

People's Democratic Republic of Algeria  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
Mohamed Boudiaf University of M'sila  
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة المسيلة  
كلية التكنولوجيا

---

Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

**Option : Fabrication Mécanique & Productique**

Présenté par :

**BRIK Mounir & LAZIRI Lakhdar**

### Thème

---

**OPTIMISATION DU PLACEMENT DES ELEMENTS D'APPUI  
SUR LES PIECES A USINER POUR MINIMISER LES ERREURS DE  
MONTAGE ET DE MAINTIEN**

---

Devant le jury composé de :

<b>NOM et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
AMROUNE SALAH	MCA	Président
SLAMANI MOHAMED	MCA	Encadreur
ARSLANE MUSTAPHA	Enseignant vacataire	Examineur

*Année Universitaire : 2019 / 2020*

N° d'ordre : GM/...../2020

## **Remerciements**

Nous remercions Dieu tout puissant clément et miséricordieux de nous avoir soignés et aidés.

Nous tenons avant tout, à exprimer notre profonde gratitude et remerciement à notre encadreur Dr Mohamed SLAMANI pour son aide, ses conseils et sa confiance durant la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons aussi, nos vifs remerciements à tout le personnel du staff pédagogique du département de Génie Mécanique ainsi que pour tous les enseignants pour leurs encouragements et leurs aides.

Nous tenons également à remercier tous nos collègues d'études.

En fin, à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Sommaire

Sommaire	V
Abréviations	IX
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XIII
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui	3
I-1 Introduction	4
I-2 Mise en position des pièces pour l'usinage	4
I-2-1 Définition	4
I-2-2 Isostatisme	5
I-2-3 Degrés de liberté et normales de repérage	5
I-2-3-1 Degrés de liberté	5
I-2-3-2 Normale de repérage	5
I-2-3-3 Principe fondamental	6
I-2-4 Mise en position d'usinage des pièces	6
I-2-4-1 Pièces prismatiques	6
I-2-4-1-1 Les types de liaisons	7
I-2-4-2 Pièces de révolution	11
I-3 Règles d'installation des normales de repérage	13
I-4 Représentation des solutions technologiques	14
I-4-1 Symbolisation (NF E 04-013)	14
I-4-2 Principe d'établissement des symboles	14
I-5 Définition et fonction d'un montage d'usinage	15
I-5-1 Définition d'un montage d'usinage	15
I-5-2 Fonctions d'un montage d'usinage	16
I-5-3 TYPOLOGIE DES MONTAGES D'USINAGE	17
I-5-3-1 Exemples de montages adaptés au Tournage et aux pièces de révolution	17
I-5-3-2 Exemples de montages adaptés au Fraisage et aux pièces polyédriques	19
I-5-3-3 Groupement de pièce en panoplie ou en multi-phase	21

<b>I-6 Conclusion</b>	<b>22</b>
<b>Chapitre II Problématique, objectifs et méthodologie</b>	<b>23</b>
<b>II-1 Généralités</b>	<b>24</b>
<b>II -2 Problématique</b>	<b>25</b>
<b>II-3 Objectif et méthodologie</b>	<b>25</b>
<b>II-3-1 Utilisation des algorithmes génétiques</b>	<b>25</b>
<b>II-4 Analyse pour la conception du montage d'usinage</b>	<b>27</b>
<b>II-4-1 Analyse cinématique</b>	<b>27</b>
<b>II-4-2 Analyse de forces</b>	<b>27</b>
<b>II-4-3 Analyse de déformations</b>	<b>27</b>
<b>II -5 Facteurs influent sur le montage d'usinage</b>	<b>27</b>
<b>II -6 Le lien entre le choix de l'outil et le montage d'usinage</b>	<b>28</b>
<b>II-7 Le lien entre l'ordonnancement et la conception du montage d'usinage</b>	<b>28</b>
<b>II-8 Le lien entre la conception du montage d'usinage et la trajectoire d'outil</b>	<b>28</b>
<b>Chapitre III Méthodes d'optimisation</b>	<b>30</b>
<b>III-1 Etat de l'art sur les méthodes d'optimisation : théorie et aspects mathématiques</b>	<b>31</b>
<b>III-1-1 Généralités</b>	<b>31</b>
<b>III-1-1-1 Sensibilité et robustesse de la méthode</b>	<b>32</b>
<b>III-1-1-2 Les opérateurs de recherche</b>	<b>32</b>
<b>III-1-1-3 Les modes de recherche</b>	<b>32</b>
<b>III-1-1-4 Ordre d'une méthode d'optimisation</b>	<b>33</b>
<b>III-1-2 Méthodes d'optimisation avec contraintes</b>	<b>33</b>
<b>III-1-2 1 Méthodes de pénalité</b>	<b>33</b>
<b>III-2 Optimisation mono-objective</b>	<b>34</b>

III-2-1 Méthodes déterministes	34
III-2-1-1 Méthodes de gradient	35
III-2-1-2 Méthode de descente quasi-Newton	35
III-2-1-3 Limitations des méthodes déterministes	35
III-2-2 Méthodes stochastiques	35
III-2-2- 1 Recherche Tabou	35
III-2-2-2 Méthodes évolutionnaires	36
III-2-2-3 Méthodes de regroupement (clustering)	36
III-2-2-4 Méthodes de descentes généralisées	37
III-3 Optimisation multi-objective	37
III-3-1 Transformation en un problème mono-objectif	37
III-3-2 Approche Non-Pareto	38
III-3-3 Approches Pareto	38
III-4 Optimisation par l'application de la méthode des algorithmes génétiques	38
III-4-1 Caractéristiques générales des méthodes d'optimisation par AG	40
III-4-2- Les opérateurs classiques des algorithmes génétiques	40
III-4-2-1 Sélection	40
III-4-2-2 Croisemen	41
III-4-2-3 Mutation	42
III-4-3 Test de convergence	42
III-5 Optimisation avec Matlab	42
III-5-1 Minimisation unidimensionnel : fminbnd	43
III-5-2 Minimisation multidimensionnelle : fminsearch, fminunc	43
III-5-3 Le minimum d'une fonction en utilisant les algorithmes génétiques (AG) sur Matlab	44
<b>CHAPITRE IV Modélisation mathématique</b>	<b>45</b>
IV-1 Introduction	46
IV-2 Concept du torseur de petits déplacements (SDT) et Coordonnées plückériennes	46
IV-3 Optimisation de la position des points d'appui	47
IV-4 Développement de la matrice à partir des coordonnées plückériennes et calcul des normales (cosinus directeurs)	48
IV-4-1 Coordonnées plückériennes d'une droite	48

IV-4-2 Rang d'un système de droite	50
IV-4-3 Optimisation de la localisation des points d'appui	51
<b>Chapitre V Concept d'optimisation par nuage de points</b>	<b>52</b>
V-1 Introduction	53
V-2 Surfaces de Bézier	53
V-2-1 Définition	53
V-2-2 Formulation mathématique	54
V-3 Surfaces B-spline	54
V-4 Surfaces NURBS	55
<b>Chapitre VI Application de la méthode proposée sur différentes pièce</b>	<b>57</b>
VI-1 Introduction	58
VI-2 Les Méthodes d'optimisation utilisées	58
VI-3 Les pièces modèles	58
VI-4 Etude des cas	60
VI-4-1 Cas d'une pièce prismatique	60
VI-4-2 Cas d'une pièce cylindrique	67
VI-4-3 Cas d'une pièce complexe (surface gauche)	69
Conclusion générale	72
Références bibliographiques	74
Résumé	76

## **Abréviations :**

3D : trois dimensions.

CAD: Computer aided design.

CAM: Computer aided manufacturing.

CAO : conception assistée par ordinateur.

Cond : conditionnement.

Dét : déterminant.

FAO: Fabrication assistée par ordinateur.

Ga : algorithme génétique.

Sdt : Torseur de petits déplacements.

Stl : format de fichier stéréolithographique.

Txt : texte.

# Liste des figures

## CHAPITRE I

Figure( I-1) degrés de liberté d'un objet libre dans l'espace)	5
Figure (I-2) normale de repérage	5
Figure (I-3-a) Référentiel de la pièce par rapport R machine-outil	6
Figure I-3-b	6
Figure I-3-c	7
Figure I-3-d	7
Figure I- 4 Pièce d'une bonne correction géométrique (Contact direct support- pièce)	8
Figure (I-5) liaison triponctuelle	8
Figure (I-6) Symbolisation de l'appui plan	8
Figure I-7-a Pièce d'une bonne correction géométrique (Contact direct support- pièce)	9
Figure (I-7-b)appui bi-ponctuel	9
Figure (I-8) Symbolisation de l'appui linéaire	9
Figure (I-9-a) appui à bout sphérique	10
Figure( I-9-b) appui à surface plane	10
Figure( I-10) Symbolisation de l'appui ponctuel	10
Figure ( I-11-a ) cylindre long	11
Figure ( I-11-b) Symbolisation centrage long	11
Figure (I-12) cylindre court	12
Figure (I-13) Symbolisation centrage court	12
Figure (I-14) Normales de repérage pour un cône	13
Figure (I-15) Symbolisation centrage cône	13
Figure (I-16) Règles d'installation des normales de repérage	14
Figure (I-17) Symbolisation des éléments d'appui	14
Figure (I-18) Symbolisation des solutions technologiques de prises de pièce	15
Figure (I-19-a) Les différents types de posage	16

Figure( I-19-b) Les différents modes de bridage	16
Figure I-20. Exemples de montages adaptés au Tournage et aux pièces de révolution	18
Figure I-21 (Exemple d'un montage modulaire)	19
Figure (I-22) Eléments modulaires standard	20
Figure (I-23) Groupement de pièces sur le même montage	21

## **Chapitre II**

FigureII-1 (Exemple d'un système de conception de montage)	26
FigureII-2 Le sens des efforts de coupe peut influencer sur la stabilité des pièces	29

## **Chapitre III**

Figure (III-1) Classification des méthodes d'optimisation	34
Figure (III-2) Organigramme d'un algorithme génétique type	39

## **CHAPITRE IV**

Figure IV -1 (liaison mécanique pièce-montage d'usinage)	46
Figure IV.2 : Mise en position de Lord Kelvin et points de Bessel	48
Figure IV-3 : Droite normale ( $D_i$ ) au point de contact $M_i$	49
Figure IV-4 : Position spatiale de la droite ( $D_i$ ) dans le repère R	49

## **Chapitre V**

Figure (V-1) Surface de Bézier	53
Figure (V-2) Surfaces B-spline (10×10 points)	55
Figure (V-3) Surface NURBS	56

## **CHAPITRE VI**

Figure (VI-1) Pièce prismatique	59
Figure(VI-2) Pièce cylindrique	59
Figure (VI-3) Pièce complexe (surface gauche, ailette de t	60
Figure (VI-4) Interface d'optimisation par Fmincon (test1)	61
Figure (VI-5) Résultat graphique d'optimisation par Fmincon	61

Figure (VI-6) placement des appuis (optimisation par Fmincon) (test1)	62
Figure (VI-7) placement des appuis (optimisation par Fmincon) (test2)	63
Figure (VI-8) placement des appuis (optimisation par Fmincon) (test3)	63
Figure (VI-9) Interface d'optimisation par Algorithme génétique (test1)	64
Figure (VI-10) Résultat graphique d'optimisation par Alg génétique (1)	64
Figure (VI-11) placement des appuis (optimisation par alg gén) (test1)	65
Figure (VI-12) placement des appuis (optimisation par algor gén) (test2)	65
Figure (VI-13) placement des appuis (optimisation par algor gén) (test3)	65
Figure (VI-14) Pièce cylindrique dessinée sur SolidWorks	67
Figure (VI-15) Mesh file	68
Figure (VI-16) nuage de points	68
Figure (VI-17) Nuage de points cylindre, surface B-spline et vects normaux	69
Figure (VI-18)Fichier 'Stl file' de l'ailette	70
Figure (VI-19)Fichier 'Mesh file'	70
Figure (VI-20) Fichier 'Cloud point file'	71
Figure (VI-21) Nuage de points ailette, surface B-spline et vecteurs normaux	71

## Liste des Tableau

### CHAPITRE VI

Tableau (VI-1) Résultats obtenus après la routine d'optimisation par Fmincon	62
Tableau (VI-2) Résultats obtenus après la routine d'optimisation par algorithme génétique (ga)	66

---

## **Introduction générale**

## Introduction générale

Ce troisième millénaire a connu d'énormes progrès en matière de développement technologique dans tous les secteurs. Le secteur de production de pièces mécaniques a progressé de manière notable grâce à l'outil informatique en élaborant des logiciels allant de la conception à la fabrication. Ceci mène les entreprises concernées à intégrer ces outils de plus en plus pour faire face à la compétitivité qui s'acharne de jour en jour.

Ces dernières décennies ont vu le développement poussé de logiciels informatiques pour la modélisation géométrique de produits (modeleurs CAO / CAD) et d'outils pour l'assistance à la fabrication (logiciels de FAO / CAM) ainsi que les logiciels de calcul et d'optimisation (Matlab...).

Au fur et à mesure de développement des besoins des industriels, des modules métiers se sont greffés à ces logiciels (module de dimensionnement, module spécialisé pour les géométries de pièces forgées...).

Le problème qui nous intéresse dans cette modeste étude est d'optimiser le placement des éléments d'appui des pièces à usinées durant la conception des montages d'usinage qui englobe trois éléments : les variables de conception, les contraintes de conception et les objectifs de conception. Pour la conception du montage d'usinage la recherche de la solution optimale globale est difficile à obtenir mais l'optimisation des différents paramètres comme les forces de serrage optimales, le placement des points d'appui optimal reste possible. D'une façon générale on cherche une solution pertinente.

L'objectif de ce mémoire est de contribuer à l'étude de conception des montages d'usinage destinés à la mise et le maintien en position tout en basant sur les résultats obtenus par les méthodes d'optimisation en utilisant les algorithmes génétiques en mettant en compte toutes les paramètres de formes géométriques et contraintes technologiques.

Ce mémoire de thèse est composé de six chapitres :

- Le chapitre I expose des généralités et des revues de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation des éléments d'appui.

- Le chapitre II présente la méthodologie adoptée pour achever ce travail en décrivant la Problématique et les objectifs.

- Le chapitre III consiste à définir les méthodes théoriques d'optimisation.

- Le chapitre IV présente la modélisation mathématiques en se basant sur le concept du torseur de petites déplacements et le développement de ça matrice à partir des coordonnées plückériennes et en calculant les normales (cosinus directeurs) et les indicateurs d'isostatisme (déterminant et conditionnement).

- Le chapitre V présente les modélisations surfaciques.
- Le chapitre VI est consacré à l'application de la méthode proposée sur différentes pièces et l'optimisation du placement des éléments d'appui par simulation.

Après l'analyse de ces six chapitres nous finissons notre étude par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

**Généralités et revue de littérature sur les  
montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques  
d'optimisation du placement des éléments d'appui**

## I-1 Introduction :

Pour pouvoir usiner correctement une pièce, il faut pouvoir définir correctement et répétitivement sa position sur la machine-outil et, de plus, garantir le maintien de cette position lors de l'usinage, qui implique évidemment des forces de coupe. Il y a donc deux fonctions à assurer, le positionnement et le serrage de la pièce à usiner. L'ensemble de ces deux fonctions est désigné par le nom d'ablocage.

Si l'on prend une pièce et qu'on la monte plusieurs fois de suite sur le montage de contrôle, il faut que la pièce soit toujours positionnée de la même manière (en translation et en orientation).

Si ce n'est pas le cas, cela peut provenir principalement :

- de la déformation de la pièce ;
- du frottement qui interrompt le glissement pour venir en appui ;
- du système d'ablocage engendrant des efforts qui vont faire bouger la pièce lors du serrage ;
- et du choix « judicieux » des surfaces (ou points) d'appui réalisant l'interface « pièce-montage ». Plus particulièrement, le nombre de points d'appui ne doit pas être surabondant.

## I-2 Mise en position des pièces pour l'usinage

### I-2-1 Définition

Mettre une pièce en position d'usinage, c'est choisir le nombre et la disposition des appuis de telle sorte que :

- a- S'il n'y a qu'une seule pièce, celle-ci reprend toujours la même position si on la monte et démonte plusieurs fois. La position des usinages réalisés est définie par rapport au référentiel de la pièce déterminée par les appuis ;
- b- Si plusieurs pièces sont placées successivement sur les appuis, les usinages réalisés auront sur chaque pièce des positions en rapport direct avec le référentiel de la pièce défini par les appuis.

Dans la recherche de la mise en position :

- a- La pièce est supposée indéformable sous l'action de son poids.
- b- Les appuis sont ponctuels et ne provoquent, ni ne subissent de déformations.
- c- Lors de l'étude technologique d'installation, la forme donnée aux appuis permet de réduire les déformations négligées lors de l'étude préalable. [1]
- d- L'analyse de la mise en position d'une pièce consiste à rechercher par rapport à un trièdre de référence  $o, x, y, z$  appartenant à la pièce (référentiel d'appui de la pièce) si les libertés caractéristiques de la ou des surfaces à usiner sont bien supprimées. [1]

# Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui

## I-2-2 Isostatisme

C'est l'ensemble des composants qui concourent à la liaison de la pièce et de porte-pièce en permettant l'élimination des degrés de liberté. L'ensemble de ces composants doit permettre une remise en position identique après la pose d'une nouvelle pièce sur son porte-pièce pour assurer une bonne précision à l'usinage. [02]

## I-2-3 Degrés de liberté et normales de repérage :

### I-2-3-1 Degrés de liberté :

Ils caractérisent le mouvement d'un solide par rapport à un autre pris comme repère fixe. Il y a 6 degrés de liberté pour un objet libre dans l'espace (figure I-1).

