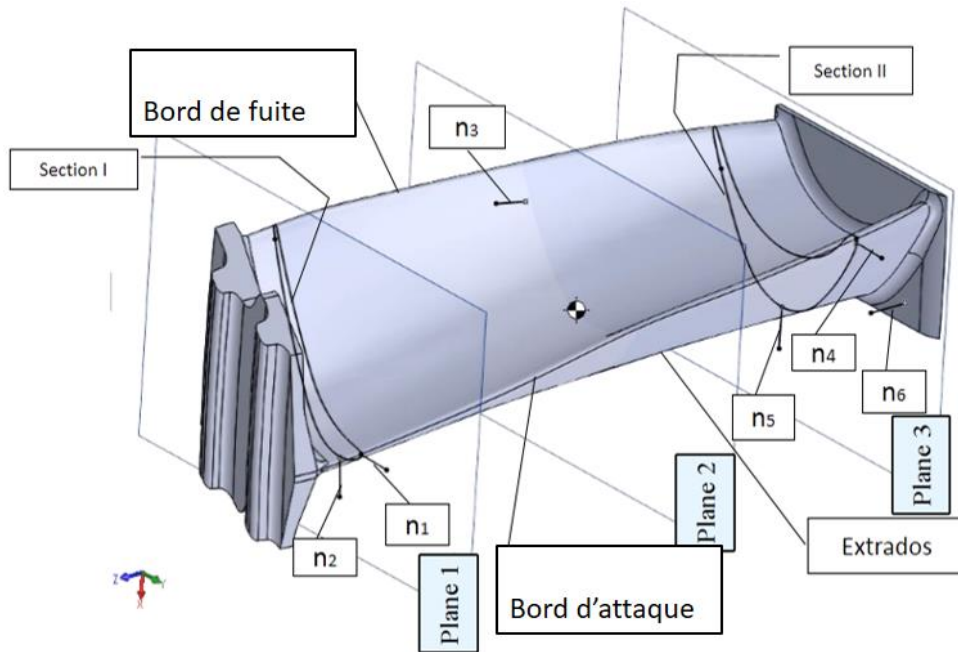


Figure II 15: Représentation des six points d'Isostatisme et leurs vecteurs normaux associés

Tableau II 3: Angles des plans orientés avec leurs vecteurs normaux associés

Couleur du vecteur normal pour chaque nouveau plan orienté	Plans orientés et leurs vecteurs normaux
	n5 normal au plan 0° et n4 normal au plan 90°
	n5 normal au plan 0° et n4 normal au plan 60°
	n5 normal au plan 45° et n4 normal au plan 45°
	n5 normal au plan 60° et n4 normal au plan 60°
	n5 normal au plan 60° et n4 normal au plan 90°
	n5 normal au plan 30° et n4 normal au plan 30°

Toutes ces situations des vecteurs normaux (n1, n2, n4, et n5) aux plans tangentiels associés, liés successivement aux points (P1, P2, P4 et P5) au niveau des deux sections I et II, sont représentées dans la figure II.13 suivante.

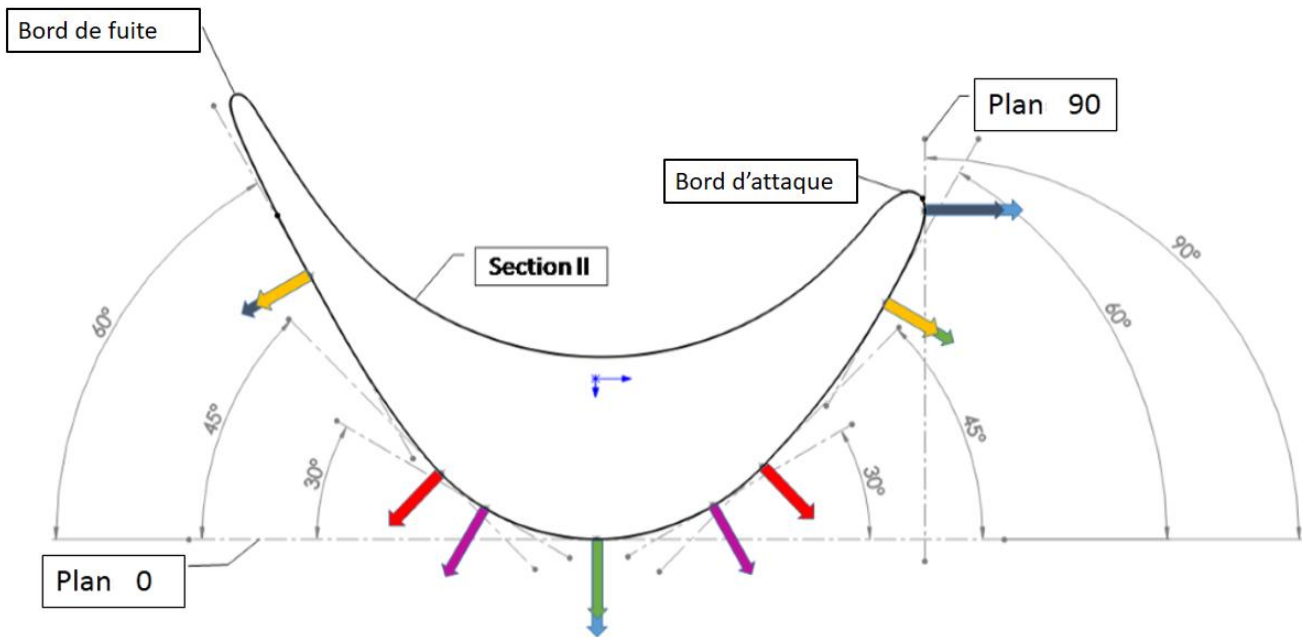


Figure II 16: Angles d'inclinaison des différents plans avec leurs vecteurs normaux associés pour la section II

On peut voir à partir de ces histogrammes les valeurs du déterminant  $D$  (figure II.17), et les valeurs de conditionnement  $K$  (figure II.18). Pour chaque situation des vecteurs normaux ( $n_1$  et  $n_2$ ) au niveau de la section I, et les vecteurs normaux ( $n_4$  et  $n_5$ ) au niveau de la section II. Les meilleurs emplacements des points P1, P2, P4 et P5 sont dans le plan orienté à environ  $45^\circ$  de l'horizontale. Cette orientation fournit le déterminant le plus élevé et le conditionnement le plus bas de la matrice plückerienne.

Il convient de mentionner que les deux points P3 et P6 n'ont pas une grande influence sur la variation des deux indicateurs (le déterminant  $D$  et le conditionnement  $K$ ), le point P3 élimine la rotation autour de l'axe Z. Pratiquement dans la turbine, ce point assure l'angle d'orientation de la pale, et donc l'orientation de flux des gaz brûlés vers l'étage d'aubes suivant (figure II.19).

Le point P6 supprime la translation selon l'axe Z et assure pratiquement l'alignement radial des bandages internes de l'ensemble du jeu d'ailettes, (Figure II.20). En fait, ce point peut coïncider avec le bandage à l'intérieur du pied d'ailette, comme il peut également coïncider avec le bandage à l'intérieur du chapeau d'ailette.

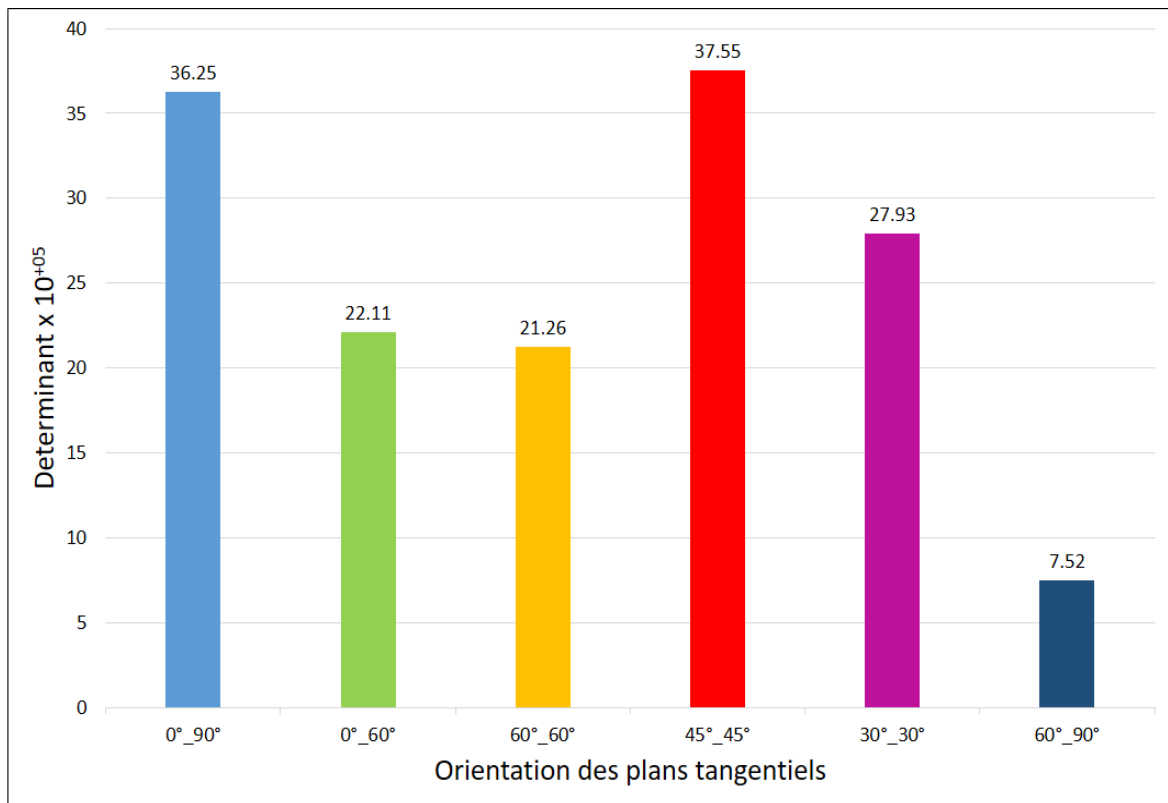


Figure II 17: Variation du Déterminant  $D$

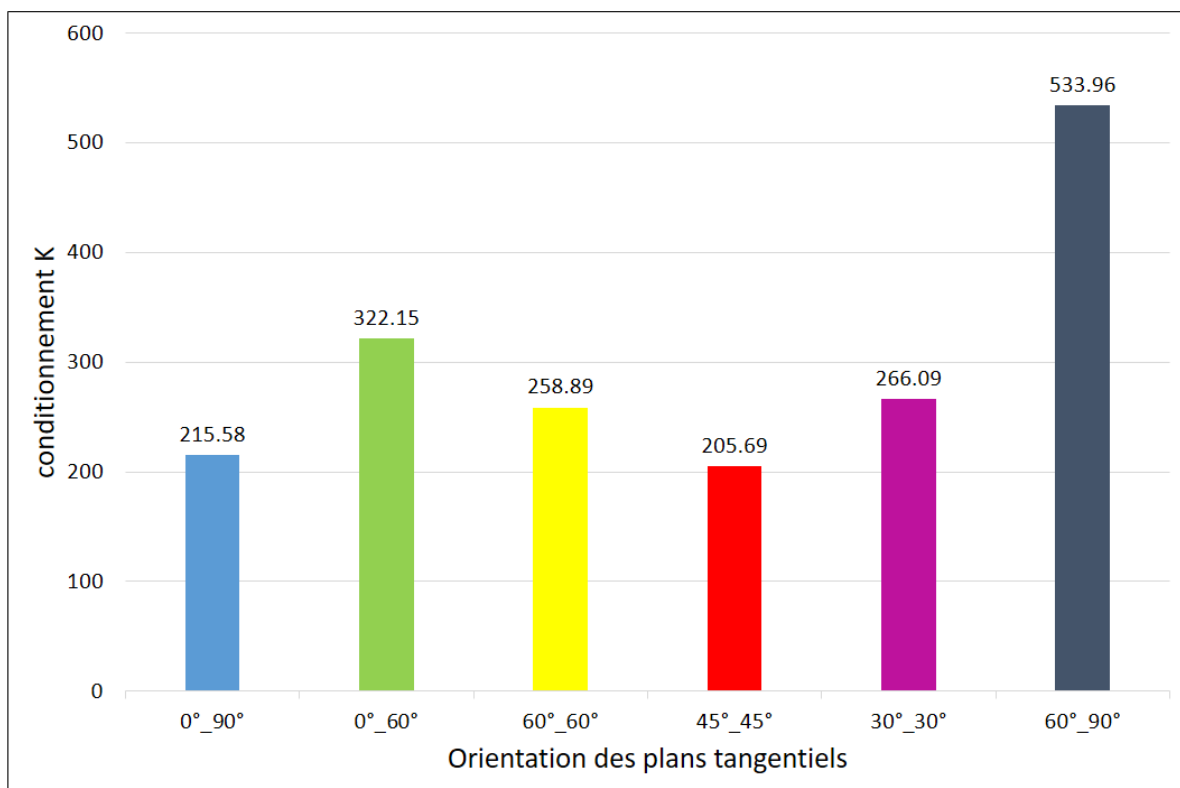


Figure II 18: Variation du Conditionnement  $K$

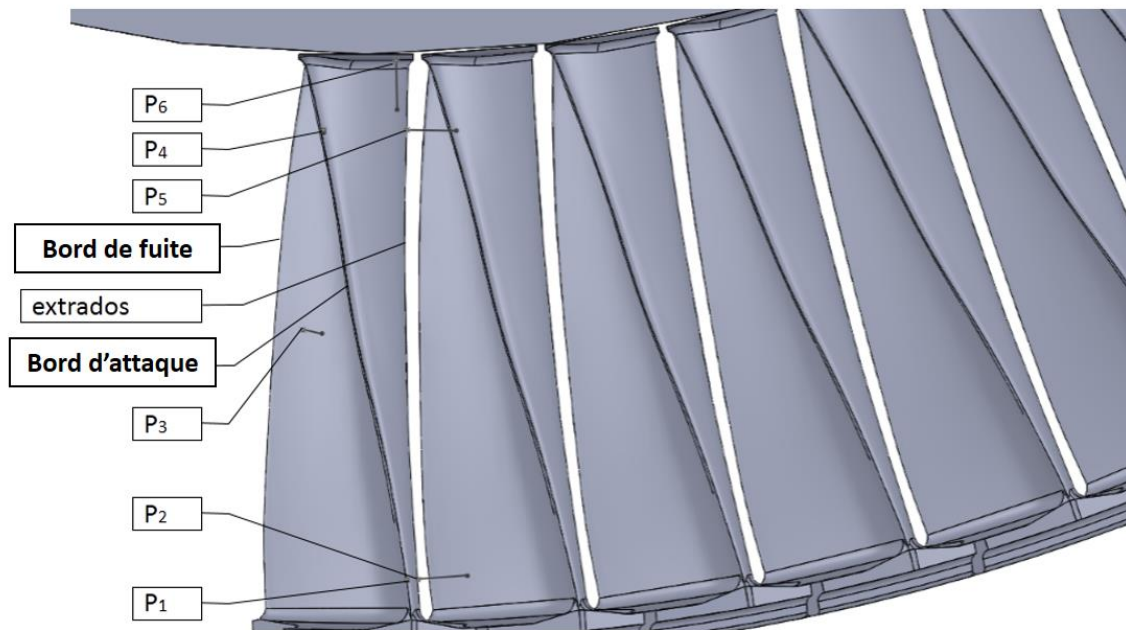


Figure II 19: Distribution des ailettes autour de l'axe turbine et les six points d'Isostatisme

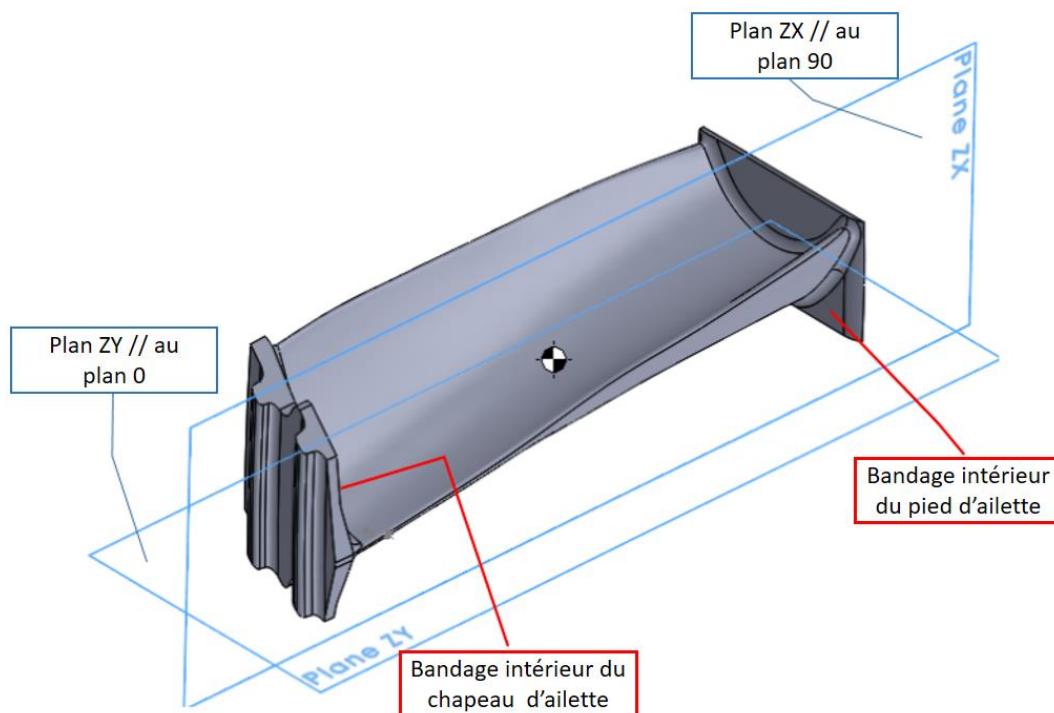


Figure II 20: Représentation des deux bandages intérieurs d'une ailette.

### II.4.2.3 Troisième étape d'optimisation :

Pour confirmer la validité de l'approche proposée et la qualité de l'Isostatisme de la pièce, l'analyse du déterminant D et le conditionnement K est appliquée à une autre pièce prismatique (équivalente à notre pale aérodynamique). Celui-ci comprend la même base géométrique mais

elle est localisée selon le principe classique d'Isostatisme 3–2–1, puisque ce système est le plus stable (Figure II.21).

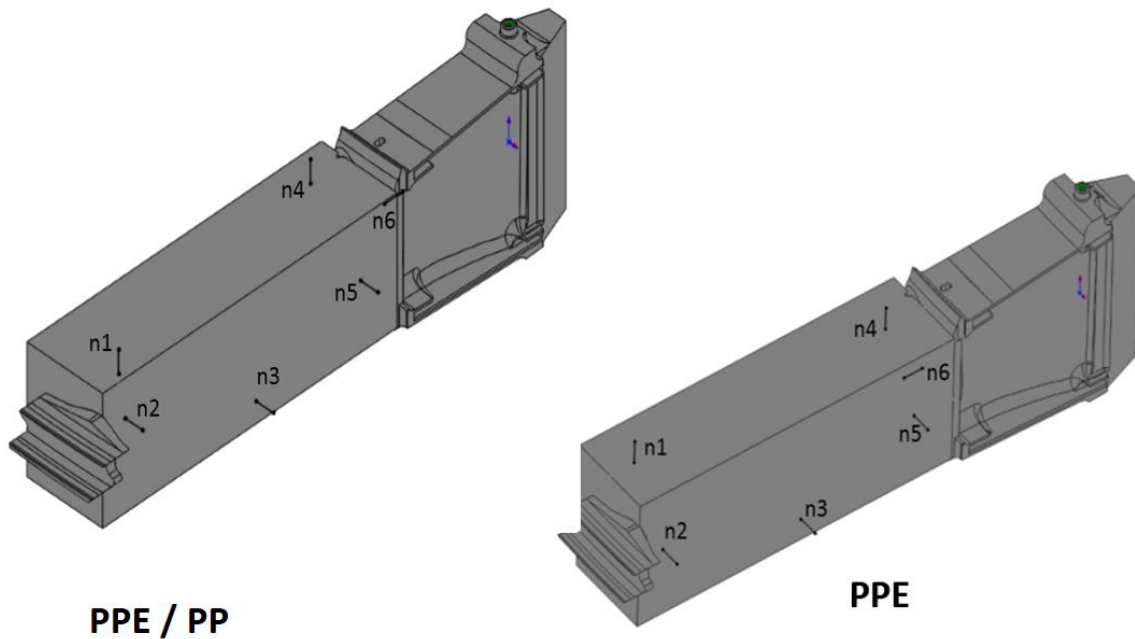


Figure II 21: La pièce prismatique équivalente à la pale d'ailette.

Les histogrammes présentés dans les figures II.22 et II.23, montrent successivement les déterminants D et le conditionnement K, de la nouvelle matrice des coordonnées plückeriennes pour les trois cas suivants :

- Une pièce prismatique équivalente avec les six points de la pale projetés sur les trois côtés, concrétisant le principe de localisation 3–2–1, avec l'abréviation P.P.E/P.P.
- Une pièce prismatique équivalente au système conventionnel 3–2–1, avec l'abréviation E.P.P.
- La pale objet d'étude, avec l'abréviation PALE.

D'où

- P.P.E/PP : la pièce prismatique équivalente à points projetées
- P.P.E : la pièce prismatique équivalente
- PALE : la pale aérodynamique

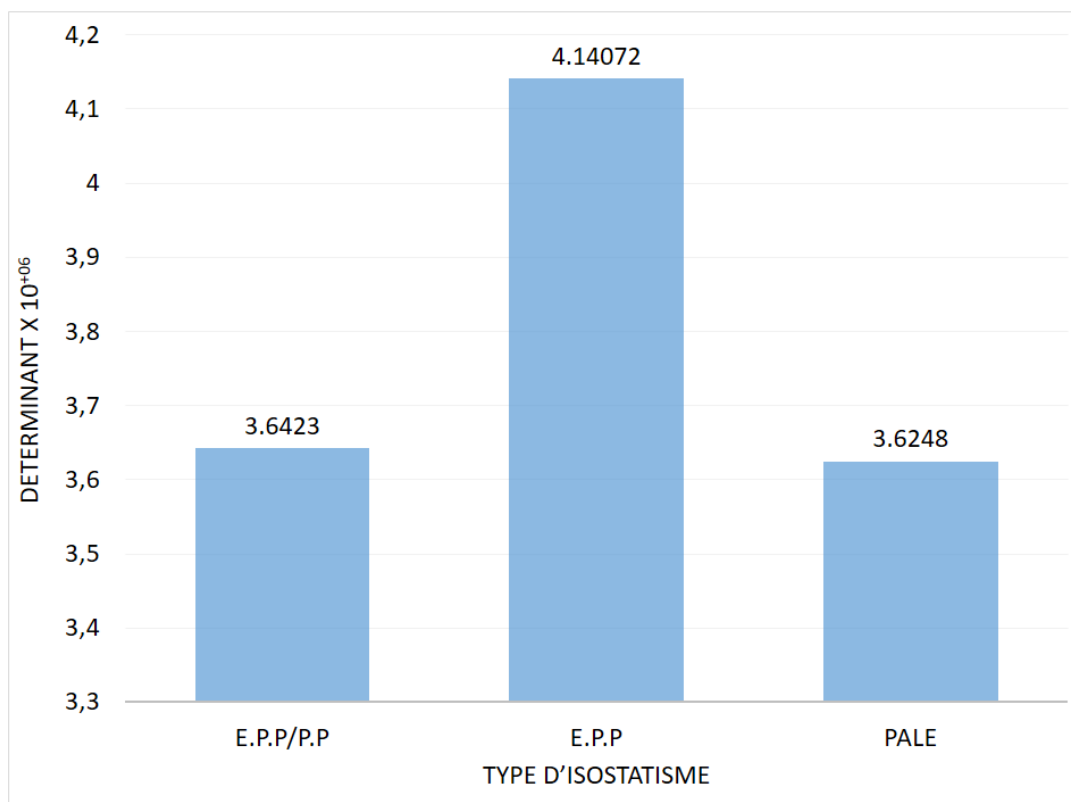


Figure II 22: Comparaison des déterminants  $D$ .

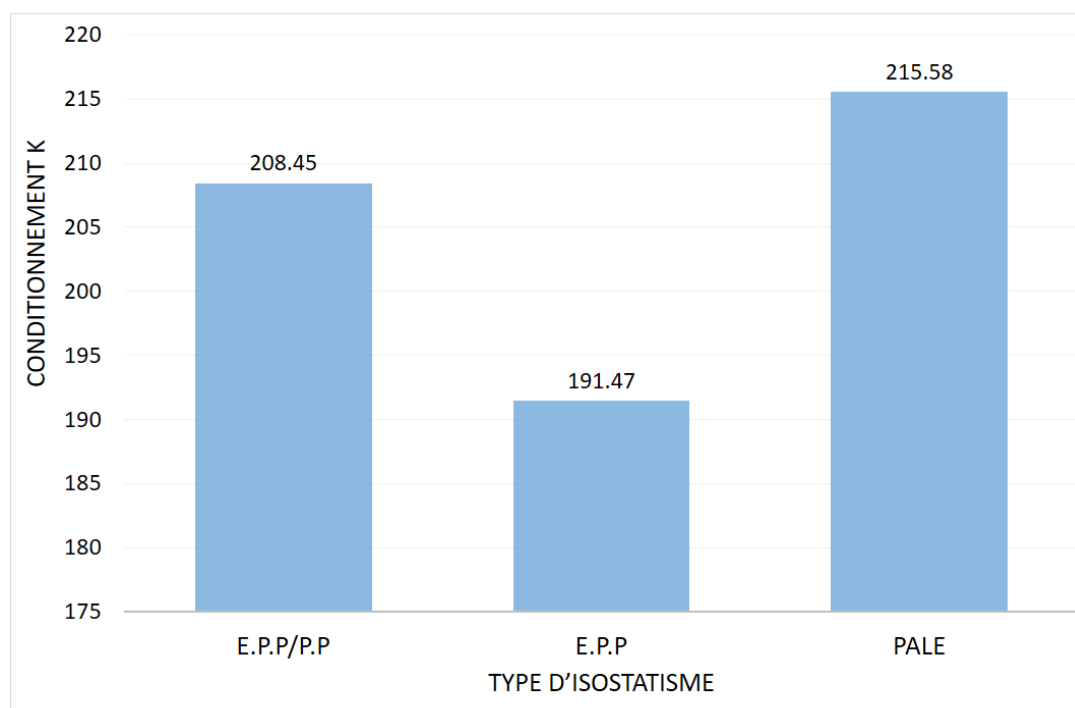


Figure II 23: Comparaison de conditionnement  $K$ .

## II.5 Discussion des résultats :

La discussion des résultats des trois étapes de l'approche proposée dans ce chapitre, nous permette de révéler l'analyse des résultats comme suit :

Dans la première étape, on peut observer d'après la figure II.14, que la 3<sup>ème</sup> base géométrique a une bonne qualité pour le montage d'usinage, avec un déterminant maximum égal à  $3.6 \times 10^6$  de la matrice de coordonnées de Plücker, comme indicateur de qualité principal.

Dans la deuxième étape. On peut voir à partir des histogrammes représentés dans les figures II.17 et II.18, que les meilleurs emplacements des points P1, P2, P4 et P5 sont dans le plan orienté à environ  $45^\circ$  de l'horizontale. Cette orientation fournit le déterminant (premier facteur de qualité / fonction objective principale) le plus élevé et le conditionnement (deuxième facteur de qualité / fonction objective secondaire) le plus bas de la matrice plückerienne. Néanmoins, cet emplacement n'est pratiquement pas accessible, en raison des contraintes suivantes :

- La nécessité d'aligner les bords d'attaque de l'ensemble des ailettes selon un angle déterminé par rapport au plan transversal (plan perpendiculaire à l'axe de la turbine), cette contrainte est assurée par les deux points (P1 et P4) comme le montre la figure II.19.
- La nécessité d'avoir une répartition homogène (équilibrée) de toutes les aubes autour de l'axe de la turbine (volumes constants entre chaque deux aubes successives), cette contrainte est assurée par les deux points (P2 et P5) comme le montre la figure II.19.

A travers la troisième étape, on a confirmé la validité de l'approche proposée et la qualité de l'Isostatisme de l'ailette turbine, en appliquant cette méthode sur une pièce prismatique (équivalente à notre pale aérodynamique). Celui-ci comprend la même base géométrique mais il est localisé selon le principe classique d'Isostatisme 3–2–1, puisque ce système est le plus stable (Figure II.21).

Trois cas ont été soumis à la comparaison de leurs indicateurs de qualité :

- Une pièce prismatique équivalente en volume à la pale d'ailette avec les six points de la pale projetés sur les trois côtés, concrétisant le principe de localisation 3–2–1, avec l'abréviation P.P.E/P.P.
- Une pièce prismatique équivalente en volume à la pale d'ailette avec le système conventionnel 3–2–1, avec l'abréviation E.P.P.
- La pale objet d'étude dans les étapes 1 et 2, avec l'abréviation PALE.

Les histogrammes présentés dans les figures II.22 et II.23, montrent que notre montage d'usinage a également une bonne qualité de localisation (Isostatisme), puisque le déterminant

et le conditionnement de notre montage d'usinage pour l'aube de turbine à gaz, sont très proches de ceux des deux pièces prismatiques équivalentes (PPE et PPE / PP).

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre, l'approche proposée a été abordée avec détails, selon trois étapes distinctes. Dans la première étape, nous avons fait une optimisation par comparaison de trois bases géométriques sélectionnées au niveau de la pale d'ailette de turbine à gaz, (la base géométrique est le volume inclut entre les six points de localisation), en évaluant les deux facteurs de qualité de la matrice des coordonnées de Plücker. Dans la deuxième étape, on a fait une deuxième optimisation au niveau des deux sections I et II de la base géométrique possédant une meilleure qualité d'Isostatisme, avec un déterminant max et un conditionnement  $k$  min. Dans la troisième étape, on a vérifié et comparait les résultats obtenus par l'application de la méthode d'optimisation sur une pièce prismatique avec le principe classique d'Isostatisme 3–2–1 ayant le même volume que la pale objet d'étude.

Deux indicateurs de qualité (déterminant  $D$ , et conditionnement  $K$ ), ont été optés à travers les trois étapes de l'approche d'optimisation proposée, en but de chercher la bonne disposition des appuis de positionnement.

# Chapitre III : Optimisation de la disposition des éléments d'appuis par algorithme génétique en se basant sur le concept de coordonnées plückeriennes.

### **III.1 Introduction :**

L'optimisation des appuis de positionnement et les éléments de serrage d'un dispositif d'usinage, est la première étape de la conception de montage, en particulier pour les montages d'usinage destiné pour les pièces de forme complexe. Cela permet d'assurer un maintien et un positionnement corrects et de réduire les erreurs géométriques de la pièce pendant le processus d'usinage. Les montages d'usinage sont utilisés pour placer et maintenir en toute sécurité les pièces dans la position souhaitée et les soutenir pendant l'usinage, tout en garantissant que les pièces produites resteront conformes et interchangeables. Un montage d'usinage typique se compose d'une plaque de base et d'un certain nombre de positionneurs et de pinces.

Les positionneurs sont des éléments de fixation passifs utilisés pour positionner la pièce, tandis que les pinces sont des éléments de fixation actifs. Ces derniers peuvent être actionnés mécaniquement, pneumatiquement ou hydrauliquement, pour appliquer des forces de serrage sur la pièce afin qu'elle puisse résister aux forces externes générées par l'opération d'usinage.

Comme on le sait, il existe des variétés de conceptions de montages d'usinage. La géométrie de la zone de contact entre un appui de positionnement et la pièce peut être un point, comme il peut être une ligne ou un plan. La qualité des produits en termes de précision, d'exactitude et d'état de surface des pièces usinées est le résultat d'une conception appropriée des appareils. Dans ce chapitre, l'optimisation par algorithme génétique des positions des localisateurs pour les composants 3-D tels que les aubes de turbine est traitée.

### **III.2 Méthodologie de l'algorithme génétique (AG) :**

L'AG est une méthode de recherche et d'optimisation populaire pour résoudre des problèmes très complexes. Le succès de cette méthode a été prouvé dans des domaines impliquant des approches d'apprentissage automatique. L'algorithme génétique (AG) est basé sur le processus de sélection naturelle, qui relève de la catégorie des algorithmes évolutionnaires (EA). L'informatique évolutive a été introduite dans les années 1960 par I. Rechenberg dans le domaine « Stratégies d'évolution ». Cette idée a ensuite été développée par d'autres recherches. Les algorithmes génétiques (AG) ont été inventés par John Holland et a développé cette idée dans son livre « Adaptation dans les systèmes naturels et artificiels » en 1975. Holland a proposé l'AG comme méthode heuristique basée sur la « Survie du plus apte » [127]. Les algorithmes génétiques sont généralement utilisés pour générer des solutions de haute qualité pour les problèmes de recherche et d'optimisation basées sur des opérateurs bio-orientés tels que la

sélection, le croisement et la mutation. La figure III. 1, montre l'organigramme de l'AG standard [128].

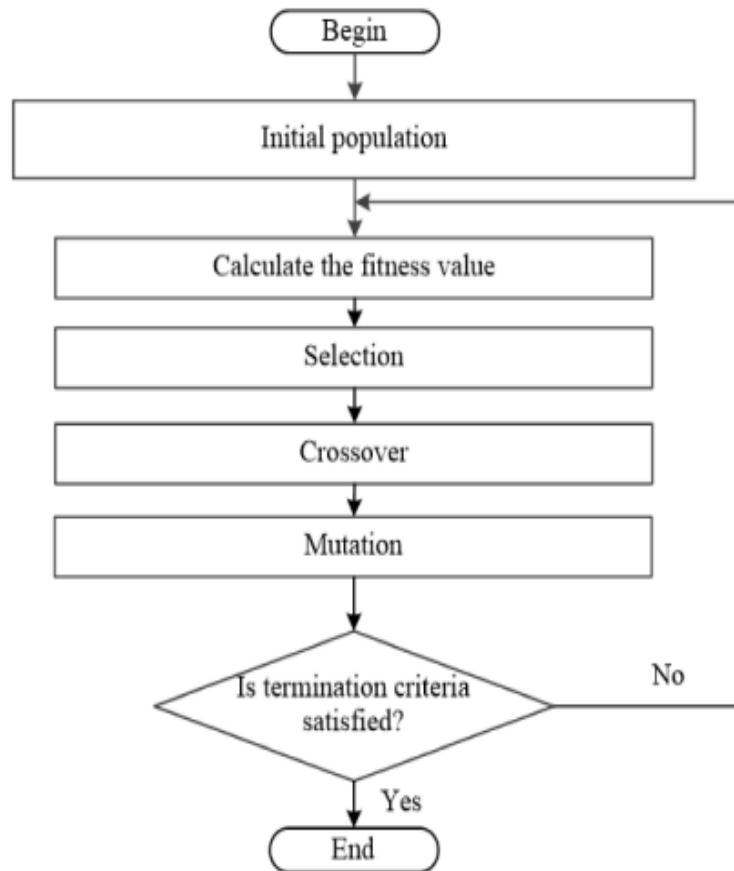


Figure III 1: Organigramme de l'algorithme génétique standard (AG).

De nombreux travaux sur l'optimisation par algorithme génétique des montages d'usinage peuvent être trouvés, d'où on va citer quelques travaux relatifs avec notre sujet.