- 3 translations suivant les axes x, y, z.
- 3 rotations autour des axes x, y, z.

On peut alors décrire ces mobilités sous la forme du torseur suivant :

$$\begin{Bmatrix} T_x & R_x \\ T_y & R_y \\ T_z & R_z \end{Bmatrix}$$

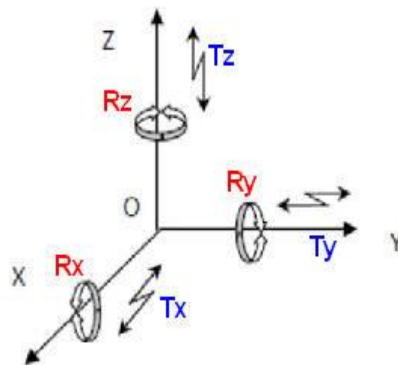


Figure ( I-1) degrés de liberté d'un objet libre dans l'espace [2]

Ou sous la forme linéaire : (Tx, Ty, Tz; Rx, Ry, Rz)

### I-2-3-2 Normale de repérage :

L'action de chaque contact ponctuel peut être symbolisée par un vecteur normal (une flèche normale) à la surface considérée, c'est une normale de repérage. Ce symbole est toujours placé du côté libre de matière (figure I-2). [1]



Figure (I-2) normale de repérage

# Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui

## I-2-3-3 Principe fondamental

Une mise en position est isostatique :

- Si le nombre des normales de repérage est égal au nombre des degrés à supprimer ;
- Si chacune des normales contribue à éliminer un degré de liberté ;
- Si chaque normale est matérialisée par un appui ponctuel ;
- On obtient un repérage isostatique complet si les 6 degrés de liberté du solide sont supprimés par 6 normales.

Une normale ne doit pas supprimer un degré de liberté déjà interdit par une autre normale.

Dans tous les autres cas, la mise en position n'est pas isostatique mais hypostatique si le repérage est incomplet ou hyperstatique si le repérage est surabondant. [1]

## I-2-4 Mise en position d'usinage des pièces [1]

### I-2-4-1 Pièces prismatiques :

Le problème consiste à situer correctement le référentiel  $o,x,y,z$  de la pièce par rapport au référentiel  $O,X,Y,Z$  de la machine (figure I-3-a).

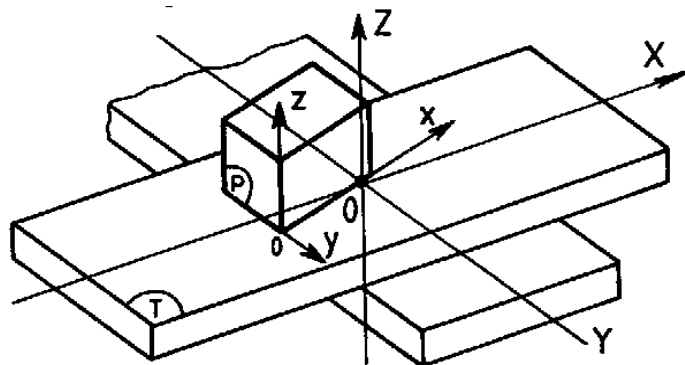


Figure (I-3-a) Référentiel de la pièce par rapport R machine-outil

### a- Suppression des degrés de liberté :

La liaison **appui plan** supprime 3 degrés de liberté : une translation et deux rotations (Figure 3-b).

- Translation suivant Z notée  $T_z$
- Rotation suivant Y notée  $R_y$
- Rotation suivant X notée  $R_x$

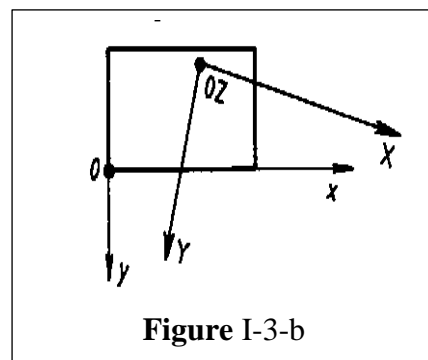


Figure I-3-b

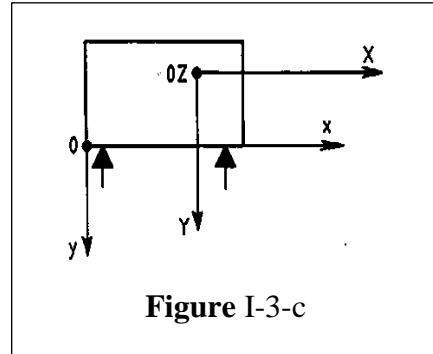
# Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui

## b- Suppression des degrés de liberté :

La liaison **appui linéaire** rectiligne supprime 2 degrés de liberté :

Une rotation et une translation (Figure 3-c).

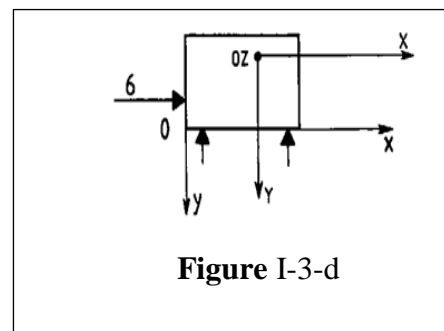
- Translation suivant Y notée  $T_y$
- Rotation suivant X notée  $R_x$



## c- Suppression de la translation suivant X :

La liaison **appui ponctuel** élimine un degré de liberté

(une translation notée  $T_x$ ) (Figure I-3-d).



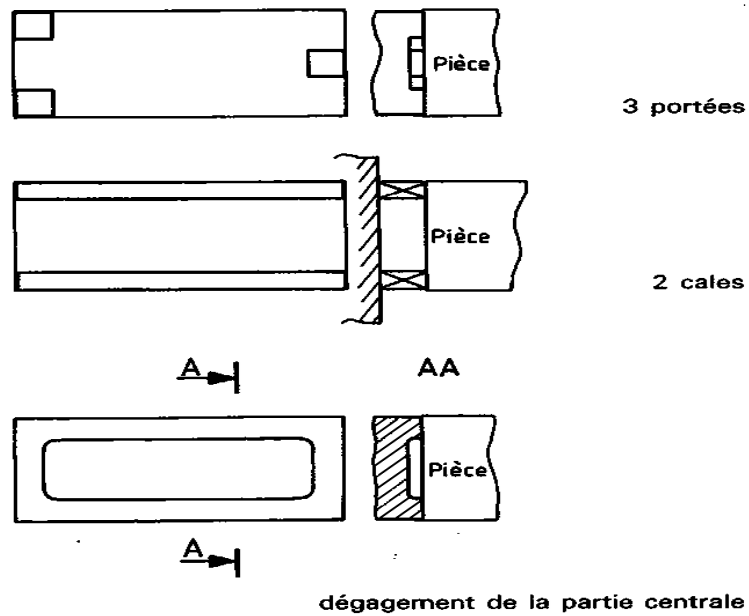
### I-2-4-1-1 Les types de liaisons :

#### 1- Liaison appui plan,

On considère deux cas :

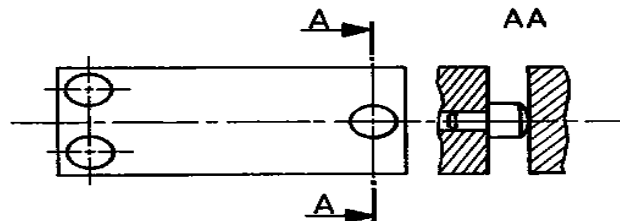
A. Le plan considéré de la pièce est d'une bonne correction géométrique, dans ce cas on admet généralement un contact direct plus ou moins allégé avec l'élément support de pièce s'il est lui-même de bonne correction géométrique (figure I-4).

**Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui**



**Figure (I- 4)** Pièce d'une bonne correction géométrique (Contact direct support-pièce)

**B.** Le plan considéré de la pièce est imprécis (surface brute ou usinée non convexe, etc.), dans ce cas la liaison doit se faire par l'intermédiaire de trois contacts ponctuels aussi éloignés que possibles... liaison tri-ponctuelle (Figure I-5).

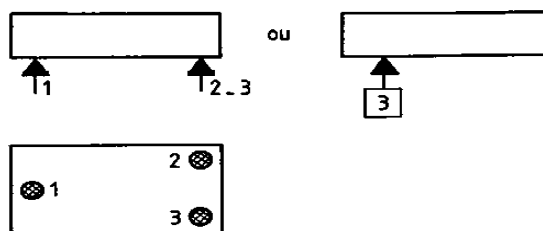


**Figure (I-5)** liaison triponctuelle

Dans les deux cas, la liaison appui plan élimine trois degrés de liberté, dans le cas A la position des trois normales de repérage est indéfinie alors que dans le cas B elle est dans l'axe de chaque appui.

**Symbolisation :**

*Deux solutions (Figure 6)*



**Figure (I-6)** Symbolisation de l'appui plan

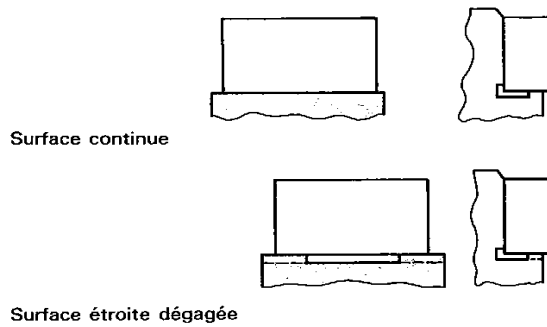
# Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui

On repère séparément chaque normale de repérage, où dans un cadre, on inscrit le nombre des degrés de liberté éliminés par la surface désignée.

## 2- Liaison linéaire rectiligne

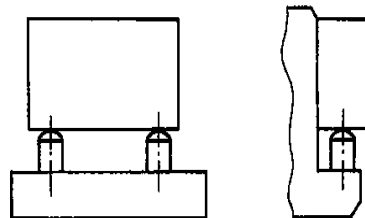
On considère deux cas :

**A.** Sur la pièce, le plan destiné à assurer la liaison est d'une bonne correction géométrique, dans ce cas on admet un contact plus ou moins allégé avec l'élément support, s'il est lui-même de bonne correction géométrique (Figure 7-a).



**Figure (I-7-a)** Pièce d'une bonne correction géométrique (Contact direct support-pièce)

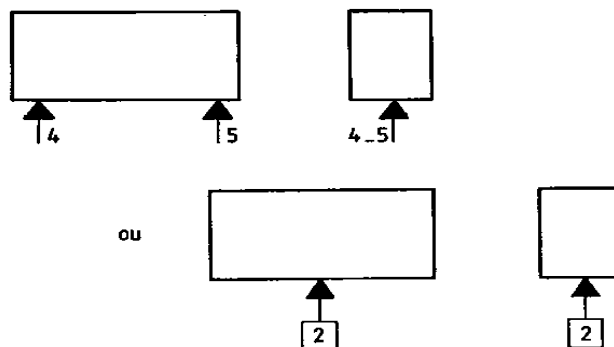
**B.** Sur la pièce, le plan destiné à assurer la liaison est imprécis (surface brute ou usinée non convexe, etc.), dans ce cas la liaison doit se faire par l'intermédiaire de deux contacts ponctuels aussi éloignés que possible, appui bi-ponctuel (figure I-7-b).



**Figure (I-7-b)** appui bi-ponctuel

### Symbolisation :

Deux solutions (Figure I- 8)



**Figure (I-8)** Symbolisation de l'appui linéaire

# Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui

## 3- Liaison ponctuelle

La surface (S) de contact entre la pièce et l'appui se réduit :

- Pour l'appui (Figure I- 9-a), à bout sphérique, à une surface très faible que l'on peut assimiler à un point.

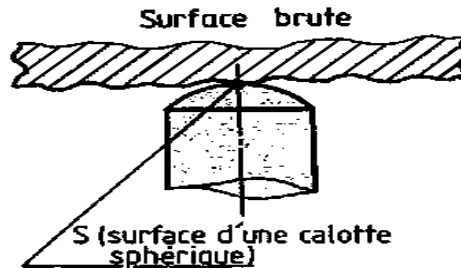


Figure (I-9-a) appui à bout sphérique

- Pour l'appui (Figure 9-b), à une surface plane plus ou moins étendue.

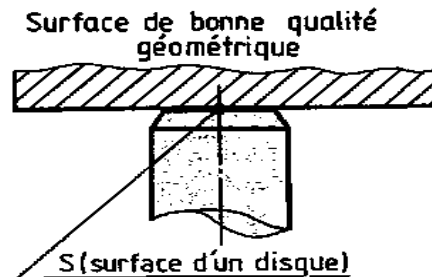


Figure ( I-9-b) appui à surface plane

## Symbolisation :

Deux solutions (Figure I-10)



Figure (I-10) Symbolisation de l'appui ponctuel

- Si la surface de contact pièce-appui est importante, les erreurs de mise en position de la pièce sont tributaires de la bonne correction géométrique des surfaces considérées de l'appui et de la pièce.

- Si la surface de contact pièce-appui est très réduite (à la limite  $S=0$ ) les erreurs de forme des surfaces en présence n'entachent pas la précision de repérage.

## Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui

• Plus la surface  $S$  de l'appui ponctuel est réduite plus les risques de déformation de la surface pièce sont importants. Le technicien doit donc établir un compromis entre la précision de repérage souhaitée, la qualité géométrique de la surface considérée de la pièce et l'étendue de la surface d'appui.

### I-2-4-2 Pièces de révolution :

a- **Cylindre long** (longueur  $l \geq 0,6 d$ ) (Figure I-11-a)

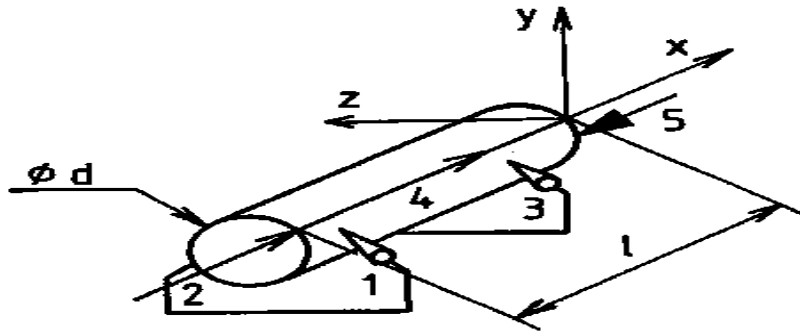


Figure (I-11-a) Cylindre long

- Le cylindre est repéré par cinq normales de repérage
- Cinq degrés de liberté sont éliminés :
  - (1, 2, 3, 4) éliminent ( $R_z$ ,  $T_z$ ,  $R_y$ ,  $T_y$ )
  - (5) élimine ( $T_x$ )

Seule  $R_x$  subsiste

- L'ensemble des normales de repérage (1, 2, 3, 4) réalise une liaison pivot glissant ou centrage long.
- L'ensemble des normales de repérage (1, 2, 3, 4) réalise une liaison pivot glissant ou centrage long plus butée.

### Symbolisation :

Deux solutions (Figure I-11-b)

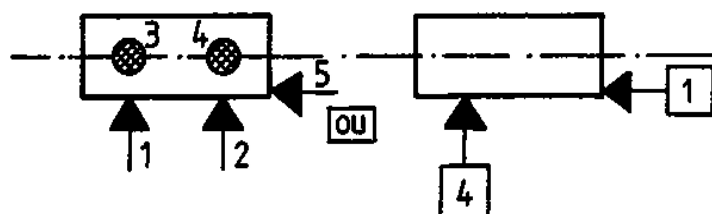
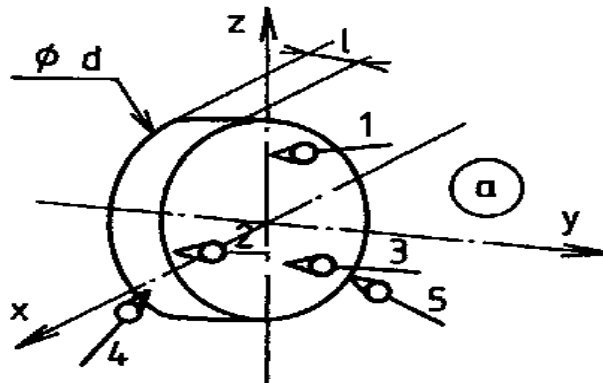


Figure (I-11-b) Symbolisation centrage long

**Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui**

**b- cylindre court**

Longueur  $l \leq 0,2 d$  (Figure I-12)



**Figure (I-12) cylindre court**

- La surface cylindrique n'est pas assez étendue pour réaliser une liaison pivot.