### III.3 Synthèse sur les travaux réalisés :

Vasundara, M. et Padmanaban, KP [76], ont donné un aperçu sur le développement récent de la configuration de montage d'usinage. Ils se sont concentrés sur la configuration optimale de montages récemment développée, en utilisant divers algorithmes d'optimisation et des études de cas des pièces 3D dans des conditions dynamiques. Nalbandh, A.H.; Rajyaguru, C. C [127], ont présentés une revue du rôle d'intégration des algorithmes génétiques en termes d'optimisation, de la disposition des appuis de localisation, la position des éléments de fixation, ainsi que les déformations liées aux pièces générées par les éléments de serrage. Ils ont également donné une introduction aux algorithmes génétiques avec leurs applications, et les avantages autant que les inconvénients en relation. M. Shaharoun et al [129], fournissent un

examen approfondi et critique des approches d'optimisation actuelles dans CAFD (computer aided of fixture design) ou CMAO (conception de montages assistée par ordinateur). En outre, ils clarifient la classification des systèmes de conception de montages d'usinage en fonction du degré d'automatisation.

Ka Yiu Yeung, Xun Chen [130], ont présenté une technologie basée sur un algorithme génétique (GA) axée sur l'optimisation des positions des localisateurs et les éléments de serrage pour les pièces à géométrie compliquée, l'objectif de cette étude est de réduire la dépendance de l'expertise humaine du concepteur. Vukelic, D et al [131], ont développé un système intégral pour l'optimisation de la conception de la disposition des montages d'usinage. Pour cela, ils ont intégrés l'GA, pour adapter ce système aux processus d'usinage de tournage, perçage, fraisage et meulage de pièces rotatives et prismatiques. Ils se sont concentrés sur l'optimisation de la position des éléments de positionnement et de serrage, tout en assurant la conception du montage sans collision. Kulankara, K et al [132], ont présenté une application de AG pour l'optimisation de la disposition des appuis et de la force de serrage pour une pièce conforme, en utilisant un algorithme itératif qui minimise les déformations élastiques de la pièce illustrées via un exemple de montage d'usinage en fraisage.

Konneh, M et AGE,S [133], ont présenté un algorithme d'optimisation hybride pour obtenir une configuration de serrage optimale d'un montage de type broche. Ils ont combiné deux algorithmes pour obtenir une meilleure configuration de serrage en satisfaisant l'arrangement de serrage pour minimiser la déformation de la pièce à l'aide des AG, et une meilleure position du localisateur en utilisant PSO (particle swarm optimization) ou (optimisation de l'essaim de particules), sur la base des résultats du premier algorithme. Butt et al [134], ont proposé un AG, qui peut évaluer l'erreur de positionnement d'une pièce prismatique (un système de fixation de type 3-2-1), sur ses localisateurs sous des forces externes et couples. Cet algorithme optimise 12 variables, qui définissent le placement du localisateur tout en minimisant l'erreur de positionnement de la pièce en un seul point d'effort et de couple d'usinage. L'algorithme proposé est encore modifié pour l'optimisation du placement afin de prendre en compte l'usinage multipoints.

La contribution de cette étude peut être résumée comme suit. Nous avons présenté une application de l'algorithme génétique (AG) sur :

- a) une pièce prismatique avec un Isostatisme typique (3-2-1).
- b) une pièce de géométrie complexe telle qu'une aube de turbine à gaz, afin de confirmer la fiabilité du choix des positions optimales des localisateurs.

### III.4 Méthodes d'optimisation de la disposition d'un montage :

L'emplacement des éléments de positionnement et de serrage d'un montage d'usinage est appelé disposition du montage. L'objectif est de prendre le meilleur des systèmes d'optimisation de la conception des montages d'usinage, afin de développer un système intégral pour la conception automatisée des montages. Le concept global du système de conception et d'optimisation de montages automatisés a été défini à travers quatre modules principaux (Figure III.2), des modules d'informations d'entrée, d'optimisation, de sélection des éléments de montages et d'informations de sortie [131].

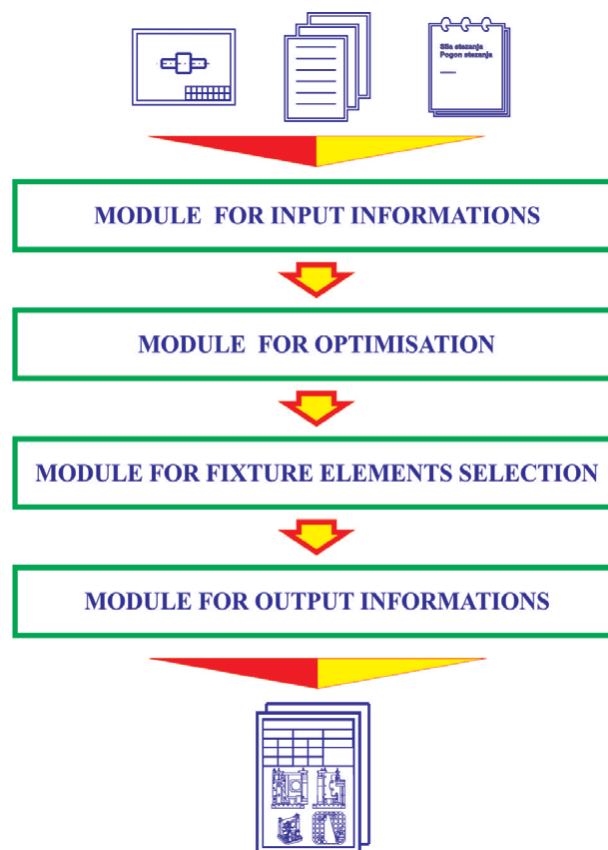


Figure III 2: Système de conception automatisé [131].

De nombreuses recherches au cours des dernières décennies ont décrit des algorithmes plus efficaces pour l'optimisation de la disposition des montages, l'objectif étant de sélectionner l'emplacement optimal des éléments du dispositif d'usinage, tels que les positionneurs et les pinces, pour maintenir la précision d'usinage.

Parmi ces algorithmes, on peut citer par exemple, mais sans s'y limiter, les algorithmes génétiques (AG), l'optimisation des essaims de particules (particle swarm optimization, PSO), l'algorithme de colonie de fourmis (ant colony algorithm ACA), les réseaux de neurones

artificiels (artificial neural networks ANN), les algorithmes mémétiques (memetic algorithms), et les algorithmes gloutons (greedy algorithms). Parfois ces les algorithmes sont combinés avec les méthodes des éléments finis (FEM) afin d'avoir des résultats plus fins [129].

Dans cette section, nous parlerons de l'algorithme génétique (AG), tant qu'elle est la méthodologie d'optimisation la plus efficace et la plus utilisée dans l'optimisation de la conception de la disposition des montages d'usinage.

### III.5 Pièces pour études de cas :

Un objet 3D rigide est maintenu par six localisateurs et une ou deux pinces. En but d'optimiser les positions des appuis de positionnement, deux objets 3D différents ont été sélectionnés pour tester l'application de l'algorithme génétique :

Cas 1 : une pièce rectangulaire

Cas 2 : une aube de turbine avec positionneurs sur la pale aérodynamique.

#### a) Pièce 1 :

Une pièce rectangulaire 3-D aux dimensions 100x100x100 mm (Figure III.3) est utilisée comme étude de cas 1. Étant donné que le composant est de forme régulière classique, une configuration de localisateur peut être effectuée avec la stratégie de configuration 3-2-1. Par conséquent, ce cas est principalement utilisé pour tester les algorithmes afin de s'assurer qu'ils conviennent à la détermination des dispositions de localisateur appropriées, nombre de points = 600 (positions possibles des localisateurs et des pinces).

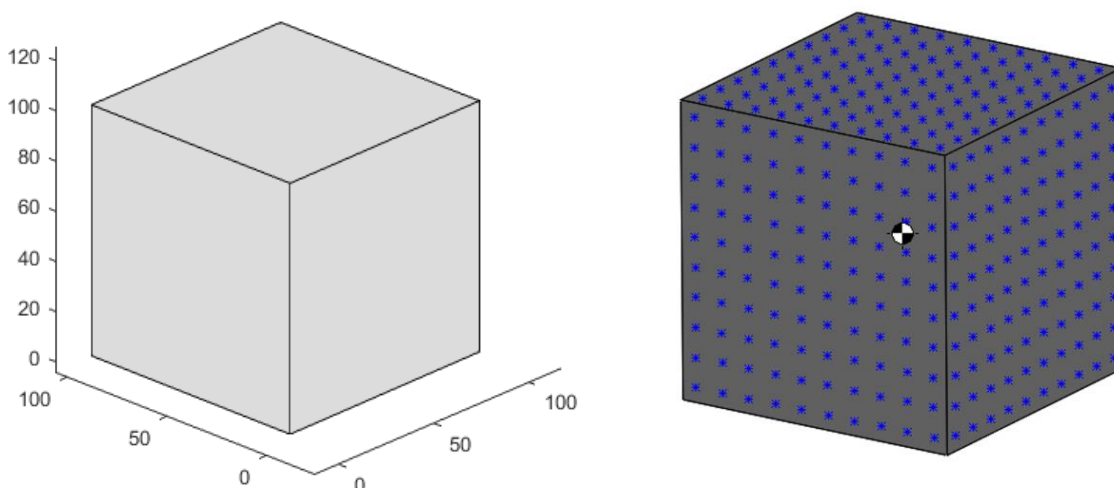


Figure III 3: Pièce pour étude de cas 1.

**b) Pièce 2 :**

Une aube de turbine de 2<sup>ème</sup> étage de type FRAME 9001 GE (Figure III.4), est utilisée comme étude de cas 2. Cette aube est retenue par six positionneurs sur la pale d'ailette afin de permettre l'accès à l'usinage du pied d'ailette. A noter que les tests d'optimisation seront effectués uniquement sur la pale de l'aube de turbine.

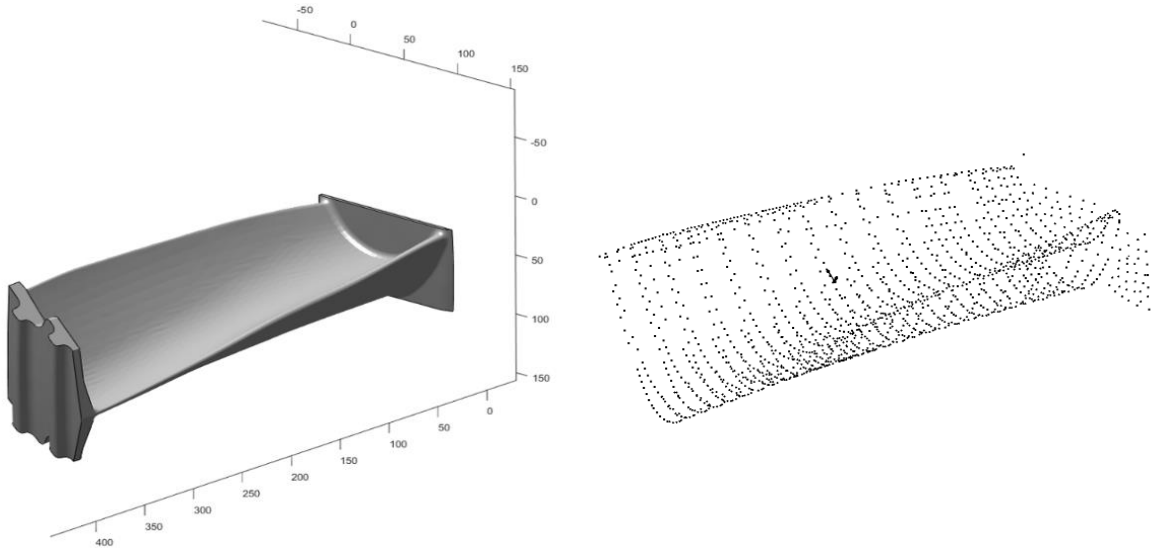


Figure III 4: Pale aérodynamique d'aube de turbine pour l'étude de cas 2.

**III.6 La fonction objective (fitness function) :**

La fonction objective qui sera adoptée dans l'optimisation par algorithme génétique, est la maximisation du déterminant de la matrice de localisation ( $L_M$ ), connu sous le nom de déterminant de la matrice plückerienne [69], ou D-Optimality [130]. La matrice du localisateur est définie par les six quantités scalaires (composantes) suivante [69].

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{n}_i \\ \overrightarrow{OP}_i \wedge \vec{n}_i \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} n_{xi} \\ n_{yi} \\ n_{zi} \\ V_{oxi} \\ V_{oyi} \\ V_{ozi} \end{array} \right. \quad (III.1)$$

Étant donné qu'il existe N nombre de localisateurs, le vecteur normal de localisation étant noté  $[n_{xi}, n_{yi}, n_{zi}]$  et la position de localisation étant notée  $[x_i, y_i, z_i]$  pour chaque localisateur, tandis que  $\overrightarrow{OP}_i$  est la position vecteur du i<sup>ème</sup> point,  $i = 1, 2, \dots, n$  ( $n = 6$ ), la matrice de

localisation ( $L_M$ ) pour le modèle 3-D est déterminée comme elle est indiquée dans (équation III.2), [69].

Le déterminant de la matrice de localisation en tant que fonction objective, est utilisé comme critère d'optimisation du positionnement du localisateur des montages d'usinage. Il est utilisé dans MATLAB pour guider les algorithmes afin de trouver une solution optimale,

$$L_M = \begin{bmatrix} n_{x1} & \cdot & n_{xi} & \cdot & n_{xn} \\ n_{y1} & \cdot & n_{yi} & \cdot & n_{yn} \\ n_{z1} & \cdot & n_{zi} & \cdot & n_{zn} \\ V_{ox1} & \cdot & V_{oxi} & \cdot & V_{oxn} \\ V_{oy1} & \cdot & V_{oyi} & \cdot & V_{oyn} \\ V_{oz1} & \cdot & V_{ozi} & \cdot & V_{ozn} \end{bmatrix} \quad (III.2)$$

D'où :

$$\vec{V}_{oi} = \overrightarrow{OP}_i \wedge \vec{n}_i \quad (III.3)$$

$$\vec{V}_{oxi} = (y_i n_{zi} - z_i n_{yi}) \quad (III.4)$$

$$\vec{V}_{oyi} = (z_i n_{xi} - x_i n_{zi}) \quad (III.5)$$

$$\vec{V}_{ozi} = (x_i n_{yi} - y_i n_{xi}) \quad (III.6)$$

### III.7 Optimisation de la position de localisateurs par GA :

Une fois les fichiers d'entrée préparés (fichier de points de maillage, fichier STL pour les modèles 3D), la fonction objective ainsi que la configuration de la matrice de localisateurs, ils sont ensuite entrés dans la boîte à outils (tool box) GA du logiciel MATLAB. La longueur des chromosomes artificiels se compose de six paramètres L1, L2, L3, L4, L5 et L6, et chaque paramètre est spécifié par trois coordonnées cartésiennes (x, y et z) indiquant la position de chaque localisateur 1, 2, 3, 4, 5 et 6. La figure III.5, représente les étapes constituant l'AG.

Dans MATLAB, la boîte à outils de l'algorithme génétique minimise la fonction objective. La boîte à outils GA résout les problèmes sous la forme suivante :

Supposons  $f : R^n \rightarrow R$

Minimiser  $f(x)$ , sous réserve de  $x \in R^n$

Les problèmes de maximisation peuvent être résolus en minimisant  $-f(x)$

La fonction objective a comme code MATLAB suivant :

Fonction [Y] = fonction objective (x)

$$Y = \det (L_M)$$

L'objectif est toujours de maximiser le déterminant de la matrice d'informations des montages d'usinage, c'est-à-dire,  $\max (\det (L_M))$ .

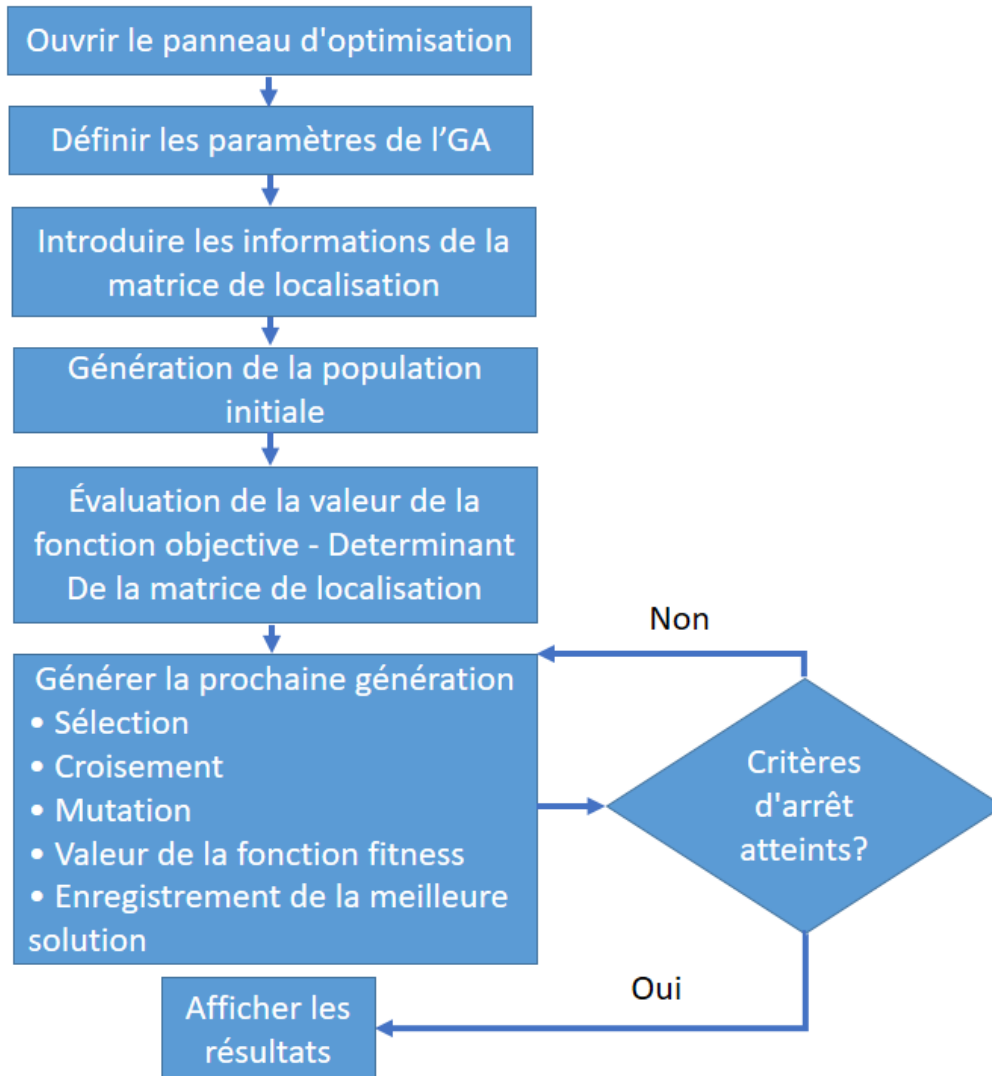


Figure III 5: Organigramme de l'optimisation des positions des localisateurs basée sur AG.

### a) Etude de cas 1 :

La première étude de cas est un cube de 100x100x100 mm, décrit avec un maillage de 1200 points. La première étape de l'algorithme génétique est l'ouverture du panneau de l'AG, puis l'introduction des paramètres d'entrée, comme le montre la figure III.6.

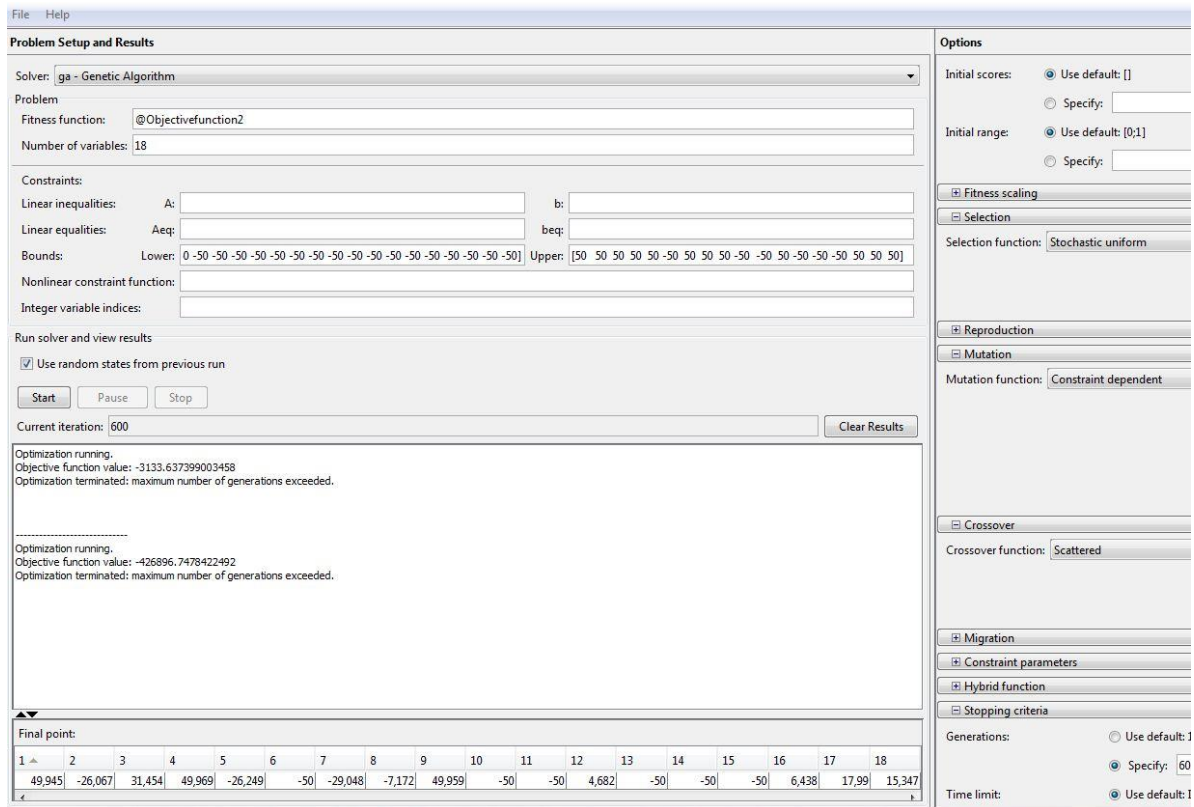


Figure III 6: Interface d'optimisation de l'AG.

Les paramètres d'entrée nécessaires sont :

- le solveur : ga-Genetic Algorithm
- fitness function (function objective), est sous la syntaxe : @Objectivefunction.
- Bounds (lower / upper) : limites de l'objet 3D (min / max)
- Options : options à utiliser pour avoir de bons résultats.

Ce cas d'études, peut être considéré comme un modèle pilote, pour choisir les meilleures options afin d'obtenir les résultats attendus. Pour cela 7 cas différents ont été étudiés en but de fixer les options optimales. Le 8<sup>ème</sup> cas dans la chaîne de choix des options, montre que le nombre d'itérations (nombre de génération), a donné un bon choix de la disposition des appuis pour le cube 100x100x100.

Le processus itératif, qui commence par la création des premières générations de solution (18 variables, vu que chaque point parmi les six points de localisation, a trois coordonnées X, Y et Z). Ce processus se poursuivra jusqu'à ce qu'il n'y ait pas d'amélioration appréciable de la fonction de fitness après un certain nombre prédéfini d'itérations consécutives.

La figure III.7, montre la disposition des appuis pour le 1<sup>er</sup> cas, en utilisant les options proposées par l'AG. Les détails des paramètres GA sont présentés dans le tableau III.1.

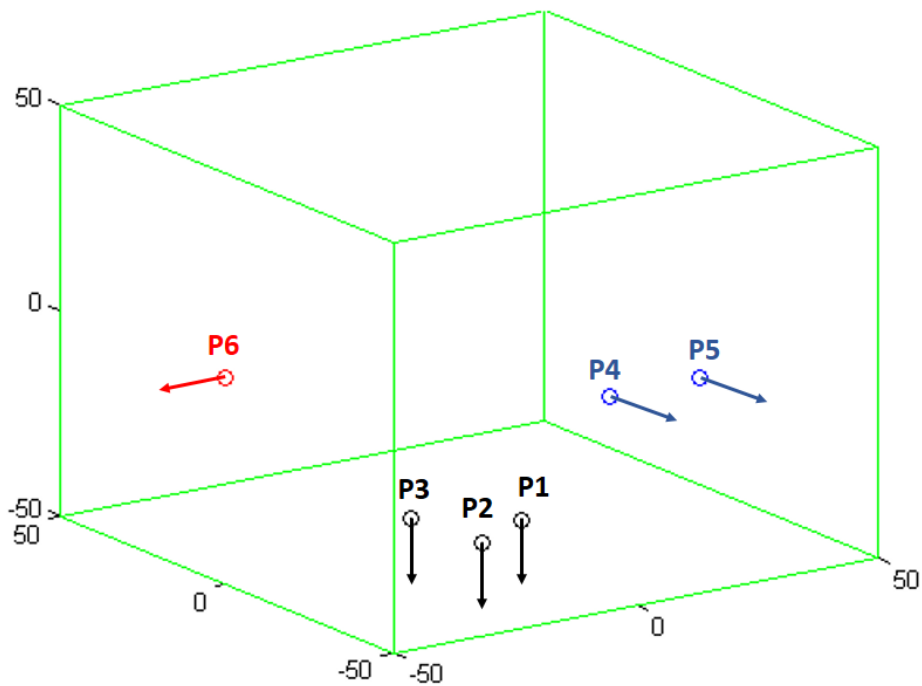


Figure III 7: Disposition des 6 appuis / cas 1

Tableau III 1: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 1

Taille de population	20 / double vecteur
Fonction de sélection	Stochastic uniform
Fonction de mutation	Constraint dependent / Adaptive feasible
Fonction de croisement	Scattered
Nombre de génération	100
Nombre de nœuds	600

La figure III.8, montre la disposition des appuis pour le 2<sup>ème</sup> cas de choix des options de l'AG, en changeant la fonction de croisement au mode « heuristic ». Le nombre d'itérations est limité à 51 itérations, malgré que le nombre de génération soit fixé sur 100. Le tableau III.2, présente les paramètres utilisés pour le 2<sup>ème</sup> cas de choix des options.

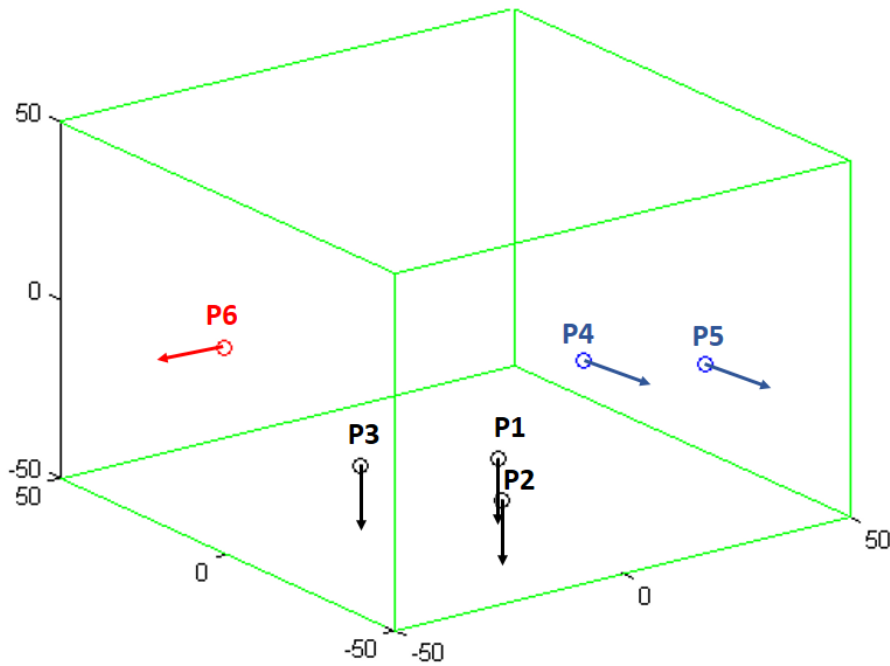


Figure III 8: Disposition des 6 appuis / cas 2

Tableau III 2: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 2.

Taille de population	20 / double vecteur
Fonction de sélection	Stochastic uniform
Fonction de mutation	Constraint dependent / Adaptive feasible
Fonction de croisement	Heuristic
Nombre de génération	100 / nombre de génération est limité à 51
Nombre de nœuds	600

La figure III.9, montre la disposition des appuis pour le 3<sup>ème</sup> cas de choix des options de l'AG, en changeant la fonction de mutation au mode « gaussian », et en conservant la fonction de croisement au mode par défaut « scattered ». Le nombre d'itérations est limité à 51 itérations, malgré que le nombre de génération soit fixé sur 100. Le tableau III.3, présente les paramètres utilisés pour le 3<sup>ème</sup> cas de choix des options.

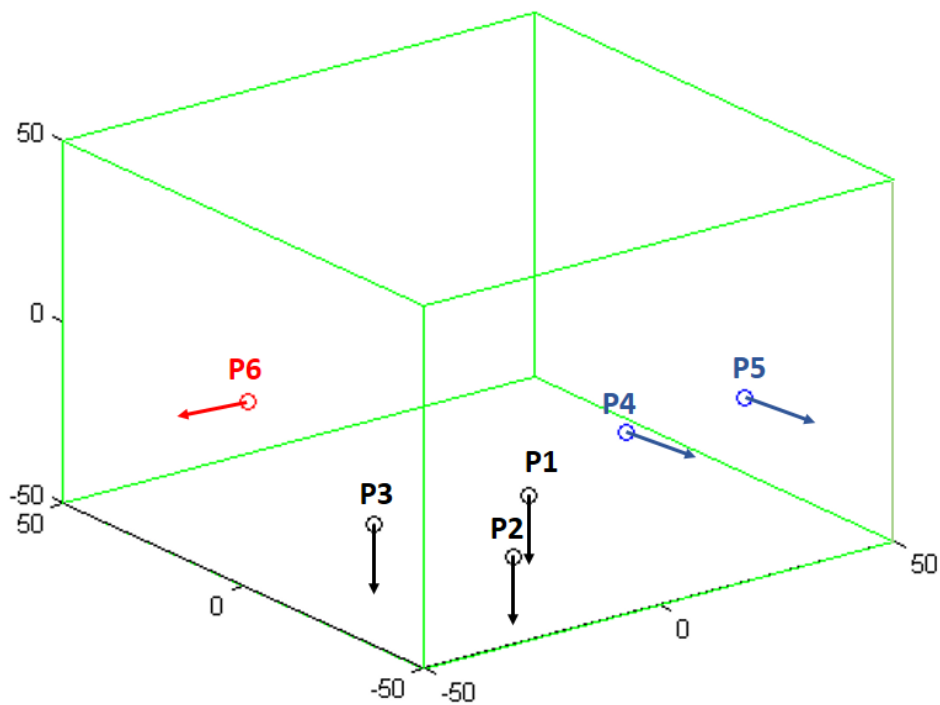


Figure III 9: Disposition des 6 appuis / cas 3

Tableau III 3: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 3.

Taille de population	20 / double vecteur
Fonction de sélection	Stochastic uniform
Fonction de mutation	gaussian
Fonction de croisement	scattered
Nombre de génération	100 / nombre de génération est limité à 51
Nombre de nœuds	600

La figure III.10, montre la disposition des appuis pour le 4ème cas de choix des options de l'AG, en changeant la fonction de mutation au mode « gaussian », et la fonction de croisement au mode « Heuristic ». Le nombre d'itérations est limité à 51 itérations, malgré que le nombre de génération soit fixé sur 100. Le tableau III.4, présente les paramètres utilisés pour le 4ème cas de choix des options.

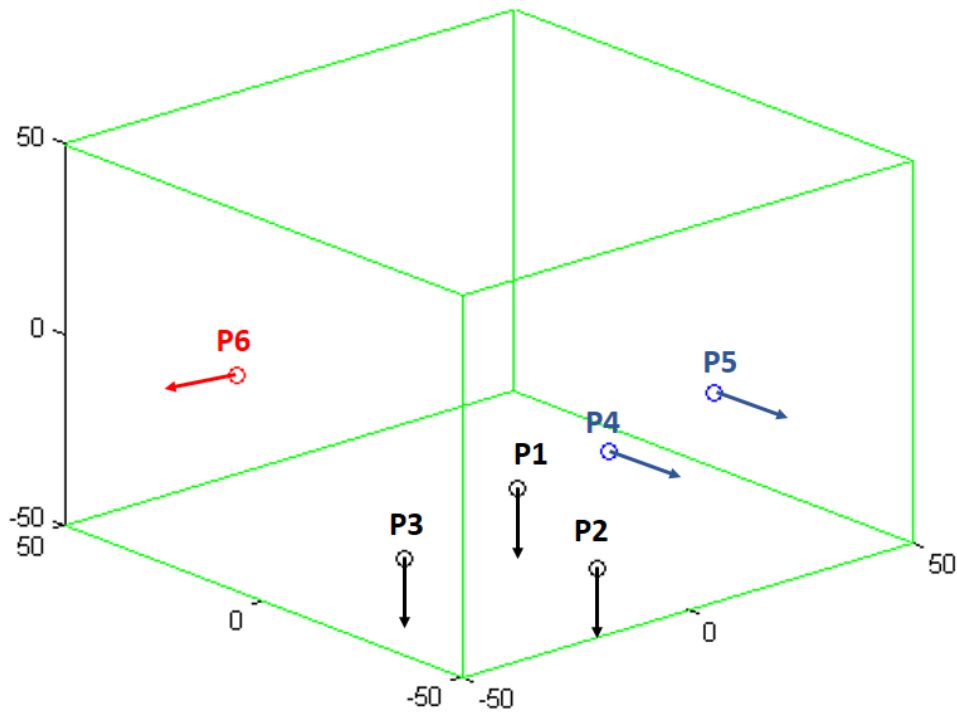


Figure III 10: Disposition des 6 appuis / cas 4

Tableau III 4: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 4.

Taille de population	20 / double vecteur
Fonction de sélection	Stochastic uniform
Fonction de mutation	gaussian
Fonction de croisement	Heuristic
Nombre de génération	100 / nombre de génération est limité à 51
Nombre de nœuds	600

La figure III.11, montre la disposition des appuis pour le 5ème cas de choix des options de l'AG, en changeant la fonction de sélection en mode « uniform », la fonction de mutation au mode « gaussian » et la fonction de croisement au mode « Heuristic ». Le nombre d'itérations est limité à 51 itérations, malgré que le nombre de génération soit fixé sur 100. Le tableau III.5, présente les paramètres utilisés pour le 5ème cas de choix des options.

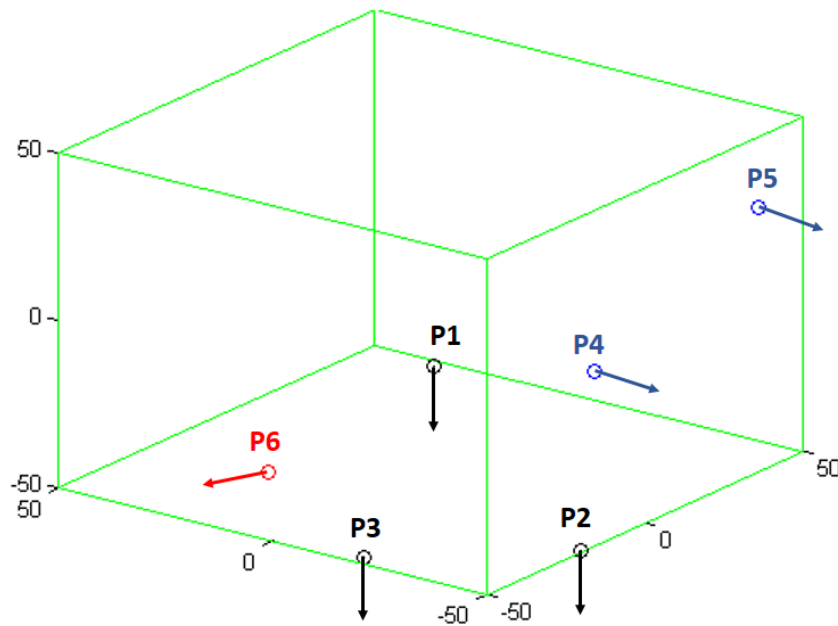


Figure III 11: Disposition des 6 appuis / cas 5

Tableau III 5: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 5.

Taille de population	20 / double vecteur
Fonction de sélection	uniform
Fonction de mutation	gaussian
Fonction de croisement	Heuristic
Nombre de génération	100 / nombre de génération est limité à 51
Nombre de nœuds	600

La figure III.12, montre la disposition des appuis pour le 6ème cas de choix des options de l'AG, en conservant les options proposées par l'AG initiales, sauf que le nombre d'itérations est augmenté à 400 itérations. Le tableau III.5, présente les paramètres utilisés pour le 6ème cas de choix des options.

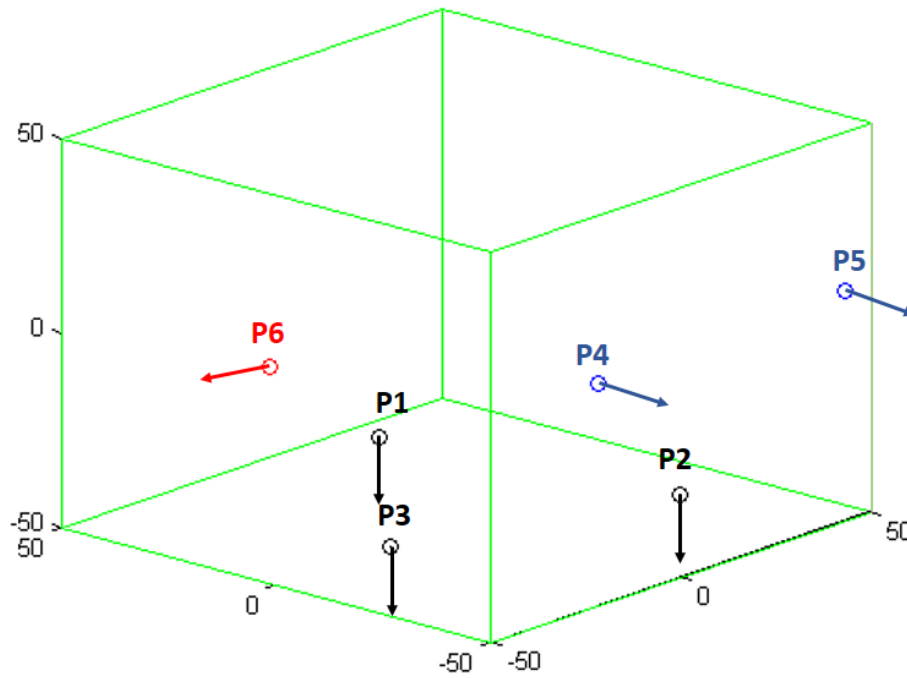


Figure III 12: Disposition des 6 appuis / cas 6

Tableau III 6: Paramétrage de l'algorithm génétique pour le cas 6.

Taille de population	20 / double vecteur
Fonction de sélection	Stochastic uniform
Fonction de mutation	Constraint dependent / Adaptive feasible
Fonction de croisement	Scattered
Nombre de génération	400
Nombre de nœuds	600

La figure III.13, montre la disposition des appuis pour le 7ème cas de choix des options de l'AG, en conservant les options proposées par l'AG initiales, sauf que le nombre d'itérations est augmenté à 500 itérations. Le tableau III.6, présente les paramètres utilisés pour le 7ème cas de choix des options.

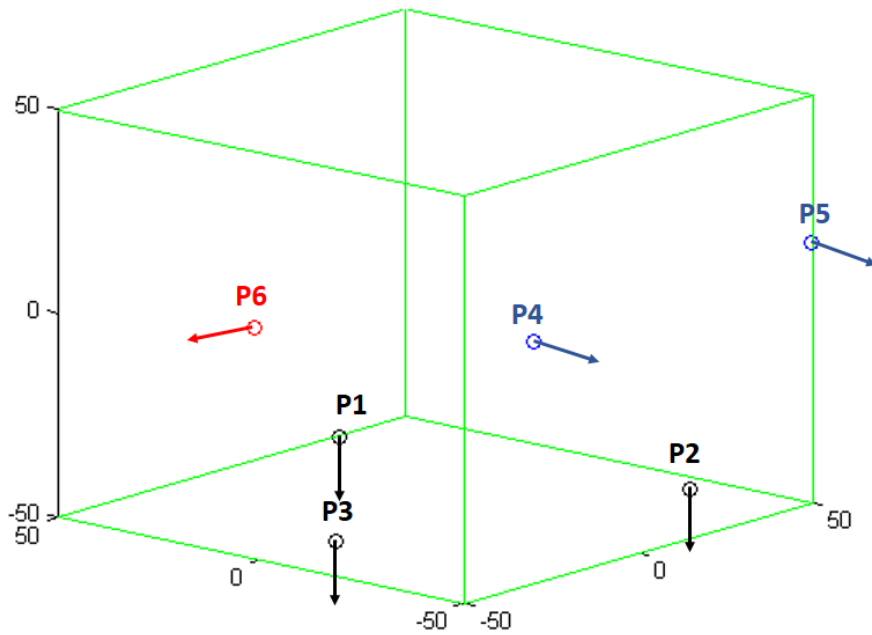


Figure III 13: Disposition des 6 appuis / cas 7

Tableau III 7: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le cas 7.

taille de population	20 / double vecteur
Fonction de sélection	Stochastic uniform
Fonction de mutation	Constraint dependent / Adaptive feasible
Fonction de croisement	Scattered
Nombre de génération	500
Nombre de nœuds	600

La dernière figure III.14, montre la disposition des appuis pour le 8ème cas de choix des options de l'AG, en conservant les options proposées par l'AG initiales, sauf que le nombre d'itérations est augmenté à 600 itérations. Le nombre maximum d'itérations accepté par l'AG, est de 641 itérations, suivant le volume de l'objet 3D, et la taille du nuage de points. Le tableau III.8, présente les paramètres utilisés pour le 8ème cas de choix des options.

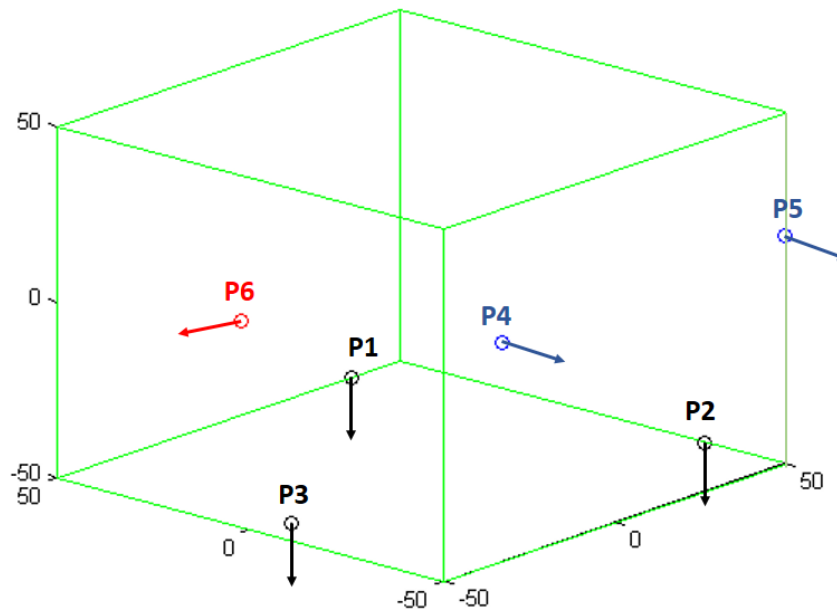


Figure III 14: Disposition des 6 appuis / cas 8

Tableau III 8: Paramétrage de l'algorithmme génétique pour le cas 8.

Taille de population	20 / double vecteur
Fonction de sélection	Stochastic uniform
Fonction de mutation	Constraint dependent / Adaptive feasible
Fonction de croisement	Scattered
Nombre de génération	600
Nombre de nœuds	1200

Après la fixation des options de choix optimales de l'AG, ce 8ème cas sera adopté pour l'optimisation de la disposition des appuis de localisations pour le cube 100x100x100. Les mêmes options de choix seront utilisées pour l'optimisation des appuis de localisations de l'ailette de turbine à gaz.

**b) Etude de cas 2 :**

La deuxième étude de cas est une pale aérodynamique d'aube de turbine décrit avec un maillage de 1548 points, le détail des paramètres de l'AG est présenté dans le tableau III.9.

Tableau III 9: Paramétrage de l'algorithme génétique pour le 2ème cas d'étude de l'ailette.

Taille de population	20 / double vecteur
Fonction de sélection	Stochasticuniform
Fonction de mutation	Constraintdependent / Adaptive feasible
Fonction de croisement	Scattered
Nombre de génération	800
Nombre de nœuds	1548

**c) Présentation des résultats :**

Après le lancement de 50 essais d'optimisation par l'algorithme génétique, les tableaux III.10 et III.11, présentent les 10 meilleures possibilités des coordonnées X, Y et Z de chaque localisateur.

Tableau III 10: Résumé des résultats de l'étude de cas 1

localisateur coordonnée	L1	L2	L3	L4	L5	L6
x1	-31	31	8	50	50	-25
x2	-32	31	5	50	50	-20
x3	-35	31	2.5	50	50	-18
x4	-38.5	33	0	50	50	-15
x5	-39	34	-1.5	50	50	-15
x6	-40	36.5	-2	50	50	-15
x7	-40.5	36	-2	50	50	-12.5
x8	-39.5	37	-4	50	50	-10.5
x9	-41.5	39	-6	50	50	-10
x10	-43	41.5	-5.5	50	50	-10
y1	-36	-39	40.5	35	-44	50
y2	-32.5	-42	43	40	-44	50
y3	-40.5	-46	38	34	-43	50
y4	-40.5	-35	40	37.5	-40.5	50

y5	-36	-40	39	42	-39	50
y6	-40	-37	32.5	45	-38	50
y7	-40	-40.5	41.5	40	-38	50
y8	-41	-40.5	35	43	-34.5	50
y9	-40.5	-35.5	32	38	-34	50
y10	-43	-38	38.5	39	-34.5	50
z1	50	50	50	35	-35	-43
z2	50	50	50	35	-39	-40
z3	50	50	50	38	-42	-41
z4	50	50	50	39	-38	-45
z5	50	50	50	38.5	-34	-35
z6	50	50	50	41	-36	-37
z7	50	50	50	40	-41	-39
z8	50	50	50	43	-34.5	-35.5
z9	50	50	50	41	-35.5	-37.5
z10	50	50	50	43	-38.5	-41

Tableau III 11: Résumé des résultats de l'étude de cas 2

localisateur coordonnée	L1	L2	L3	L4	L5	L6
x1	24.065	30.635	-38.126	-25.724	24.000	17.771
x2	24.556	30.548	-34.489	-24.567	23.861	17.009
x3	23.635	30.550	-38.160	12.970 <sub>45°</sub>	14.041	18.729
x4	23.290	30.526	-35.743	9.330	10.296	19.499
x5	26.009 <sub>45°</sub>	23.118 <sub>45°</sub>	-38.298	12.894 <sub>45°</sub>	24.040	18.936
x6	26.390	22.955 <sub>45°</sub>	-36.457	9.258	23.807	17.354
x7	26.238	22.874 <sub>45°</sub>	-37.855	-25.155	13.753	16.403
x8	25.755 <sub>45°</sub>	20.751	-34.845	13.178 <sub>45°</sub>	9.783	18.268
x9	25.942	20.630	-36.528	9.364	14.165	15.854
x10	25.566 <sub>45°</sub>	20.779	-34.595	-25.714	10.492	18.517
y1	36.275	20.914	-39.666	52.361	1.802	38.734
y2	36.217	18.885	-38.179	52.243	-1.198	40.666
y3	36.438	20.795	-39.445	27.361	-22.325	40.250
y4	36.605	20.664	-38.468	30.789	-25.637	37.768
y5	35.367	3.194	-39.222	27.305	1.791	36.667
y6	34.931	2.914	-38.485	30.738	1.869	36.919
y7	34.931	2.657	-39.840	52.109	-22.181	38.385
y8	35.493	1.054	-38.608	27.079	-25.643	-46.955

y9	35.206	0.807	-39.540	30.676	-22.502	-48.923
y10	35.624	0.738	-38.744	52.466	-25.786	-51.937
z1	153.031	153.031	3.031	-116.969	-116.469	-158.950
z2	153.031	153.031	3.031	-116.969	-116.469	-158.936
z3	150.031	150.031	5.531	-116.969	-116.469	-158.969
z4	147.031	147.031	5.531	-116.969	-116.469	-158.985
z5	153.031	153.031	8.531	-114.469	-119.469	-158.974
z6	153.031	150.031	8.531	-114.469	-114.469	-158.943
z7	150.031	147.031	0.031	-114.469	-114.469	-158.925
z8	150.031	153.031	0.031	-119.469	-114.469	-158.960
z9	147.031	150.031	-2.469	-119.469	-119.469	-158.915
z10	147.031	147.031	-2.469	-119.469	-119.469	-158.965

Les figures III.15 et III.16, présentent respectivement les 10 meilleures positions des appuis de référence optimisées par AG pour les deux pièces objets d'études.

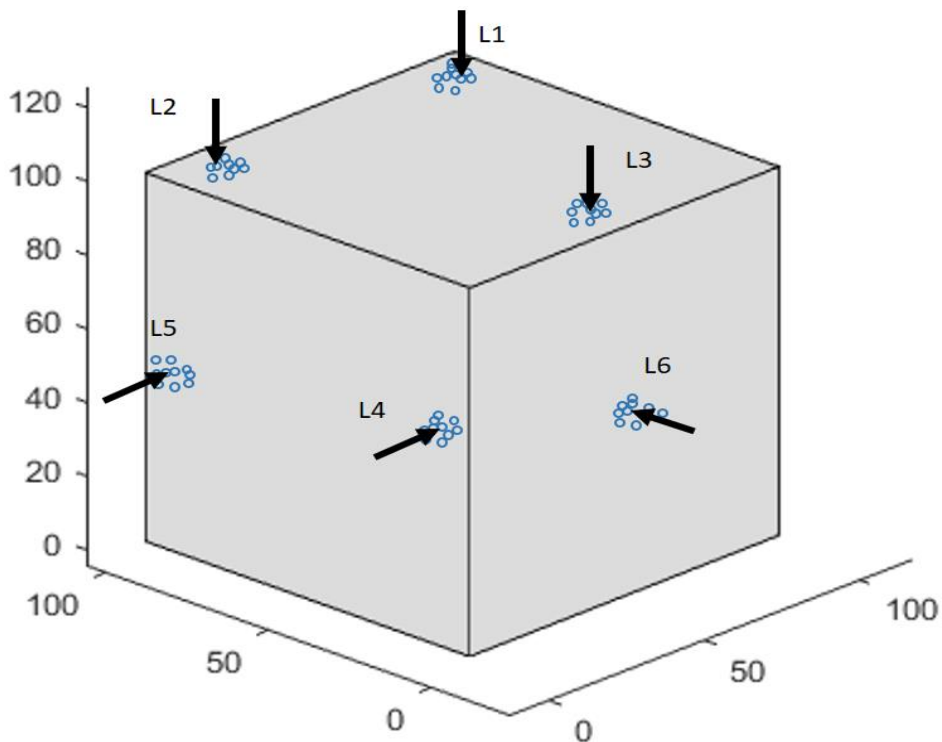


Figure III 15: Présentation de 10 meilleures possibilités d'Isostatisme (3-2-1) d'un cube

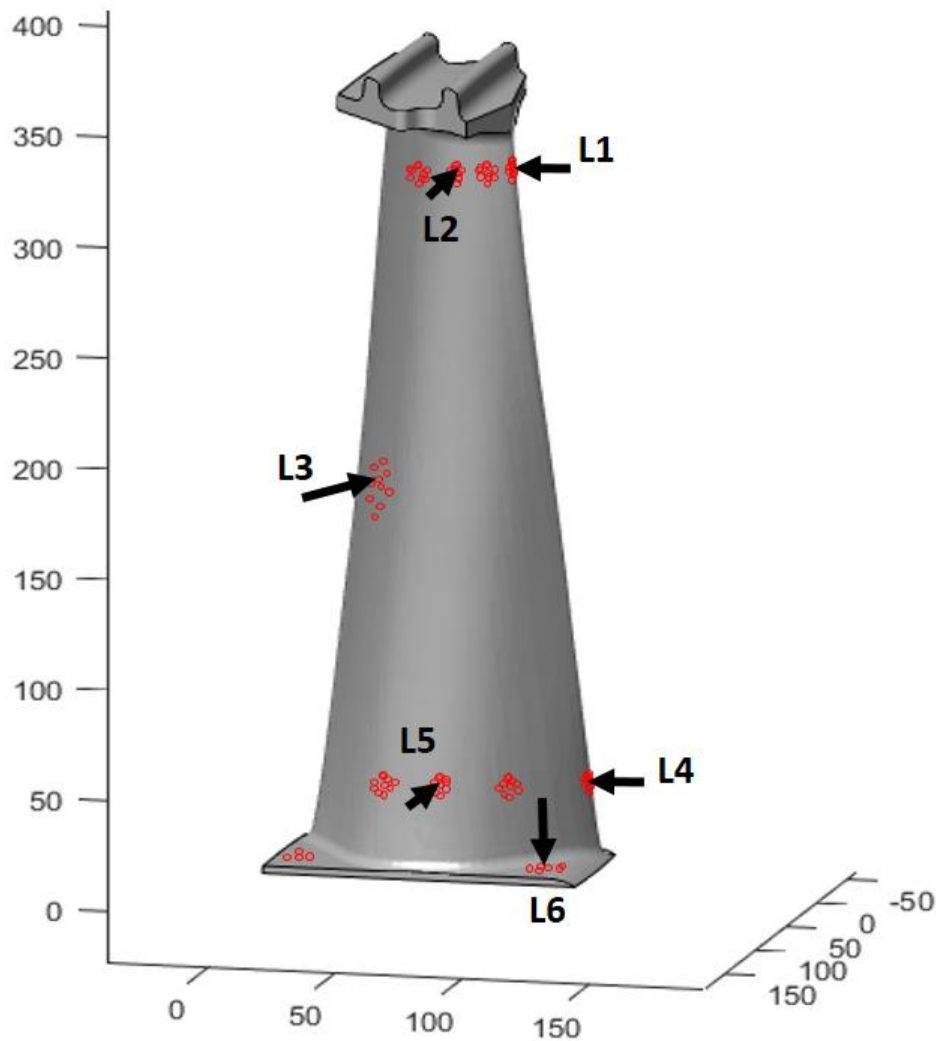


Figure III 16: Présentation de 10 meilleures possibilités d'Isostatisme d'une pale d'ailette

**N.B** : il est à noter que les coordonnées x, y et z sont présent par rapport aux centres de gravités des deux pièces.

### III.8 Discussion des résultats :

Ce chapitre décrit une approche de recherche pour optimiser la disposition des appuis des montages d'usinage pour des pièces à usiner en 3D. L'approche s'applique à une pièce avec une géométrie arbitrairement complexe, et une pièce standard avec une forme régulière comme un cube, pour vérifier la fiabilité de l'AG.

#### a) Résultat pour l'étude de cas 1 :

Étant donné que le composant a une forme régulière, il existe plusieurs ensembles de configurations de localisateur qui peuvent remplir toutes les contraintes. Des tests d'optimisation ont été faite, en but de fixer les options de paramétrage de l'AG. Les résultats

de ces tests, ne dévoilent que seul le nombre d'itération (nombre de génération), qui donne une bonne optimisation en combinaison avec les autres options proposées par l'AG. 50 configurations différentes ont été revues ; il n'y a donc pas de répétition de la même configuration. Cependant, certaines positions de localisation sont plus populaires que d'autres. 50 positionneurs différents ont été sélectionnés par l'AG. Le résumé des résultats est présenté dans le tableau III.10 et seuls les 10 principaux localisateurs les plus répétitifs sont présentés dans ce tableau. La configuration avec la plus grande valeur déterminée est illustrée à la figure III.15.

Puisque le composant est une forme régulière classique, une configuration de localisateur peut être accomplie avec la stratégie de configuration 3-2-1. Par conséquent, ce cas est principalement utilisé pour tester l'algorithme afin de s'assurer qu'il est approprié pour déterminer les dispositions de localisation appropriées, la disposition des appuis pour cette pièce montre que l'algorithme est fiable à être adopté pour l'optimisation de la conception des montages d'usinage.

### ***b) Résultat pour l'étude de cas 2 :***

Etant donné que la pièce a une forme irrégulière, il est nécessaire d'ajouter des contraintes qui peuvent aider l'AG à donner des résultats optimaux à des temps de calcul réduits. Il s'agit des vecteurs normaux  $\vec{n}_i$  et ces trois composantes ( $\vec{n}_{xi}, \vec{n}_{yi}, \vec{n}_{zi}$ ) figure III.17.

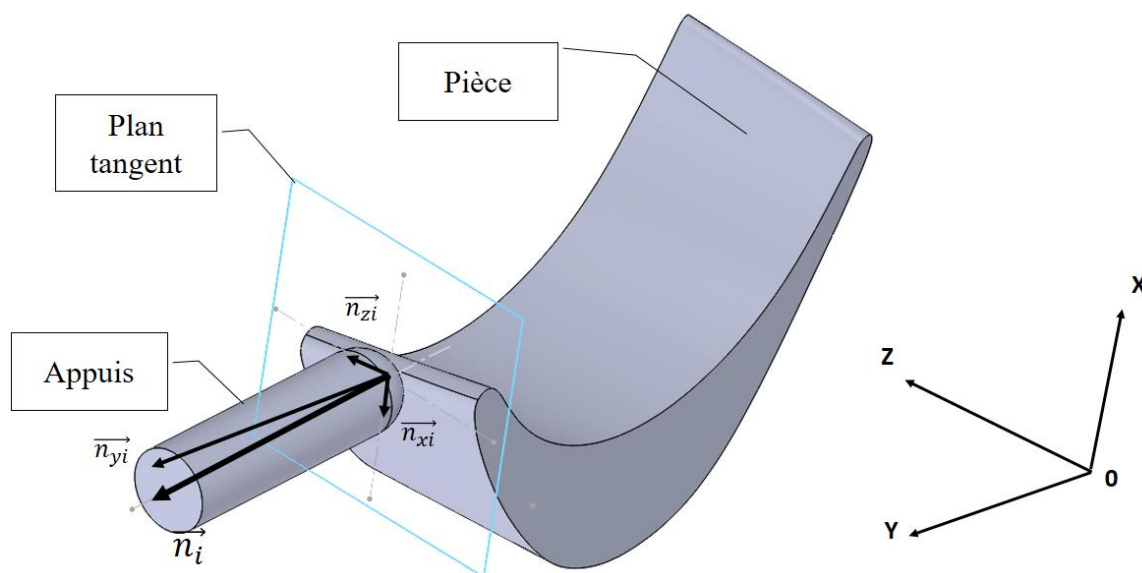


Figure III 17: Représentation du vecteur unitaire  $\vec{n}_i$  et ces trois composantes

Plus que la force de réaction de la pièce contre l'appui est importante, plus que la composante vers une direction quelconque est proche de  $\vec{n}_i$ .

A cet effet, le choix des six vecteurs normaux correspondants aux six appuis du MU se fait à la base de choix des six composantes presque perpendiculaires aux trois plans orthogonaux traversant la pièce objet d'étude (figure III.18).

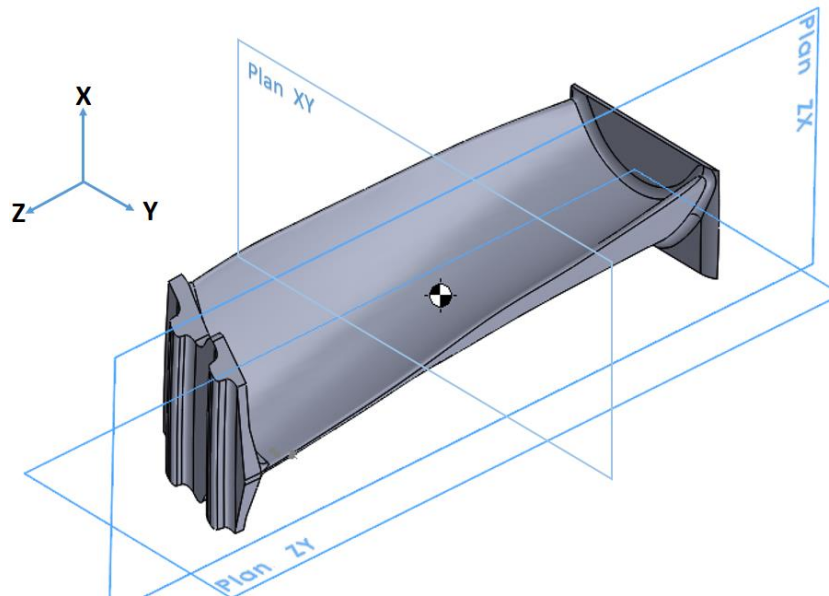


Figure III 18: Les trois plans orthogonaux de la pièce.

Le choix se fait suivant la séquence suivante :

- Deux composantes perpendiculaires au plan ZX, ( $n_{yi}$  Proche de  $n_i = \pm 1$ ), déterminent les positions d'appuis (D1, D4) voir figure IV.2. (les deux composantes  $n_{xi}$  et  $n_{zi}$  sont égales ou presque proches à zéro)
- Deux composantes perpendiculaires au plan ZY, ( $n_{xi}$  Proche de  $n_i = \pm 1$ ), déterminent les positions d'appuis (D2, D5) voir figure IV.2. (les deux composantes  $n_{yi}$  et  $n_{zi}$  sont égales ou presque proches à zéro).
- Une composante perpendiculaire au plan XY, ( $n_{zi}$  Proche de  $n_i = \pm 1$ ), détermine la position d'appui (D6). Voir figure IV.2. . (les deux composantes  $n_{xi}$  et  $n_{yi}$  sont égales ou presque proches à zéro).
- Une composante qui détermine l'appui (D3 : sert à éliminer la rotation autour de l'axe Z) avec deux composantes ( $n_{xi}, n_{yi}$ ), qui sont égales ou presque, la troisième composante est presque nulle. Voir la figure V.2.

Cependant, 50 configurations différentes ont été revues ; il n'y a donc pas de répétition de la même configuration. Certaines positions de localisation sont plus populaires que d'autres. 50 positionneurs différents ont été sélectionnés par l'AG. Le résumé des résultats est présenté dans le tableau III.11 et seuls les 10 principaux localisateurs les plus répétitifs sont présentés dans ce tableau. La configuration avec la plus grande valeur déterminée est illustrée à la figure III.16.

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre, une optimisation de la disposition des appuis de positionnement de montages d'usinage de deux pièces types a été abordée. Il s'agit d'une technique utile pour les chercheurs pour leur fournir des outils indispensables et automatisés pour le développement rapide de la disposition des montages d'usinage. En outre, il permet aux concepteurs novices d'utiliser l'application de conception de montages d'usinage pour formuler une disposition des montages optimisée et la performance de nouvelles conceptions de montages d'usinages peut être évaluée facilement et rapidement.

# Chapitre IV: Implémentation de l'approche proposée pour le développement d'un montage d'usinage des pièces de formes complexes.

## IV.1 Introduction :

Selon Wang et al. [135], un montage d'usinage doit satisfaire aux exigences suivantes :

- Bonne répétabilité du chargement
- Immobilité
- Nombre minimum de configurations (prises)
- Accessibilité
- Bonnes performances dynamiques
- Pas de déformation excessive de la pièce survenant lors du maintien et de l'usinage

La conception et la fabrication de montages d'usinage pour les pièces avec des surfaces de forme libre et une géométrie complexe posent plusieurs défis en termes de choix de placement du localisateur, de répétabilité et de précision du positionnement, et d'interchangeabilité des pièces usinées.

L'objectif principal de cette étude à travers ce montage est de créer un nouveau référentiel sur le pied de pale, Ce nouveau référentiel devra être unique pour les autres montages d'usinage afin de faciliter le positionnement et le maintien des pales (Figure IV.1).

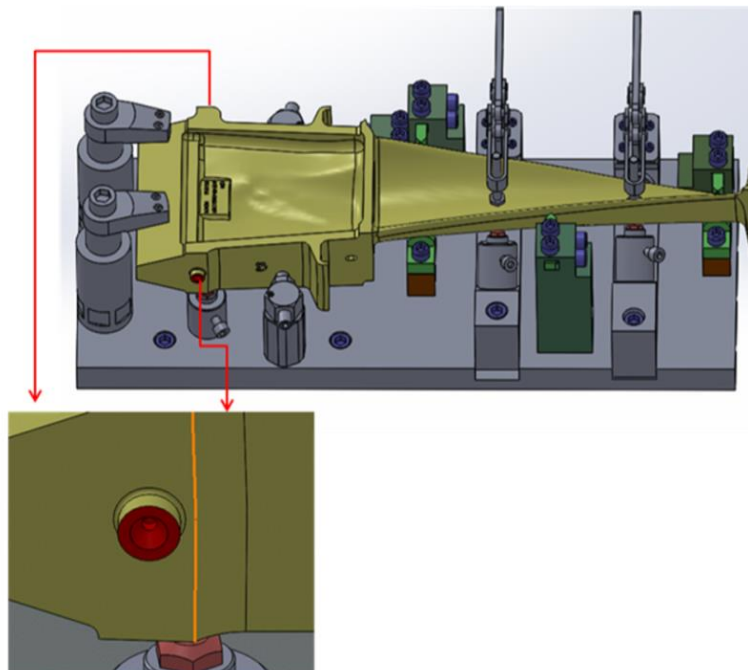


Figure IV 1: Création d'un nouveau référentiel pour faciliter le positionnement et la tenue de la pièce

Du fait de la complexité de la pièce dont la pale de l'aube où se situent les six points de référence (figure IV.2), et du fait des différentes opérations que va subir l'aube, différents montages d'usinage doivent être mis en œuvre à la base de ce nouveau référentiel.

Selon la nature du procédé d'usinage à utiliser, le nouveau repère créé sur le pied de l'aube peut être utilisé pour le perçage des trous de refroidissement par perçage électrochimique ou (electro chemical drilling ECD) (Figure IV.3), ainsi que pour l'usinage du pied de sapin de l'aube avec usinage par électro-décharge ou (electro discharge machining EDM) (figure IV.4).

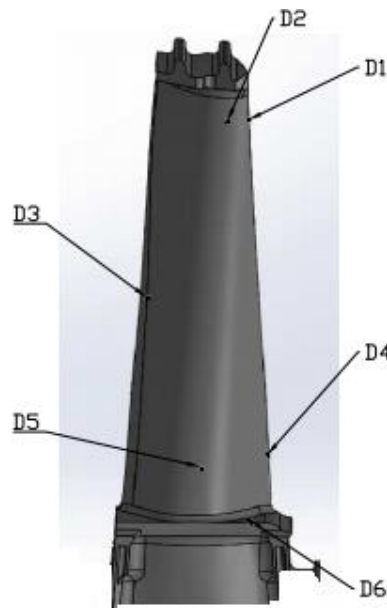


Figure IV 2: Les six points de référence de l'ailette objet d'étude.



Figure IV 3: Dispositif d'usinage pour le perçage des trous de refroidissement au niveau de la pale d'ailette par ECD

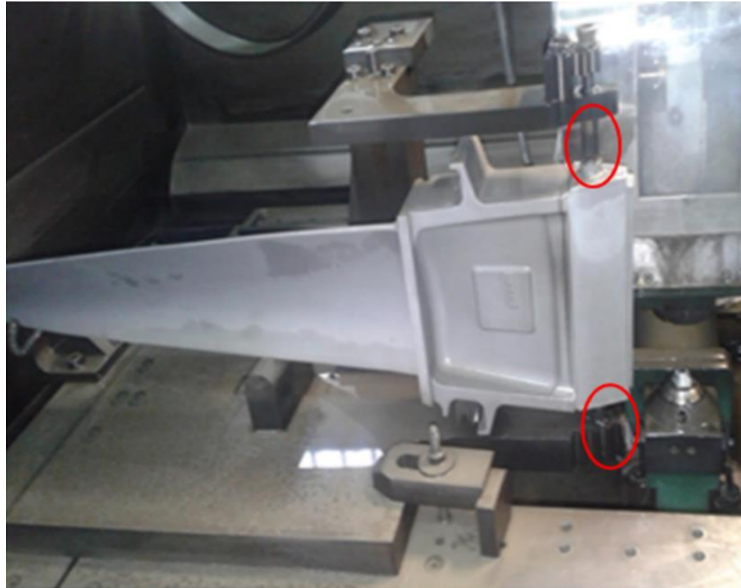


Figure IV 4: Dispositif d'usinage destiné à usiner le pied de sapin par électroérosion à fil (EDM)

## IV.2 Procédés d'électro-usinage (ECM et EDM) :

Les procédés d'usinage électrochimique et par électro décharge sont les deux principaux procédés d'électro-usinage dotés de capacités uniques. L'usinage par décharge électrique (EDM) et l'usinage électrochimique (ECM) offrent une meilleure alternative ou parfois la seule alternative pour générer des caractéristiques macros, micro et nano de forme complexe en 3D précises et des composants de matériaux difficiles à usiner [136].

### IV.2.1 Le procédé du perçage électrochimique ECM :

Il est difficile d'usiner des macro et micro-trous dans des matériaux très durs et cassants en utilisant des méthodes d'usinage traditionnelles. Les progrès récents réalisés dans le domaine de l'aviation (trous de refroidissement dans les aubes des turbines à réaction), de l'espace, de l'automobile, de l'électronique et de l'informatique (circuits imprimés), du médical (implants chirurgicaux), de l'optique, de la fabrication de miniatures et autres, ont créé le besoin de petits et micro-taille des trous avec un rapport d'aspect élevé dans des matériaux extrêmement durs et cassants. La complexité et le degré de précision requis pour les composants dans ces industries nécessitent que ces trous soient droits, précis et exactement positionnés. Les procédés de perçage de trous basés sur l'usinage électrochimique (ECM) possèdent les capacités requises pour relever les défis posés [137].

**IV.2.1.1 Le principe de processus du perçage électrochimique :**

L'ECM est un processus de dissolution anodique. Il utilise une cellule électrolytique formée par un outil de cathode et une pièce d'anode avec un électrolyte approprié circulant entre eux. La pièce anodique est dissoute selon la loi de Faraday lorsqu'une tension suffisante est appliquée à travers l'espace entre l'anode et la cathode dans laquelle l'électrolyte est rempli [137].

Les procédés électrochimiques pour le perçage de trous petits et fins par dissolution anodique contrôlée utilisent invariablement une solution acide faible comme électrolyte. Ceux-ci incluent le forage électrochimique (ECD) et les procédés de forage (ECM) à base d'acide : usinage électrolytique de tubes profilés (STEM), forage capillaire (CD), forage électro-flux (ESD) et forage électrolytique par jet (JED) figure IV.5.