Le repérage complet du solide est assuré par le plan et le cylindre :

- (1, 2, 3) éliminent  $(R_x, R_z, T_y)$

- (4, 5) éliminent  $(T_x, T_z)$

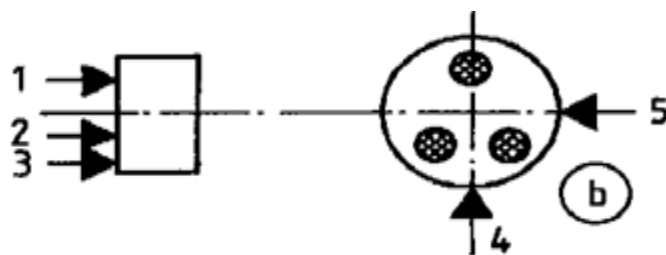
Seule  $R_y$  subsiste.

- La liaison (4, 5) est appelée linéaire annulaire au centrage court.

**NOTA :** pour le rapport  $\frac{l}{d}$  compris entre 0,6 et 0,2 la relation est indéterminée. Elle dépend de la qualité des contacts de surface entre la pièce et le porte-pièce.

**Symbolisation :**

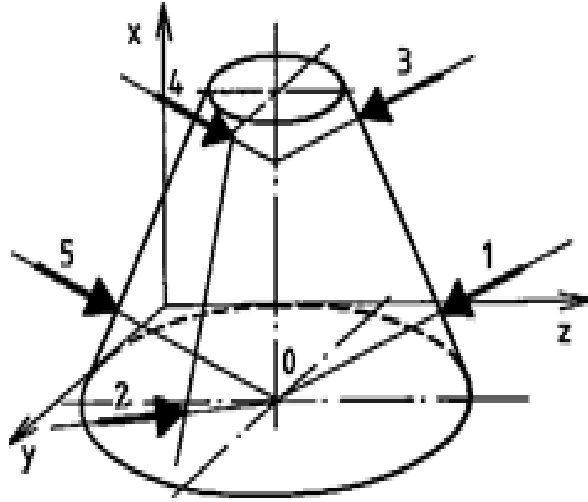
Une seule solution est recommandée (Figure I-13)



**Figure (I-13) Symbolisation centrage court**

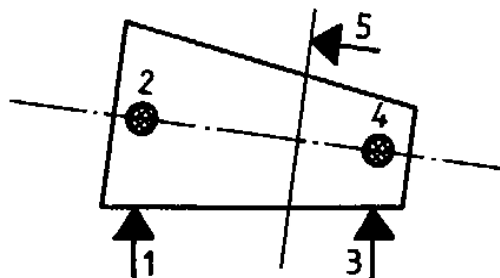
**c- cône long (Figure I-14)**

La surface conique élimine cinq degrés de liberté. Il reste  $R_x$ .



**Figure (I-14)** Normales de repérage pour un cône

**Symbolisation :** (Figure I-15)



**Figure (I-15)** Symbolisation centrage cône

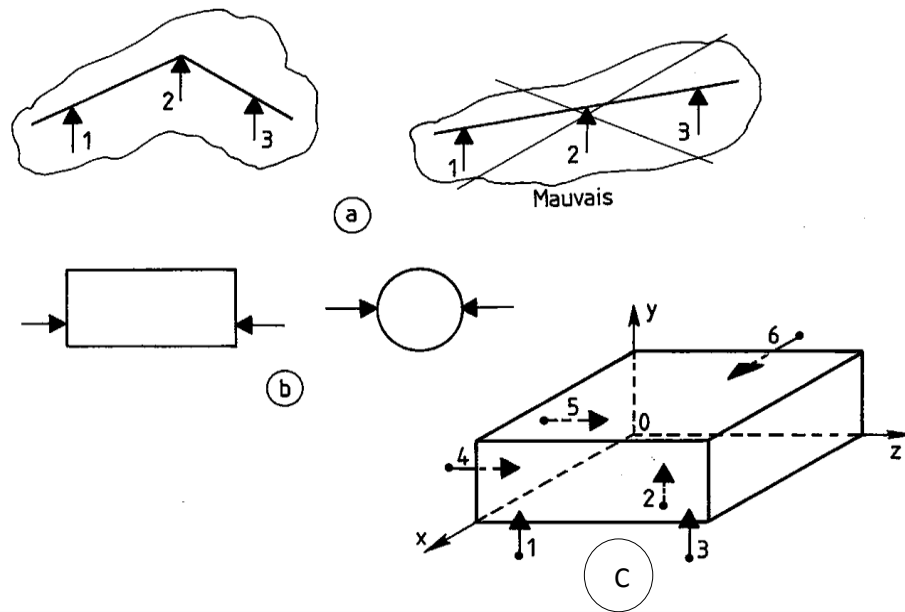
**I-3 Règles d'installation des normales de repérage :**

➤ Un plan ne peut recevoir plus de trois normales de repérage (fig I-16-a). En aucun cas, les trois normales ne peuvent être alignées.

➤ Deux normales ne peuvent se trouver sur une même ligne d'action (fig I-16-b).

➤ On ne doit pas placer plus de trois normales coplanaires (fig I-16-c).

Trois normales au moins doivent être disposées dans trois directions différentes. Exemple : 1, 4, 6 (Fig I-16-c).



**Figure (I-16) Règles d'installation des normales de repérage [1]**

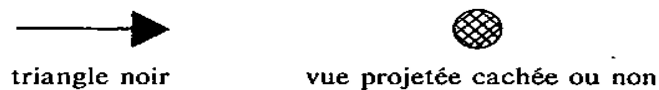
## **I-4 Représentation des solutions technologiques**

La norme NF E 04-013 définit la symbolisation des solutions technologiques de prises de pièces, c'est-à-dire la symbolisation des éléments d'appui des surfaces de référence et des éléments de maintien en position. Cette symbolisation ne doit pas figurer sur les documents portant la symbolisation des degrés de liberté supprimés. [1]

### **I-4-1 Symbolisation (NF E 04-013)**

On distingue :

Le symbole de base qui sert à la mise en position géométrique d'une pièce en vue de son usinage (Figure I-17).



**Figure (I-17) Symbolisation des éléments d'appui**

### **I-4-2 Principe d'établissement des symboles :**

Chaque symbole est construit à l'aide d'un certain nombre de symboles élémentaires additifs dont le rôle est de préciser :

- La fonction de l'élément technologique ;
- La nature du contact avec la surface ;
- La nature de la surface de contact de la pièce (brute ou usinée) ;
- Le type de technologie de l'élément.

# Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui

La figure I-18 ci-dessous donne un tableau résumé de la norme NF E 04-013.

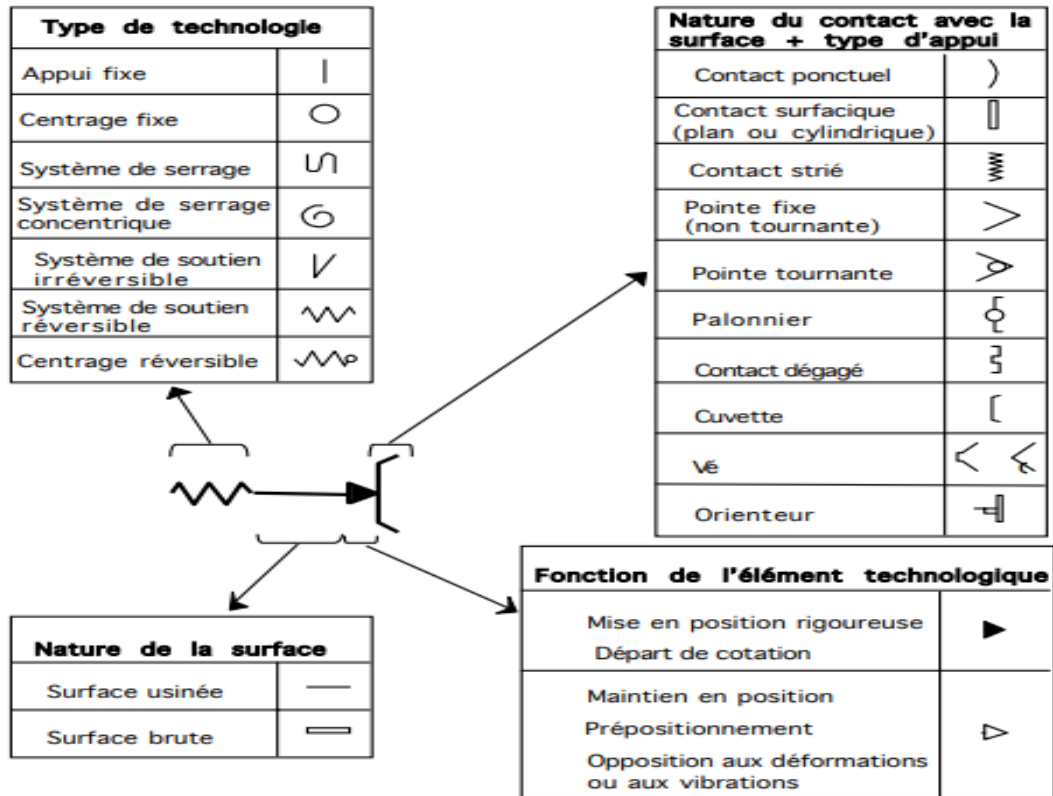


Figure (I-18) Symbolisation des solutions technologiques de prises de pièce) [3]

## I-5 Définition et fonction d'un montage d'usinage

### I-5-1 Définition d'un montage d'usinage

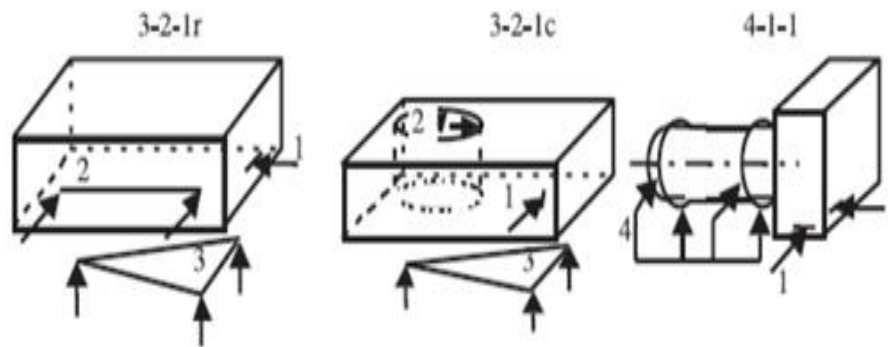
Un montage d'usinage est un outillage utilisé pour fixer la pièce solidement à la bonne position dans l'espace de travail de la machine-outil. La conception du montage d'usinage joue un rôle important pour obtenir une pièce usinée de bonne qualité. Elle s'inscrit au sein d'un processus plus global de fabrication industrielle. Les contraintes que doit respecter un montage d'usinage sont les suivantes :

- Garantir un libre accès des outils de coupe aux surfaces à usiner,
- Garantir la qualité de la pièce à usiner,
- Garantir la stabilité de la pièce sous les sollicitations dues aux efforts de coupe,
- Garantir un montage et un démontage aisé de la pièce,
- Permettre l'évacuation des copeaux et du fluide de coupe,
- Garantir la sécurité de l'opérateur pour la mise en œuvre du montage.

**I-5- 2 Fonctions d'un montage d'usinage**

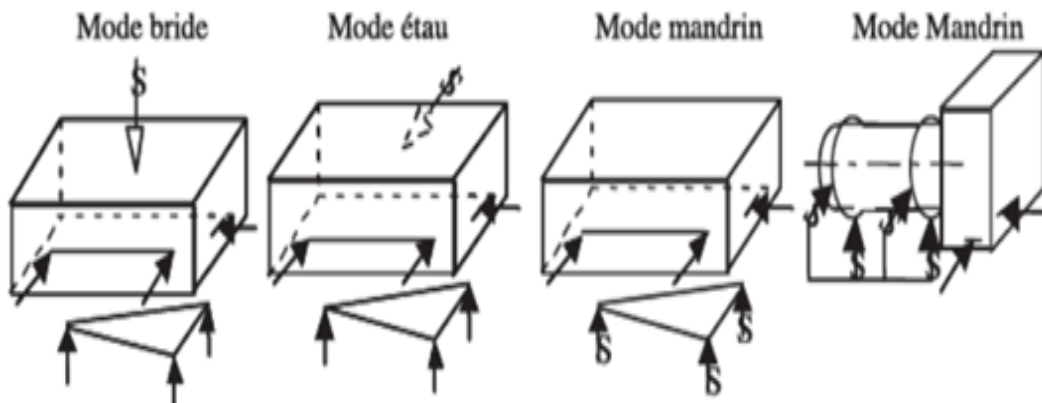
Les fonctions principales que doit remplir le montage d'usinage sont :

- **Positionner la pièce** : Durant l'usinage, la pièce doit être positionnée précisément dans l'espace de travail de la machine-outil. Cette condition est nécessaire pour garantir un bon positionnement des usinages sur la pièce en respectant l'isostatisme et assurant le maximum de précision et de stabilité. Pour cela, le posage est une combinaison d'appui prépondérant, secondaire et tertiaire qui peut être de type 3-2-1r (plan, linéaire, butée), de type 3-2-1c (plan, centreur, locating) ou de type 4-1-1 (pivot, butée, butée) (Figure I-19-a).



**Figure (I-19-a)** Les différents types de posage

- **Maintenir la pièce** : Durant l'usinage, la pièce doit être maintenue en position sur ses appuis pour éliminer tout risque de mouvement dû aux sollicitations mécaniques extérieures comme les efforts de coupe, le poids de la pièce et les forces d'inertie. Ce maintien est assuré par un bridage 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-19-b).



**Figure (I-19-b)** Les différents modes de bridage

## **Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui**

- **Soutenir la pièce** : Dans certains cas, il est nécessaire d'ajouter des soutiens pour éviter les déformations et/ou les vibrations indésirables de la pièce durant son usinage. Le soutien est assuré par des éléments réglables afin de ne pas perturber la qualité de la mise en position de la pièce dans l'espace de travail de la machine-outil.

L'objectif premier du montage d'usinage est de situer précisément la pièce dans l'espace de travail de la machine- outil par rapport à un référentiel afin d'assurer l'usinage au bon endroit sur la pièce. Cette mise en position ne doit pas être perturbée par les efforts de coupe, de bridage et d'inertie. De plus, les outils de coupe ne doivent pas entrer en collision avec les éléments du montage d'usinage tout au long de leurs trajectoires. [4]

### **I-5-3 TYPOLOGIE DES MONTAGES D'USINAGE**

Selon que la pièce par sa fréquence de rotation assure ou non la vitesse de coupe, et selon que la morphologie générale des surfaces de référence soit ou non de révolution, on peut définir deux grandes catégories de montages d'usinage. Les montages adaptés au tournage et aux pièces de révolution (mandrin, pointes) et les montages adaptés au fraisage et aux pièces de forme générale polyédrique (montages modulaires, étaux etc...). [3]

#### **I-5-3-1 Exemples de montages adaptés au Tournage et aux pièces de révolution :**

Le tableau des figures ci-dessous montre les montages adaptés au tournage des pièces de révolution.

**Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui**

<p>- Montage en l'air : mandrin à 3 mors concentriques sur centre de tournage</p>	<p>- Montage mixte : sur tour à commande numérique</p>
	
<p>- Montage entre pointes : sur tour à commande numérique</p>	<p>- Montage en mandrin à 3 mors concentriques, sur centre de fraisage à 5 axes</p>
	

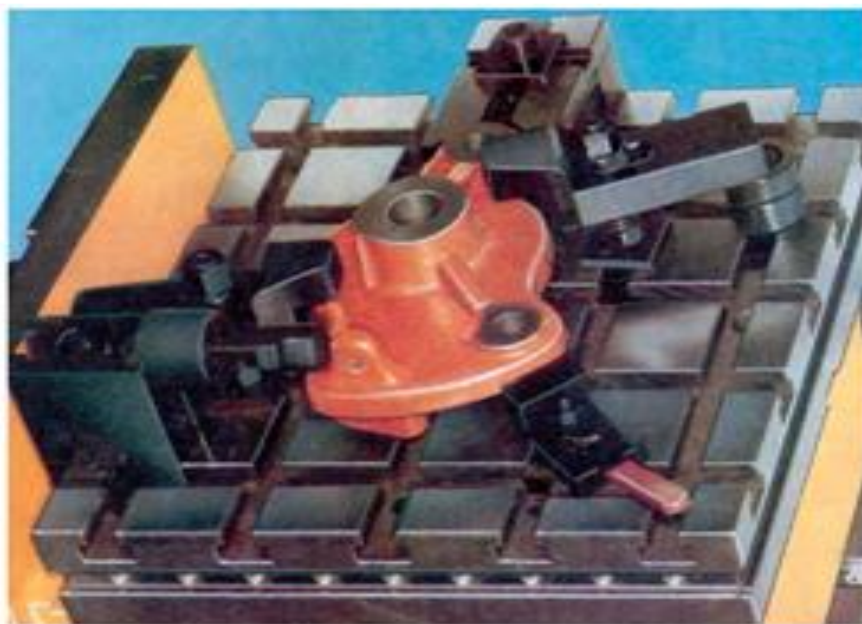
**Figure (I-20)** Exemples de montages adaptés au Tournage et aux pièces de révolution

**I-5-3-2 Exemples de montages adaptés au Fraisage et aux pièces polyédriques**

- **Montage d'usinage modulaire :**

Ce type de montage est constitué d'une plaque-support (ou équerre ou dé) sur laquelle il est possible de fixer différents composants standards réalisant la mise en position des surfaces de référence et le bridage de la pièce.