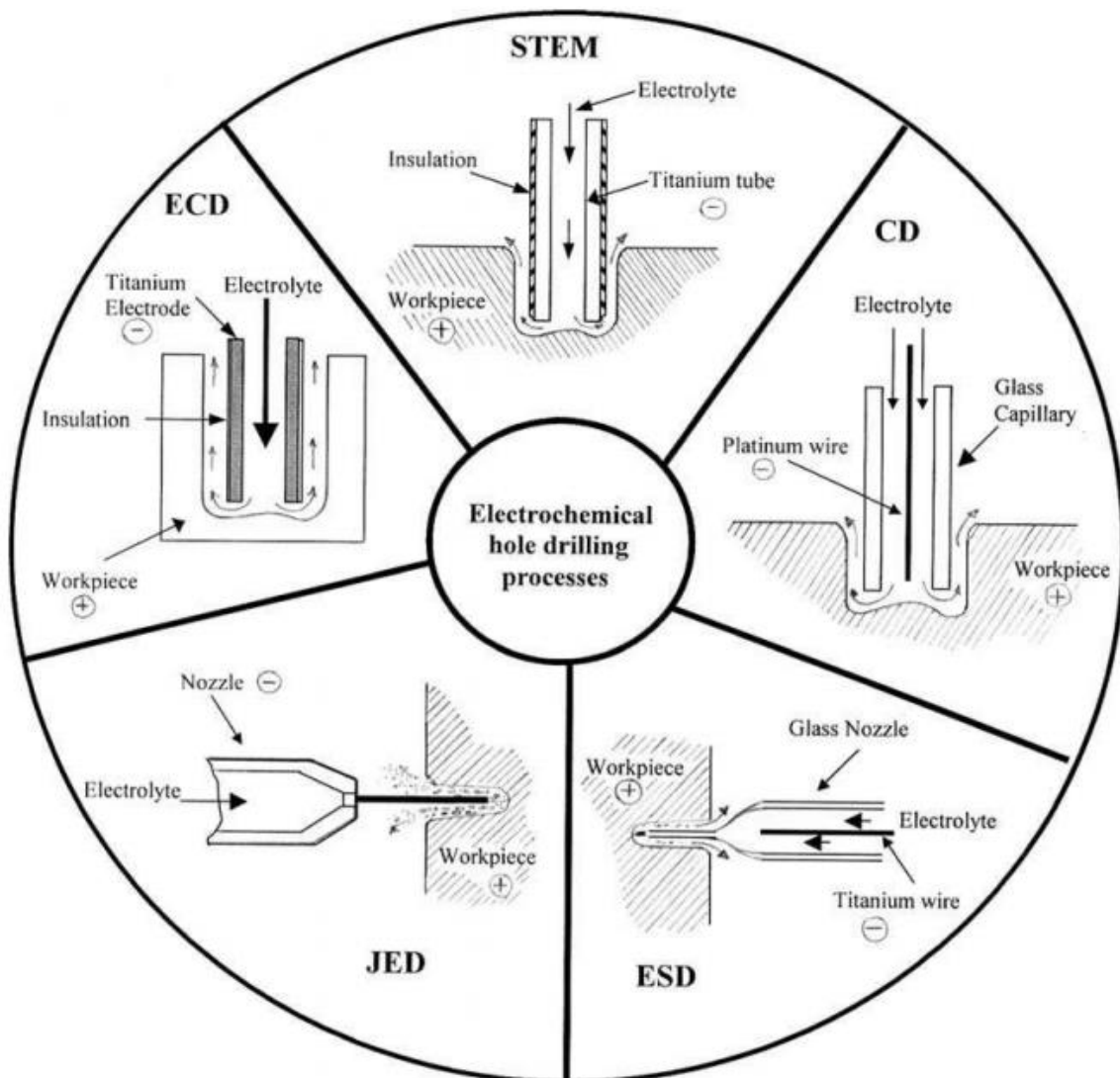


Figure IV 5: Processus de perçage (forage) électrochimique [137].

L'utilisation d'électrolytes acides dans les processus de perçage de trous ECM facilite la dissolution des métaux et le matériau retiré est emporté sous forme d'ions métalliques, ce qui permet d'obtenir une finition lisse avec des tolérances plus étroites et des trous profonds de rapport d'aspect élevé.

### **IV.2.2 L'usinage par décharge électrique (électroérosion) EDM :**

L'usinage par électroérosion (EDM) est un procédé d'usinage électrothermique sans contact. Un usinage précis peut être effectué sur des matériaux électriquement conducteurs et semi-conducteurs à l'aide de ce processus d'usinage non conventionnel. L'EDM peut être utilisé pour percer des trous circulaires et non circulaires, générer des profils et fabriquer des matrices de forme complexe de macro et micro tailles. L'usinage par électroérosion par fil (WEDM) s'est considérablement développé depuis sa première application il y a plus de vingt ans. Ses vastes capacités lui ont permis d'englober les industries de la production, de l'aérospatiale/aéronautique et médicale et pratiquement tous les domaines de l'usinage des matériaux conducteurs. À mesure que des matériaux nouveaux et plus exotiques sont développés et que des formes plus complexes sont présentées, les opérations d'usinage conventionnelles continueront d'atteindre leurs limites et l'utilisation accrue de l'électroérosion à fil dans la fabrication continuera de croître à un rythme accéléré [136], [138].

#### ***IV.2.2.1 Le principe de l'usinage EDM à fil :***

Le procédé d'usinage par décharge électrique à fil (WEDM) est un procédé électrothermique potentiel qui est utile pour l'usinage de ces matériaux électriquement conducteurs difficiles à couper. Le mécanisme d'enlèvement de matière du processus WEDM ressemble vraiment au processus EDM par enfonçage avec une petite différence dans la forme de l'électrode de l'outil. Au lieu d'utiliser un outil préformé qui est le plus souvent utilisé dans l'électroérosion par enfonçage, un fil mince de 0,05 à 0,3 mm de diamètre (en cuivre ou laiton), agit comme un outil dans le WEDM. La figure IV.6 montre un diagramme schématique du processus WEDM [139].

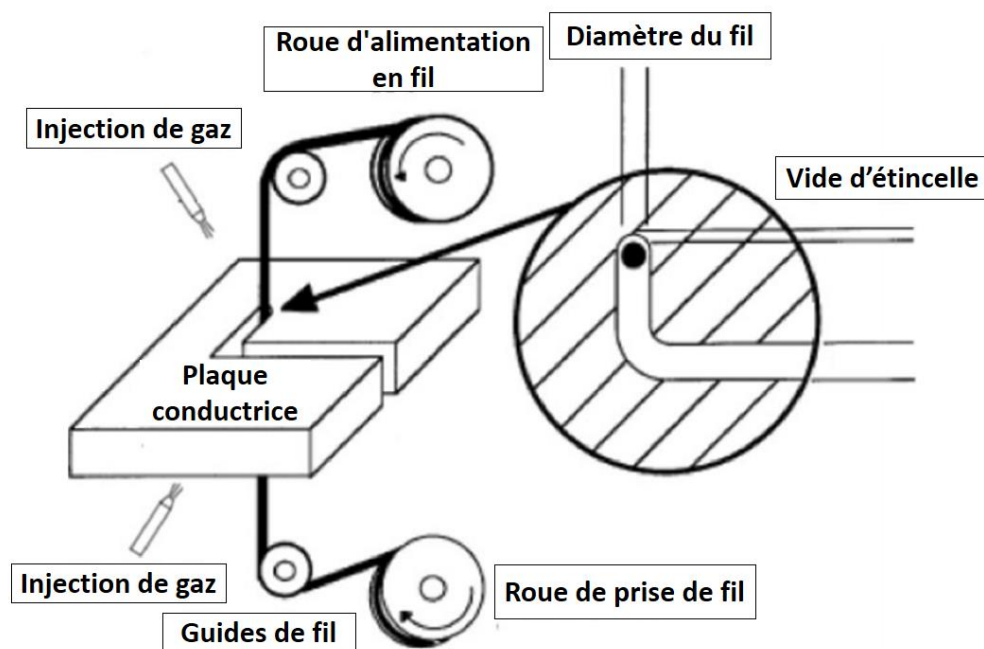


Figure IV 6: Un schéma de principe du processus d'électroérosion à fil [139].

## IV.2 Stratégie de conception :

Afin de réaliser une conception optimale, certains points techniques doivent être pris en considération :

- Le modèle numérisé en 3D doit être cohérent avec le modèle de l'aube de turbine réelle.
- Les coordonnées cartésiennes du référentiel d'aube par rapport à son emplacement dans l'ensemble turbine sont connues.
- Une large gamme d'accessoires standards en format 3D tels que les accessoires de fixation et les accessoires supports et de soutien pour optimiser le temps de conception sont connus.

Sur la base de ses connaissances techniques et expérimentales, un concepteur qualifié serait en mesure de concevoir un montage d'usinage qui répond aux exigences technologiques et fonctionnelles, telles que :

- Assurer un bon positionnement de la pièce, avec une bonne répétabilité, c'est-à-dire que chaque pièce doit être située exactement dans la même position à chaque fois.
- Assurer un bon maintien de la pièce (bonne stabilité) lors de l'usinage.
- Facilitez le montage et le démontage des pièces dans un délai optimal.
- Avoir une conception ouverte pour faciliter l'accès de l'outil de coupe à la surface à usiner.
- Assurer la sécurité de l'opérateur.

- S'adapter à d'autres fonctions, telles que les opérations de mesure et d'électroérosion par enfonçage.

Les différentes contraintes influençant la conception du montage d'usinage sont les suivantes :

- Contraintes physiques
- Contraintes d'assemblage
- Contraintes de fabrication
- Les contraintes esthétiques

La conception du montage d'usinage est réalisée selon l'organigramme présenté à la figure IV.7.

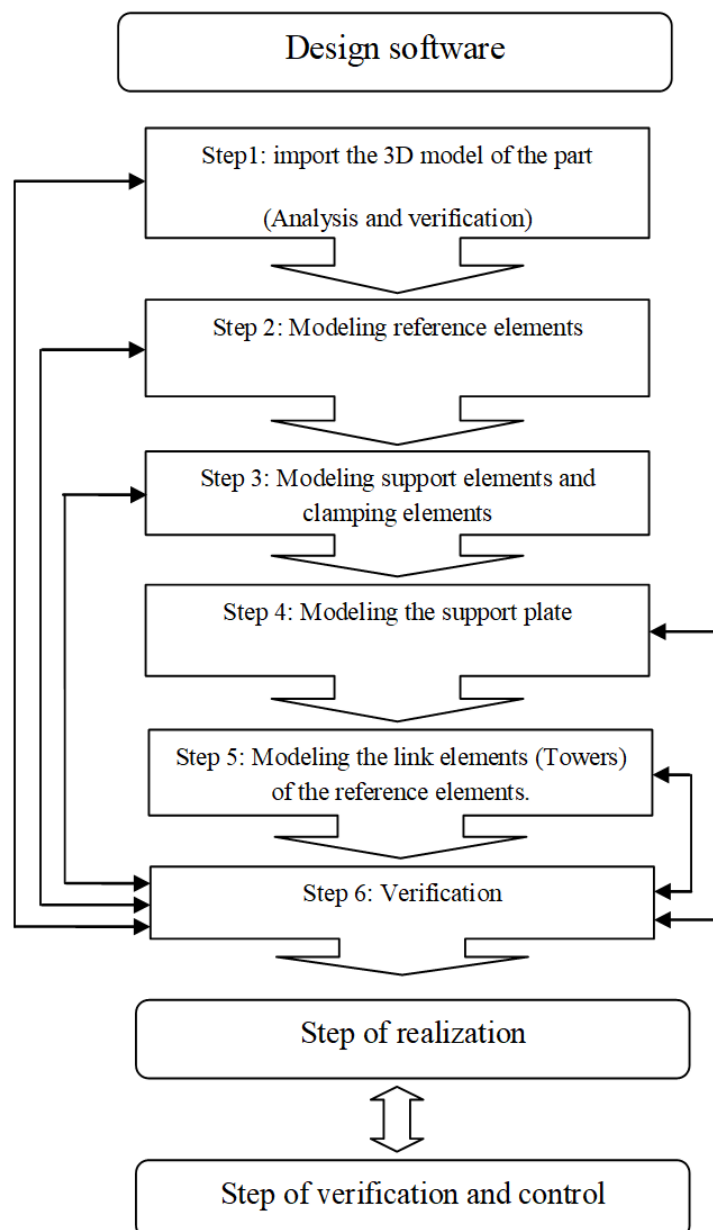


Figure IV 7: Organigramme montrant les étapes de conception du MU [69]

Commençant par l'import du modèle 3D fournit par le fondeur (bureau d'études) sous format IGES ou STEP aux logiciels de CEAO. « Topsilod » pour la FAO, le « Solidworks » est destiné pour la CAO et l'analyse. Le modèle sera vérifié et analysé géométriquement pour des éventuels défauts ou discontinuité géométrique (figure IV.8).

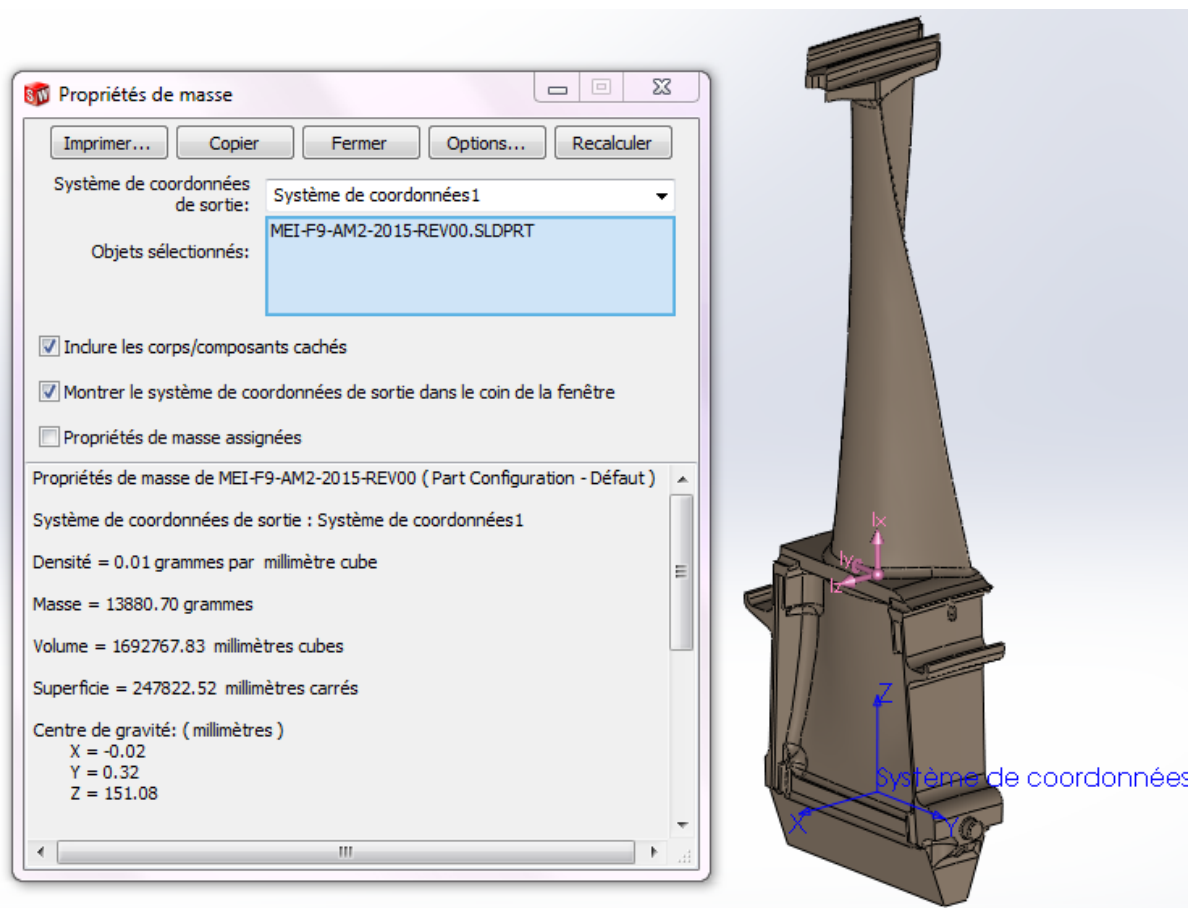


Figure IV 8: Analyse et vérification de la géométrie de l'ailette.

La modélisation des éléments de positionnement, sera la deuxième étape au niveau des six points de localisations optimisés dans le chapitre II (figure IV.9), une analyse d'interférence et par éléments finis EF sont primordiales afin de confirmer les caractéristiques physiques et mécaniques finales de chaque élément.

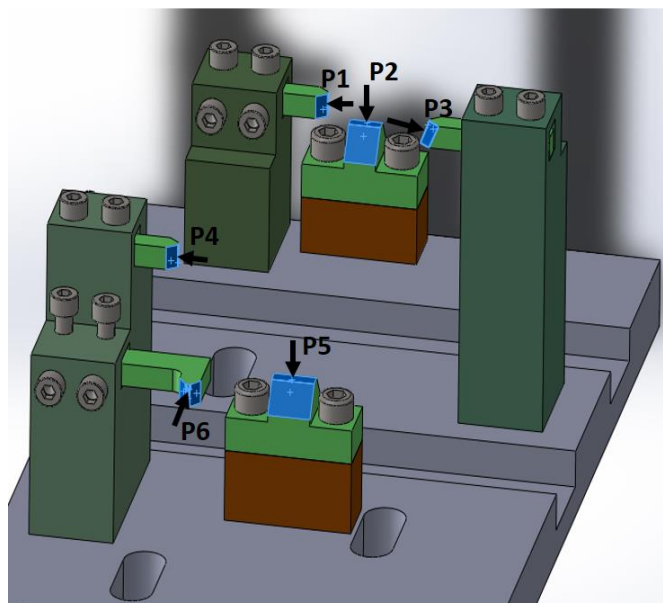


Figure IV 9: Représentation des six appuis de positionnement.

La troisième étape est la modélisation des sauterelles après un choix pré étudié des forces de serrage, ainsi que les supports de soutien à contact réglable (figure VI.10).

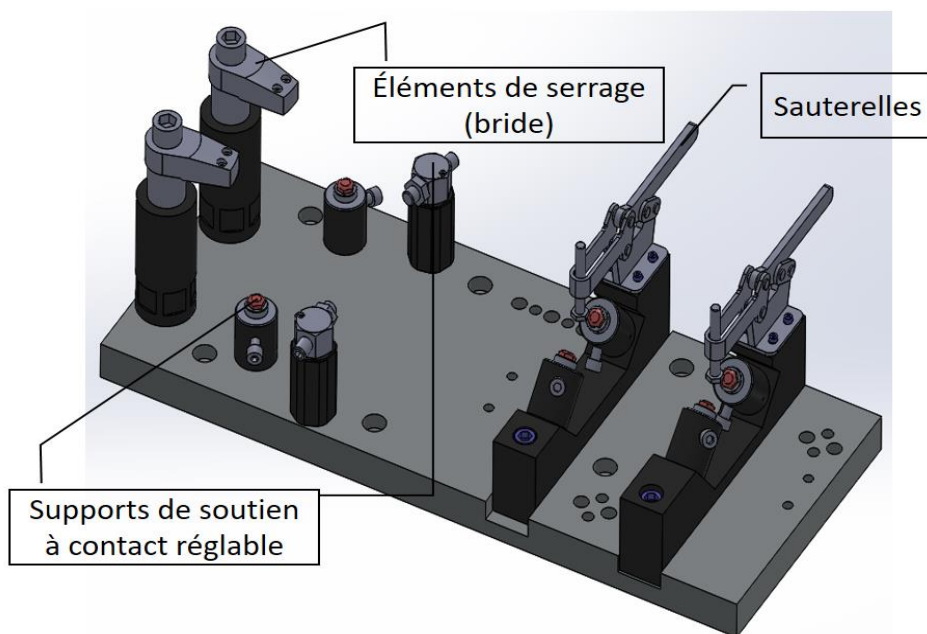
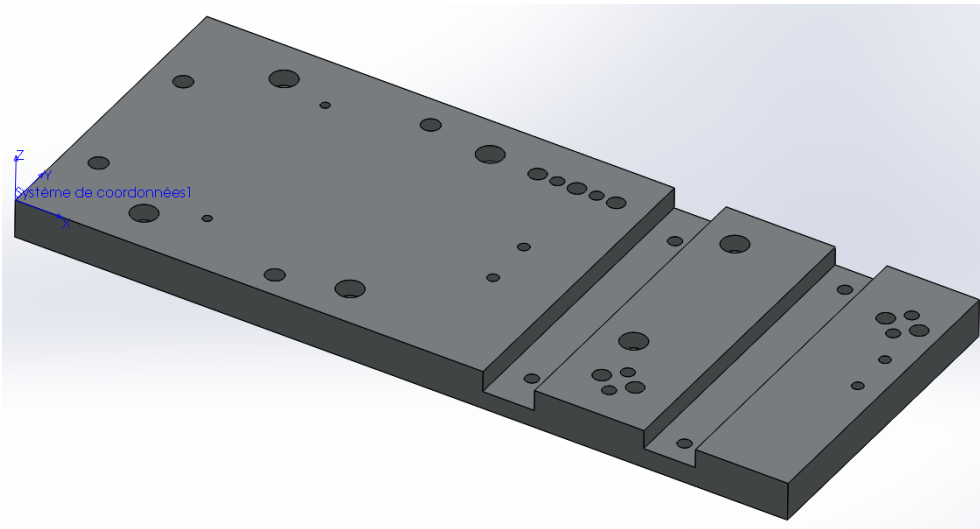


Figure IV 10: Les éléments de serrage et les supports de soutien.

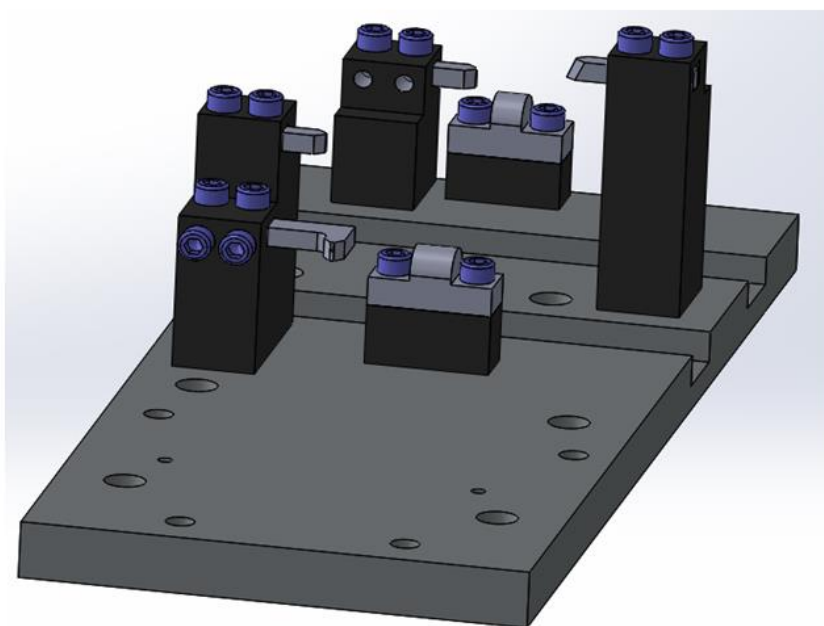
Après la finalisation de la modélisation des appuis de positionnement, les éléments de serrage, ainsi que les supports réglable de soutien, une vérification d'éventuelles interférences est nécessaire entre tous ces éléments cités auparavant et la pièce. Après la validation de l'étape

Chapitre IV \_\_\_\_\_ Implémentation de l'approche proposée pour le développement du MU précédente, l'étape suivante consiste la modélisation de la plaque support principale portant tous les éléments constituant le montage d'usinage (figure VI.11).



*Figure IV 11: La plaque support principale*

La dernière étape de la modélisation concerne les supports portant les appuis de positionnement (les tours / towers). Ces supports sont modélisés de telle façon à permettre l'accès aux outils de coupe, à la vérification du jeu entre tous les éléments précédents et la pièce, et surtout au montage et démontage facile de la pièce (figure IV.12).



*Figure IV 12: Les supports (tours) portants les appuis de positionnement.*

### IV.3 Stratégie de fabrication :

Lors de la fabrication du montage d'usinage, deux postes de travail ont été couplés pour la réalisation des différents composants, le centre d'usinage vertical 5 axes (CUV) type DMG (figure IV.13), avec contrôleur Siemens (Sinumerik 840d) (figure IV.14), et une machine de découpage à fil par décharge électrique (EDM) type ONA AF35 (figure IV.15).



Figure IV 13: CUV 5 axes type DMG

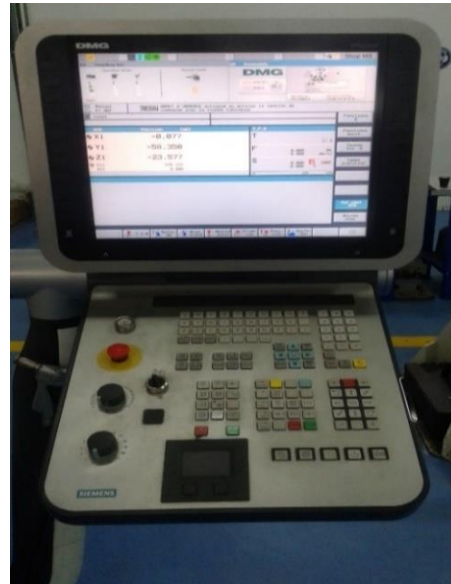


Figure IV 14: HMI Sinumerik 840d



Figure IV 15: Machine EDM à fil type ONA AF35

Cependant, les appuis de positionnement ont été fabriqués de la même manière, à l'exception des faces qui sont en contact avec la pale de l'ailette, où elles sont reportées après l'étape de l'assemblage finale. Elles sont soumises à l'usinage multiaxes (3 axes simultanés). Les faces qui sont en contact avec la pièce ont la forme d'un segment de cylindre pour assurer le contact ponctuel ou linéaire. Ces faces nécessitent un balayage de finition 3 axes avec un outil hémisphérique après l'opération d'ébauche et semi finition, figure IV.16.

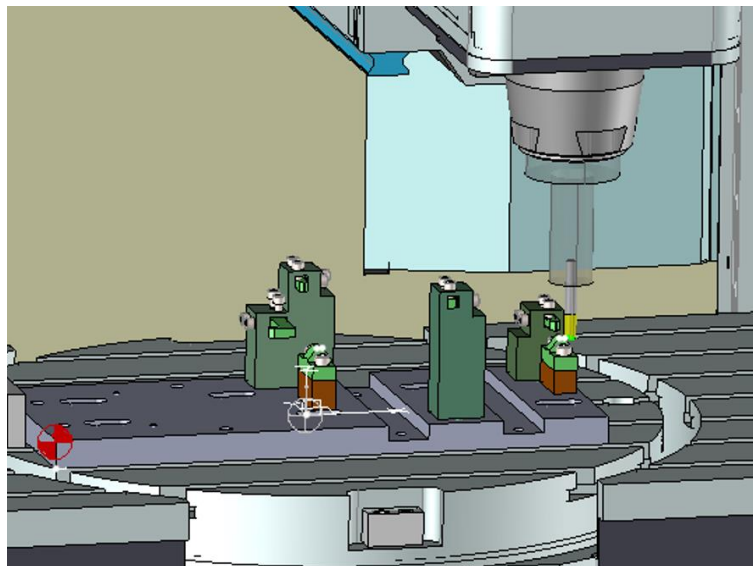
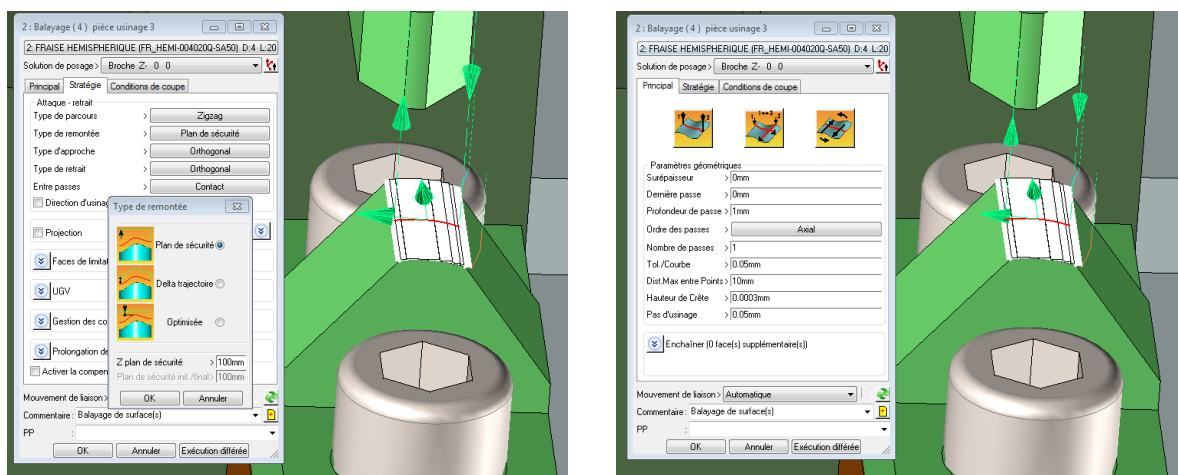


Figure IV 16: Représentation DAO d'une opération de balayage 3 axes d'un appui horizontal

Différentes stratégies d'usinage ont été testées en but d'obtenir un bon aspect et état de surface rigoureux, figure IV.17 a, b, c et d.

La phase d'usinage de finition des éléments de positionnement a été impérativement réalisée sur la VMC 5 axes, en une seule phase, une seule prise, et avec le même référentiel que celui de la conception.



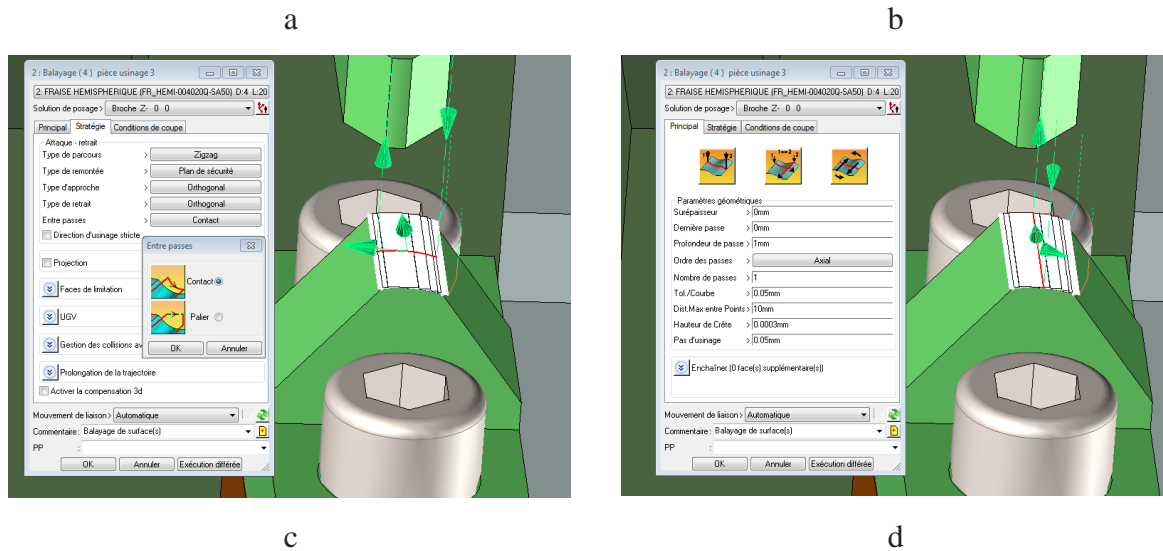


Figure IV 17: Représentation FAO des stratégies d'usinage utilisées.

La qualité du montage d'usinage fabriqué a été évaluée sur la base de la répétabilité de la localisation des aubes de turbine. Une machine de mesure tridimensionnelle de type HEXAGON est utilisée à cet effet (figure IV.18).

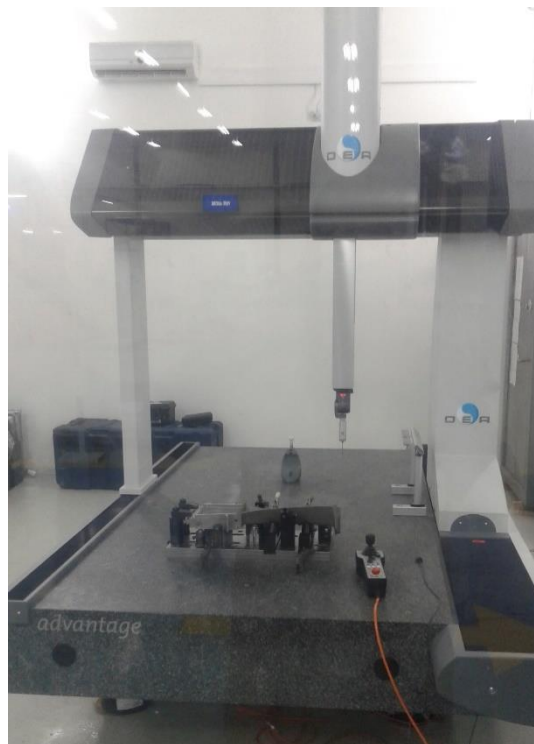
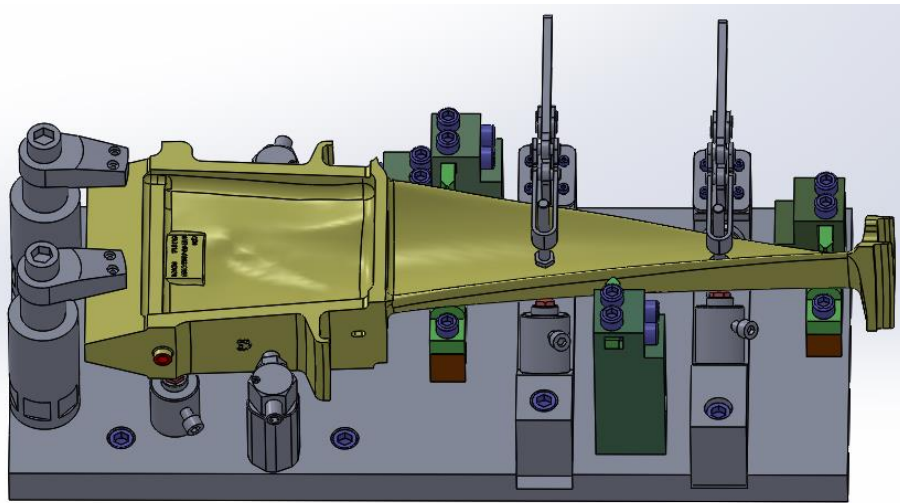
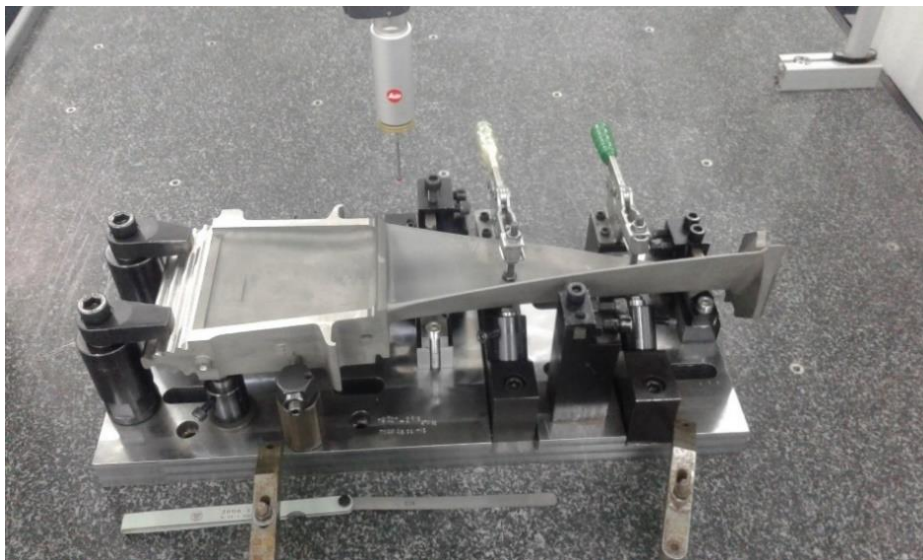


Figure IV 18: Machine MMT type HEXAGON

Les figures IV.19 et IV.20 représentent respectivement le modèle CAO 3D du montage d'usinage et le montage d'usinage réel (fabriqué) portant l'aube mobile usinée.



*Figure IV 19: Modèle CAO du montage d'usinage dans sa phase finale*



*Figure IV 20: Photo du montage d'usinage fabriqué tenant l'ailette mobile*

## **Conclusion :**

Plusieurs composants du dispositif d'usinage ont été usinés séparément de l'état brut à la phase finale soit à l'aide de la machine VMC soit à l'aide de la machine EDM à fil.