La préparation du montage se fait en dehors de la Machine-Outil, l'ensemble du montage est ensuite positionné et fixé sur la table ou la palette de la MOCN (Figure I-21)



**Figure I-21** (Exemple d'un montage modulaire) [3]

L'immobilisation de la machine pour changement de production est ainsi minimisée. Une mesure de l'origine pièce par rapport à l'origine du montage est réalisée sur MMT ce qui permet de définir, hors machine-outil, le décalage de l'origine du programme de commande numérique.

La modularité des composants constituant un montage d'usinage permet de réduire les coûts. Dans le cas de productions répétitives, les montages d'usinages sont systématiquement recomposés à chaque lancement de production. L'ensemble des composants est ainsi commun à plusieurs montages d'usinage.

Les montages modulaires sont réalisés à partir d'éléments modulaires standards (figure I-22) assemblés pour obtenir un porte-pièce désiré. Ils peuvent être conçus et réalisés rapidement.

## Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui



**Figure (I-22)** Eléments modulaires standard) [3]

Comme ces montages sont démontés à chaque campagne d'usinage, il faut, en contrepartie, avoir d'une part un stock d'éléments modulaires suffisant (ce qui représente un coût non négligeable) et d'autre part des opérateurs pour effectuer le montage, le réglage puis le démontage et le nettoyage à chaque lancement de lot.

Les montages d'usinage modulaires pour le fraisage offrent les avantages suivants :

- Gain de temps incontestable sur l'étude et la réalisation d'un montage, mais aussi sur le temps global de mise en œuvre (délai total de fabrication du montage),
- Flexibilité : modifications faciles et rapides en fonction de l'évolution des pièces,
- Parfaitement adapté aux études réalisées par C.A.O,
- Capacité de bridage étendue,
- Précision liée à la rigidité du système : grande résistance aux efforts de coupe et de bridage,
- Conforme aux adaptations pour palettisation ou cellules flexibles,
- Capacité de brider des pièces en fonction du type de machine : sur centre d'usinage à broche horizontale ou verticale, sur fraiseuses, sur machines à mesurer 3D,
- Grande performance par ses possibilités de prise de pièces,
- Adapté aux petites et moyennes séries,

## Chapitre I Généralités et revue de littérature sur les montages d'usinage, l'isostatisme et les techniques d'optimisation du placement des éléments d'appui

- C'est un outillage très performant pour la sous-traitance qui permet de réduire les délais de fabrication. [3]

### I-5-3-3 Groupement de pièce en panoplie ou en multi-phase

Pour les montages d'usinage modulaires on peut grouper un ensemble de pièces sur le même montage (figure I-23), ceci est généralement utilisé pour les pièces de petites dimensions et pour des moyennes et grandes séries. Le montage est dit en panoplie si on est dans la même phase sinon on change de phase et l'on est alors en multi-phase. [4]



**Figure (I-23)** Groupement de pièces sur le même montage

### I-6 Conclusion :

Avant de réaliser un usinage sur une machine-outil, on doit assurer la mise en position des surfaces de référence d'appui de la pièce par rapport au référentiel machine. Cette mise en position est réalisée par l'intermédiaire de porte-pièces qui peuvent être standards ou spéciaux.

Lors de la mise en position d'une pièce il faut distinguer les appuis qui permettent de garantir les dimensions et les positions relatives des surfaces usinées par rapport aux surfaces d'appui et les appuis qui permettront la localisation de l'usinage sur la machine.

Selon les usinages à réaliser, les degrés de liberté à supprimer sont variables mais ne peuvent en aucun cas excéder six.

L'étude du repérage isostatique d'une pièce a pour avantage de définir une installation qui garantit une position unique pour toutes les pièces d'une même série et d'éliminer toute installation archaïque ou branlante nuisible à la précision de l'usinage.

Selon les solutions technologiques retenues pour assurer les liaisons de la pièce avec le porte-pièce, la mise en position est isostatique ou hyperstatique.

Le choix du porte-pièce dépend de nombreux paramètres, en particulier de la qualité des surfaces d'appui de la pièce et des spécifications de positions relatives entre les surfaces de référence d'appui et les surfaces usinées.

Les symboles de mise en position des pièces sont normalisés, ce sont les symboles de repérages géométriques et les symboles technologiques. [1]

## **Chapitre II**

### **Problématique, objectifs et méthodologie**

## II-1 Généralités :

La conception des montages d'usinage implique plusieurs méthodes et domaines. Beaucoup de méthodologies ont été développées pour la conception et pour la détermination des configurations optimales de montages d'usinage. Cependant, il manque une directive, qui peut aider l'utilisateur à choisir la méthode appropriée avec des outils correspondants pour résoudre divers problèmes à différentes phases de conception.

La plupart de ces travaux s'intéressent à des familles de pièces bien définies comme les pièces prismatiques ou cylindriques et peu de travaux s'intéressent aux pièces de formes arbitraires ou de formes complexes. Beaucoup d'entre eux traitent une partie des problèmes locaux rencontrés dans la conception des montages d'usinage comme les problèmes de contact, les problèmes de serrage optimal, les problèmes de stabilité, les problèmes de qualité ..., etc. Et peu de travaux prennent la conception du montage d'usinage dans sa globalité.

Depuis quelques années, la littérature propose de nombreuses études sur la conception du montage d'usinage. On trouve plus particulièrement des études sur :

- La modélisation des connaissances pour l'aide à la conception des montages d'usinage à l'aide d'une base de règles,
- La conception automatique des montages d'usinage pour les pièces prismatiques,
- La conception de montage d'usinage assisté par ordinateur,
- Les problèmes de serrage des pièces dans le montage d'usinage,
- Comportement dynamique des montages d'usinage,
- Les déformations de la pièce ou du montage d'usinage,
- La sélection automatique des surfaces de serrage,
- L'analyse de l'erreur de positionnement,
- L'analyse de la stabilité,
- L'analyse de la tolérance des entités d'usinage,
- L'accessibilité des surfaces de prise de pièce,
- La performance des montages d'usinage,
- La planification de posage,
- La vérification de l'interférence entre l'outil et le montage d'usinage,
- Le frottement aux points de contact montage-pièce,
- Vérification ou validation de la solution du montage d'usinage. [4]

### II -2 Problématique :

Un problème de conception dans le cas général peut toujours être défini comme un problème d'optimisation qui englobe trois éléments : les variables de conception, les contraintes de conception et les objectifs de conception. Pour la conception du montage d'usinage la recherche de la solution optimale globale est difficile à obtenir mais l'optimisation des différents paramètres comme les forces de serrage optimales, le placement des points d'appui optimal reste possible. D'une façon générale on cherche une solution pertinente.

Après le choix des éléments technologiques, il faut les placer. Ce placement est optimisé de manière à répondre aux contraintes de stabilité, de qualité et d'accessibilité. Il est très difficile de répondre à toutes ces contraintes en même temps mais la recherche d'un compromis est possible. L'appui prépondérant assure la stabilité de la pièce. Le placement des éléments sur cet appui doit répondre à la contrainte de stabilité.

### II-3 Objectif et méthodologie :

Notre étude vise à traiter le problème d'isostatisme et d'optimisation des éléments d'appuis durant la phase de conception d'un montage d'usinage pour les pièces dans sa globalité en se basant sur l'une des méthodes d'optimisation qui est l'algorithme génétique. Il s'agit donc de trouver une solution optimale du placement des appuis afin de minimiser les erreurs de montage et de maintien.

Lors de notre étude on a fait appel à des logiciels de conception à savoir Solidworks et de calcul en utilisant Matlab.

Notre étude (simulation) est appliquée aux pièces prismatiques, cylindriques et aux pièces complexes (à surfaces gauches).

#### II-3-1 Utilisation des algorithmes génétiques :

Le choix des algorithmes génétiques est basé sur des recherches faites est des résultats obtenus qui justifient notre choix. Les méthodes stochastiques comme les algorithmes génétiques et les réseaux de neurone ont fourni une alternative viable. Wu et Chan [5] ont appliqué les algorithmes génétiques pour l'optimisation de la conception du montage d'usinage. L'objectif général du système de vérification a été élaboré pour vérifier la validité des différentes configurations du montage d'usinage en analysant différents types de contact du système pièce-montage. Dans cette approche d'optimisation, l'évaluation globale des configurations candidates repose sur l'appréciation des individus. Les résultats préliminaires de la mise en œuvre des algorithmes génétiques ont démontré leur robustesse et leur efficacité dans plusieurs travaux de recherche. Différents paramètres de contrôle sont testés et différents schémas de codage sont introduits. Les algorithmes génétiques ont été utilisés par Val [6],

Chouby [7] et Krishnakumar [8] pour optimiser l'emplacement des éléments du montage d'usinage. Pour Val la méthode intègre un nombre important de concepts tels que l'encodage, l'augmentation de la mutation qui est le changement des valeurs des paramètres aléatoirement choisis avec une probabilité très basse, et le partage qui est une technique employée pour imposer la diversité dans la population. C'est-à-dire il aide le procédé à chercher plusieurs solutions optimales globales proches et empêche la convergence aux optimums locaux. Chouby [7] considère la fonction objective avec le problème d'équilibre sous l'influence des forces extérieures tandis que Krishnakumar [8] s'est intéressé au problème de déformation. Kaya [9] applique les algorithmes génétiques pour minimiser les erreurs de positionnement par l'optimisation de placement des points d'appuis et de bridage grâce à l'intégration d'un code d'éléments finis pour calculer les valeurs de la fonction objectif (figure II-2). Cette approche est particulièrement adaptée pour les problèmes où il n'existe pas une relation mathématique bien définie entre la fonction objective et les variables de conception. [4]

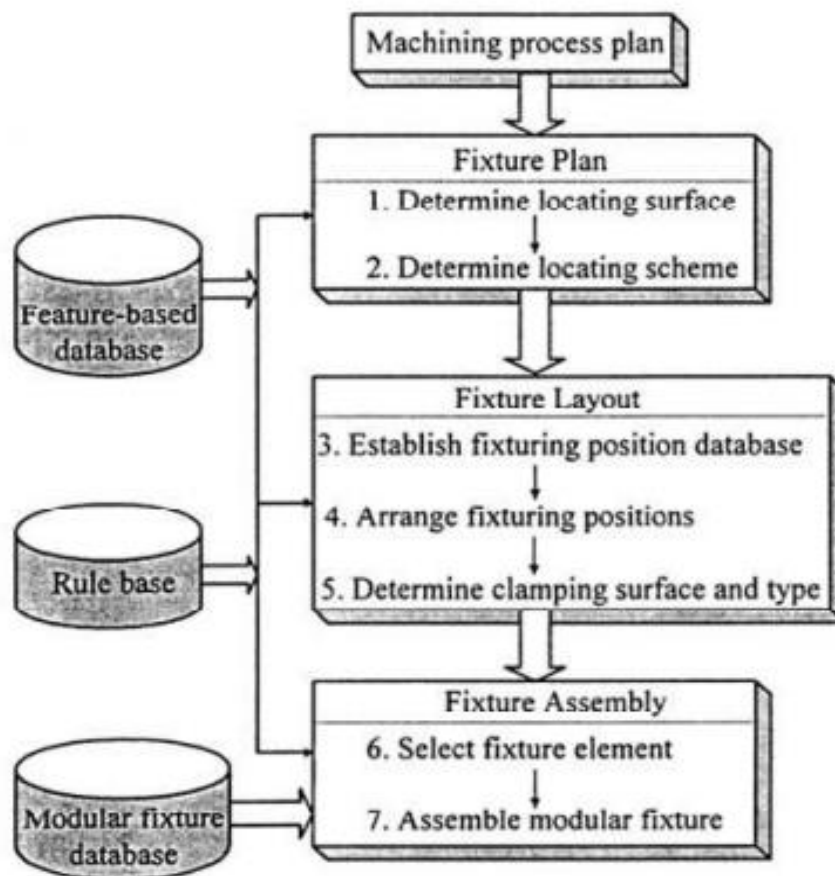


Figure II-1 (Exemple d'un système de conception de montage [4])

**II-4 Analyse pour la conception du montage d'usinage [4]**

Les modèles d'analyse suivants sont employés pour vérifier si une configuration de montage répond aux contraintes de conception du montage d'usinage.

**II-4-1 Analyse cinématique**

L'analyse cinématique permet de s'assurer que les composants du montage n'obstruent pas le chemin d'outil au cours de l'usinage et que les entités d'usinage sont accessibles. Elle permet aussi de s'assurer que les composantes du montage ne rentrent pas en collision entre elles et accèdent facilement aux surfaces d'appui et de bridage.

**II-4-2 Analyse de forces**

L'analyse de forces est utilisée pour vérifier que les forces appliquées par les systèmes de bridage sont suffisantes pour maintenir l'équilibre statique et dynamique en présence des forces de coupe.

**II-4-3 Analyse de déformations :**

C'est l'étape qui comporte le plus de calculs. Le souci est qu'une pièce peut se déformer élastiquement et/ou plastiquement sous l'influence des forces de coupe et de bridage de sorte que les tolérances désirées ne sont plus respectées. La déformation est un souci particulier surtout avec les pièces à paroi mince et les pièces où il faut enlever beaucoup de matière.

**II -5 Facteurs influent sur le montage d'usinage :**

La conception du montage d'usinage est effectuée lors de l'étude de la sous-phase. Elle nécessite le calcul de l'équilibre de la pièce pendant l'usinage pour garantir la stabilité et évaluer les réactions des points d'appui ce qui nécessite la connaissance des efforts de coupe. À partir de ce moment les efforts de bridage sont évalués. Les déformations subies par la pièce à travers le dispositif de bridage et l'outil de coupe doivent rester compatibles avec la qualité des entités d'usinage. Le respect des trajectoires d'outil est plus que nécessaire pour assurer l'accessibilité des outils de coupe pour toutes les opérations planifiées pour la réalisation des entités d'usinage. La sous-phase n'est validée qu'après la garantie de la stabilité de la pièce durant tout le processus d'usinage, la garantie de la qualité après usinage et démontage de la pièce, la vérification du respect du non violation des espaces de travail réservés aux outils de coupe et de la compatibilité des efforts de coupe au système pièce-montage d'usinage.

Le montage d'usinage doit être conçu compact avec une structure la plus rigide possible.[4]

## **II -6 Le lien entre le choix de l'outil et le montage d'usinage :**

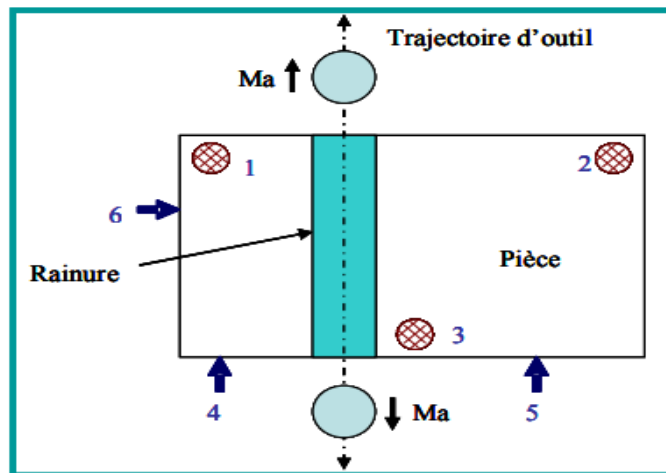
Le choix de l'outil de coupe engendre une équivalence en effort de coupe qui influe sur l'équilibre et la stabilité de la pièce sur le montage d'usinage. Les efforts de coupe excessifs peuvent engendrer une instabilité et des déformations non désirables de la pièce. Un choix mal fait de l'outil de coupe du point de vue géométrie et dimension peut provoquer des collisions outil-montage d'usinage. [4]

## **II-7 Le lien entre l'ordonnancement et la conception du montage d'usinage**

L'ordonnancement des opérations d'usinage est le passage d'une opération à une autre. Une fois la condition «les entités d'usinage sont accessibles » est vérifiées, le passage d'une opération d'usinage à une autre dans n'importe quel ordre peut être effectué sans problème. Il suffit de réserver l'espace de travail des outils de coupe et de garantir l'accessibilité de ces outils aux entités d'usinage pour pouvoir exécuter les opérations d'usinage dans l'ordre qui respecte les contraintes d'ordonnancement. [4]

## **II-8 Le lien entre la conception du montage d'usinage et la trajectoire d'outil**

Le dispositif de bridage se situe en général dans l'espace de travail des outils de coupe ce qui augmente les risques de collision entre les outils et les brides constituant le système de bridage. Ceci contraint fortement les trajectoires d'outil du fait que les outils peuvent être amenés à contourner les brides pour se déplacer d'un usinage à un autre. Le dispositif de bridage contraint la trajectoire d'outil et même peut la rendre impossible. Les trajectoires d'outil influent aussi sur le comportement mécanique du système pièce-montage d'usinage par l'intensité, la direction et le sens des efforts qu'elle engendre (Figure II-2).