La phase d'usinage de finition des éléments de positionnement a été impérativement réalisée sur la VMC 5 axes, en une seule phase, une seule prise, et avec le même référentiel que celui de la conception. Deux modes de programmation ont été utilisés lors de la réalisation des composants du montage d'usinage. Le mode direct sur la machine pour l'usinage 2 axes et 1/2

Chapitre IV \_\_\_\_\_ Implémentation de l'approche proposée pour le développement du MU par le logiciel Shop-Mill de la VMC, et le logiciel machine ONA AF35 pour la machine d'électroérosion à fil. Le mode indirect est la FAO ou CAM, par le logiciel TOPSOLID V6.

# Chapitre V : Évaluation de la qualité du montage d'usinage développé.

## V.1 Introduction :

Il est important de rappeler dans ce contexte que le montage d'usinage est développé, notamment pour créer et fabriquer un nouveau système de référence sur le pied d'ailette.

Le contrôle et l'évaluation de la qualité du montage d'usinage est de garantir la conformité de notre dispositif avec les spécifications techniques et son fonctionnement correct dans un environnement industriel, et d'analyser les résultats obtenus mathématiquement ou bien expérimentalement, dans le but de vérifier la validité du système d'usinage et son cohérence à l'égard des objectifs consacrés par le développeur. Dans ce contexte, trois tests de contrôle pour la validation du MU développé, ont été effectués

Le premier test concerne l'évaluation de la stabilité statique de l'aube de turbine semi-finie sur le dispositif d'usinage développé sans démontage (Figure IV.20), par la sensation expérimentale de vibrations et de bruits anormaux dans le stand de machines utilisant la machine de mesure tridimensionnelle MMT.

Le deuxième test vise à analyser les performances du dispositif d'usinage par l'évaluation de la répétabilité de la localisation de la pièce. Ce test est divisé en deux parties, la première partie concerne l'évaluation de la répétabilité du montage d'usinage en se basant sur le concept de torseur de petits déplacements TPD, pour la mesure et l'évaluation des six points de référence. Dans la deuxième partie, 20 points arbitraires ont été sélectionnés et soumis à des mesures directes par MMT sur la totalité de l'ailette, en but de confirmer la répétabilité et la reproductibilité du système après usinage.

Le troisième test est destructif. Ce test a été fait sur la première ailette qu'a été subit à l'opération ECD des trous de refroidissement au niveau de la pale en utilisant le nouveau référentiel réalisé au niveau du pied d'ailette au moyen du montage d'usinage développé. Le but de test est d'inspecter la disposition des trous au niveau des sections découpées.

Pendant la mesure, les points à mesurer peuvent être situés à des endroits inaccessibles au palpeur de mesure directe de la MMT en raison des contraintes de contact entre les positionneurs et la pièce. Cependant, selon la propriété de l'équiprojectivité, le palpement des six points de contact ( $M_i$ ) pour les six points de positionnement peut être effectué n'importe où sur la droite normale ( $N_i$ ). En conséquence, les points mesurés ont été sélectionnés le long de la ligne normale ( $N_i$ ) de chaque point de contact (entre les positionneurs et la pièce) mais du côté opposé comme le montrent les figures V.1 et V.2.

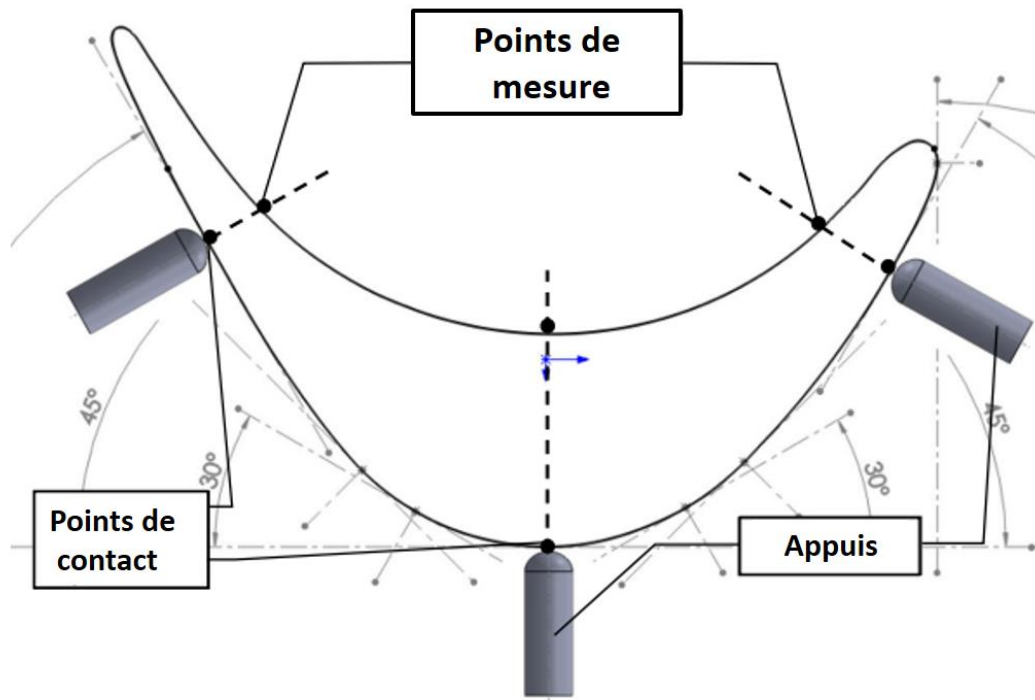


Figure V 1: Illustration schématique des points de contact avec leurs vecteurs normaux associés

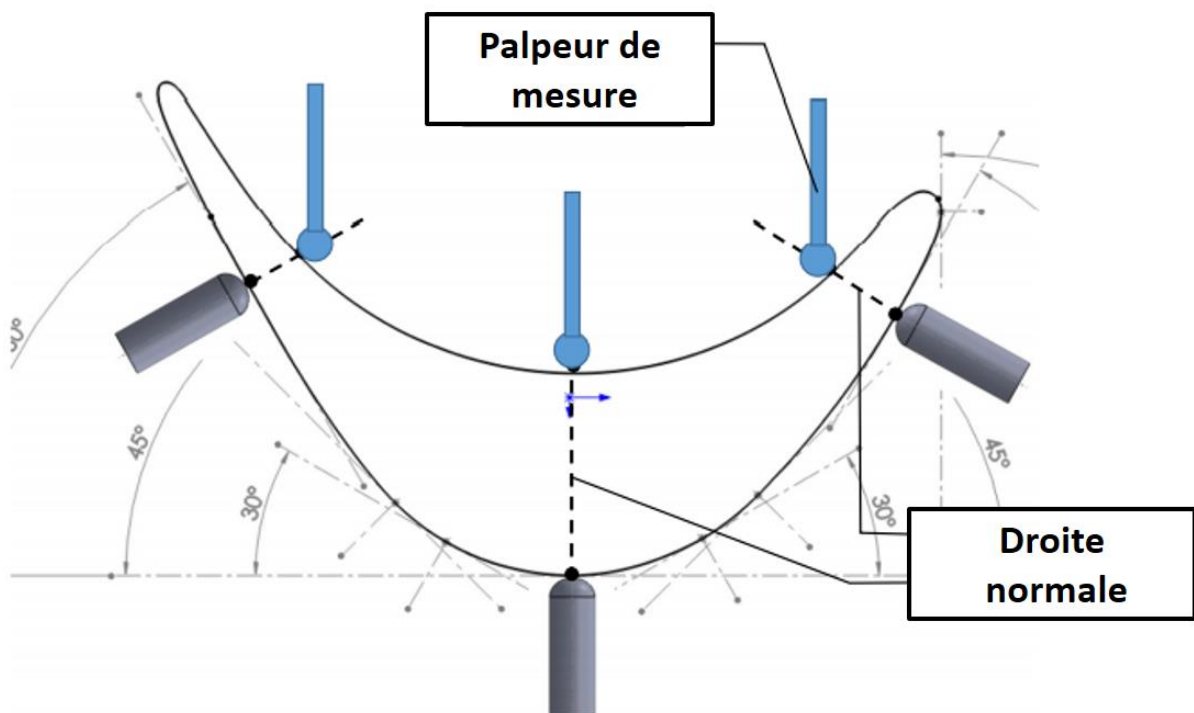


Figure V 2: Représentation schématique des points de mesure pour les tests de répétabilité

## V.2 La propriété d'équiprojectivité :

### Définition :

Un champ de vecteurs  $\vec{M}$  équiprojectif est un champ de vecteurs affine tel que : pour tout couples de points (A, C) il y'a [140]:

$$\vec{CA} \cdot \vec{M}_A = \vec{CA} \cdot \vec{M}_C \text{ Ou } \vec{M}_A \cdot \vec{CA} = \vec{M}_C \cdot \vec{CA} \quad (\text{V.1})$$

Les vecteurs moments  $\vec{M}_A$  et  $\vec{M}_C$  respectivement aux points A et C ont la même projection sur la droite AC : On dit que le champ des vecteurs moments, est équiprojectif, (figure V.3).

En utilisant la formule de transport des moments pour déterminer le moment en un point C en connaissant le moment au point A :

$$\vec{M}_C = \vec{M}_A + \vec{CA} \wedge \vec{R} \quad (\text{V.2})$$

Multiplions la relation (V.2) scalairement par le vecteur  $\vec{CA}$ .

$$\vec{CA} \cdot \vec{M}_C = \vec{CA} \cdot (\vec{M}_A + \vec{CA} \wedge \vec{R}) = \vec{CA} \cdot \vec{M}_A + \vec{CA} \cdot (\vec{CA} \wedge \vec{R}) \quad (\text{V.3})$$

Bien que  $(\vec{CA} \wedge \vec{R})$  est un vecteur perpendiculaire à  $\vec{CA}$  alors :

$$\vec{CA} \cdot (\vec{CA} \wedge \vec{R}) = 0 \quad (\text{V.4})$$

On obtient donc :

$$\vec{CA} \cdot \vec{M}_C = \vec{CA} \cdot \vec{M}_A \quad (\text{V.5})$$

Cette formule exprime que les projections des vecteurs moments  $\vec{M}_A$  et  $\vec{M}_C$  sur la droite CA sont égales.

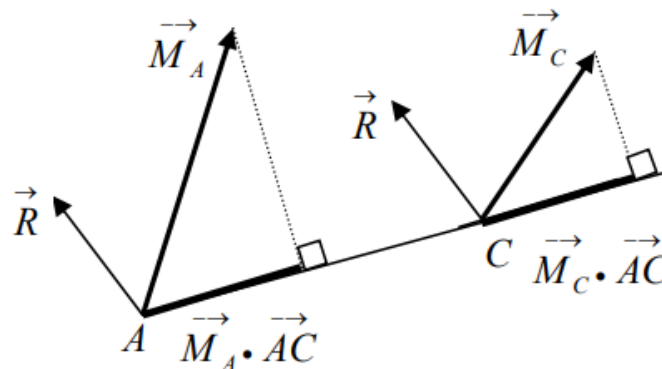


Figure V 3: Projection des moments vecteurs sur la droite AC.

### V.3 La répétabilité (où reproductibilité) :

La répétabilité se définit comme la variabilité aléatoire des résultats d'une série de détermination d'une même mesure effectuée, dans presque les mêmes conditions, et dans un temps court. La reproductibilité se définit comme la répétabilité effectuée de manière espacée dans le temps [141], figure V.4.

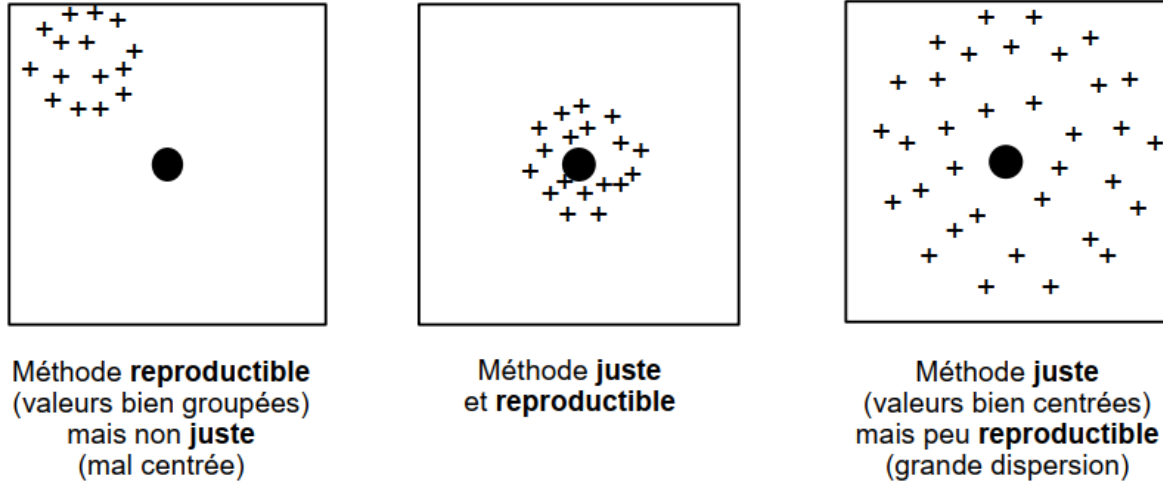


Figure V.4: Représentation de la reproductibilité (répétabilité) des mesures [141].

Pour une position donné, la répétabilité (ou la reproductibilité), exprimée par  $RP_i$  peut être calculée de comme suit :

$$RP_i = \bar{I} + 3Si \quad (V.6)$$

Avec :

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n I_j \quad (V.7)$$

$$I_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (V.8)$$

Avec:

$\bar{x}, \bar{y}$  et  $\bar{z}$ : Sont les coordonnées du barycentre d'un ensemble de points obtenu après la répétition de  $n$  fois de la même position.

$x_j, y_j$  et  $z_j$ : Sont les coordonnées de  $j^{\text{ème}}$  positions atteintes.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j, \quad \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j$$

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I_j - \bar{I})^2}{n-1}} \quad (\text{V.9})$$

Avec :

$I_j$ :  $J^{\text{ème}}$  valeur, obtenue sur une série de  $n$  mesures d'un échantillon.

$n$  : Nombre de mesures.

$\bar{I}$ : Valeur moyenne, sur la série de  $n$  mesures.

#### V.4 Test de stabilité statique :

Le test de l'évaluation de la stabilité statique, se fait en deux parties différentes. La première partie concerne le mesurage des six points de localisation, en palpant la pale d'ailette dans le côté opposé des appuis le long des normales aux points de contacts (figure V.2), en effectuant 100 mesures successives sur la MMT. Dans la deuxième partie de test, 20 points aléatoires ont été choisis le long de l'ailette, 4 points sur la face inclinée du pied d'ailette, et 16 points au niveau de la pale aérodynamique, figure V.5. Ce test a comme objectif, la sensation expérimentale de vibrations et de bruits anormaux dans le stand de machines.

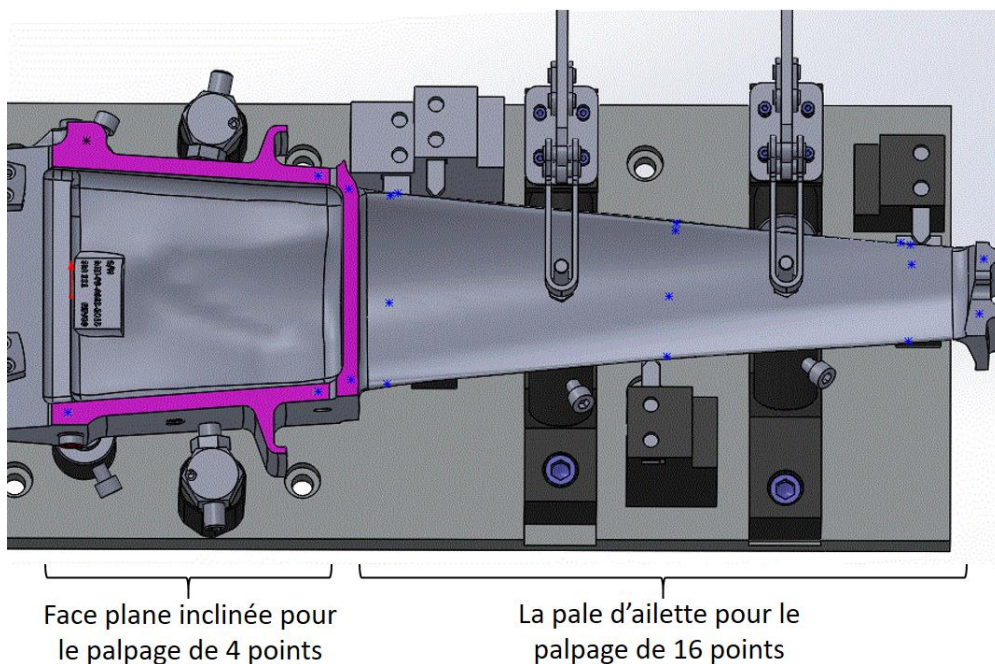


Figure V 5: Représentation de 20 points à mesurer sur l'ailette.

Les étapes suivantes ont été suivies lors des tests effectués sur la machine de mesure tridimensionnelle :

- Le MU placé et aligné sur la table de la MMT.
- La température du milieu dans le stand MMT est environ 22°C.
- Création d'un référentiel de mesure coïncident avec celui du CAO.
- L'ailette insérée une seule fois dans le MU.
- Etablissement d'un programme de palpation pour la recherche des six points de localisation sur le modèle CAO de l'ailette, puis sur le modèle réel.
- Etablissement d'un programme de palpation de 20 points sur l'ailette, (04 points sur la face inclinée du pied d'ailette, et 16 points sur la pale aérodynamique). Les mesures prises lors du palpation manuel des 20 points sont considéré comme mesures de commande (consigne).
- Exécution du programme de mesure en mode AUTO pour le palpation des six points de localisation, cent fois successives (n =100).
- Exécution du programme de mesure en mode AUTO, pour le palpation de 16 points, trois fois successives (n = 3).

#### V.4.1 Présentation des résultats :

La figure V.6 montre les résultats des tests de la stabilité statique sans démontage de l'ailette, pour les six points de localisation.

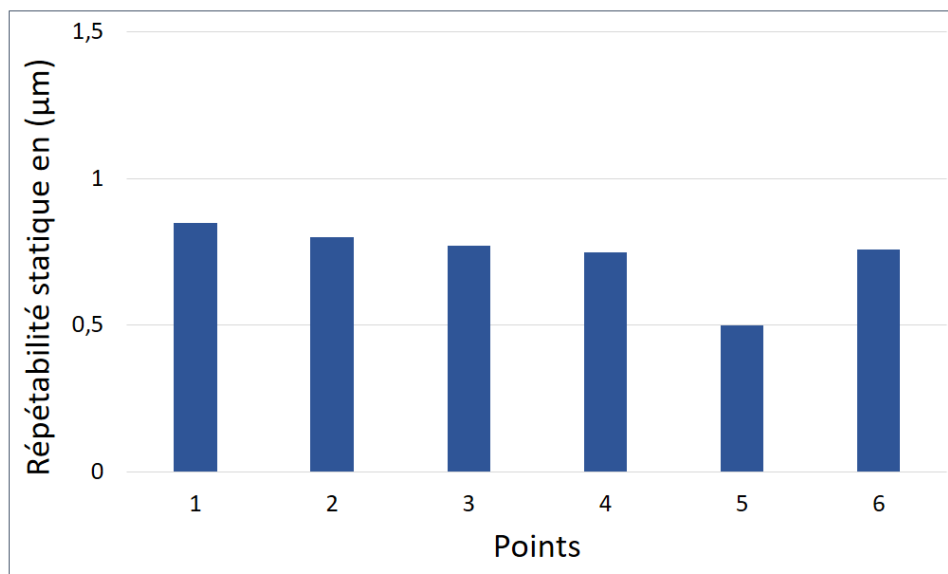


Figure V 6: Quantification de la mesure des bruits par un écart type expérimental.

La figure V.7 représente la disposition des quatre premiers points au niveau du pied d'ailette, qui présente un plan incliné par rapport au plan référentiel de la MMT.

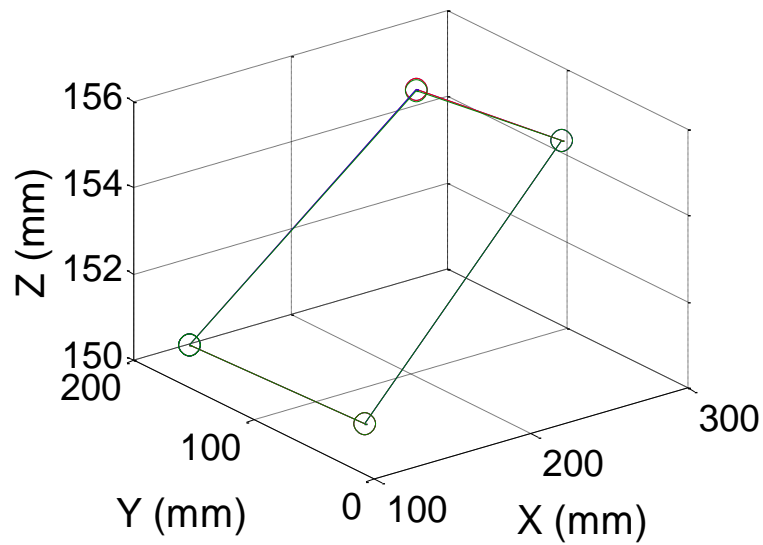


Figure V 7: Représentation des 4 points de la face inclinée.

Dans la deuxième partie du test de la stabilité statique, les figures V.8, V.9 et V.10, montrent successivement les résultats, de l'écart moyen «  $\bar{I}$  », l'écart type «  $S_i$  », et la répétabilité «  $RP_i$  » des 4 points de la face inclinée du pied d'ailette, sans le démontage de la pièce.

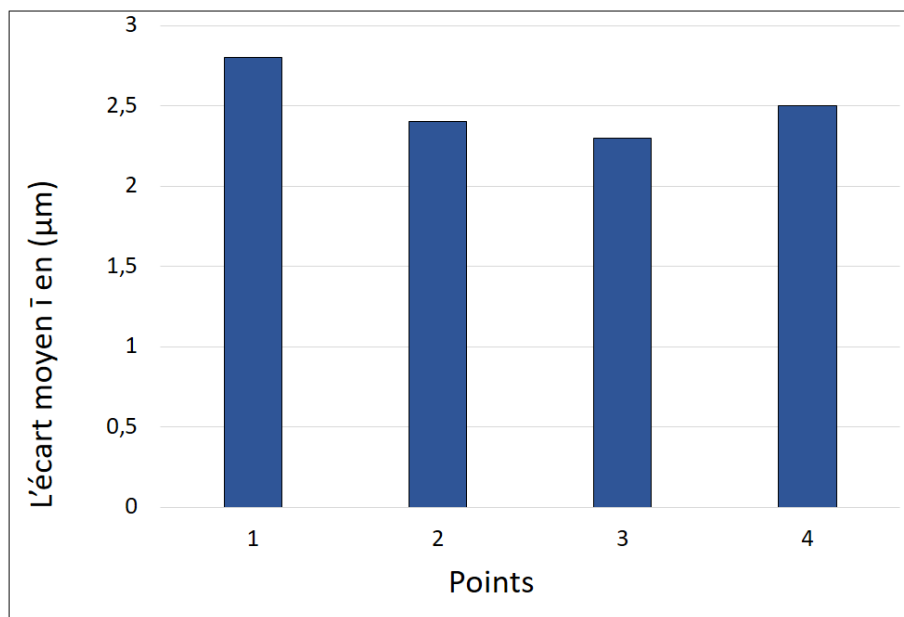


Figure V 8: L'écart moyen «  $\bar{I}$  » des 4 points de la face inclinée

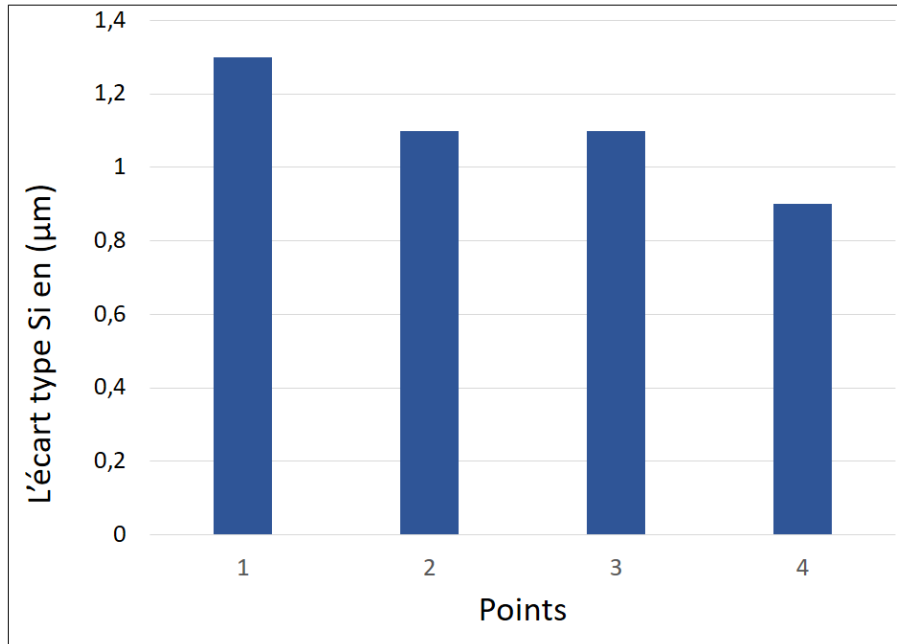


Figure V 9: L'écart type « Si » des 4 points de la face inclinée

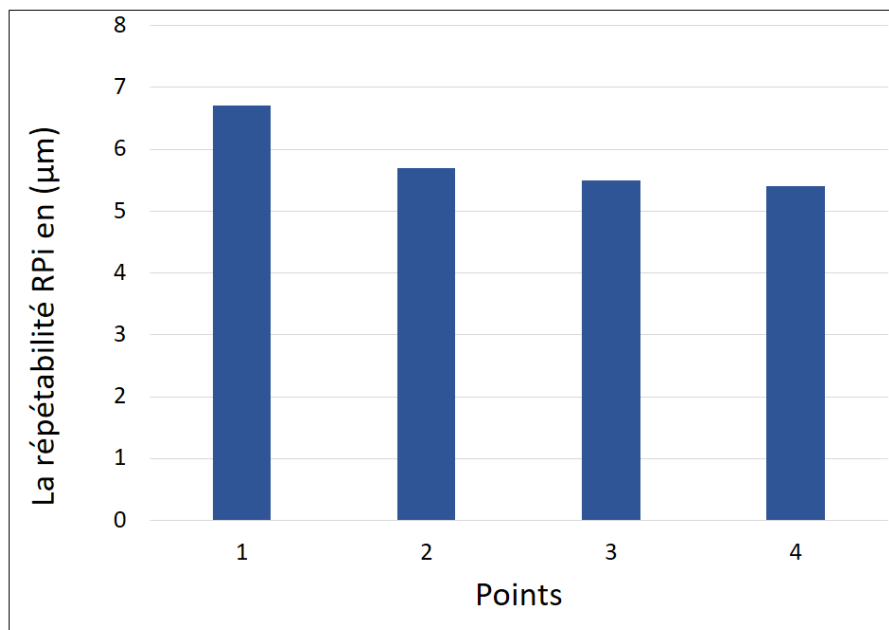


Figure V 10: La répétabilité « RPi » des 4 points de la face inclinée

Les figures V.11, V.12 et V.13, montrent successivement les résultats de l'écart type « Si », selon les axes X, Y et Z, de la stabilité statique des 4 points de la face inclinée de l'ailette, sans le démontage de la pièce.

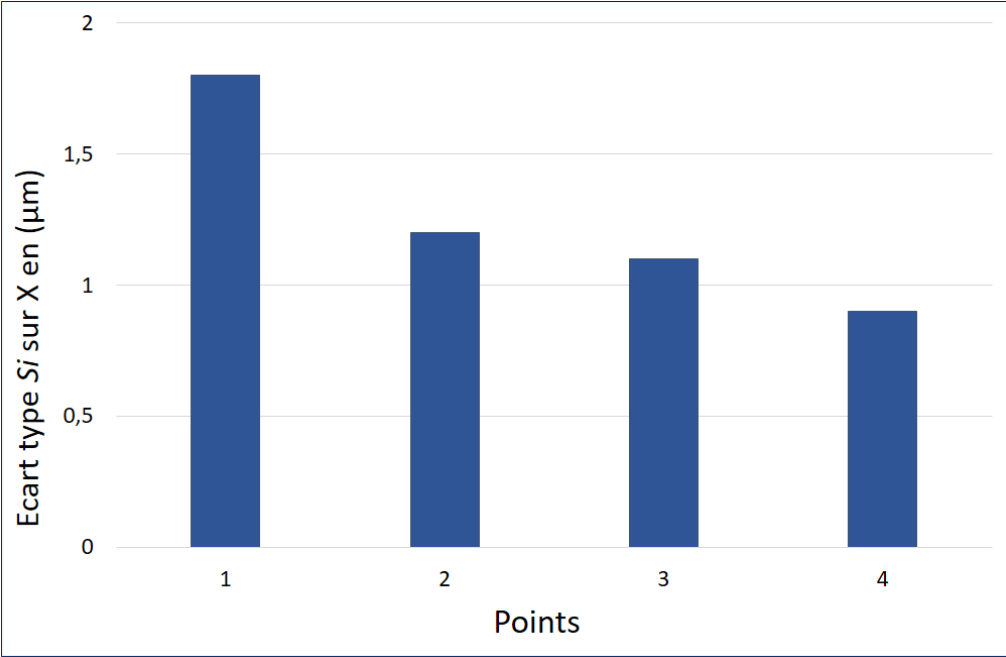


Figure V 11: L'écart type « Si », selon l'axe X pour les 4 points de la face inclinée.

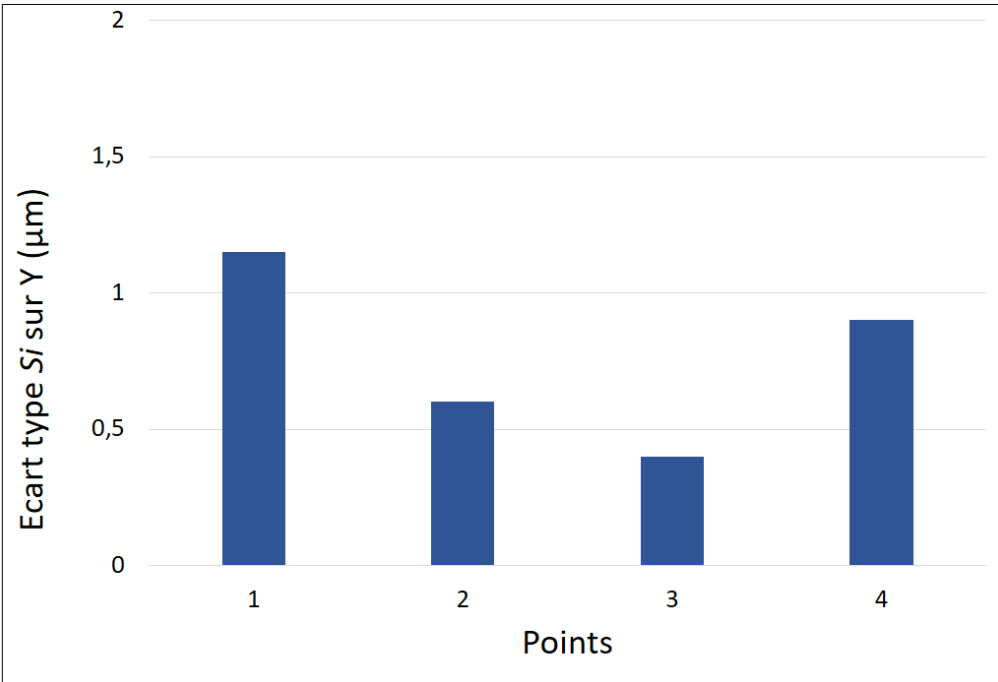


Figure V 12: L'écart type « Si », selon l'axe Y pour les 4 points de la face inclinée.

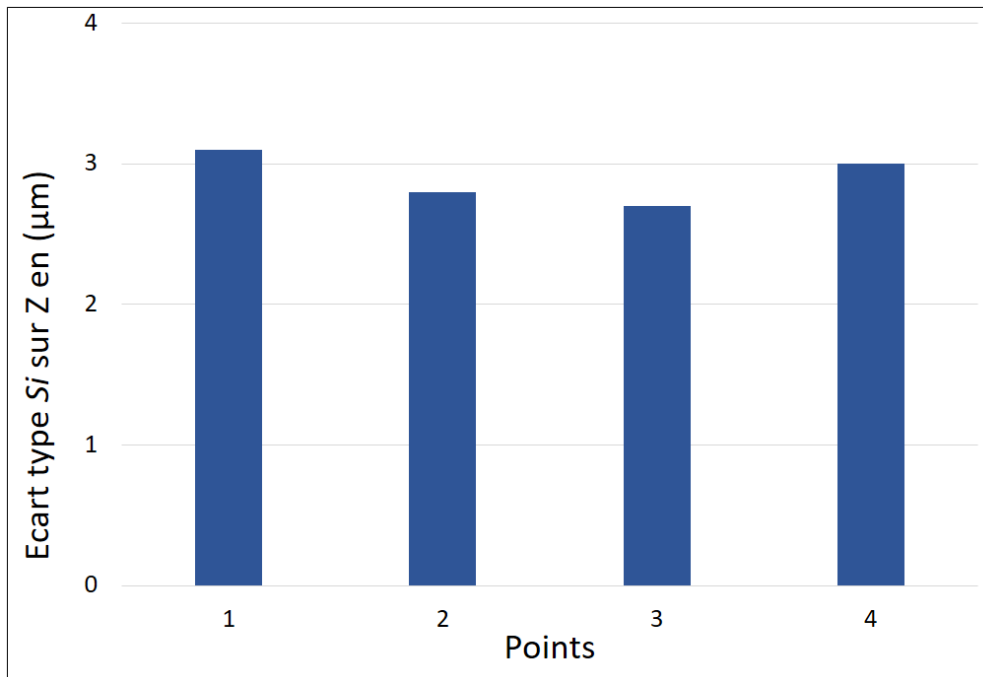


Figure V 13: L'écart type «  $S_i$  », selon l'axe Z pour les 4 points de la face inclinée.

Les figures V.14, V.15 et V.16, montrent successivement les résultats, de l'écart moyen «  $\bar{I}$  », l'écart type «  $S_i$  », et la répétabilité «  $RP_i$  », des 16 points au niveau de la pale d'ailette, sans le démontage de la pièce.