**Figure II-2** (Le sens des efforts de coupe peut influencer sur la stabilité de la pièce) [4]

Les efforts de coupe peuvent soit plaquer la pièce sur ses appuis ou l'arracher de ces derniers selon le sens du mouvement de l'outil. La conception du montage d'usinage doit coopérer avec les trajectoires d'outil pour s'affranchir d'une solution.

## **Chapitre III**

### **Méthodes d'optimisation**

### III-1 Etat de l'art sur les méthodes d'optimisation : théorie et aspects mathématiques

Le développement et la performance des industries de nos jours ne se résument plus seulement à l'organisation, la production et aux processus de fabrication. Une voie prometteuse n'est pas entièrement explorée, celle de l'optimisation. Un domaine, d'un point de vue mathématique, est considérablement développé grâce au développement de la puissance des calculateurs. Ces progrès ont permis de résoudre des problèmes de grandes dimensions, dans plusieurs disciplines insolubles auparavant. Différentes méthodes ont été développées. Il y a une riche littérature qui traite ces méthodes. Nous essayons de cerner, brièvement, les divers types et méthodes traitées dans la littérature. [10]

#### III-1-1 Généralités

Un algorithme d'optimisation est une procédure mathématique qui permet d'obtenir les minimums (ou maximums)<sup>1</sup> d'une fonction réelle  $f$  (que l'on appelle fonction objectif). [11]

D'une manière générale, un problème d'optimisation peut s'écrire de la façon suivante (Eq.III-1)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Minimiser } f(x) & X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (\text{eq.III.1}) \\ \text{Sous les contraintes} & g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & h_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, \\ & X \in C \subset \mathbb{R}^n \end{array} \right.$$

Où  $f$  est la fonction objectif à minimiser, appelée aussi fonction coût,

$X$  représente le vecteur des variables d'optimisation appelée aussi variables de conception ou encore variables de décision,  $g_i$  représente l'ensemble des contraintes d'inégalité,  $h_j$  l'ensemble des contraintes d'égalité et  $C$  définit l'espace de définition des variables appelé aussi l'espace de recherche.

Selon le minimum trouvé, les méthodes peuvent être classées dans deux types : méthodes d'optimisation locales et méthodes d'optimisation globales. En se basant sur ce principe, une méthode d'optimisation locale est un algorithme qui converge vers un minimum local.

Plusieurs méthodes d'optimisation locales existent en littérature, les plus fameuses sont les méthodes de descente où l'optimum est atteint par une direction de descente déduite des dérivées de la fonction.

---

<sup>1</sup> Maximiser une fonction  $f(x) = \text{Minimiser} - f(x)$ .

Au contraire, les méthodes globales ont une vision plus globale basée sur l'exploration et l'exploitation du domaine de recherche dans le but d'atteindre des optimums globaux.

La différence entre les diverses méthodes d'optimisation en général se fait par le biais du nombre d'évaluations de la fonction objectif. Pour l'optimisation de problèmes industriels, le nombre d'évaluations de la fonction coût est un facteur déterminant vu le temps de calcul important des simulations numériques.

Mais le choix de la méthode convenable à utiliser et le réglage de ses paramètres dépendent du problème à optimiser. Les méthodes d'optimisation ne se classifient pas seulement selon la nature de l'optimum, local ou global, mais plusieurs facteurs déterminent ses caractéristiques, comme [10]:

#### **III-1-1-1 Sensibilité et robustesse de la méthode**

Des paramètres de contrôles et des conditions initiales sont spécifiques à chaque méthode d'optimisation. Les algorithmes d'optimisation sont sensibles aux valeurs initiales des variables de conception et celles des paramètres de contrôle. L'efficacité de ces méthodes donc, se traduit par leur sensibilité ou robustesse par rapport aux paramètres de contrôle et aux conditions initiales. On dit qu'une méthode est robuste si pour les mêmes paramètres de contrôle et les mêmes conditions initiales, elle est capable de trouver l'optimum.

#### **III-1-1-2 Les opérateurs de recherche**

La recherche de l'optimum d'une fonction est généralement réalisée à l'aide de deux opérateurs fondamentaux : l'exploration et l'exploitation. L'exploration nous permet une localisation imprécise de l'optimum global alors que l'exploitation affine cette solution en augmentant la précision de l'optimum. Le succès et l'efficacité d'une technique de résolution dépendent la plupart du temps d'un compromis entre l'exploration et l'exploitation. Ainsi, la majorité des méthodes d'optimisation exploitent les dérivées de la fonction objectif et les contraintes pour atteindre rapidement et précisément l'optimum local le plus proche du point de départ. Tout algorithme d'optimisation doit utiliser ces deux stratégies pour trouver l'optimum global : l'exploration pour la recherche de régions inexplorées de l'espace de recherche, et l'exploitation pour exploiter la connaissance acquise aux points déjà visités et ainsi trouver des points meilleurs. Ces deux exigences peuvent paraître contradictoires mais un bon algorithme de recherche doit trouver le bon compromis entre les deux. [10]

#### **III-1-1-3 Les modes de recherche**

Lorsque la méthode de résolution ne contient aucun aspect probabiliste, celle-ci est qualifiée de méthode déterministe. En revanche les méthodes dites stochastiques s'appuient sur

des mécanismes de transition probabiliste qui peuvent conduire à des résultats différents pour des conditions initiales et des paramètres de contrôle identiques.

#### **III-1-1-4 Ordre d'une méthode d'optimisation**

Les méthodes de résolution peuvent être classées à partir de leur ordre ; selon qu'elles nécessitent ou non le calcul des dérivées de la fonction objectif et des fonctions contraintes par rapport aux paramètres. Une méthode est dite d'ordre zéro si elle utilise uniquement la connaissance de la fonction elle-même. Par ailleurs, une méthode est d'ordre un si elle requiert le calcul des dérivées premières et elle est d'ordre deux si elle nécessite le calcul des dérivées secondes. Les méthodes d'ordre zéro sont en général peu précises et convergent plus lentement vers l'optimum. En revanche, elles offrent l'avantage d'éviter le calcul du gradient, ce qui est intéressant lorsque la fonction n'est pas différentielle ou que le calcul de son gradient représente un coût important. Les méthodes d'ordre un permettent d'accélérer la localisation de l'optimum, puisque le gradient donne l'information sur la direction de l'amélioration.

Les méthodes d'optimisation peuvent être aussi classées selon qu'elles sont sous des contraintes ou sans contrainte [10].

#### **III-1-2 Méthodes d'optimisation avec contraintes :**

Un problème d'optimisation est dit problème avec contraintes s'il contient au moins une fonction contrainte de types contraintes d'égalité,  $h_j(X) = 0$ , ou de type contraintes d'inégalité,  $g_i(X) \leq 0$ .

L'existence de fonctions contraintes dans un problème d'optimisation demande une prise en considération de celles-ci dans la résolution du problème, car une solution qui minimise la fonction objectif ne sera valable que dans le cas où elle respecte aussi les contraintes existantes.

Il y a plusieurs méthodes d'optimisation pour le traitement des problèmes avec contraintes. Cependant, pour des raisons de robustesse et de facilité de mise en œuvre, on peut transformer un problème d'optimisation avec contraintes en une suite de problèmes sans contraintes. Cette transformation peut être effectuée en ajoutant des pénalités à la fonction objectif.

##### **III-1-2 1 Méthodes de pénalité :**

Le concept de base est de transformer la résolution du problème sous contraintes en une suite de problèmes sans contraintes en associant à la fonction objectif une pénalité dès qu'une contrainte est violée.

La fonction de pénalité est choisie de telle façon que les contraintes seront garanties dans tous les processus de recherche de l'optimum. Cette caractéristique est très importante pour éviter un arrêt prématuré de l'algorithme d'optimisation.

On distingue la méthode des pénalités intérieures et la méthode des pénalités extérieures.

### III-2 Optimisation mono-objective

On peut résumer les méthodes d'optimisation par l'organigramme présenté dans la figure (III-1)

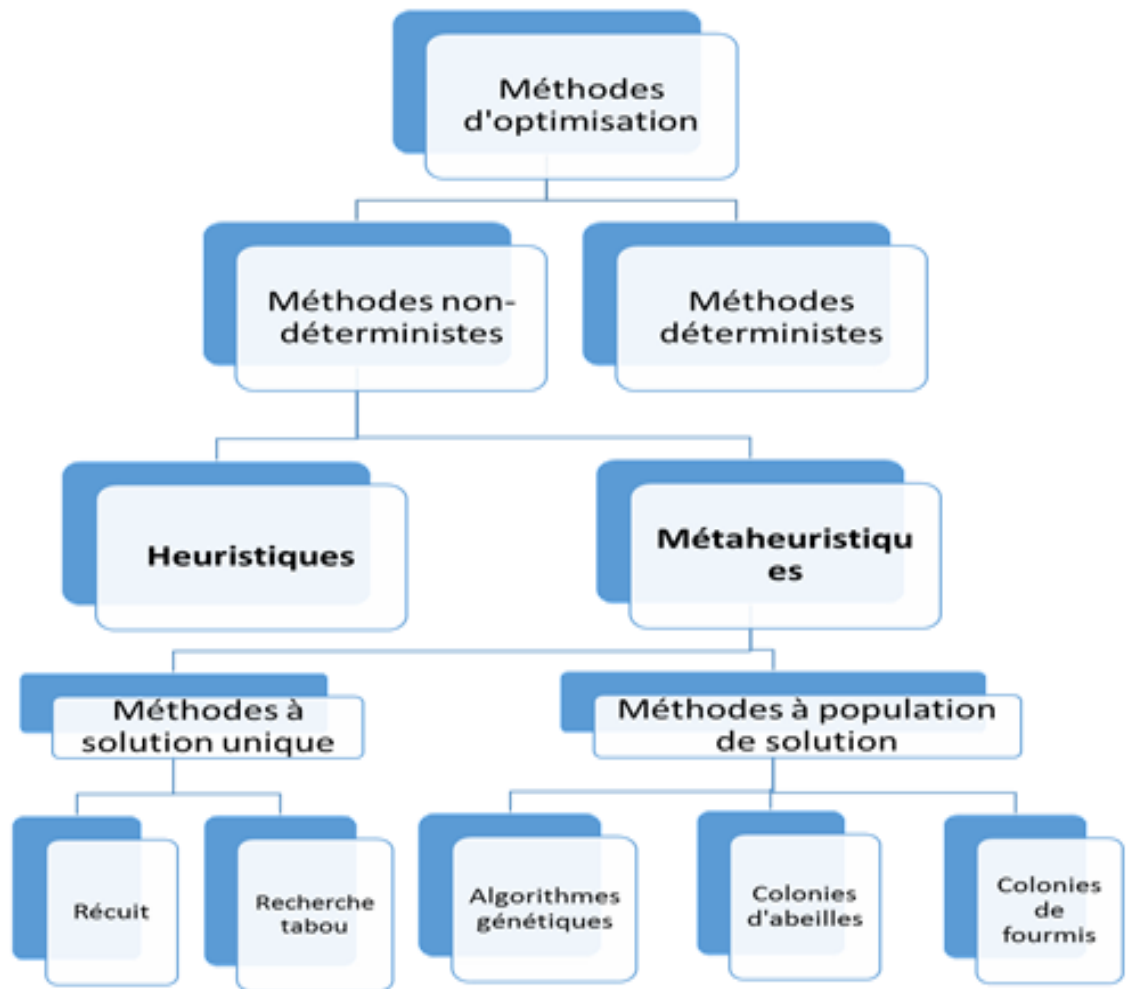


Figure (III-1) Classification des méthodes d'optimisation

#### III-2-1 Méthodes déterministes

Les méthodes déterministes sont des méthodes basées sur des recherches dites locales afin de trouver une solution qui possède des propriétés locales. Le principe de ces méthodes est de partir d'une solution initiale et de déterminer un chemin de descente vers le minimum le plus proche. La solution obtenue dépend donc de la solution initiale. [10]

### III-2-1-1 Méthodes de gradient

La méthode de descente de gradient est la méthode la plus ancienne parmi les méthodes d'optimisation locale. Cette méthode suppose que nous avons accès aux dérivées partielles de la fonction objectif, ce qui n'est pas le cas en général, pour les problèmes d'optimisation difficile. Le gradient indique la direction de la plus grande augmentation de la fonction  $f$ ; on se déplace dans le sens opposé (s'il s'agit de minimiser la fonction objectif).

L'inconvénient majeur de ces méthodes est la convergence ralentie pour certains types de fonctions.

### III-2-1-2 Méthode de descente quasi-Newton

Les algorithmes de type quasi-Newton construisent itérativement une approximation de la matrice Hessienne, en utilisant seulement l'évolution des gradients et en supposant que la fonction peut être approchée localement par un développement limité quadratique autour de l'optimum.

### III-2-1-3 Limitations des méthodes déterministes

Les méthodes déterministes en optimisation ont été appliquées dans plusieurs domaines et elles ont connu un succès pendant de nombreuses années. Elles ont leurs avantages qui se résument en quelques points : preuve de convergence, faible nombre d'évaluations de la fonction objectif nécessaire à l'optimisation, prise en compte de contraintes complexes.

L'inconvénient majeur des méthodes déterministes est leur blocage au niveau du premier minimum local trouvé. Ce qui a laissé la place à une autre catégorie de méthodes écartant l'utilisation ou l'évaluation du gradient de la fonction objectif. Il s'agit des méthodes stochastiques qui sont des méthodes d'optimisation globale appelées aussi des heuristiques.

### III-2-2 Méthodes stochastiques :

Les méthodes d'optimisation globale, qui sont en général les méthodes stochastiques, échantillonnent l'espace de recherche dans sa globalité. Contrairement aux méthodes locales, ces méthodes ont pour objectif de trouver l'optimum global de la fonction objectif dans un espace borné au préalable. Différentes classifications des méthodes globales sont abondantes dans la littérature. [10]

#### III-2-2- 1 Recherche Tabou :

La méthode de recherche Tabou est une métaheuristique originalement développée par Glover en 1986 [12] spécifiquement pour des problèmes d'optimisation combinatoire et qui permet de trouver d'une manière flexible un compromis entre la qualité de la solution et le temps de calcul. Le principe de cette méthode est d'ajouter au processus de recherche une

mémoire flexible qui permet de mener une recherche plus "intelligente" dans l'espace des solutions.

La méthode de recherche Tabou fonctionne avec une seule configuration courante, qui est actualisée au cours des itérations successives. La nouveauté ici est que, pour éviter le risque de retour à une configuration déjà visitée, on tient à jour une liste de mouvements interdits, appelée liste tabou.

Dans la recherche tabou avec des variables continues, deux concepts sont mis en jeu : le voisinage d'un point donné et un mouvement aléatoire dans le voisinage.

L'algorithme a besoin d'une mémoire qui conserve la trace des solutions visitées pendant un moment donné. Ces solutions sont déclarées taboues, d'où le nom de la méthode. Elles sont stockées dans une liste de longueur  $L$  fixe appelée liste taboue. Une nouvelle solution n'est acceptée que si elle n'appartient pas à la liste taboue. Le retour vers des solutions déjà explorées dépend donc de la longueur de liste taboue. Elle sera d'autant plus difficile que cette dernière est longue. En conséquence, la recherche sera dirigée vers des régions non explorées.

#### **III-2-2-2 Méthodes évolutionnaires :**

Les méthodes évolutionnaires sont des méthodes d'optimisation probabilistes qui sont souvent présentées par analogie avec la théorie de la sélection naturelle de Darwin. Les individus les plus performants d'une population ont une plus grande probabilité de survivre et de se reproduire, en donnant des descendants encore mieux adaptés. La correspondance avec la minimisation d'une fonction est la suivante : un "individu" est un point  $X$ , la "population" est un ensemble de points et "la performance d'un individu"  $X$  est évaluée par sa valeur de la fonction objectif  $f(X)$ .

En partant d'un échantillonnage de l'espace de recherche (une population initiale), ces méthodes effectuent des tirages de nouvelles populations (générations) à l'aide d'opérations de sélection, de croisement et de mutation. Les différents algorithmes évolutionnaires se distinguent par la mise en œuvre de ces opérations. Historiquement, ils ont été développés indépendamment en trois variantes : algorithmes génétiques, stratégies d'évolution et programmation évolutive. [10]

#### **III-2-2-3 Méthodes de regroupement (clustering) :**

Les méthodes de regroupement consistent à estimer la position de l'optimum global parmi plusieurs optima locaux [13]. Ces méthodes nécessitent plusieurs étapes. Premièrement, l'espace de recherche doit être échantillonné. Ensuite, au moyen d'analyse de proximité (clustering techniques), les points sont regroupés par régions prometteuses. Finalement des recherches locales sont exécutées et celles qui convergent vers des régions déjà explorées sont

abandonnées. Les analyses de proximité divisent l'espace de recherche en régions, et elles utilisent les valeurs de la fonction ou de la matrice Hessienne des points échantillonnés. Un inconvénient de ces méthodes est qu'elles sont peu performantes pour les fonctions ayant de nombreux optima. Dans ces cas, en effet, un grand nombre d'échantillons est nécessaire.