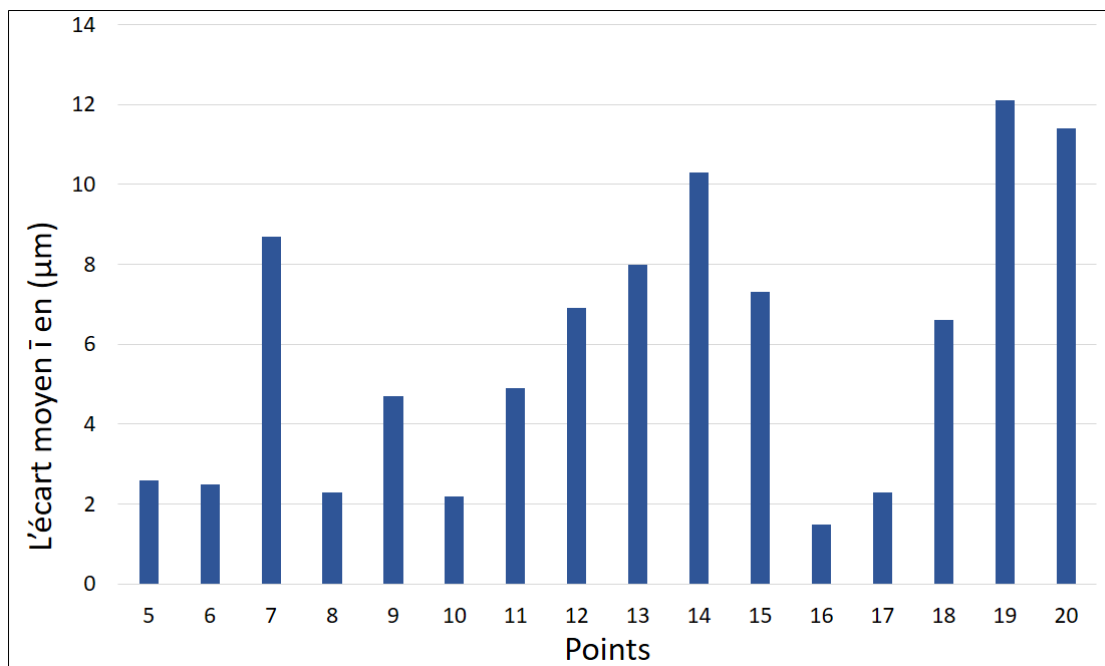


Figure V 14: L'écart moyen «  $\bar{I}$  » des 16 points de la pale d'ailette.

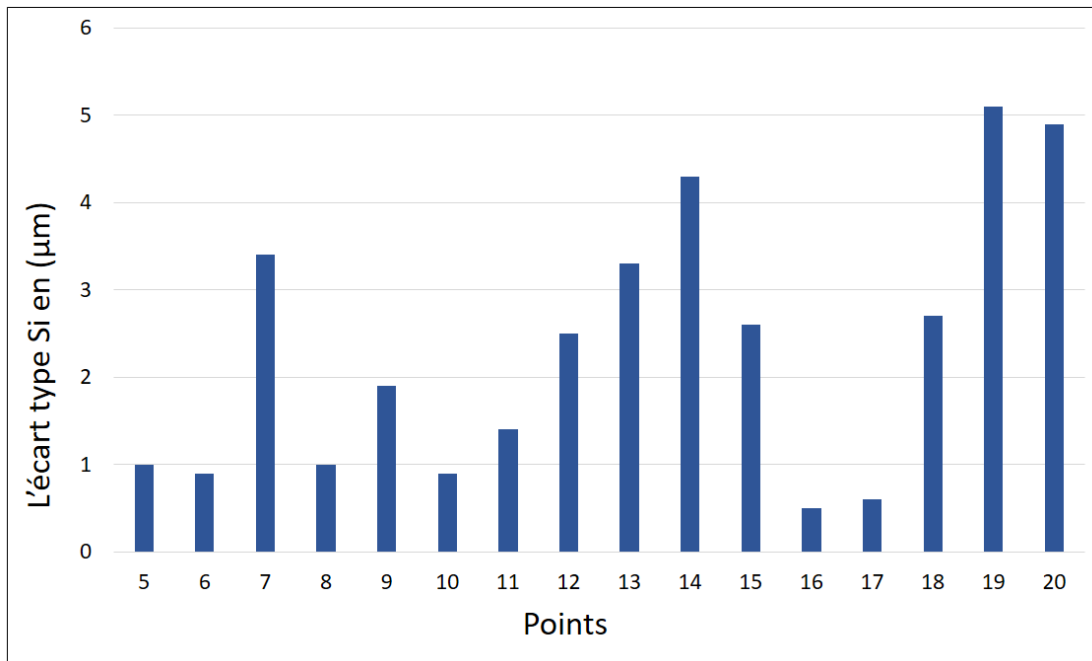


Figure V 15: L'écart type «  $S_i$  » des 16 points de la pale d'ailette.

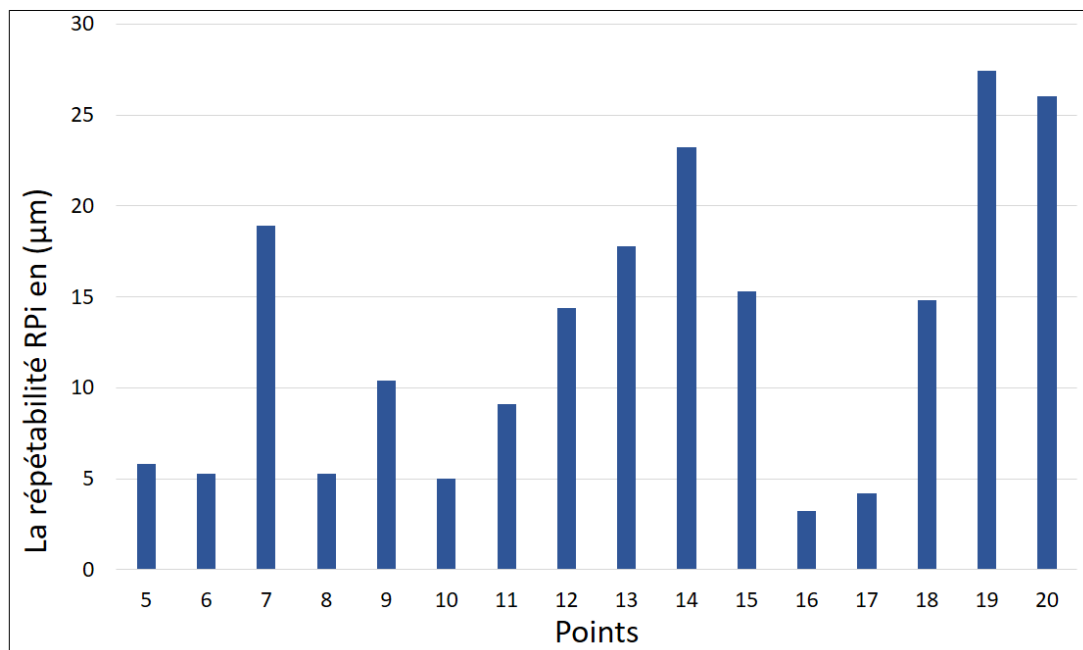


Figure V 16: La répétabilité «  $R_{Pi}$  » des 16 points de la pale d'ailette.

Les figures V.17, V.18 et V.19, montrent successivement les résultats de l'écart type «  $S_i$  », selon les axes X, Y et Z, de la stabilité statique des 16 points au niveau de pale aérodynamique, sans le démontage de la pièce.

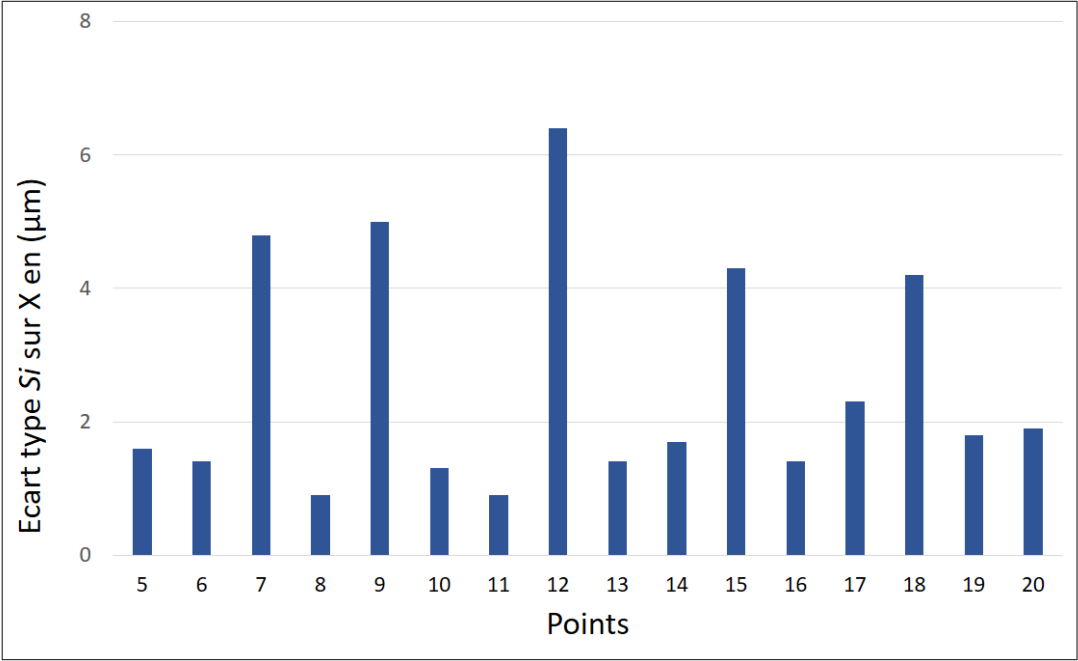


Figure V 17: L'écart type « Si », selon l'axe X pour les 16 points de la pale d'ailette.

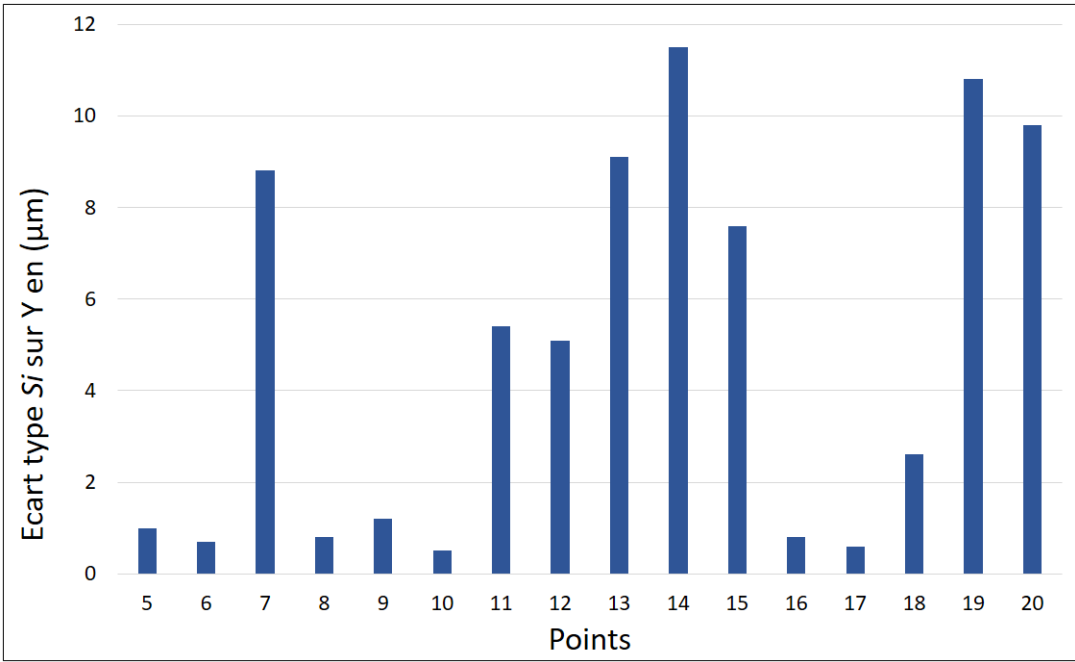


Figure V 18: L'écart type « Si », selon l'axe Y pour les 16 points de la pale d'ailette.

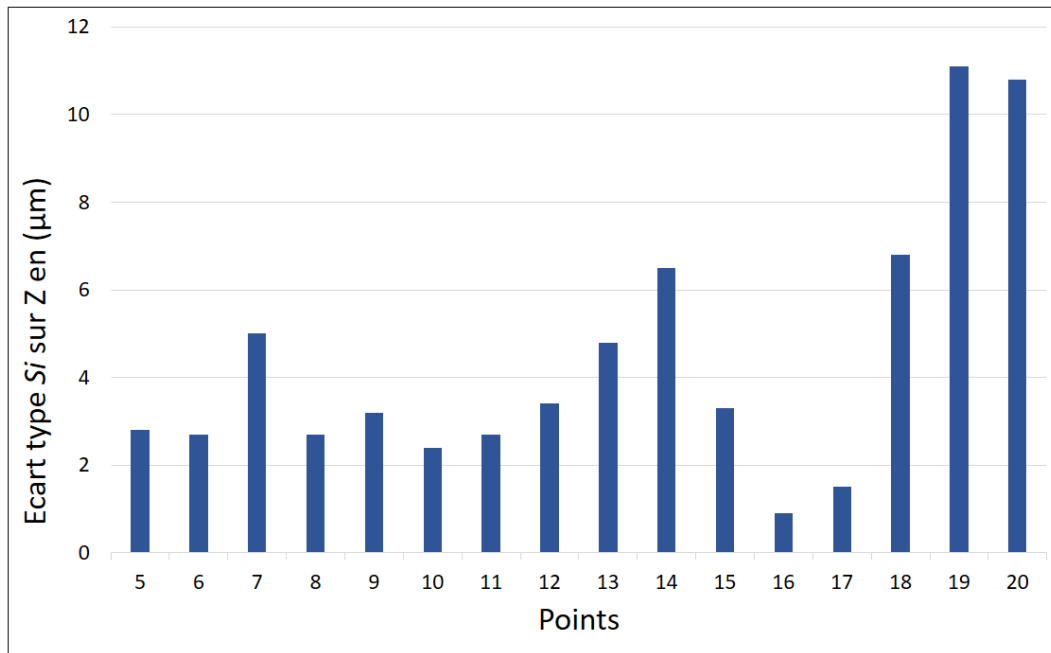


Figure V 19: L'écart type «  $S_i$  », selon l'axe Z pour les 16 points de la pale d'ailette.

## V.5 Evaluation de la qualité du MU basée sur le concept TPD :

En supposant que les déplacements de la pièce à usiner sur le dispositif sont petits comparés à sa dimension géométrique. Pour chaque nouvel emplacement de la pièce (ordre chronologique), les coordonnées de 6 points ( $M_1$  à  $M_6$ ) (Figure V.20) sur la pièce seront mesurées par la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).

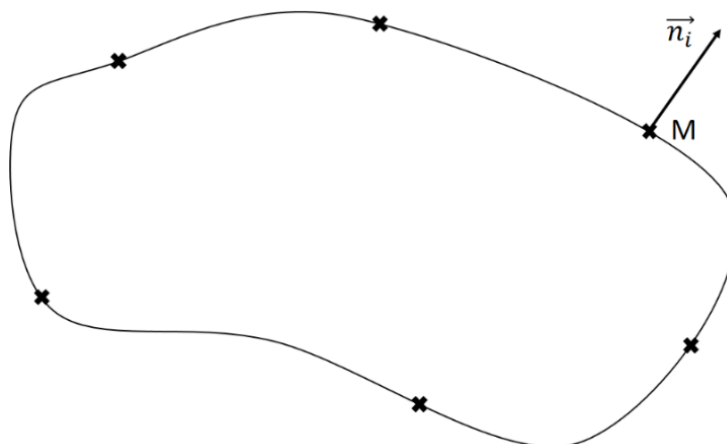


Figure V 20: Choix de 6 points de mesure  $M_i$

### V.5.1. Détermination des écarts de positionnement

Un modèle CAO est nécessaire pour initialiser les points de mesure  $M_i$  sur la pièce. La répétabilité de la localisation peut être modélisée par le premier emplacement de la pièce sur le montage (ou l'emplacement théorique qui est obtenu par un modèle CAO) servira de référence (0), il correspond à :

$$\overrightarrow{OM_{i0}} = (x_{i0}, y_{i0}, z_{i0}) \quad (\text{V.10})$$

Un nouvel emplacement de la pièce, qui est défini après chaque démontage et remontage de la pièce sur le montage, est mesuré à l'aide du même programme (six points de mesure  $M_1$  à  $M_6$ ). La  $k_i^{\text{ème}}$  mesure de l'emplacement de la pièce est indiquée comme suit :

$$\overrightarrow{OM_{ik}} = (x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}) \quad (\text{V.11})$$

Le  $k_i^{\text{ème}}$  emplacement de la pièce se compare à la référence 0 comme suit :

$$\overrightarrow{D_{Mi0k}} = \overrightarrow{M_{i0} M_{ik}} = (x_{ik} - x_{i0}, y_{ik} - y_{i0}, z_{ik} - z_{i0}) \quad (\text{V.12})$$

On a :

$$\delta_{ik} = \vec{n}_i \cdot \overrightarrow{D_{Mi0k}} \quad (\text{V.13})$$

$$\delta_{ik} = n_{ix}(x_{ik} - x_{i0}) + n_{iy}(y_{ik} - y_{i0}) + n_{iz}(z_{ik} - z_{i0}) \quad (\text{V.14})$$

Avec :

$$\overrightarrow{D_{ok}} = \overrightarrow{D_{Mi0k}} + \overrightarrow{OM_{i0}} \wedge \overrightarrow{\Omega_k} \quad (\text{V.15})$$

$$\vec{n}_i \cdot \overrightarrow{D_{ok}} = \vec{n}_i \cdot \overrightarrow{D_{Mi0k}} + \vec{n}_i \cdot \overrightarrow{OM_{i0}} \wedge \overrightarrow{\Omega_k} \quad (\text{V.16})$$

$$\vec{n}_i \cdot \overrightarrow{D_{ok}} - (\vec{n}_i \cdot \overrightarrow{OM_{i0}} \wedge \overrightarrow{\Omega_k}) = \delta_{ik} \quad (\text{V.17})$$

$$\{D_k\} = \left\{ \overrightarrow{\Omega_{k,S/R}} \quad \overrightarrow{D_{ok}} \right\}_o = \left\{ \begin{array}{cc} \alpha_k & u_{ok} \\ \beta_k & v_{ok} \\ \gamma_k & w_{ok} \end{array} \right\}_o \quad (\text{V.18})$$

Elle est résolue à l'aide d'un système de 6 équations ( $i = 1$  à 6):

$$\begin{bmatrix} n_{ix} & n_{iy} & n_{iz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ok} \\ v_{ok} \\ w_{ok} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} n_{ix} & x_{i0} & \alpha_k \\ n_{iy} & y_{i0} & \beta_k \\ n_{iz} & z_{i0} & \gamma_k \end{bmatrix} = \delta_{ik} \quad (\text{V.19})$$

Où :  $u_{ok}$ ,  $v_{ok}$ ,  $w_{ok}$ ,  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$ ,  $\gamma_k$  sont inconnus.

$\delta_{ik}$  : peuvent être calculés de l'équation (V.14).

L'équation (V.19), peut être réécrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} n_{ix} & n_{iy} & n_{iz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ok} \\ v_{ok} \\ w_{ok} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} n_{ix} & n_{iy} & n_{iz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_k & \beta_k \\ \gamma_k & 0 & -\alpha_k \\ -\beta_k & \alpha_k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i0} \\ y_{i0} \\ z_{i0} \end{bmatrix} = \delta_{ik} \quad (\text{V.20})$$

Donc,

$$n_{ix}u_{ok} + n_{iy}v_{ok} + n_{iz}w_{ok} + V_{oxi} \alpha_k + V_{oyi} \beta_k + V_{oz i} \gamma_k = \delta_{ik} \quad (\text{V.21})$$

Le côté gauche de cette équation (V.21)  $[P_i] [D_k]$  est un produit d'un TPD et la matrice de coordonnées Plücker de la normale en un point  $i$ .

A partir de la forme matricielle, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} n_{xi} & n_{yi} & n_{zi} & V_{oxi} & V_{oyi} & V_{oz i} \\ n_{xi} & n_{yi} & n_{zi} & V_{oxi} & V_{oyi} & V_{oz i} \\ n_{xi} & n_{yi} & n_{zi} & V_{oxi} & V_{oyi} & V_{oz i} \\ n_{xi} & n_{yi} & n_{zi} & V_{oxi} & V_{oyi} & V_{oz i} \\ n_{xi} & n_{yi} & n_{zi} & V_{oxi} & V_{oyi} & V_{oz i} \\ n_{xi} & n_{yi} & n_{zi} & V_{oxi} & V_{oyi} & V_{oz i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ \delta_6 \end{bmatrix} \quad (\text{V.22})$$

D'où :

$$V_{oxi} = y_i \cdot n_{zi} - z_i \cdot n_{yi} \quad (\text{V.23})$$

$$V_{oyi} = z_i \cdot n_{xi} - x_i \cdot n_{zi} \quad (\text{V.24})$$

$$V_{oz i} = x_i \cdot n_{yi} - y_i \cdot n_{xi} \quad (\text{V.25})$$

Cette équation matricielle peut être réécrite sous une forme simple comme :

$$[P_i] \cdot [\alpha] = [\delta] \quad (\text{V.26})$$

$$[\alpha] = [P_i]^{-1}[\delta] \quad (V.27)$$

Cette égalité présente un système d'équations linéaires. La résolution de ce système d'équations par la méthode des moindres carrés donne les six composantes du TPD.

Pour construire la matrice A, les six points théoriques (six points de référence) sont d'abord extraits du modèle CAO. Ensuite, un programme d'inspection basé sur ces six points est développé et appliqué sur une MMT pour mesurer les six points réels (points de contact, appuis / pale d'ailette) pour chaque configuration.

Après chaque démontage et remontage de l'ailette semi-finie sur le montage, son nouvel emplacement est mesuré à l'aide du même programme (six points de mesure  $M_1$  à  $M_6$ ). Les mesures sont répétées cinq fois, cela signifie que les six composantes du TPD sont identifiées cinq fois.

La variabilité des six composantes du TPD est quantifiée par un écart type expérimental. Cette variabilité représente la qualité de localisation du montage d'usinage.

### **V.5.2 Test de la répétabilité de localisation :**

Comme mentionné ci-dessus, pour chaque nouvel emplacement de l'ailette semi-finie sur le montage d'usinage, les coordonnées de 6 points sur la pale sont mesurées et les vecteurs normaux ( $n_i$ ) pour chaque point sont calculés. De plus, le vecteur d'erreur entre la position mesurée et la position théorique  $\delta_i$  pour chaque point est calculé et projeté selon la normale.

Après résolution du système d'équations linéaires, les six composantes inconnues ( $\alpha, \beta, \gamma, u, v, w$ ) du TPD sont obtenues. La qualité du montage d'usinage usiné est attestée par la variabilité des inconnues. Le test de localisation étant répété cinq fois, la variabilité des composantes ( $\alpha, \beta, \gamma, u, v, w$ ) est exprimée par un écart type expérimental et présentée dans les figures V.21 et V.22.

Les étapes suivantes ont été suivies lors de la mesure sur la machine de mesure tridimensionnelle :

- Le MU placé et aligné sur la table de la MMT.
- La température du milieu dans le stand MMT est environ 22°C.
- Création d'un référentiel de mesure coïncident avec celui du CAO.
- L'ailette est montée et démontée, après chaque prise de mesure cinq fois successives (n=5) dans le MU.

- Etablissement d'un programme de palpation pour la recherche des six points de localisation, en introduisant les six coordonnées des six points de localisation théoriques, sur le modèle CAO de l'ailette, puis les chercher sur le modèle réel.
- Exécution du programme de mesure en mode AUTO pour le palpation des six points de localisation, cinq fois successives ( $n=5$ ).

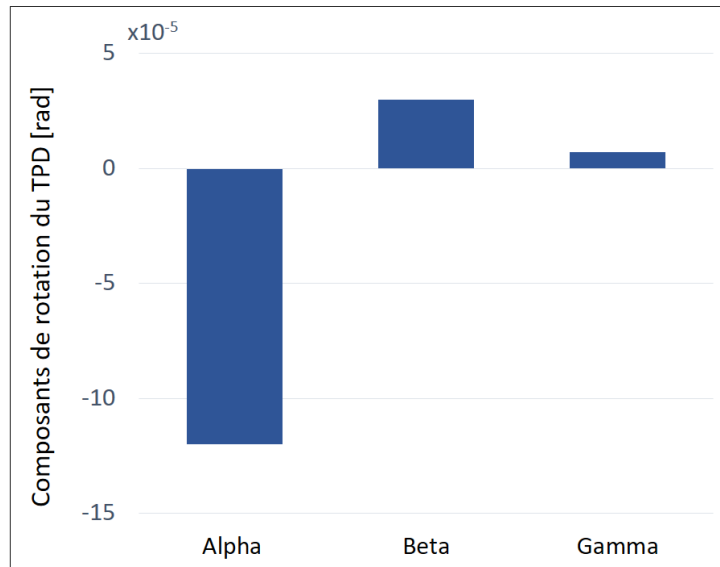


Figure V 21: Variabilité des trois petites rotations ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )

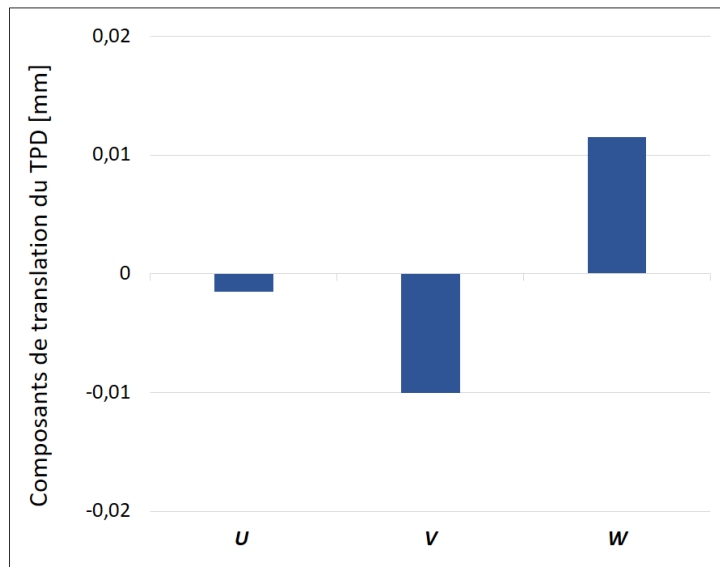


Figure V 22: Variabilité des trois petites translations ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ )

## V.6 Test de la répétabilité de localisation par mesures directes:

La deuxième partie de l'évaluation de la qualité du MU développé, est l'évaluation de la répétabilité et de la reproductibilité de la pose et la dépose de la pièce sur le montage d'usinage, d'une manière directe. Après trois fois de pose et dépose de la pièce, 20 points aléatoires seront mesurés, le long de l'ailette, 4 points de la face inclinée du pied d'ailette, et 16 points au niveau de la pale d'ailette, figure V.5. Les étapes suivantes ont été suivies lors des tests effectués sur la machine de mesure tridimensionnelle.

- Le MU placé et aligné sur la table de la MMT.
- La température du milieu dans le stand MMT est environ 22°C.
- Création d'un référentiel de mesure coïncident avec celui du CAO.
- L'ailette est montée et démontée, après chaque prise de mesure trois fois successives (n=3) dans le MU.
- Etablissement d'un programme de palpation de 20 points sur l'ailette, (04 points sur la face inclinée du pied d'ailette, et 16 points sur la pale aérodynamique). Les mesures prises lors du palpation manuel des 20 points sont considéré comme mesures de commande (consigne).
- Exécution du programme de mesure en mode AUTO, pour le palpation de 16 points, trois fois successives (n = 3).

### V.6.1 Présentation des résultats :

Les figures V.23, V.24 et V.25, montrent successivement les résultats de l'écart moyen " $\bar{I}$ ", l'écart type «  $Si$  » et la répétabilité «  $RPi$  », pour le test de la reproductibilité (ou la répétabilité), du montage d'usinage, au niveau des 4 points de la face inclinée du pied d'ailette, avec le montage et le démontage de la pièce, trois fois successives.

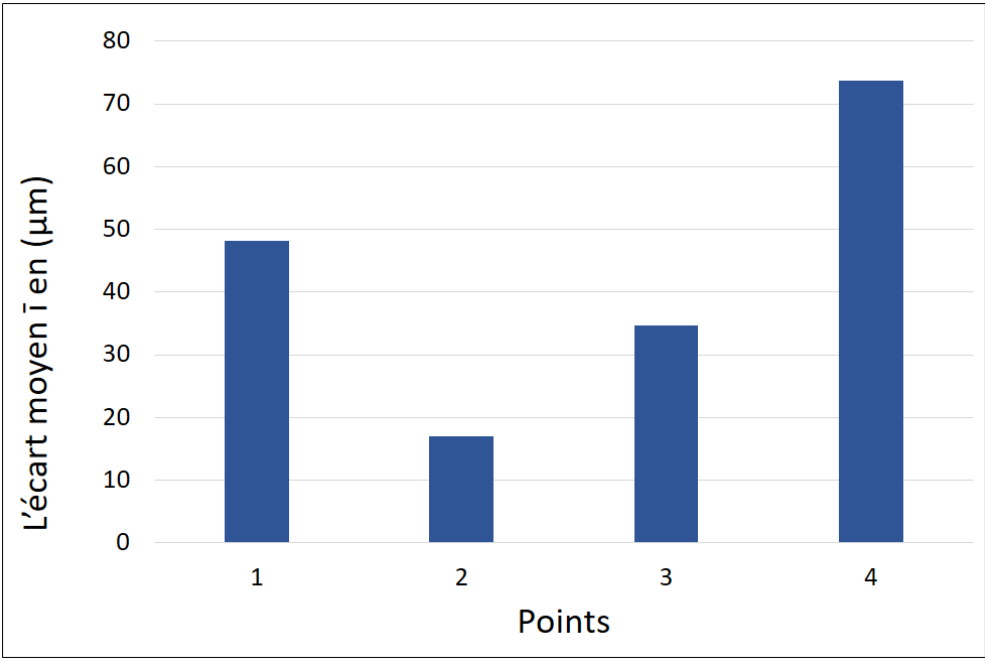


Figure V 23: L'écart moyen « $\bar{I}$ » des 4 points de la face inclinée.

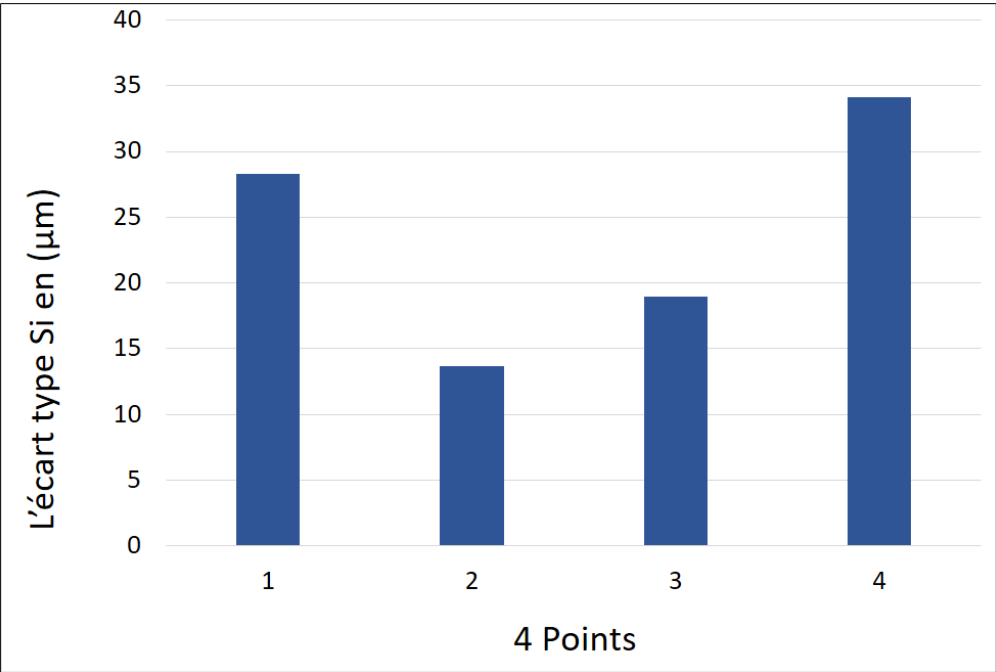


Figure V 24: L'écart type « $S_i$ » des 4 points de la face inclinée

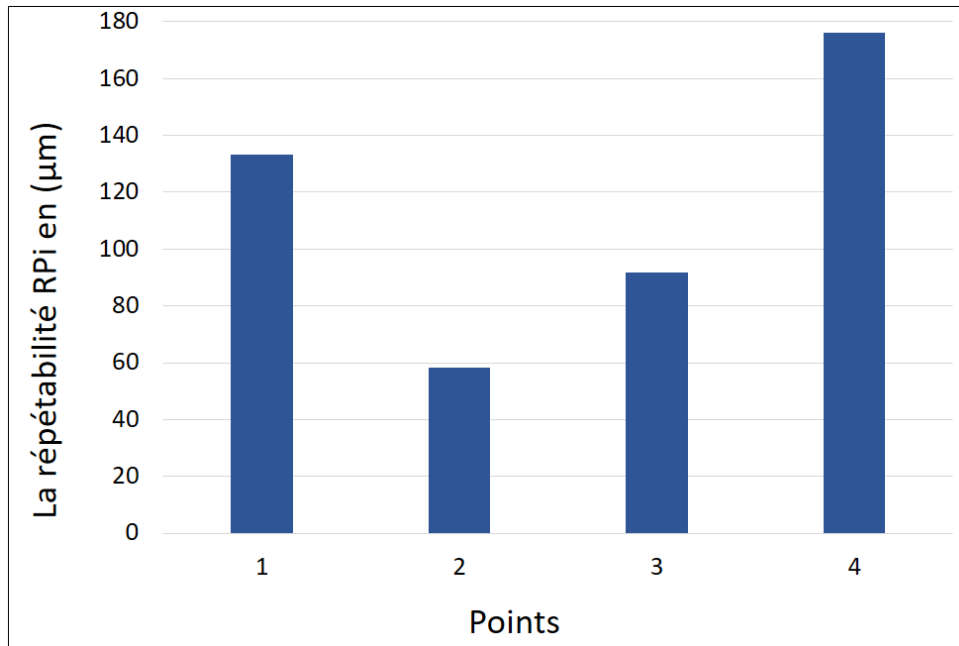


Figure V 25: La répétabilité « RPi » des 4 points de la face inclinée

Les figures V.26, V.27 et V.28, montrent successivement les résultats de l'écart type «  $S_i$  », sur les axes X, Y et Z, pour le test de la reproductibilité (ou la répétabilité), du montage d'usinage, au niveau des 4 points de la face inclinée du pied d'ailette, avec le montage et le démontage de la pièce, trois fois successives.

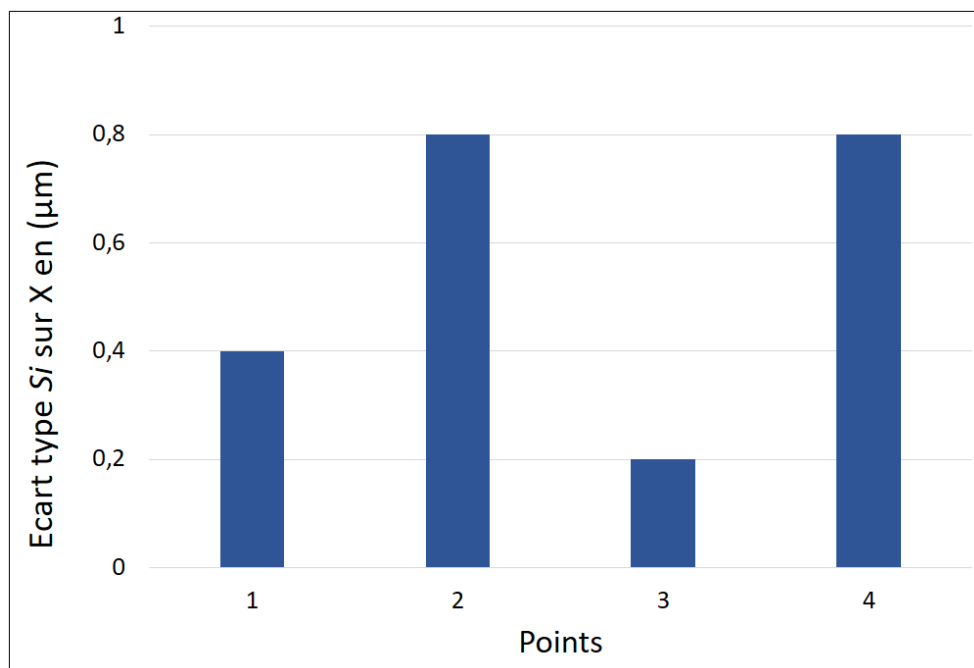


Figure V 26: L'écart type «  $S_i$  » sur l'axe X des 4 points de la face inclinée.

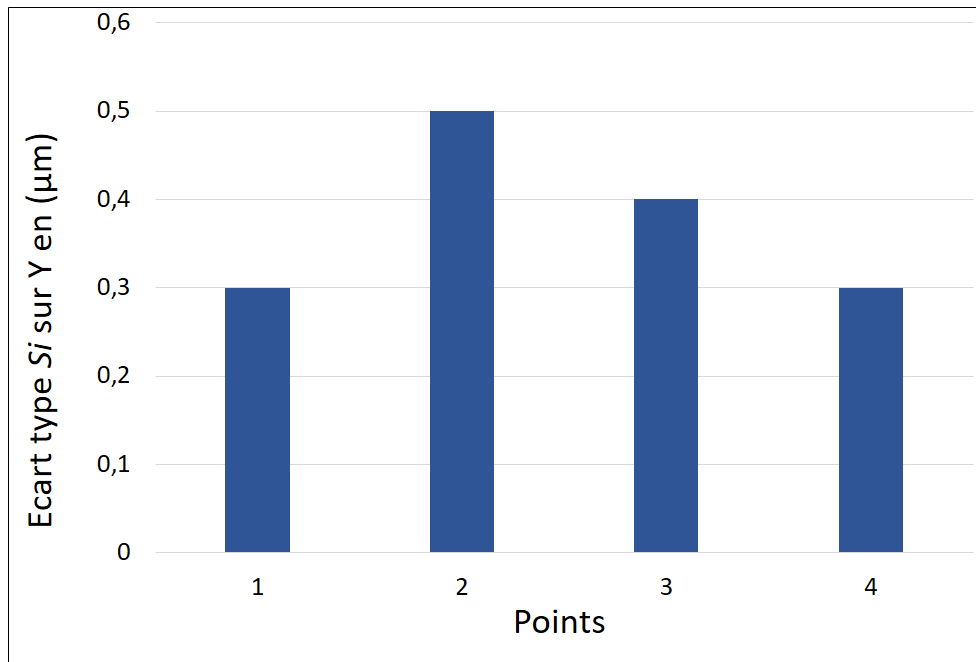


Figure V 27: L'écart type «  $S_i$  » sur l'axe Y des 4 points de la face inclinée.

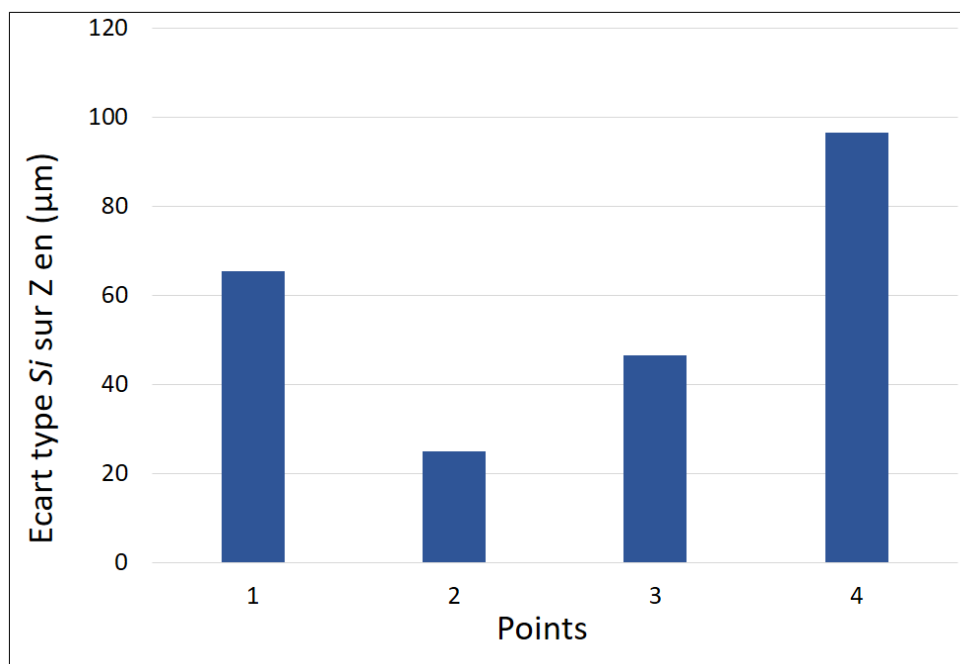


Figure V 28: L'écart type «  $S_i$  » sur l'axe Z des 4 points de la face inclinée.

Les figures V.29, V.30 et V.31, montrent successivement les résultats de l'écart moyen " $\bar{I}$ ", l'écart type «  $S_i$  » et la répétabilité «  $RP_i$  », pour le test de la reproductibilité (ou la répétabilité), du montage d'usinage, au niveau des 16 points sur la pale aérodynamique de l'ailette, avec le montage et le démontage de la pièce, trois fois successives.

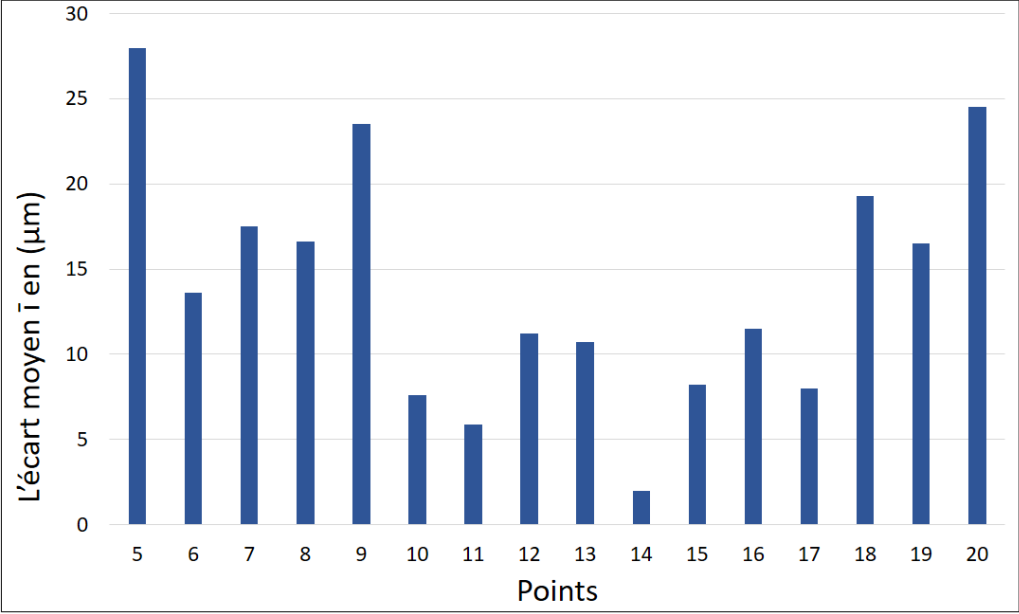


Figure V 29: L'écart moyen « $\bar{I}$ » des 16 points de la pale d'ailette.

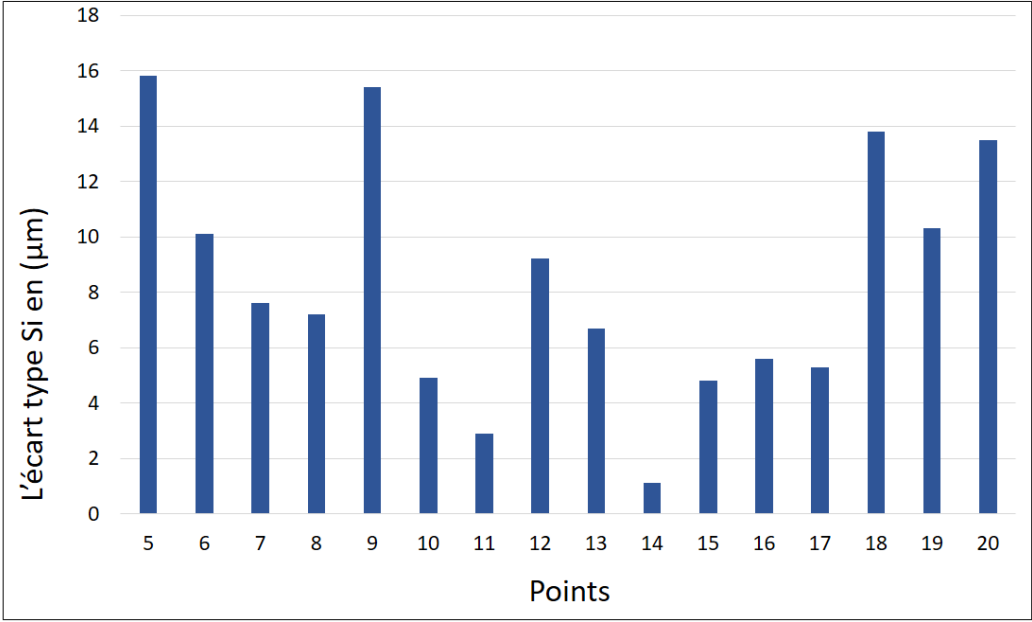


Figure V 30: L'écart type « $S_i$ » des 16 points de pale d'ailette.

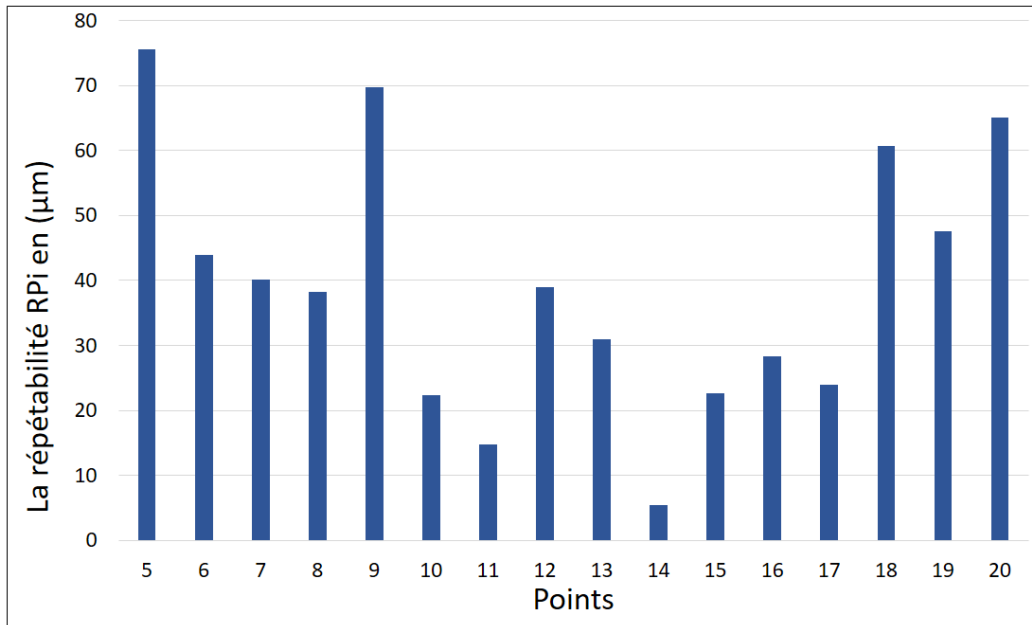


Figure V 31: La répétabilité « RPi » des 16 points de la pale d'ailette.

Les figures V.32, V.33 et V.34, montrent successivement les résultats de l'écart type « Si », sur les axes X, Y et Z, pour le test de la reproductibilité (ou la répétabilité), du montage d'usinage, au niveau des 16 points sur la pale aérodynamique de l'ailette, avec le montage et le démontage de la pièce, trois fois successives.

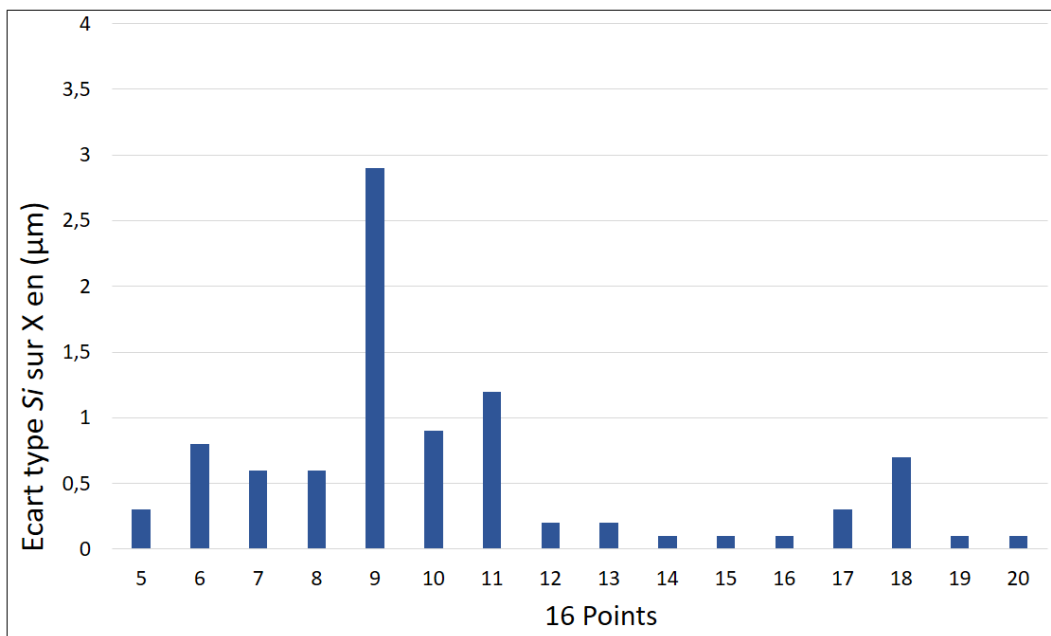


Figure V 32: L'écart type « Si » sur l'axe X des 16 points de la pale d'ailette.

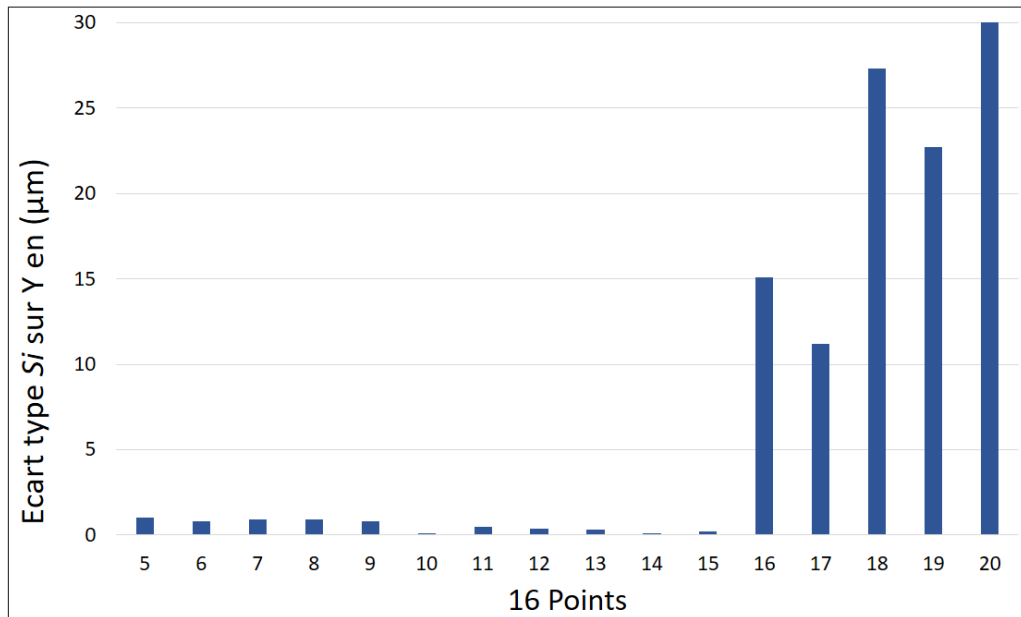


Figure V 33: L'écart type « Si » sur l'axe Y des 16 points de la pale d'ailette.

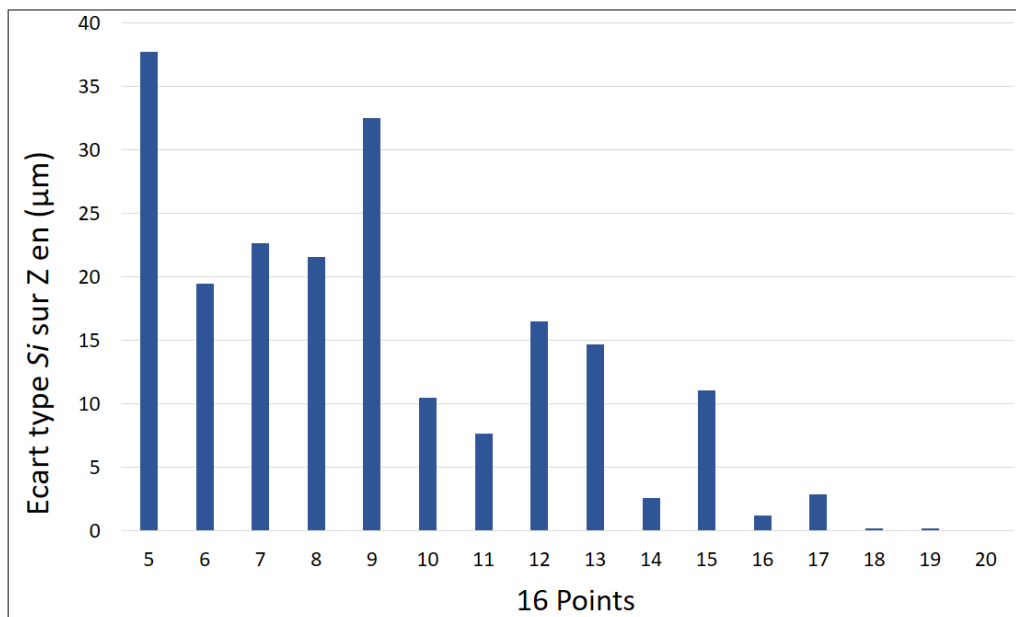


Figure V 34: L'écart type « Si » sur l'axe Z des 16 points de la pale d'ailette.

## V.7 Test destructif visuel :

L'objectif d'avoir un aubage avec refroidissement interne (trous longitudinaux à travers la pale) figure V.35, est d'atteindre le meilleur rendement tout en conservant une température acceptable dans le métal de l'aubage pour assurer une résistance adéquate aux sollicitations mécaniques, et à l'érosion dans les conditions réelles de fonctionnement.

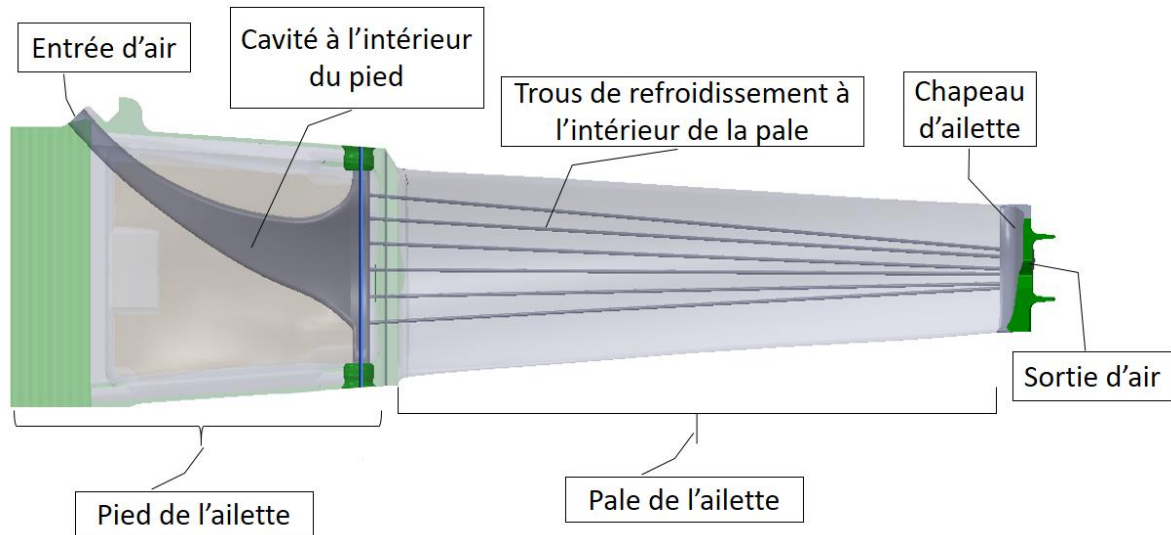


Figure V 35: Représentation des trous de refroidissement et les plans de découpe par EDM

Six trous de refroidissement pour ce type d'ailette ont été réalisés à travers la forme aérodynamique (pale), à l'aide de ce nouveau référentiel réalisé au moyen du montage d'usinage développé. Cette opération de perçage appelée ECD (electro chemical drilling), ou perçage électrochimique, a été réalisée par un montage spécial (voir figure IV.3) dédié pour ce type d'opération sur une machine ECD de marque DETECHCO voir figure V.36.



Figure V 36: Machine ECD pour le perçage électrochimique

### V.7.1 Etapes du test :

Une inspection par un test destructif (TD), a été réalisée par découpage à l'aide d'une machine EDM à fil de type ONA AF 35, en but de vérifier la disposition des trous de refroidissement à la sortie de la pale à travers le chapeau, figure V.37, ainsi que à l'entrée de la pale à travers la cavité du pied d'ailette, figure V.38.

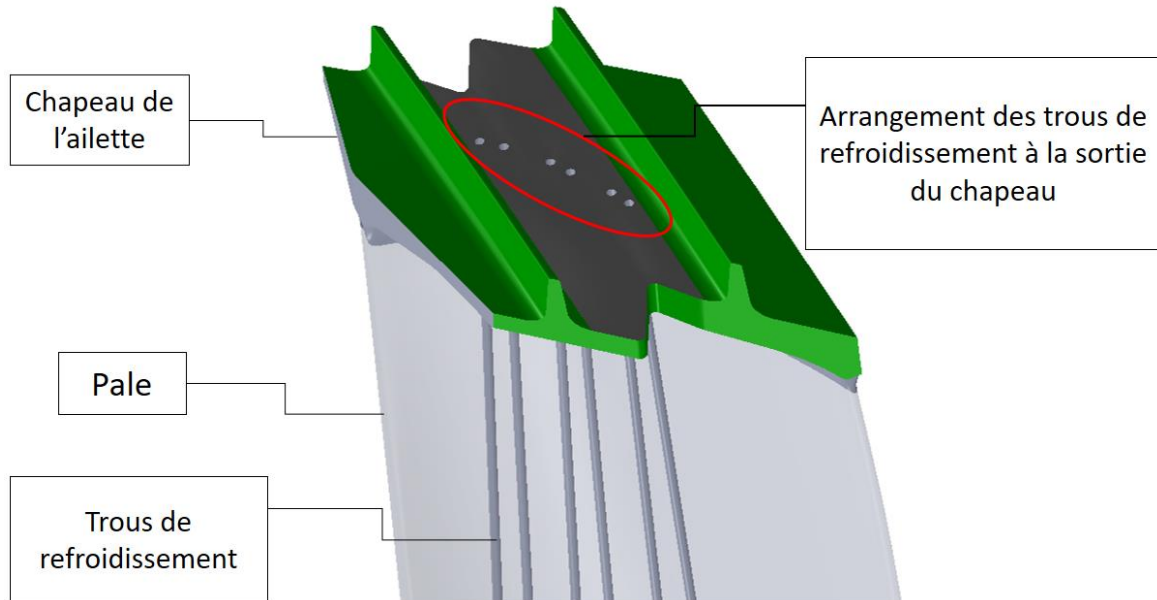


Figure V 37: Disposition des trous de refroidissement à la sortie de la pale

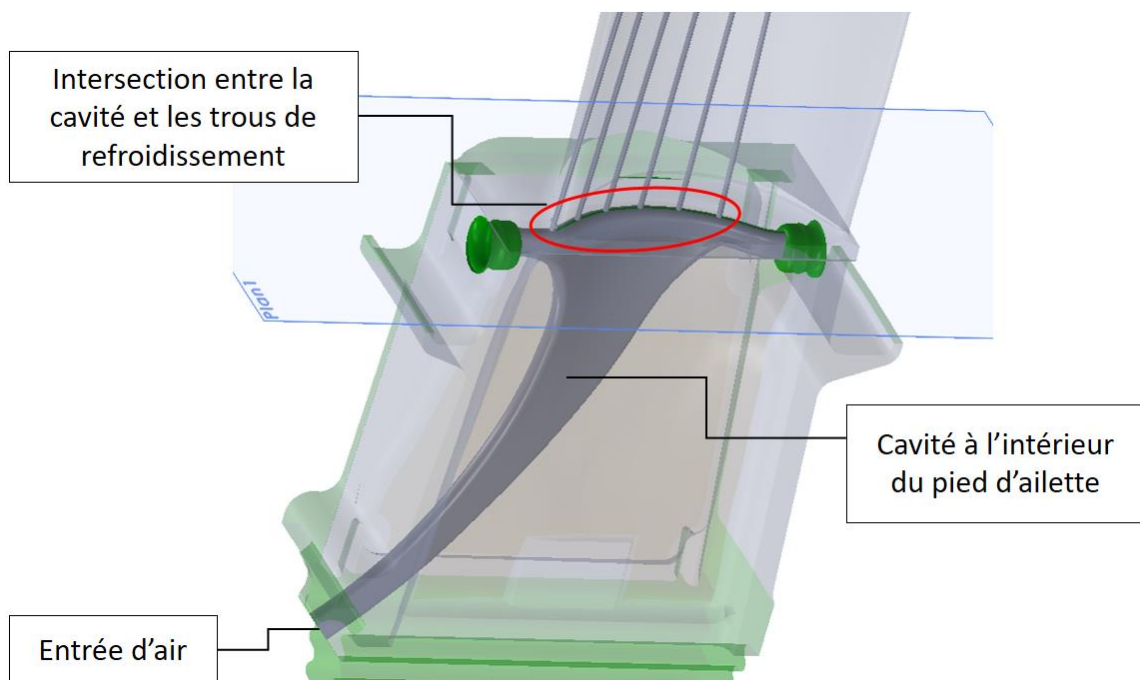


Figure V 38: Disposition des trous de refroidissement à l'intersection Pale/Cavité

Trois sections de coupe ont été réalisées au niveau de la pale, l'une au début de la pale juste après le chapeau d'ailette section 1-1, et les deux autres sections 2-2 et 3-3 sont respectivement l'une avant et l'autre après l'intersection des trous de refroidissement avec la cavité au niveau du pied d'ailettes (figure V.39 et 40).

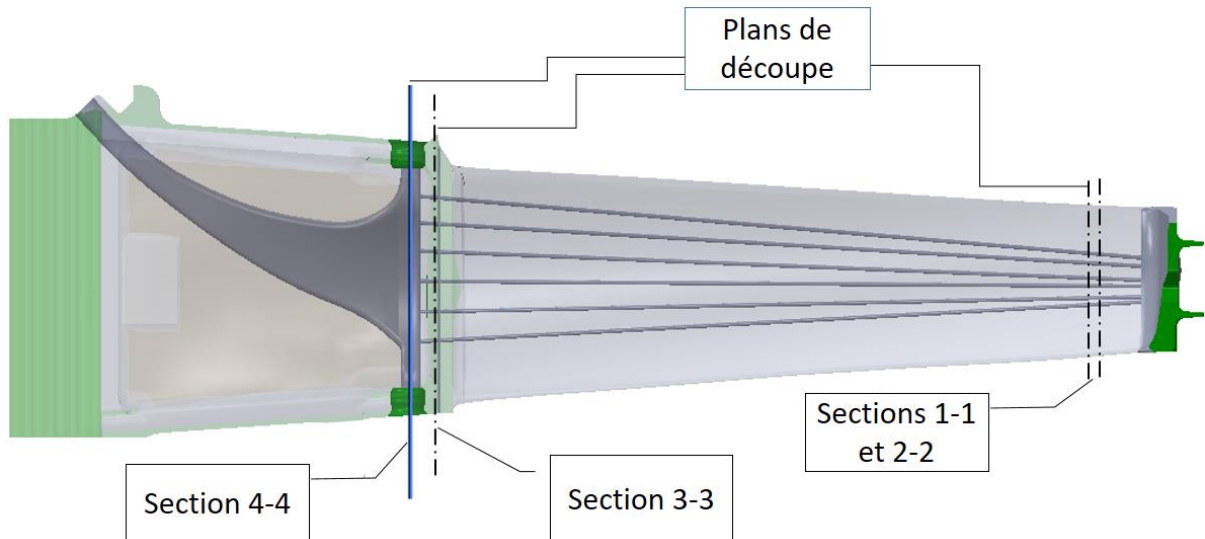


Figure V 39: Représentation des plans de découpe pour TD.

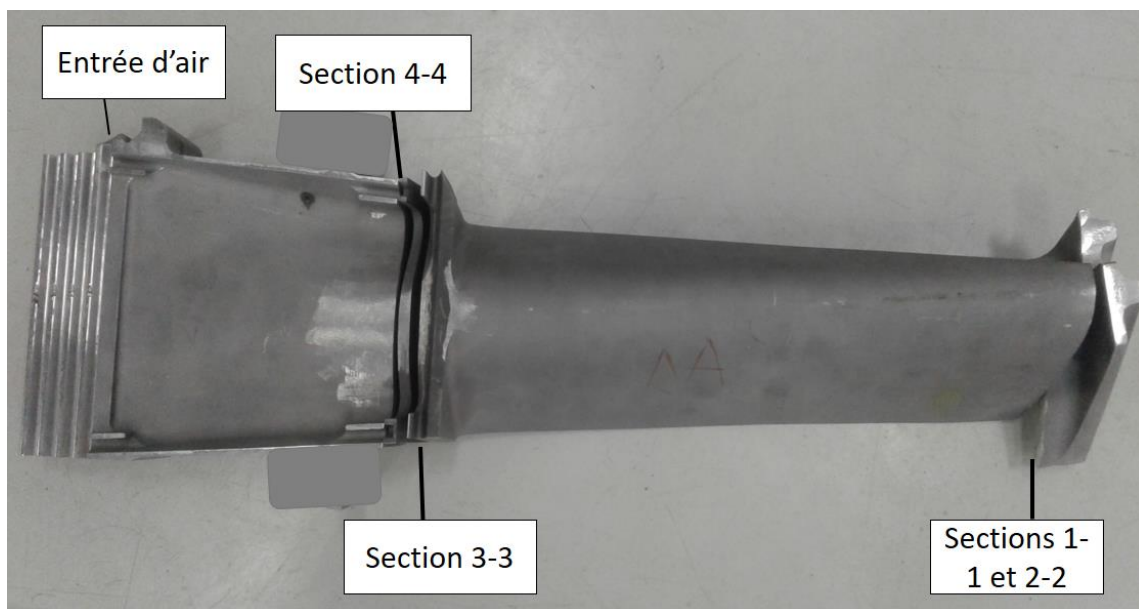


Figure V 40: Représentation des trois sections de découpe

Le tronçon résultant des sections 1-1 et 2-2 (figure V.41), illustre la répartition des trous par rapport au périmètre du profil de la section, tandis que le tronçon résultant des sections 3-3 et 4-4 (figure V.42), montre la disposition des trous de refroidissement à l'intérieur de la rainure entrée de la cavité.

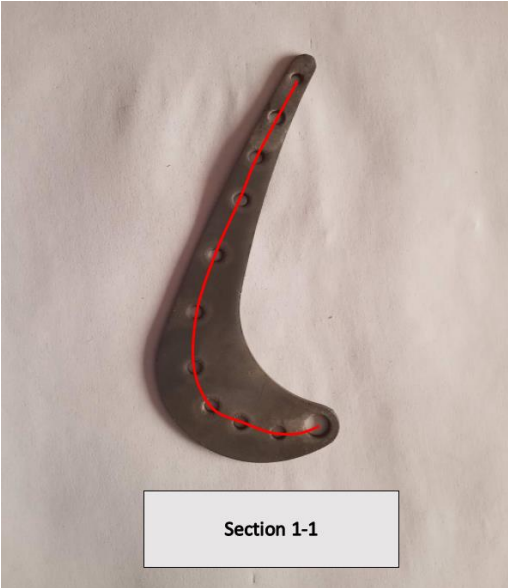


Figure V 41: Répartition des trous de refroidissement à l'intérieur de la pale aérodynamique



Figure V 42: Disposition des trous de refroidissement à l'intérieur de l'intersection cavité/pale



Figure V 43: Trous de centre (nouveau référentiel) après découpage par EDM.

## V.5 Discussion des résultats :

### V.5.1 discussion des résultats de la stabilité statique :

Pour le test de la stabilité statique, un examen plus attentif des figures révèle, que notre montage développé est apte à fonctionner dans des conditions de stabilité élevé. Il ressort des résultats de la première partie du test de la stabilité statique, que la variabilité des six points mesurés est très faible ce qui signifie que le bruit de mesure est minime (moins de 1  $\mu\text{m}$ ) voir la figure V.6. Par conséquent, elle est négligée dans les calculs mathématiques.

Les résultats de la deuxième partie de ce test pour la mesure des 4 points au niveau de la face inclinée (figure V.7), montrent dans la figure V.8, que l'écart moyen «  $\bar{I}$  », qu'est la somme moyenne des écarts partielles des trois mesures et ces barycentre. Cet écart est moins de 3  $\mu\text{m}$ , ce qui signifie que les trois mesures de chaque point sont très proches. La même chose pour l'écart type «  $S_i$  » figure V.9, qu'est moins de 1.4  $\mu\text{m}$ , et la répétabilité de mesure «  $R_{Pi}$  », figure V.10, qu'est moins de 7  $\mu\text{m}$ , ce qui traduit l'absence presque totale d'éventuels bruits de mesure au niveau du pied d'ailette.

Cette stabilité est confirmée aussi par les valeurs obtenues de l'écart type «  $S_i$  », selon les axes X et Y, figures V.11 et V.12, qui sont respectivement moins de 2  $\mu\text{m}$  et 1.5  $\mu\text{m}$ , ce qui traduit le bon positionnement du palpeur de la machine pendant la mesure. Dans le sens de palpation l'axe Z, figure V.13, l'écart type «  $S_i$  » est toujours minime, de l'ordre 3  $\mu\text{m}$ , mais un peu supérieur que celui qu'est selon X et Y.

Au niveau des 16 points de la pale d'ailette, l'écart moyen «  $\bar{I}$  », l'écart type «  $S_i$  » et la répétabilité «  $R_{Pi}$  », sont successivement moins de 12  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  et 30  $\mu\text{m}$ , comme il est représenté respectivement dans les figures V.14, V.15 et V.16. Cette augmentation de valeurs par rapport aux valeurs des résultats de la face inclinée, est affectée par la légère déformation de la pale qu'est considérée comme une paroi mince sous l'effet de serrage par les sauterelles. Un éventuel glissement du palpeur sur la forme irrégulière (pale aérodynamique), peut également affectée la précision des mesures.

Les résultats de l'écart type «  $S_i$  », selon les axes X, Y et Z, représentés successivement dans les figures V.17, V.18 et V.19, montrent l'instabilité des écarts types entre un point et un autre, qui sont affectés par les mêmes facteurs influents dans la section précédente.

Ce bruit peut être dû à de nombreuses sources telles que l'opérateur, l'équipement, la méthode, la machine et l'environnement. Ces résultats révèlent que le montage d'usinage développé peut

fonctionner dans des conditions de stabilité très élevées, et aussi la stabilité et la fiabilité de la machine MMT lors de la mesure.