#### **III-2-2-4 Méthodes de descentes généralisées :**

Pour ces méthodes, on utilise un algorithme d'optimisation local d'une façon itérative. En effet, la direction de descente est modifiée de manière à éviter la convergence vers un optimum local déjà trouvé. Une façon de réaliser ceci est de pénaliser la fonction  $f$  au fur et à mesure qu'on s'approche d'un optimum local déjà trouvé.

### **III-3 Optimisation multi-objective :**

Depuis une trentaine d'années, l'optimisation multi-objectif, appelée aussi multicritère, connaît une évolution remarquable qui s'est traduite par l'apparition et le développement d'un grand nombre de méthodes. Cette multitude de méthodes est considérée comme une richesse partiellement exploitable par les différents secteurs d'industrie (Automobile, aéronautique, énergie, télécommunications, transport ...).

L'optimisation multi-objectif consiste donc à optimiser simultanément plusieurs fonctions avec les mêmes variables d'optimisation. La notion de solution optimale unique dans l'optimisation mono-objective disparaît pour les problèmes d'optimisation multi-objective au profit de la notion de compromis entre les objectifs sous forme d'ensemble de solutions nommées Pareto optimales.

L'optimisation multi-objectif est née du besoin en industrie de satisfaire plusieurs critères contradictoires, simultanément. Les bases de cette optimisation ont été posées par Pareto et Edgeworth au 19<sup>ème</sup> siècle.

Les approches de résolution des problèmes multi-objectif peuvent être réparties en trois classes : approches basées sur la transformation du problème multi-objectif en un problème mono-objectif, approches non-Pareto et approches Pareto. [10]

#### **III-3-1 Transformation en un problème mono-objectif :**

Cette approche de l'optimisation multi-objectif (MO), consiste tout simplement à transformer un problème multi-objectif en un problème mono-objectif, qu'on peut résoudre par de nombreuses méthodes d'optimisation présentées auparavant. Parmi les méthodes qui utilisent cette approche, nous pouvons citer les méthodes d'agrégation, les méthodes  $\varepsilon$ -contraintes, les méthodes de programmation par but et min-max.

### III-3-2 Approche Non-Pareto :

Cette approche est appelée aussi approche non agrégée. Généralement, les méthodes basées sur cette approche traitent les objectifs séparément et elles sont sensibles au paysage du front de Pareto (convexité, continuité,). Deux groupes de méthodes existent dans la littérature : sélection lexicographique et sélection parallèle. Dans l'approche classique de la sélection lexicographique.

### III-3-3 Approches Pareto :

Contrairement aux autres approches qui combinent les critères ou les traitent séparément, les approches Pareto utilisent la notion de dominance, pour sélectionner des solutions faisant converger la population vers un ensemble de solutions efficaces. Cette idée, basée sur les algorithmes génétiques, a été proposée par Goldberg.

Cette approche respecte l'intégrité de chaque critère, car les valeurs des différents critères ne sont pas comparées a priori. Ces méthodes permettent d'avoir un ensemble de solutions possibles (solutions Pareto) au problème, mais ne permettent pas de choisir une alternative plutôt qu'une autre. Le choix de la solution finale revient à l'utilisateur (décideur).[10]

## III-4 Optimisation par l'application de la méthode des algorithmes génétiques

Ces algorithmes sont basés sur l'idée d'adaptation d'une population à son environnement. On utilise l'analogie :

- Un point de l'espace de conception : un individu
- Un ensemble de points : Une population, ou une génération
- Une fonction objectif : Adaptation au milieu

Ces méthodes ont pour principe de faire évoluer une population par trois opérateurs :

- Sélection,
- Croisement,
- Mutation.

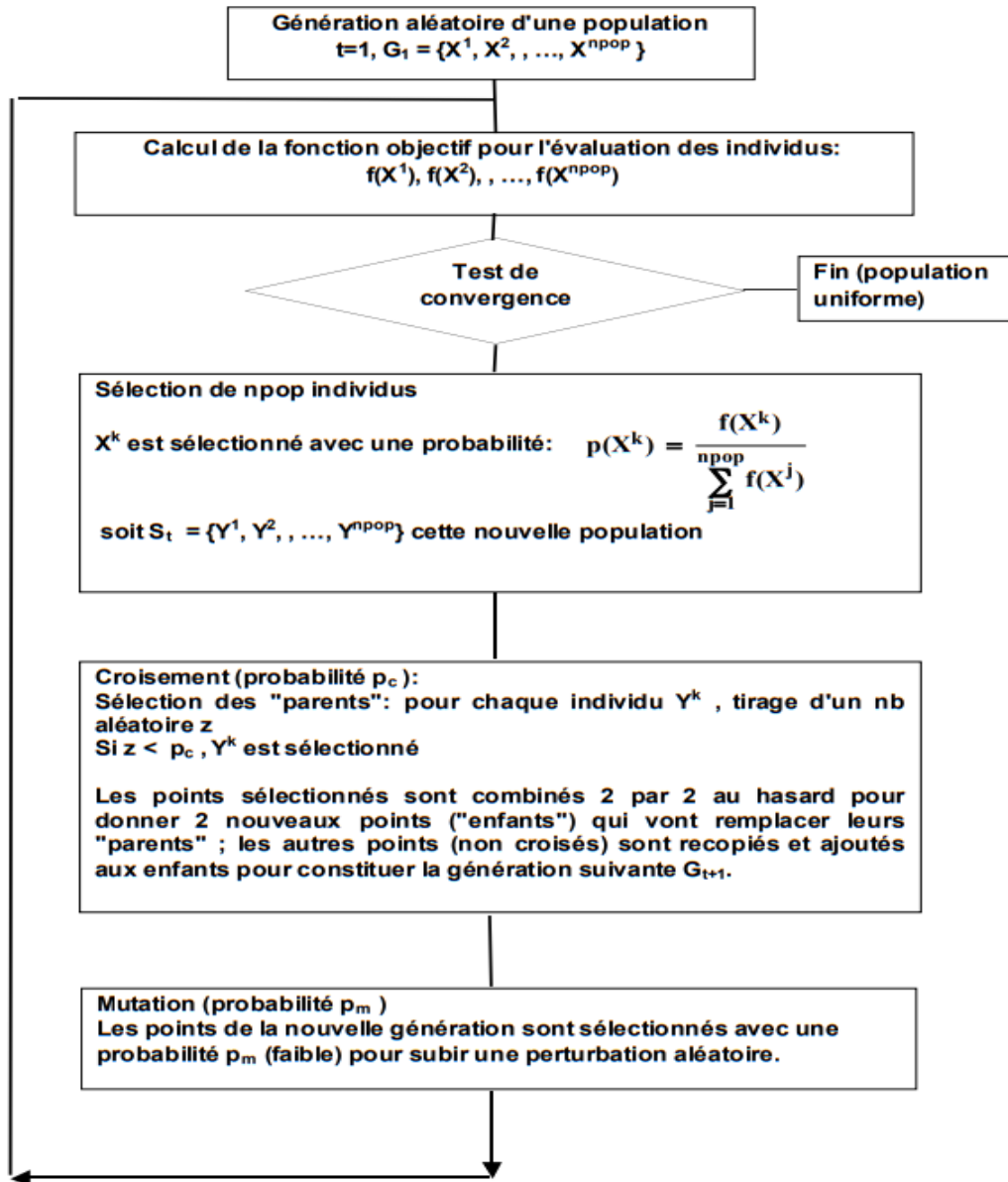


Figure (III-2) Organigramme d'un algorithme génétique type

De manière à générer une nouvelle population mieux adaptée (dont les individus ont de meilleures valeurs de la fonction objectif), ceci jusqu'à convergence des individus vers le ou les optimum(s).

Pour faciliter l'analogie avec la notion d'adaptation, on présente généralement ces algorithmes en supposant que la fonction objectif doit être maximisée et non minimisée ; il faut également qu'elle ne prenne que des valeurs positives (pour les calculs de probabilité de sélection). On peut toujours se ramener à ce cas en prenant

$$f(x) = A - f(x) \text{ avec } A = \text{constante} > 0.$$

Un algorithme type peut être représenté comme suit (figure III-2).

### III-4-1 Caractéristiques générales des méthodes d'optimisation par algorithme génétique :

Les caractéristiques générales de ces méthodes sont les suivantes :

- Elles ne nécessitent que le calcul de la fonction objectif, et peuvent s'appliquer dans un cadre très général : pour des fonctions et/ou limitations non convexes, non dérivables, non continues, des variables discrètes ou continues (la prise en compte des limitations se fait la plupart du temps par une pénalisation).
- Leur convergence est généralement très lente (mais améliorations possibles par hybridation avec d'autres approches, nombreux travaux en cours)
- Il faut réaliser un compromis entre « exploration » (pour atteindre l'optimum global) et « exploitation » (pour converger).
- Elles sont facilement parallélisables (calcul simultané d'une population).
- Elles peuvent trouver le minimum ou le maximum global, ou plusieurs optima locaux.

### III-4-2 Les opérateurs classiques des algorithmes génétiques

Quelques opérateurs classiques sont décrits ci-dessous :

#### III-4-2-1 Sélection :

C'est l'opérateur qui favorise l' « exploitation ». Les probabilités de sélection des points sont d'abord calculées, à partir des fonctions d'évaluation (coût).

$$p(X^k) = \frac{f(X^k)}{\sum_{j=1}^{n_{pop}} f(X^j)}$$

Ensuite on procède comme suit :

- au 1<sup>er</sup> point (quelconque) on associe l'intervalle  $[0, p(X^1)]$ ,
- au suivant, l'intervalle  $[p(X^1), p(X^2)]$ ,
- et ainsi de suite ; l'intervalle  $[0, 1]$  est ainsi divisé en segments  $S^k$  de longueur  $p(X^k)$  ;

$S^k$  est attribué au point  $X^k$ .

Et pour sélectionner  $m$  points, on effectue  $m$  fois :

- génération d'un nombre aléatoire  $z$  dans l'intervalle  $[0, 1]$
- sélection du point  $X^k$  tel que  $z \in S^k$

Certains points pourront ainsi être sélectionnés plusieurs fois, avec une probabilité dépendant de leur fonction objectif, et d'autres éliminés. Dans une utilisation classique, il est indispensable de vérifier que le meilleur point de chaque génération a été sélectionné. Dans des

stratégies permettant de trouver plusieurs optima, il peut être utile de ne pas sélectionner trop de points proches les uns des autres.

*Variantes :*

- *sélection par le rang* : les points sont classés par ordre de leurs fonctions d'évaluation et  $p(X)$  est calculée en fonction des rangs et non des valeurs de  $f$ ,

- *sélection par tournoi* : les points sont comparés par sous-ensembles, le meilleur de chaque sous-ensemble est sélectionné.

### III-4-2-2 Croisement

Le but de cet opérateur est l'exploration : créer de nouveaux points à partir des points sélectionnés, qui seront si possible mieux « adaptés » que leurs parents, c'est-à-dire qui auront une meilleure fonction objectif.

*Croisement réel barycentrique* : Soient  $X^1$  et  $X^2$  deux points à croiser ; on génère 2 points sur la droite  $X^1 X^2$  :

$$Z' = a X^1 + (1 - a) X^2$$

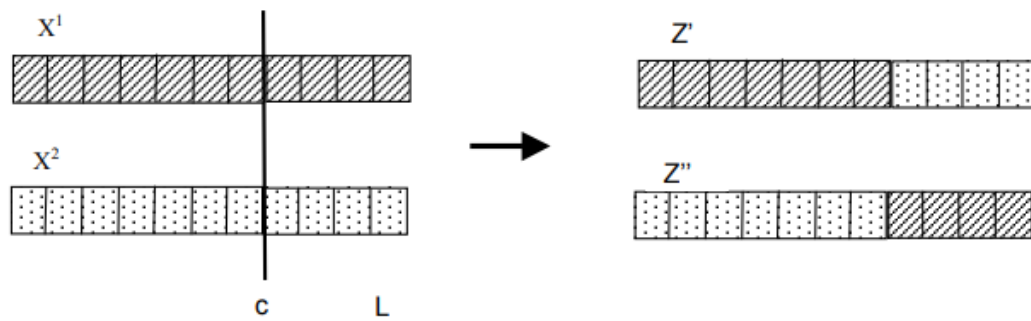
et  $Z'' = (1 - a) X^1 + a X^2$  où  $a$  est un nombre aléatoire

- compris entre 0 et 1 si on veut rester sur le segment  $X^1 X^2$   
 - compris entre  $-d$  et  $1 + d$  (par ex.  $[-0.5, 1.5]$ ) si on veut faciliter l'exploration du domaine.

*Croisement binaire* : Les premières versions des algorithmes génétiques utilisaient une représentation binaire des variables, même si leurs valeurs pouvaient être continues dans le problème posé. Les intervalles de variation de chaque variable étaient discrétisés, permettant le codage des variables par une chaîne binaire (de longueur liée au nombre de valeurs possibles) appelée « chromosome » pour continuer l'analogie avec la biologie. Si cette phase de codage n'est plus utile pour des variables réelles, elle est conservée pour les variables discrètes : tout point peut être représenté par une liste de valeurs entières (par exemple des indices de valeurs des variables), qui peut être mise aussi sous forme binaire. Tout point est donc assimilé à une chaîne de « 0 » et de « 1 » de longueur  $L$ . Le croisement de 2 points consiste à leur faire échanger des parties de leurs « chromosomes » respectifs, coupés au hasard :

**Exemple de croisement à 1 point :**

Une valeur entière  $c$  comprise entre 1 et  $L$  est choisie aléatoirement. Les deux points  $X^1$  et  $X^2$  donnent les 2 « enfants »  $Z'$  et  $Z''$  :



Dans ce cas, une variable au plus est modifiée entre les parents et les enfants. Variantes : croisement à 2 points, croisement uniforme (sur chaque variable).

**III-4-2-3 Mutation**

Elle est appliquée à un faible pourcentage des points, choisis aléatoirement. Son rôle est d'augmenter la diversité de la population.

*Mutation réelle* : une perturbation gaussienne est ajoutée à X :

$$X \rightarrow X + N(0, \sigma)$$

L'écart-type  $\sigma$  peut être variable au cours des itérations (décroissant pour exploiter plus, croissant pour explorer plus).

*Mutation binaire* : transformation d'un 0 en 1 ou inversement, à un emplacement choisi aléatoirement entre 0 et L.

**III-4-3 Test de convergence**

Il est prudent d'avoir un test sur le nombre maximum de calculs de la fonction objectif. Mais on arrête généralement les itérations lorsqu'il n'y a plus d'amélioration de la fonction objectif depuis plusieurs générations successives ; tous les points de la population ont alors convergé vers la même solution (perte de la diversité, il ne resterait plus que la mutation pour évoluer). La convergence d'un algorithme génétique se représente souvent par le tracé des 2 courbes : meilleur  $f$  et  $f_{moyen}$  au cours des générations.

**NB**: à cause du caractère stochastique de la méthode, le résultat d'une seule exécution n'est pas significatif (la solution pourrait se trouver dans la première génération) : il faut toujours présenter des moyennes de plusieurs « runs ».[14]

**III-5 Optimisation avec Matlab :**

Dans ce chapitre nous avons cité les différentes méthodes d'optimisation, nous avons consacré notre travail sur les algorithmes génétiques pour les utiliser comme méthodes d'optimisation dans notre étude en utilisant Matlab, ce qui nous mène à savoir comment Matlab utilise les méthodes d'optimisation.

Matlab a une série d'algorithmes déjà implémentés pour trouver les racines (*root*, *fzero*), les moindres carrés (*lsqcurvefit*, *lsqlin*...), la solution des systèmes d'équations (*fsolve*, *fzero*) et la minimisation, en une et plusieurs dimensions. Pour minimiser une fonction à une variable dans un domaine on utilise *fminbnd* et si la fonction a plusieurs variables, on utilise *fminsearch*. Pour le cas de problèmes contraints on utilise *linprog* et *quadprog* pour les cas linéaires et quadratiques respectivement.

La fonction *fmincon* permet de trouver le minimum d'un problème avec contraintes non linéaire et multi-variable.

Matlab possède un toolkit d'optimisation (*Optimization Toolbox*) pour des problèmes plus compliqués, qui automatise via GUI (interface graphique) le processus de choix de l'algorithme. Matlab utilise plusieurs algorithmes selon le type de problème à résoudre « interior reflective Newton method », « trust-region-dogleg », « trust-region-reflective », « levenbergmarquardt », « simplex », « BFGS », « MinMax ». [11]

### III-5-1 Minimisation unidimensionnel : *fminbnd*

Les méthodes d'optimisation pour les fonctions à une variable s'appellent recherche par ligne (line search). Les algorithmes implémentés dans Matlab pour la fonction *fminbnd* sont le (*Golden section search*) et l'interpolation parabolique.

La fonction *fminbnd* permet de trouver le minimum de la fonction dans un intervalle donné. Dans les options, on peut voir les approximations successives et l'algorithme que Matlab utilise avec *optimset* ('Display','iter').

*fminbnd* trouve minimums locaux. C'est important de choisir une bonne approximation initiale. *fminbnd* a une convergence lente quand la solution est proche de l'intervalle.

### III-5-2 Minimisation multidimensionnelle : *fminsearch*, *fminunc*

Dans Matlab, pour minimiser une fonction à plusieurs variables, on utilise l'algorithme du Simplex qui est implémenté dans *fminsearch*.

Matlab utilise la méthode Simplex parce qu'on n'a besoin ni de gradient ni de calculer la matrice Hessienne à chaque itération. La méthode consiste à entourer le minimum dans un simplex.

Pour de grands problèmes, Matlab recommande d'utiliser la méthode '*interior reflective Newton*' avec des gradients conjugués préconditionnés parce que c'est un algorithme qui converge rapidement. Pour des problèmes moyens, on utilise souvent le *BFGS quasi-Newton*.

Matlab permet aussi d'utiliser la méthode de la descente maximale utilisant comme calcul de la matrice Hessienne : *HessUpdate* 'steepdesc'.

Les méthodes implémentées en Matlab sont complexes afin de pouvoir solutionner une grande variété de problèmes avec la performance maximale (moins itérations). [11]

### III-5-3 Le minimum d'une fonction en utilisant les algorithmes génétiques (GA) sur Matlab

Pour trouver le minimum d'une fonction sur Matlab on peut suivre l'une des fonctions citées dans la syntaxe suivante :

```
x = ga(fun,nvars)
x = ga(fun,nvars,A,b)
x = ga(fun,nvars,A,b,Aeq,beq)
x = ga(fun,nvars,A,b,Aeq,beq,lb,ub)
x = ga(fun,nvars,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon)
x = ga(fun,nvars,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options)
x = ga(fun,nvars,A,b,[],[],lb,ub,nonlcon,IntCon)
x = ga(fun,nvars,A,b,[],[],lb,ub,nonlcon,IntCon,options)
x = ga(problem)
[x,fval] = ga( __ )
[x,fval,exitflag,output] = ga( __ )
[x,fval,exitflag,output,population,scores] = ga( __ )
```

[15]

## **CHAPITRE IV**

### **Modélisation mathématique**

## IV-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons calculer les normales de repérage à partir des coordonnées dites coordonnées plückériennes. L'objectif est de créer une liaison mécanique complète entre la pièce et le montage de d'usinage, le plus souvent, celle-ci sera réellement réalisée par six « petites surfaces de contact » matérialisant les six contacts ponctuels (Figure IV-1).

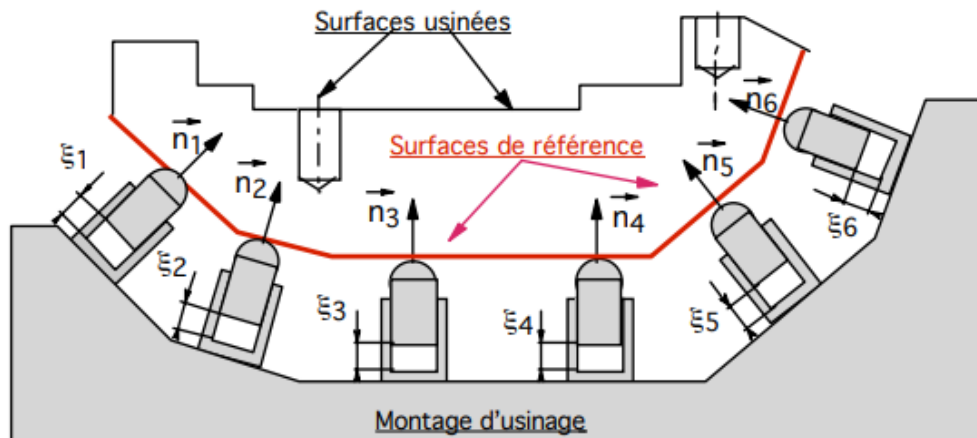


Figure IV -1 (liaison mécanique pièce-montage d'usinage) [16]

## IV-2 Concept du torseur de petits déplacements (SDT) et Coordonnées plückériennes

Un solide dans l'espace (non contraint) peut se déplacer en translation (trois composantes de déplacement) et en rotation (trois composantes angulaires). On dira qu'il a six degrés de liberté.

Dans notre cas, il s'agit de caractériser un ensemble de positions dans un voisinage d'une position initiale cible. Comme il s'agit de micro-déplacements, la transformation géométrique permettant de passer de la position cible à la position réelle (ou réciproquement) peut être modélisée par un torseur (linéarisation) appelé « torseur de petits déplacements [17] » (les composantes sont considérées comme des infiniment petits du premier ordre) :

$$\{\mathcal{D}\} = \begin{matrix} \overrightarrow{\Omega_{S/R}} \\ \overrightarrow{D_O} \end{matrix} \Big|_O = \begin{matrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ u_O \\ v_O \\ w_O \end{matrix}$$

Mesurer la position, revient à connaître les six grandeurs scalaires correspondantes. Remarquons que le déplacement (en mm) est modélisé par un champ de moments, le lieu où il est exprimé doit être clairement indiqué :

$$\overrightarrow{D_{P_i}} = \overrightarrow{D_0} + \overrightarrow{\Omega_{S/R}} \wedge \overrightarrow{OP_i}$$

Ou sous forme matricielle :

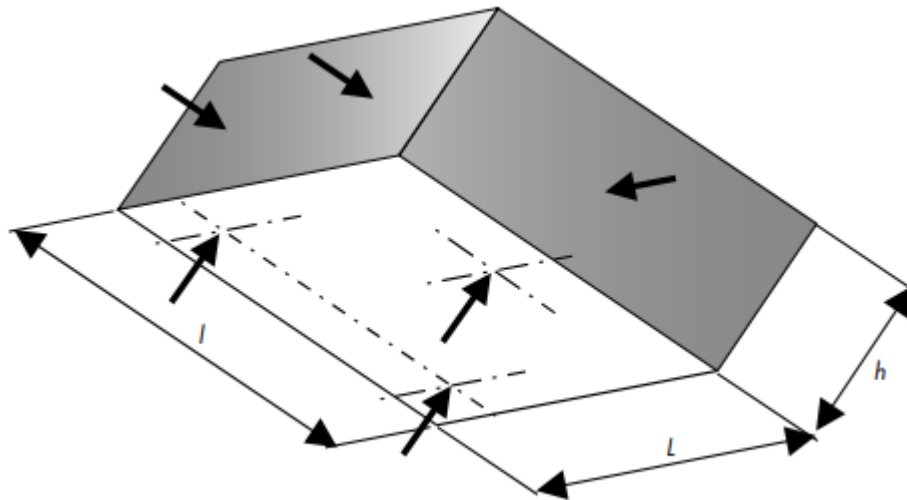
$$\begin{bmatrix} u_{P_i} \\ v_{P_i} \\ w_{P_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} x_{P_i} \\ y_{P_i} \\ z_{P_i} \end{bmatrix}$$

La qualité d'un posage de contrôle sera caractérisée par la mesure de ces six grandeurs scalaires. Cette mesure « multicritères » va être fortement influencée par le choix des points d'appui réalisant « l'interface » entre la pièce et le montage de contrôle. [18]

### IV-3 Optimisation de la position des points d'appui

Dans le cas de surfaces de contact différentes (plan sur plan, par exemple), on pourra toujours imaginer le nombre de liaisons ponctuelles équivalentes (exemple, trois points pour un appui plan).

Exemple : mise en position de Lord Kelvin1 (figure IV.2)



**Figure IV.2** Mise en position de Lord Kelvin et points de Bessel

Ce modèle de mise en position (connu également sous l'appellation : plan-trait-point) est très répandu. Nous l'utiliserons comme exemple conducteur. Si le choix paraît relativement évident (bien que l'appui plan puisse être construit différemment), il n'en est pas toujours de même lors de pièces à la morphologie tourmentée (pièces de forge ou de fonderie par exemple).[18]

## **IV-4 Développement de la matrice à partir des coordonnées plückériennes et calcul des normales (cosinus directeurs)**

### **IV-4-1 Coordonnées plückériennes d'une droite**

Partant d'un point de contact entre la pièce et le montage et après avoir défini le plan tangent nous pouvons construire la droite normale à ce plan et passant par le point de contact (figure. IV.3).

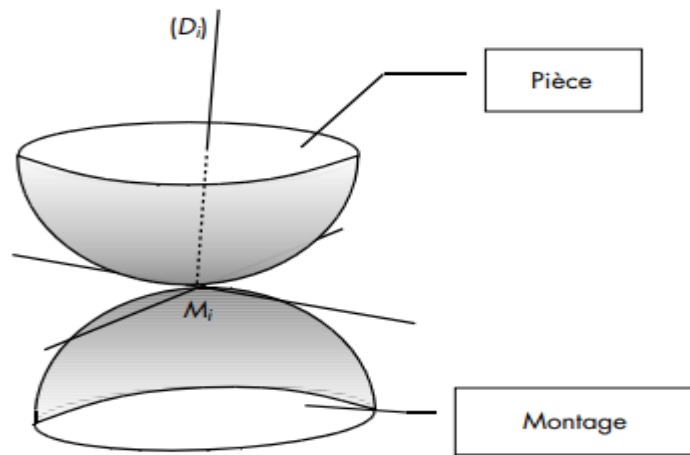


Figure IV-3 Droite normale  $(D_i)$  au point de contact  $M_i$

Si nous associons un repère  $R(o, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  (Figure IV-4) à l'ensemble «machine-montage de contrôle», nous pouvons définir chaque droite normale par ses coordonnées plückériennes.[18]

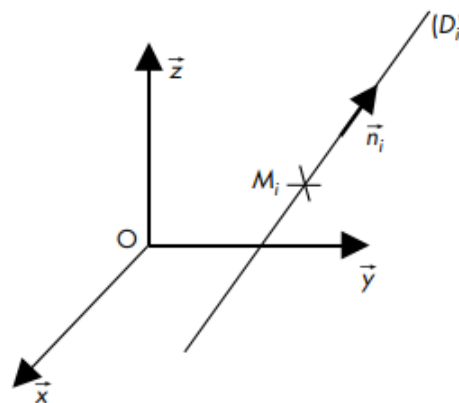


Figure IV-4 Position spatiale de la droite  $(D_i)$  dans le repère  $R$

$\vec{n}_i$  est un vecteur unitaire de  $(D_i)$ . Partant des coordonnées de :

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

On calcule le produit vectoriel :  $\vec{g}_o = \overrightarrow{OM_i} \wedge \vec{n}_i$

Les coordonnées plückériennes sont définies par les six grandeurs (composantes) scalaires suivantes :

$$\left\{ \mathcal{P}_i \right\} = \begin{matrix} \overrightarrow{n_i} \\ \overrightarrow{OM_i} \wedge \overrightarrow{n_i} \end{matrix} \begin{matrix} \overrightarrow{O} \\ \overrightarrow{O} \end{matrix} = \begin{matrix} n_{xi} \\ n_{yi} \\ n_{zi} \\ y_i \cdot n_{zi} - z_i \cdot n_{yi} \\ z_i \cdot n_{xi} - x_i \cdot n_{zi} \\ x_i \cdot n_{yi} - y_i \cdot n_{xi} \end{matrix}$$

Ces six composantes ne sont pas indépendantes, elles sont liées par :

$$n_{xi}^2 + n_{yi}^2 + n_{zi}^2 = 1$$

$$\overrightarrow{n_i} * \overrightarrow{g_0} = 0$$

$$n_{xi} \cdot (y_i \cdot n_{zi} - z_i \cdot n_{yi}) + n_{yi} \cdot (z_i \cdot n_{xi} - x_i \cdot n_{zi}) + n_{zi} \cdot (x_i \cdot n_{yi} - y_i \cdot n_{xi}) = 0$$

Note : le point Mi peut être pris n'importe où sur la droite (propriété d'équiprojectivité).[18]

#### IV-4-2 Rang d'un système de droite

Les six droites normales (D1) à (D6) constituent un système de droites.

On appelle rang du système, l'ordre le plus grand des déterminants non nuls que l'on peut extraire de la matrice construite à partir des coordonnées plückériennes des droites appartenant au système.

$$r = \begin{vmatrix} n_{x1} & n_{x2} & n_{x3} & n_{x4} & n_{x5} & n_{x6} \\ n_{y1} & n_{y2} & n_{y3} & n_{y4} & n_{y5} & n_{y6} \\ n_{z1} & n_{z2} & n_{z3} & n_{z4} & n_{z5} & n_{z6} \\ y_1 \cdot n_{z1} - z_1 \cdot n_{y1} & g_{0,x2} & g_{0,x3} & g_{0,x4} & g_{0,x5} & y_6 \cdot n_{z6} - z_6 \cdot n_{y6} \\ z_1 \cdot n_{x1} - x_1 \cdot n_{z1} & g_{0,y2} & g_{0,y3} & g_{0,y4} & g_{0,y5} & z_6 \cdot n_{x6} - x_6 \cdot n_{z6} \\ x_1 \cdot n_{y1} - y_1 \cdot n_{x1} & g_{0,z2} & g_{0,z3} & g_{0,z4} & g_{0,z5} & x_6 \cdot n_{y6} - y_6 \cdot n_{x6} \end{vmatrix}$$

Le rang d'un système est au maximum de 6.

**Théorème de Hunt**

**Théorème** : soit  $r$  le rang du système  $S$  des droites de contact (normales), les degrés de liberté restant entre les deux solides sont au nombre de  $d = 6 - r$

**Application** : dans ce cas, nous cherchons à immobiliser (sans surcontraindre) la pièce par rapport au montage. L'objectif est donc d'obtenir  $r = 6$ .

**IV-4-3 Optimisation de la localisation des points d'appui**

Nous ne rappellerons pas les règles de bon sens pour positionner judicieusement les six points d'appui (par exemple, éviter trois points alignés).

L'optimisation est multi-objectifs. Il faut minimiser simultanément six sorties (trois translations et trois rotations) en choisissant six points d'appui (les normales associées dépendent des interfaces « pièce-montage »). Nous proposons de remplacer l'optimisation multi-objectifs par un indicateur mono-objectif simple à calculer. Nous chercherons à maximiser le déterminant extrait de la matrice des coordonnées plückériennes.

Une bonne qualité de montage correspond à un grand déterminant et un conditionnement petit.

## **Chapitre V**

### **Concept d'optimisation par nuage de points**

## V-1 Introduction

La modélisation de surfaces est devenue un outil incontournable dans l'industrie moderne. En effet, elle permet de représenter et d'étudier à l'aide d'un ensemble d'équations des surfaces constituant des objets. Cette partie a pour but de présenter les différentes catégories de modélisation des surfaces :

- les surfaces de Bezier
- les surfaces de B-Spline
- les surfaces Nurbs

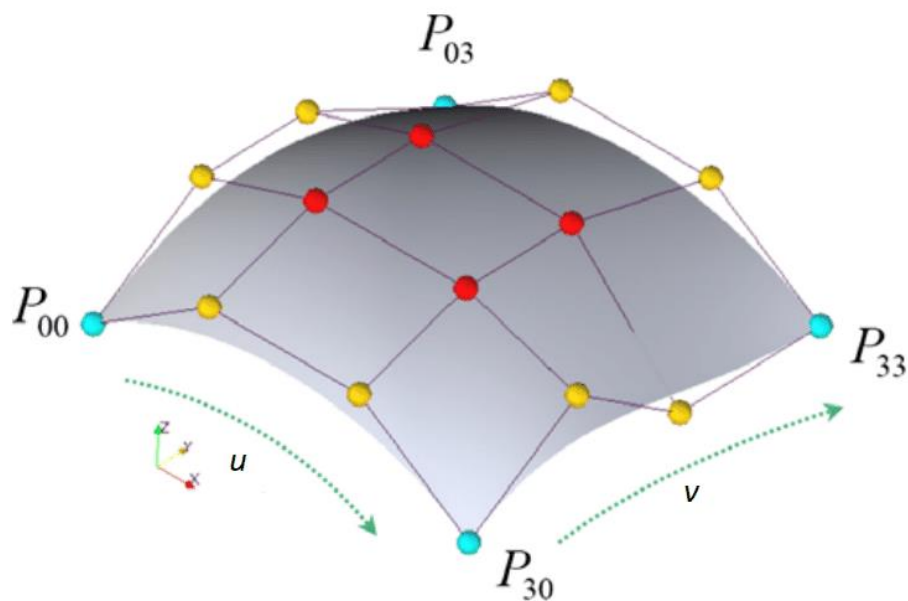
Ces surfaces ont été initialement conçues comme outils de CFAO (Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur) pour la modélisation d'objets.

Plus récemment, l'informatique graphique s'est emparé de ces outils pour représenter les objets autrement que par ensembles de facettes. Les outils de haut niveau en modélisation pour la synthèse d'images font appel aux NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) qui sont une évolution des NURBS pour permettre un affichage en perspective.

## V-2 Surfaces de Bézier

### V-2-1 Définition

Les surfaces de Bézier sont l'équivalent des courbes de Bézier au niveau des surfaces ; elles utilisent un polyèdre caractéristique, aussi appelé maillage caractéristique, la surface passe par les points de coin du polyèdre, les arêtes extérieures de la surface sont tangentes aux segments de droites formant les coins du polyèdre caractéristique [19] *Figure (V-1)*.