### V.5.2 Discussion des résultats de la reproductibilité du MU :

Pour le test de la répétabilité dans sa première partie, la répétabilité de localisation basée sur le concept TPD, montre que la variabilité des composants TPD est faible, ce qui indique la haute répétabilité de localisation du montage d'usinage développé. On peut également voir sur la figure V.21, que la composante de rotation ( $\alpha$ ) autour de l'axe X est plus grande par rapport aux deux autres composantes. Cela peut être dû à la nature de la paroi mince de la pale d'ailette et à sa faible rigidité qui se déforme légèrement autour de l'axe X sous l'action de la force de serrage. La figure V.22 montre également que le déplacement maximum ( $w$ ) a été trouvé le long de l'axe Z en raison de l'effet de la force de serrage aussi.

Dans la deuxième partie du test de la répétabilité, Les figures V.23, V.24 et V.25, montrent au niveau des 4 points de la face inclinée, une augmentation remarquable par rapport au cas du test de la stabilité statique, pour les indicateurs «  $\bar{I}$  » et «  $Si$  », notamment pour l'indicateur de répétabilité «  $RPI$  », qui atteint une valeur maximale moins de 180  $\mu\text{m}$ . Cela due à l'effet de serrage par bride au niveau du pied d'ailette, en plus le serrage par sauterelles sur la pale aérodynamique.

Les figures V.26 et V.27 montrent l'écart type «  $Si$  » selon les axes X et Y qu'est respectivement à l'ordre de 0.8 et 0.5  $\mu\text{m}$ , ce qui signifie que l'augmentation des valeurs des indicateurs précédents est affectée par l'écart type «  $Si$  » selon l'axe Z (figure V.28), qu'est moins de 100  $\mu\text{m}$  sous l'effet de serrage.

Au niveau des 16 points de la pale aérodynamique, Les figures V.29, V.30 et V.31, montrent que l'écart moyen «  $\bar{I}$  », l'écart type «  $Si$  » et la répétabilité «  $RPI$  », sont mieux par rapport au cas des 4 points de la face inclinée, et moins affectée par le serrage des brides au niveau du pied d'ailette. Les figures V.32, V.33 et V.34, montrent L'écart type «  $Si$  » selon les directions X, Y et Z pour les 16 points mesurés sur le profil aérodynamique de la pale. On voit sur ces figures que l'écart type selon les directions X, Y et Z, est meilleur dans quelques points, et important dans quelques autres. Ceci peut s'expliquer par le fait que la surface à paroi mince qui forme la partie profilée de l'aube a une faible rigidité et est très sensible à la force de serrage.

**N.B** : Il est à noter que, dans notre cas, l'erreur tolérée lors de l'usinage de l'aube de turbine est de l'ordre de 100 à 200  $\mu\text{m}$ .

### **V.5.3 Discussion des résultats du test destructif visuel :**

Dans le test destructif, la figure V.41, montre une bonne répartition des trous par rapport au périmètre du profil de la section, tandis que la figure V.42, montre avec évidence que l'ensemble de trous de refroidissement sert de médiateurs à la rainure entrée de la cavité.

Cette bonne disposition de trous de refroidissement dans les deux sections précédentes indique que ces trous sont bien orientés à travers la pale de l'ailette qu'est une forme complexe, et cette orientation de trous n'était réalisée avec succès que si les deux trous de centre (nouveau référentiel) voir figure V.43, étaient réalisés dans la bonne position avec précision à l'aide du montage d'usinage développé.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre on a évalué la qualité de notre montage d'usinage développé par trois tests de mesure expérimentaux. Le premier test concerne la stabilité statique du système au niveau du stand machines. Le deuxième test vise la répétabilité de la bonne localisation des pièces à usiner sur notre montage développé. Le dernier test destructif d'une ailette échantillon a été fait au niveau de la pale en but de vérifier la bonne disposition des trous de refroidissement à l'intérieur de l'ailette ce qui reflète la crédibilité de réalisation du nouveau référentiel.

Le dispositif d'usinage développé s'est avéré efficace dans la pratique. Il est actuellement utilisé dans des applications industrielles, où de nombreuses références ont été créées chaque jour avec une haute qualité dans les pieds d'aubes de turbine. Ainsi, le repère créé dans l'aube de turbine est ensuite utilisé pour faciliter le positionnement et le maintien de l'aube lors du perçage des trous de refroidissement par ECD (Figure IV.3), et pour l'usinage du pied de sapin de l'aube par électroérosion à fil (Figure IV.4).

Conclusion générale et  
perspectives.

## Conclusion générale :

Dans le cadre de ce mémoire de thèse, nous avons donné une contribution qui concerne l'automatisation de processus de conception des montages d'usinage, notamment pour les pièces de formes complexes. Le but est de réduire la dépendance à l'expertise des concepteurs, qui apparaisse en premier lieu dans le choix de la disposition des localisateurs, et la répartition du système de bridage en deuxième lieu.

Dans ce but, une approche d'optimisation a été présentée dans le deuxième chapitre, qui réside dans l'application de la méthode des coordonnées plückeriennes, pour choisir le placement du localisateur de pièces de forme complexe. Le choix de l'emplacement du localisateur pendant le processus d'optimisation de la conception du montage d'usinage est effectué sur la base de la maximisation du déterminant et de la minimisation du conditionnement de la matrice de localisation (matrice d'information).

Dans ce contexte aussi, une autre méthode d'optimisation de la disposition des appuis de positionnement de montages d'usinage a été abordée, en utilisant l'optimisation par algorithme génétique qu'est une technique très puissante, utilisée par les chercheurs. Vue la performance des résultats obtenus dans ce volet, cette technique est très utile pour les chercheurs pour leur fournir des outils indispensables et automatisés pour le développement rapide de la disposition des montages d'usinage. En outre, il permet aux concepteurs novices d'utiliser l'application de conception de montages d'usinage pour formuler une disposition des montages optimisée et la performance de nouvelles conceptions de montages d'usinages peut être évaluée facilement et rapidement.

L'apport essentiel de cette étude, est l'implémentation du processus de conception ensuivant les étapes de réalisation, et d'avoir des résultats satisfaisants par la création du nouveau référentiel sur 204 pièces (ailettes), qu'ont été fabriquées au moyen du montage d'usinage développé.

Ce nouveau référentiel sera utilisé dans un autre montage d'usinage destiné à la réalisation de six trous de refroidissement, au niveau de la pale (géométrie complexe) d'ailette, par le procédé ECD. Le nouveau référentiel, peut être utilisé aussi dans un deuxième montage destiné pour la réalisation du pied de sapin, qu'est la partie intermédiaire permettant l'assemblage de l'ailette dans le rotor turbine.

Comme conclusion, le processus de conception abordé dans ce travail pour ce type de montage d'usinage, notamment pour les ailettes mobiles, est considéré comme la première étape primordiale, qu'elle faut mettre en œuvre. Les tests de précision, de répétabilité et de reproductibilité, ainsi que les tests destructifs, montrent que notre montage présente une grande performance. De plus, les pièces usinées sur ce montage sont conformes aux spécifications des constructeurs, ce qui montre l'efficacité du montage d'usinage développé.

## **Perspectives :**

Notre travail permet une contribution significative à l'aide au choix de la disposition des montages d'usinage d'une façon automatisée, pour l'usinage des pièces de formes complexes. La méthodologie mise en œuvre est centrée autour de l'application de la méthode des coordonnées plückeriennes. Les perspectives de nos travaux s'orientent autour de quatre axes principaux :

- Le premier concerne l'utilisation du modèle 3D standard (géométrie régulière), équivalent à un modèle 3D à géométrie irrégulière, dans le processus d'optimisation, afin de faciliter les calculs et minimiser le temps d'analyse.
- Le deuxième est relatif à la compression des données en relation avec le nuage de points de l'objet 3D, par le choix des vecteurs normaux aux plans orthogonaux traversant l'objet 3D, choisis d'une façon à faciliter le processus d'optimisation.
- Le troisième concerne l'intégration d'autres techniques d'optimisation telles que l'algorithme PSO, l'analyse par éléments finis, en mode hybride.
- Le quatrième est relatif à l'application de ce processus d'optimisation sur les parois minces possédant des surfaces complexes.

# Bibliographie

---

## Bibliographie :

- [1] C. Tournier, “Contribution à la conception des formes complexes: La surface d’usinage en fraisage 5 axes isocrête.” Cachan, Ecole normale supérieure, 2001.
- [2] C. Lartigue, E. Duc, and C. Tournier, “Machining of free-form surfaces and geometrical specifications,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 213, no. 1, pp. 21–27, 1999.
- [3] B. Falcidieno, F. Giannini, J.-C. Léon, and J.-P. Pernot, “Processing free form objects within a Product Development Process framework,” 2014.
- [4] G. Farin, J. Hoschek, and M.-S. Kim, *Handbook of computer aided geometric design*. Elsevier, 2002.
- [5] F. Charpentier, “Maîtrise du processus de modélisation géométrique et physique en conception mécanique.” Bordeaux, 2014.
- [6] H. Ameddah, “Modélisation CAO et Stratégies d’usinage pour la réalisation des surfaces à géométrie compliquée (Surfaces Libres).” Université de Batna 2, 2013.
- [7] M. Moumnassi, “La représentation implicite des volumes pour l’analyse par éléments finis avec XFEM et Level-sets.” Université Paul Verlaine-Metz, 2011.
- [8] M. Panchetti, “Exploitation d’images numériques pour la simplification et la déformation de modèles polyédriques.” Arts et Métiers ParisTech, 2009.
- [9] P. Véron, “Techniques de simplification de modèles polyédriques pour un environnement de conception mécanique.” Grenoble INPG, 1997.
- [10] N. Tsingos and M.-P. Cani, “Un modèleur interactif d’objets définis par des surfaces implicites,” 1994.
- [11] P. Vanackère, “Les modélisations géométriques utilisées dans les logiciels de DAO/CAO,” in *L’intégration de l’informatique dans l’enseignement et la formation des enseignants*, 1992, pp. 123–131.
- [12] K. Lamboglia, “Modélisation volumique de surfaces non-manifold.” Institut National Polytechnique de Lorraine, 1994.
- [13] A. A. G. Requicha, “Representations of rigid solid objects,” *Comput. Aided Des. Model. Syst. Eng. CAD-Systems*, pp. 1–78, 1980.
- [14] V. Moron, “Mise en correspondance de données 3D avec un modèle CAO: application à l’inspection automatique.” Lyon, INSA, 1996.
- [15] A. Lieutier and B. Thibert, “Calcul des propriétés différentielles des courbes et des

- 
- surfaces: point de vue de la mesure,” *Cours M2R*, 2008.
- [16] G. Farin, “A history of curves and surfaces,” *Handb. Comput. aided Geom. Des.*, vol. 1, no. 2, p. 2, 2002.
- [17] F. Legrand and L. C. Commons, “Courbes de Bézier.”
- [18] G. G. Lorentz and B. Polynomials, “University of Toronto Press.” Toronto, 1953.
- [19] A. Giunta and L. Watson, “A comparison of approximation modeling techniques-polynomial versus interpolating models,” in *7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, 1998, p. 4758.
- [20] A. Valdescault, A. Batailly, and S. Jones, “Interpolation et approximation de données à l’aide de courbes et surfaces paramétriques de type B-splines,” 2012.
- [21] D. Salomon, *Curves and surfaces for computer graphics*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [22] T. Guillod, “Interpolations, courbes de Bézier et B-splines,” *Bull. la Société des enseignants Neuchâtelois Sci.*, 2008.
- [23] F. Andersson and B. Kvernes, “Bezier and B-spline Technology,” *Umea Univ. Sweden*, 2003.
- [24] P. Lavoie, “An introduction to NURBS,” *on-line Tutor. <http://libnurbs.sourceforge.net/nurbsintro.pdf>*, 1999.
- [25] C. Ramakrishnan, “An introduction to NURBS and OpenGL,” *Lect. Notes. Duke Univ.*, 2002.
- [26] R. Ohbuchi, H. Masuda, and M. Aono, “A shape-preserving data embedding algorithm for NURBS curves and surfaces,” in *Computer Graphics International Conference*, 1999, p. 180.
- [27] C. Jacquemyn, M. D. Jackson, and G. J. Hampson, “Surface-based geological reservoir modelling using grid-free NURBS curves and surfaces,” *Math. Geosci.*, vol. 51, no. 1, pp. 1–28, 2019.
- [28] S. BOUKEBBAB, S. HefaiDia, and H. GHERIBI, “Modélisation par les NURBS des Surfaces Gauches en vue d’une reproduction de forme: Application à la tête du piston du moteur F4L912.”
- [29] L. Tapie, “Contribution à la conception et fabrication par ordinateur de pièces de formes complexes: de l’usinage de pièces mécaniques aux dispositifs biomédicaux.” Université paris 13, 2019.

- 
- [30] P. Radhakrishnan, S. Subramanian, and V. Raju, *Cad/cam/cim*. New Age International, 2008.
- [31] I. Lazoglu, C. Manav, and Y. Murtezaoglu, “Tool path optimization for free form surface machining,” *CIRP Ann.*, vol. 58, no. 1, pp. 101–104, 2009.
- [32] S. Ding, M. A. Mannan, A. N. Poo, D. C. H. Yang, and Z. Han, “Adaptive iso-planar tool path generation for machining of free-form surfaces,” *Comput. Des.*, vol. 35, no. 2, pp. 141–153, 2003.
- [33] M. Poniatowska, “Free-form surface machining error compensation applying 3D CAD machining pattern model,” *Comput. Des.*, vol. 62, pp. 227–235, 2015.
- [34] A. Lasemi, D. Xue, and P. Gu, “Recent development in CNC machining of freeform surfaces: a state-of-the-art review,” *Comput. Des.*, vol. 42, no. 7, pp. 641–654, 2010.
- [35] G. C. Loney and T. M. Ozsoy, “NC machining of free form surfaces,” *Comput. Des.*, vol. 19, no. 2, pp. 85–90, 1987.
- [36] W. He, M. Lei, and H. Bin, “Iso-parametric CNC tool path optimization based on adaptive grid generation,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 41, no. 5, pp. 538–548, 2009.
- [37] G. Elber and E. Cohen, “Toolpath generation for freeform surface models,” *Comput. Des.*, vol. 26, no. 6, pp. 490–496, 1994.
- [38] Y. Huang and J. H. Oliver, “Non-constant parameter NC tool path generation on sculptured surfaces,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 281–290, 1994.
- [39] I. Belaidi, A. Iloul, K. Mohammedi, and G. Ishiomin, “Generation de trajectoires d’outils: une approche simplifiée pour le calcul des intersections de surfaces subdivisées.”
- [40] K. Suresh and D. Yang, “Constant scallop-height machining of free-form surfaces,” 1994.
- [41] C. Tournier and E. Duc, “Usinage de formes gauches: génération de trajectoires outils à hauteur de crête constante,” 2001.
- [42] C. Tournier and E. Duc, “Iso-scallop tool path generation in 5-axis milling,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 25, no. 9–10, pp. 867–875, 2005.
- [43] C. Tournier and C. Lartigue, “5-axis iso-scallop tool paths along parallel planes,” *Comput. Aided. Des. Appl.*, vol. 5, no. 1–4, pp. 278–286, 2008.
- [44] R. Laguionie, M. Rauch, J.-Y. Hascoët, and S.-H. Suh, “An eXtended manufacturing integrated system for feature-based manufacturing with STEP-NC,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 24, no. 9, pp. 785–799, 2011.

- 
- [45] J. J. Childs, *Numerical control part programming*. Industrial Press, 1973.
- [46] D. T. Ross, “Origins of the APT language for automatically programmed tools,” in *History of Programming Languages*, 1978, pp. 279–338.
- [47] W. Lee, Y. Lee, and C.-C. Wei, “Automatic Error Compensation for Free-Form Surfaces by Using On-Machine Measurement Data,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 15, p. 3073, 2019.
- [48] P. G. Benardos and G.-C. Vosniakos, “Predicting surface roughness in machining: a review,” *Int. J. Mach. tools Manuf.*, vol. 43, no. 8, pp. 833–844, 2003.
- [49] E.-S. Lee, S.-H. Suh, and J.-W. Shon, “A comprehensive method for calibration of volumetric positioning accuracy of CNC-machines,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 43–49, 1998.
- [50] L. N. L. De Lacalle, A. Lamikiz, J. Muñoa, M. A. Salgado, and J. A. Sánchez, “Improving the high-speed finishing of forming tools for advanced high-strength steels (AHSS),” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 29, no. 1, pp. 49–63, 2006.
- [51] S. Mekid and T. Ogedengbe, “A review of machine tool accuracy enhancement through error compensation in serial and parallel kinematic machines,” *Int. J. Precis. Technol.*, vol. 1, no. 3–4, pp. 251–286, 2010.
- [52] D. M. S. Blackshaw, “Machine tool accuracy and repeatability-a new approach with the revision of ISO 230-2,” *WIT Trans. Eng. Sci.*, vol. 16, 1970.
- [53] M. Slamani, R. Mayer, and M. Balazinski, “Concept for the integration of geometric and servo dynamic errors for predicting volumetric errors in five-axis high-speed machine tools: an application on a XYZ three-axis motion trajectory using programmed end point constraint measurements,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 9–12, pp. 1669–1679, 2013.
- [54] M. Slamani, R. Mayer, M. Balazinski, S. H. H. Zargarbashi, S. Engin, and C. Lartigue, “Dynamic and geometric error assessment of an XYZ axis subset on five-axis high-speed machine tools using programmed end point constraint measurements,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 50, no. 9–12, pp. 1063–1073, 2010.
- [55] Y. Chen, J. Gao, H. Deng, D. Zheng, X. Chen, and R. Kelly, “Spatial statistical analysis and compensation of machining errors for complex surfaces,” *Precis. Eng.*, vol. 37, no. 1, pp. 203–212, 2013.
- [56] M. Slamani, R. Mayer, M. Balazinski, and S. Engin, “Identification and compensation of dynamic scale mismatches in high-speed end mill boring trajectory on CNC machines,” 2010.
- [57] M.-W. Cho, T. Seo, and H.-D. Kwon, “Integrated error compensation method using OMM system for profile milling operation,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 136, no.

- 1–3, pp. 88–99, 2003.
- [58] M. Slamani, R. Mayer, M. Balazinski, B. Carrier, and S. Engin, “Improvement to high-speed end mill boring accuracy by a simple compensation strategy,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–19, 2012.
- [59] J. Gu, J. S. Agapiou, and S. Kurgin, “Error compensation and accuracy improvements in 5-axis machine tools using the global offset method,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 44, pp. 324–331, 2017.
- [60] Y. Chen, H. Tang, Q. Tang, A. Zhang, D. Chen, and K. Li, “Machining error decomposition and compensation of complicated surfaces by EMD method,” *Measurement*, vol. 116, pp. 341–349, 2018.
- [61] N. Huang, Y. Jin, Q. Bi, and Y. Wang, “Integrated post-processor for 5-axis machine tools with geometric errors compensation,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 94, pp. 65–73, 2015.
- [62] E. B. Msaddek, M. Baili, Z. Bouaziz, and G. Desein, “Compensation of machining errors of Bspline and Cspline,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 97, no. 9, pp. 4055–4064, 2018.
- [63] M. Slamani, J. R. R. Mayer, and G. M. Cloutier, “Modeling and experimental validation of machine tool motion errors using degree optimized polynomial including motion hysteresis,” *Exp. Tech.*, vol. 35, no. 1, pp. 37–44, 2011.
- [64] J.-S. Chen, “Computer-aided accuracy enhancement for multi-axis CNC machine tool,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 35, no. 4, pp. 593–605, 1995.
- [65] M. Slamani, J.-F. Chatelain, A. Il, and M. Balazinski, “Statistical analysis and modeling of temperature distribution during various milling operations of thin walled aircraft parts,” *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 570, p. 125842, 2021.
- [66] M. Slamani and J.-F. Chatelain, “Kriging versus Bezier and regression methods for modeling and prediction of cutting force and surface roughness during high speed edge trimming of carbon fiber reinforced polymers,” *Measurement*, vol. 152, p. 107370, 2020.
- [67] M. Slamani, S. Gauthier, and J.-F. Chatelain, “A study of the combined effects of machining parameters on cutting force components during high speed robotic trimming of CFRPs,” *Measurement*, vol. 59, pp. 268–283, 2015.
- [68] M. Slamani, S. Gauthier, and J.-F. Chatelain, “Analysis of trajectory deviation during high speed robotic trimming of carbon-fiber reinforced polymers,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 30, no. 5, pp. 546–555, 2014.
- [69] M. Arslane, M. Slamani, and J.-F. Chatelain, “Development and validation of a machining fixture for complex-shaped components based on Plückerian matrix approach

- and SDT concept,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 114, no. 5, pp. 1697–1716, 2021.
- [70] X. Kang and Q. Peng, “Recent research on computer-aided fixture planning,” *Recent Patents Mech. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 8–18, 2009.
- [71] Z. M. Bi and W. J. Zhang, “Flexible fixture design and automation: review, issues and future directions,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 39, no. 13, pp. 2867–2894, 2001.
- [72] V. Ivanov *et al.*, “Numerical simulation of the system ‘fixture–workpiece’ for lever machining,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 91, no. 1, pp. 79–90, 2017.
- [73] F. Nixon, *Managing to achieve quality and reliability*. McGraw-Hill, 1971.
- [74] J.-H. Shin, J.-M. Yu, H.-H. Doh, H.-W. Kim, and D.-H. Lee, “Batching and scheduling for a single-machine flexible machining cell with multi-fixturing pallets and controllable processing times,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 3, pp. 863–877, 2020.
- [75] S. K. Hargrove and A. Kusiak, “Computer-aided fixture design: a review,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 32, no. 4, pp. 733–753, 1994.
- [76] M. Vasundara and K. P. Padmanaban, “Recent developments on machining fixture layout design, analysis, and optimization using finite element method and evolutionary techniques,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 70, no. 1–4, pp. 79–96, 2014.
- [77] J. Cecil, “Computer-aided fixture design—a review and future trends,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 18, no. 11, pp. 790–793, 2001.
- [78] V. D. Kamble and A. T. Mathew, “Brief review of methodologies for creation of cohesive fixture design,” *Mater. Today Proc.*, vol. 22, pp. 3353–3363, 2020.
- [79] Y. Rong, W. Hu, Y. Kang, Y. Zhang, and D. W. Yen, “Locating error analysis and tolerance assignment for computer-aided fixture design,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 39, no. 15, pp. 3529–3545, 2001.
- [80] M. Fallah and B. Arezoo, “Modelling and compensation of fixture locators’ error in CNC milling,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 51, no. 15, pp. 4539–4555, 2013.
- [81] S. Selvakumar, “Design analysis and optimization of machining fixture layout using finite element method and nontraditional techniques.”
- [82] H. Paris, “Contribution à la conception automatique des gammes d’usinage: le problème du posage et du bridage des pièces.” Grenoble 1, 1995.
- [83] S. Zirni, “Conception de montages d’usinage modulaire pour le fraisage.” Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [84] Y. Wang, X. Chen, N. Gindy, and J. Xie, “Elastic deformation of a fixture and turbine

- blades system based on finite element analysis,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 36, no. 3, pp. 296–304, 2008.
- [85] H. Wang *et al.*, “Integrated analysis method of thin-walled turbine blade precise machining,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 16, no. 5, pp. 1011–1019, 2015.
- [86] S. Zirmi, H. Paris, and I. Belaidi, “Conception de montage d’usinage: placement des éléments technologiques en contact avec la pièce,” 2009.
- [87] M. Estrems, H. T. Sanchez, and F. Faura, “Influence of fixtures on dimensional accuracy in machining processes,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 21, no. 5, pp. 384–390, 2003.
- [88] J. J. Bausch III, “Turbine blade fixture design using kinematic methods and genetic algorithms,” in *Intelligent Systems in Design and Manufacturing III*, 2000, vol. 4192, pp. 240–251.
- [89] V. Ivanov, I. Dehtiarov, I. Pavlenko, O. Liaposhchenko, and V. Zaloga, “Parametric optimization of fixtures for multiaxis machining of parts,” in *International Scientific-Technical Conference MANUFACTURING*, 2019, pp. 335–347.
- [90] D. Duret, A. Sergent, and H. Bui-Minh, “An investigation of indicators for controlling the quality of a fixture,” *Int. J. Metrol. Qual. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 71–82, 2010.
- [91] D. Vukelic *et al.*, “Computer-aided design and optimization of fixtures for plastic parts machining,” *J. Prod. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 49–54, 2018.
- [92] Z. J. Tao, A. S. Kumar, and A. Y. C. Nee, “A computational geometry approach to optimum clamping synthesis of machining fixtures,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 37, no. 15, pp. 3495–3517, 1999.
- [93] J. Cecil, “A clamping design approach for automated fixture design,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 18, no. 11, pp. 784–789, 2001.
- [94] K. Krishnakumar and S. N. Melkote, “Machining fixture layout optimization using the genetic algorithm,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, no. 4, pp. 579–598, 2000.
- [95] W. U. Dongbo *et al.*, “Machining fixture for adaptive CNC machining process of near-net-shaped jet engine blade,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 33, no. 4, pp. 1311–1328, 2020.
- [96] V. G. Cioată, I. Kiss, V. Alexa, and S. A. Rațiu, “The optimization of the position and the magnitude of the clamping forces in machining fixtures,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 200, no. 1, p. 12015.
- [97] O. Gonzalo *et al.*, “A method to minimize the workpiece deformation using a concept of intelligent fixture,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 48, pp. 209–218, 2017.
- [98] J. Payne and V. Cariapa, “A fixture repeatability and reproducibility measure to predict

- the quality of machined parts,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 38, no. 18, pp. 4763–4781, 2000.
- [99] J. J.-X. Liu and D. R. Strong, “Machining fixture verification for linear fixture systems,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 40, no. 14, pp. 3441–3459, 2002.
- [100] S. O’Reilly, “Free Form Fabrication-Process Overview,” in *Direct Engineering: Toward Intelligent Manufacturing*, Springer, 1999, pp. 287–323.
- [101] P. Bo, M. Bartoň, and H. Pottmann, “Automatic fitting of conical envelopes to free-form surfaces for flank CNC machining,” *Comput. Des.*, vol. 91, pp. 84–94, 2017.
- [102] P. Bo and M. Bartoň, “On initialization of milling paths for 5-axis flank CNC machining of free-form surfaces with general milling tools,” *Comput. Aided Geom. Des.*, vol. 71, pp. 30–42, 2019.
- [103] A. Calleja, P. Bo, H. González, M. Bartoň, and L. N. L. de Lacalle, “Highly accurate 5-axis flank CNC machining with conical tools,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 97, no. 5–8, pp. 1605–1615, 2018.
- [104] Á. Álvarez, A. Calleja, N. Ortega, and L. N. L. De Lacalle, “Five-axis milling of large spiral bevel gears: toolpath definition, finishing, and shape errors,” *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 5, p. 353, 2018.
- [105] S. Ferhat, M. Bey, and H. Bendifallah, “Reproduction Industrielle d’Objets avec des Surfaces de Formes Libres.”
- [106] N. Azzam, “Contribution à l’amélioration de la qualité des états de surfaces des prothèses orthopédiques.” Aix-Marseille, 2015.
- [107] X. Pessoles and C. Tournier, “Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 7, pp. 3665–3673, 2009.
- [108] M. Makki, C. Lartigue, C. Tournier, and F. Thiebaut, “Direct duplication of physical models in discrete 5-axis machining,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 3, no. 2, pp. 93–103, 2008.
- [109] P.-Y. Pechard, C. Tournier, C. Lartigue, and J.-P. Lugarini, “Geometrical deviations versus smoothness in 5-axis high-speed flank milling,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, no. 6, pp. 454–461, 2009.
- [110] C. Lartigue, C. Tournier, M. Ritou, and D. Dumur, “High-performance NC for HSM by means of polynomial trajectories,” *CIRP Ann.*, vol. 53, no. 1, pp. 317–320, 2004.
- [111] C. Tournier, F. Thiebaut, and C. Lartigue, “Modèles géométriques polynomiaux pour la fabrication,” 2006.

- 
- [112] T. Salloum, “Conception et réalisation de pièces prototypes fonctionnelles en usinage sur machines-outils à commande numérique 5 axes.” École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2009.
- [113] A. C. Lin and C. Hui-Chin, “Automatic 3D measuring system for optical scanning of axial fan blades,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 57, no. 5–8, pp. 701–717, 2011.
- [114] Y. Y. Cheng, Z. Z. Zhu, and D. H. Zhang, “Geometrical shape analysis for investment casting turbine blade based on optical measurement,” in *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 365, pp. 716–719.
- [115] Y. Li and P. Gu, “Free-form surface inspection techniques state of the art review,” *Comput. Des.*, vol. 36, no. 13, pp. 1395–1417, 2004.
- [116] V. Mehrad, D. Xue, and P. Gu, “Robust localization to align measured points on the manufactured surface with design surface for freeform surface inspection,” *Comput. Des.*, vol. 53, pp. 90–103, 2014.
- [117] V. N. N. Namboothiri, “On determination of sample size in form error evaluation using coordinate metrology,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 37, no. 4, pp. 793–804, 1999.
- [118] D. Zhao, W. Wang, J. Zhou, R. Jiang, K. Cui, and Q. Jin, “Measurement point sampling method for inspection of parts with free-form surfaces,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 10, no. 11, p. 1687814018809577, 2018.
- [119] G. Jotic, S. Tešić, C. Dorde, and S. Jokanovic, “QUALITY INSPECTION OF FREE-FORM SURFACE PARTS,” *Ann. Fac. Eng. Hunedoara*, vol. 18, no. 4, pp. 59–62, 2020.
- [120] F. Li, A. P. Longstaff, S. Fletcher, and A. Myers, “Rapid and accurate reverse engineering of geometry based on a multi-sensor system,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 74, no. 1–4, pp. 369–382, 2014.
- [121] K. Sokół and D. Cekus, “Reverse engineering as a solution in parts restoration process,” *Procedia Eng.*, vol. 177, pp. 210–217, 2017.
- [122] T. Li, L. Gao, Q. Pan, and P. Li, “Free-form surface parts quality inspection optimization with a novel sampling method,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 62, pp. 550–570, 2018.
- [123] M. Poniatowska, “Deviation model based method of planning accuracy inspection of free-form surfaces using CMMs,” *Measurement*, vol. 45, no. 5, pp. 927–937, 2012.
- [124] P. Bourdet and A. Clément, “Controlling a complex surface with a 3 axis measuring machine,” *Ann. CIRP*, vol. 25, no. 1, pp. 359–361, 1976.
- [125] P. Bourdet, “Métrologie tridimensionnelle et géométrique des pièces mécaniques,” *Univ. Paris VI–ENS Cachan, Licence Technol. Mécanique*, 1999.

- 
- [126] D. Duret, *Qualité de la mesure en production*. Editions Eyrolles, 2008.
- [127] A. H. Nalbandh and C. C. Rajyaguru, “Fixture design optimization using genetic algorithm-a review,” *J. information, Knowl. Res. Mech. Eng.*, vol. 2, pp. 466–471, 2013.
- [128] M. A. Albadr, S. Tiun, M. Ayob, and F. AL-Dhief, “Genetic Algorithm Based on Natural Selection Theory for Optimization Problems,” *Symmetry (Basel)*, vol. 12, no. 11, p. 1758, 2020.
- [129] A. Mohamed Shaharoun, H. Hashemi, and I. Sudin, “Fixture design automation and optimization techniques: Review and future trends,” *Int. J. Eng.*, vol. 27, no. 11, pp. 1787–1794, 2014.
- [130] K. Y. Yeung and X. Chen, “3-D fixture layout design system based on genetic algorithm,” in *Proceedings of the 16th International conference on Automation & Computing*, 2010, pp. 238–243.
- [131] D. Vukelic, G. Simunovic, B. Tadic, B. Buchmeister, T. Saric, and N. Simeunovic, “Intelligent design and optimization of machining fixtures,” *Teh. Vjesn.*, vol. 23, no. 5, pp. 1325–1334, 2016.
- [132] K. Kulankara, S. Satyanarayana, and S. N. Melkote, “Iterative fixture layout and clamping force optimization using the genetic algorithm,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 124, no. 1, pp. 119–125, 2002.
- [133] M. Konneh and S. AGE, “Optimization of Pin Type Fixture Configurations,” in *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century: LEM21 2007.4*, 2007, p. 7F606.
- [134] S. U. Butt, M. Arshad, A. A. Baqai, H. A. Saeed, N. A. Din, and R. A. Khan, “Locator Placement Optimization for Minimum Part Positioning Error During Machining Operation Using Genetic Algorithm,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 22, no. 5, pp. 813–829, 2021.
- [135] Y. Wang, A. Hodgson, X. Chen, and N. Gindy, “A methodology for the development of machining fixtures for components with complicated geometry,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 21, no. 7, pp. 848–856, 2008.
- [136] K. P. Rajurkar, M. M. Sundaram, and A. P. Malshe, “Review of electrochemical and electrodischarge machining,” *Procedia Cirp*, vol. 6, pp. 13–26, 2013.
- [137] M. Sen and H. S. Shan, “A review of electrochemical macro-to micro-hole drilling processes,” *Int. J. Mach. tools Manuf.*, vol. 45, no. 2, pp. 137–152, 2005.
- [138] T. A. S. and Z. Wang, “Study on modeling of wire EDM process,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 69, pp. 13–26, 1997.

- [139] and Z. L. R. B. Azhiri, R. Teimouri, M. G. Baboly, “Application of Taguchi, ANFIS and grey relational analysis for studying, modeling and optimization of wire EDM process while using gaseous media,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 71, pp. 279–295, 2014.
- [140] A. KADI, *Mecanique\_rationnelle\_book*, 2010th ed. .
- [141] D. E. L. P. DE MESURAGE, “LE CALCUL D’INCERTITUDE DANS LES MÉTHODES DE MESURAGE DE L’EXPOSITION PROFESSIONNELLE.”

**ملخص:**

في إطار هذه الأطروحة، قدمنا مساهمة تتعلق بجعل عملية تصميم تجميعات التصنيع بطريقة آلية، ولا سيما للقطع الميكانيكية ذات الأشكال المعقدة. في هذا المنحى، تم اتباع نهج التحسين على أساس مفهوم إحداثيات «Plücker» كما تم تقديم تطبيق تحسين ثان باستخدام الخوارزمية الجينية. الهدف هو تقليل الاعتماد على خبرة المصممين، والتي تظهر أولاً في اختيار مواقع محددات تموقع القطع المصنعة في تجميعات التصنيع، وثانياً توزيع نظام التثبيت. هذه المساهمة تمكن المصممين المبتدئين من استخدام تطبيق تحسين تجميعات التصنيع، لصياغة تخطيط تركيبات وتجميعات محسنة، كما يمكن تقييم أداء تصميمات التركيبات الجديدة بسهولة وسرعة.

**Abstract:**

In this thesis, we have given a contribution which concerns the automation of the design process of machining fixtures, in particular for parts of complex shapes. In this sense, an optimization approach was used at the basis of the concept of Plückerian coordinates. A second optimization application was also presented using the genetic algorithm. The aim is, to reduce the dependence on the expertise of the designers, which appears first in the choice of the layout of the locators, and the distribution of the clamping system second. This contribution enables novice designers to use the fixture design application to formulate an optimized fixture layout and the performance of new fixture designs can be easily and quickly evaluated.

**Résumé :**

Dans le cadre de ce mémoire de thèse, nous avons donné une contribution qui concerne l'automatisation de processus de conception des montages d'usinage, notamment pour les pièces de formes complexes. Dans ce sens, une approche d'optimisation a été abordée à la base du concept des coordonnées plückeriennes. Une deuxième application d'optimisation a été présentée aussi en utilisant l'algorithme génétique. Le but est de réduire la dépendance à l'expertise des concepteurs, qui apparaisse en premier lieu dans le choix de la disposition des localisateurs, et la répartition du système de bridage en deuxième lieu. Cette contribution permet aux concepteurs novices d'utiliser l'application de conception de montages d'usinage pour formuler une disposition des montages optimisée, et la performance de nouvelles conceptions de montages d'usinages peut être évaluée facilement et rapidement.