**Figure (V-1)** Surface de Bézier

### V-2-2 Formulation mathématique

La surface de Bézier de  $(n+1)$  points de contrôle selon  $u$  (polynôme de degré  $n$  en  $u$ ) et de  $(m+1)$  points de contrôle selon  $v$  (polynôme de degré  $m$  en  $v$ ) est définie par :

$$\vec{P}(u,v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \vec{P}_{ij} B_{i,n}(u) B_{j,m}(v) \quad \text{avec } u, v \in [0,1]$$

Où :  $P_{ij}$  coordonnées  $(x,y,z)$  des sommets du polyèdre caractéristique ;

Les fonctions d'influences  $B_{i,n}(u)$  et  $B_{j,m}(v)$  sont définies par :

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad B_{j,m}(v) = \frac{m!}{j!(m-j)!} v^j (1-v)^{m-j}$$

### V-3 Surfaces B-spline

Les surfaces B-splines s'expriment comme un produit tensoriel de courbes B-splines *figure (V-2)*. Comme les courbes B-splines, les surfaces B-splines ont l'avantage d'un contrôle local et d'un degré peu élevé. On peut exprimer les surfaces B-splines à partir de la base  $N_{i,k}$  des B-splines : Soit  $P_{i,j}$  pour  $i = 0, \dots, m-1$  et  $j = 0, \dots, n-1$  un réseau de points de contrôle.

Soit  $k \geq 1$ , qui contrôlera le degré des polynômes considérés par rapport au paramètre  $u$ , et soit  $t \geq 1$  qui contrôlera le degré des polynômes en fonction du paramètre  $v$ . Soit  $U = [u_0, u_1, \dots, u_{m+k-1}]$  un vecteur nodal par rapport à  $u$ , et soit  $V = [v_0, v_1, \dots, v_{n+t-1}]$  un vecteur nodal par rapport à  $v$ .

On définit les fonctions  $N_{i,k}$  et  $N_{j,t}$  pour  $i = 0, \dots, m-1$  et pour  $j = 0, \dots, n-1$ . La surface B-spline  $Q$  d'ordre  $m \times n$ , de degré  $k-1$  par rapport à  $u$  et de degré  $t-1$  par rapport à  $v$  ayant  $V$  et  $Q$  pour vecteurs nodaux et les  $P_{i,j}$  pour points de contrôle est définie par :

$$Q : [u_{k-1}, u_m] \cdot [v_{t-1}, v_m] \rightarrow \mathbb{R}^3$$

$$(u, v) \rightarrow Q(u, v) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,t}(v) \quad [20]$$

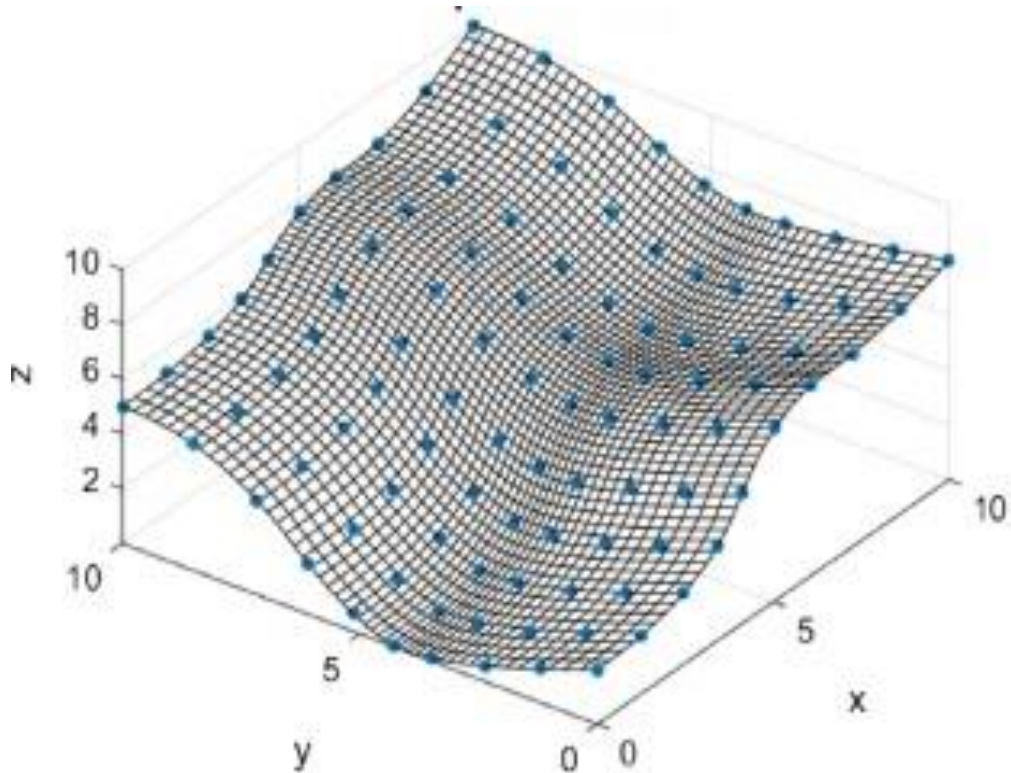


Figure (V-2) Surfaces B-spline (10×10 points)

### V-4 Surfaces NURBS

Une surface NURBS dans  $\mathbb{R}^3$ , c'est la projection centrale d'une surface B-spline produit tensoriel dans  $\mathbb{R}^4$  (Figure (V-3)). Autrement dit, on se donne deux vecteurs de nœuds, un polyèdre de contrôle et un poids  $w_{ij}$  pour chaque point de contrôle  $P_{ij}$ , et la surface associée est paramétrée par [21] :

$$S = \left\{ P(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \omega_{i,j} D_{i,j} N_i^m(u) N_j^n(v)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \omega_{i,j} N_i^m(u) N_j^n(v)} \right\}$$

Où :

<i>Ordre m (degré du=m-l) en u</i>	<i>Ordre n (degré dv=n-l) en v</i>
<i>Vecteur de nœuds en u : <math>u_0, u_1, \dots, u_{nu}</math></i>	<i>Vecteur de nœuds en v : <math>v_0, v_1, \dots, v_{nv}</math></i>
<i>Grille de M x N points <math>D_{i,j}</math> et poids <math>\omega_{i,j}</math> (<math>M=nu+du, N=nv+dv</math>)</i>	

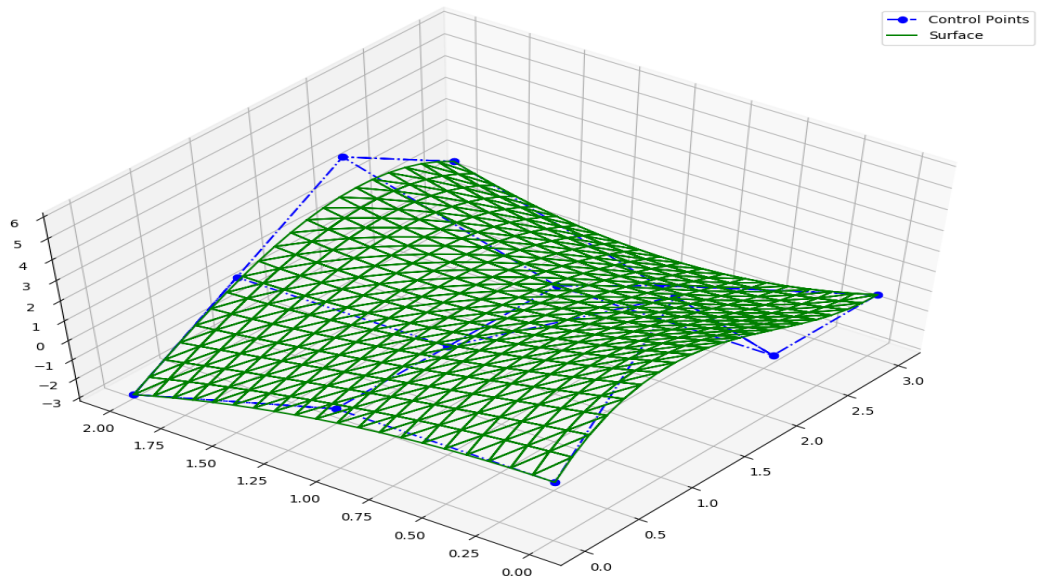


Figure (V-3) Surface NURBS

## **Chapitre VI**

### **Application de la méthode proposée sur différentes pièces**

### VI-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons aborder une étude d'optimisation dans le but de trouver le placement des éléments d'appui en utilisant le logiciel Matlab.

### VI-2 Les Méthodes d'optimisation utilisées :

Plusieurs fonctions spécifiques existent dans MATLAB pour résoudre des problèmes d'optimisation. Certaines fonctions sont disponibles dans la version de base du logiciel (polyfit/polyval, fminsearch et fminbnd) alors que les autres ne sont accessibles que par l'intermédiaire de l'optimization toolbox.

Dans une grande majorité des cas, la fonction objectif du problème Matlab doit être exprimée dans une fonction MATLAB externe ou anonyme. Selon la nature du problème d'optimisation à traiter, il est nécessaire de choisir la bonne fonction MATLAB apte à résoudre un tel problème.

Dans ce travail, une étude comparative entre deux fonctions d'optimisation a été menée en utilisant le logiciel Matlab. Ces fonctions d'optimisation sont :

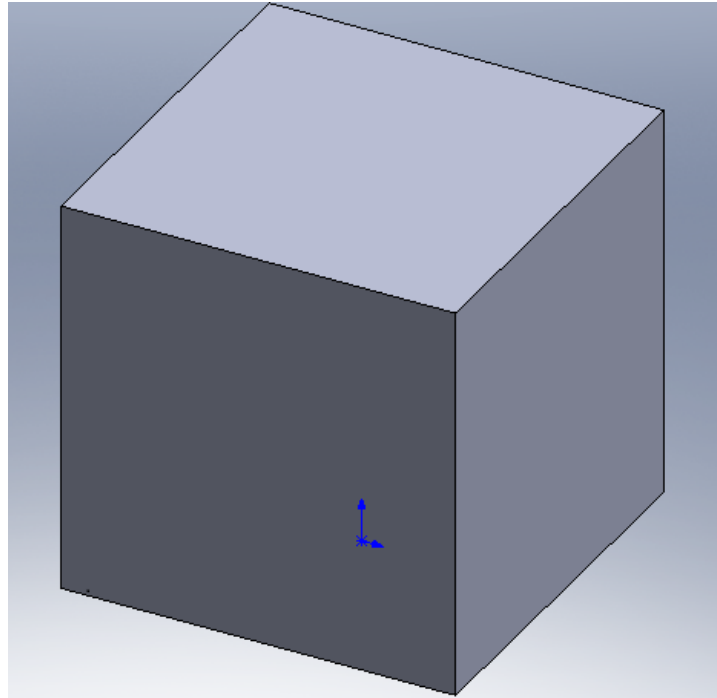
- 1- Optimisation par Fmincon ;
- 2- Optimisation par algorithmes génétiques.

La fonction fmincon code des plusieurs méthodes (dont SQP) de résolution de problème d'optimisation multidimensionnelle avec contraintes. L'utilisateur avisé peut choisir la méthode numérique ou sinon laisser la fonction fmincon choisir automatiquement la méthode la plus adaptée.

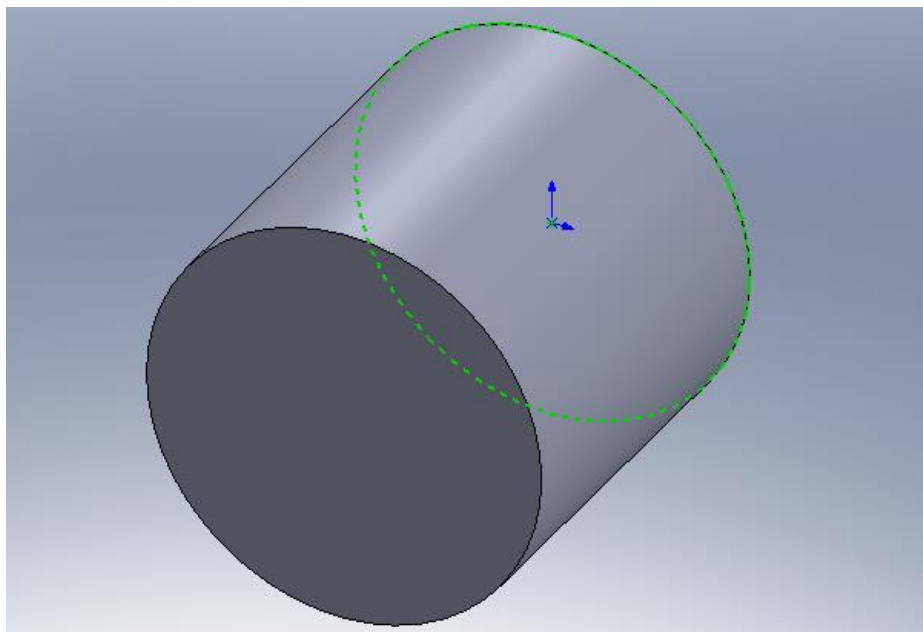
La fonction ga trouve un minimum de fonction en utilisant un algorithme génétique. Pour utiliser le solveur ga sur Matlab, il faut fournir au moins deux arguments d'entrée, une fonction de fitness et le nombre de variables du problème. Les deux premiers arguments de sortie renvoyés par la fonction ga sont : (x) le meilleur point trouvé et (Fval) la valeur de la fonction au meilleur point. Un troisième argument de sortie(exitFlag)qui indique la raison pour laquelle ga s'est arrêté. ga peut également renvoyer un quatrième argument, Output, qui contient des informations sur les performances du solveur.

### VI-3 Les pièces modèles :

La méthode d'optimisation est premièrement appliquée sur une pièce de forme générale prismatique (Figure VI-1), puis généraliser sur d'autres types de pièces telles que les pièces cylindriques (Figure VI-2) et les pièces de forme complexes comme les ailettes de turbines (Figure VI-3).



**Figure (VI-1)** Pièce prismatique



**Figure (VI-2)** Pièce cylindrique

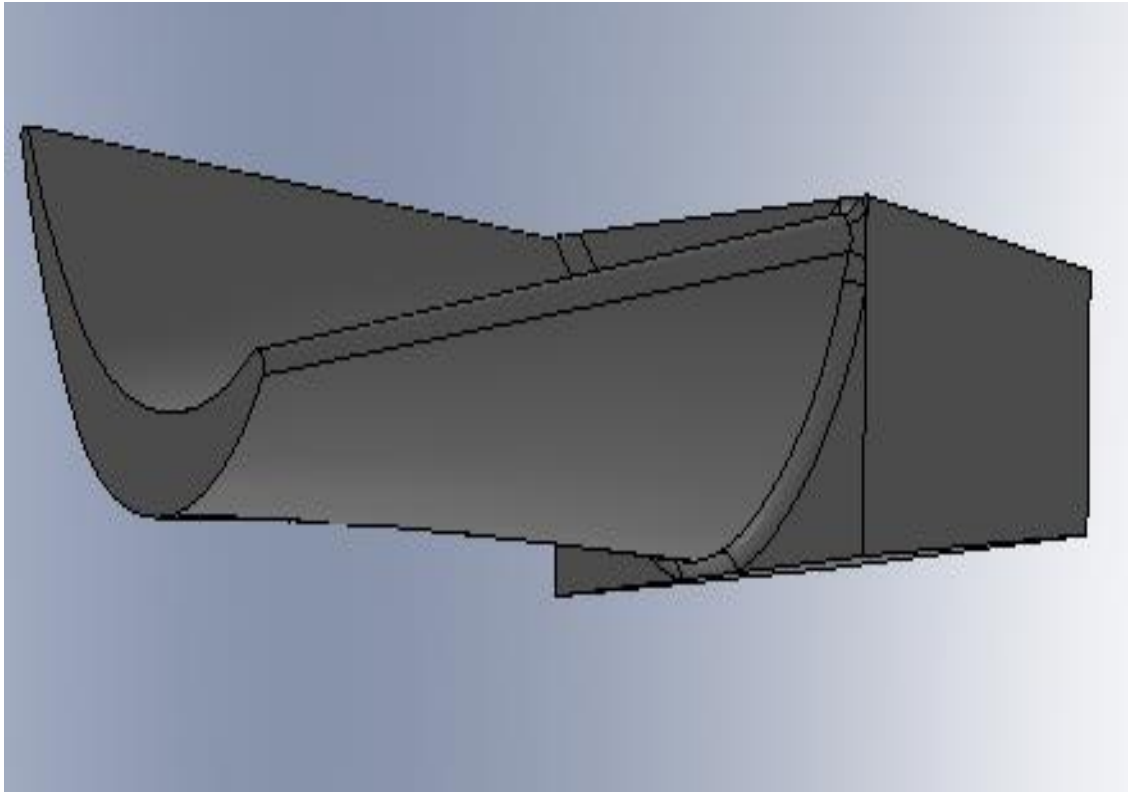


Figure (VI-3) Pièce complexe (surface gauche, ailette de turbine)

## VI-4 Etude des cas

Afin de comparer et d'inspecter la performance des deux méthodes d'optimisation proposées, des tests ont été menés sur différents types de composants.

### VI-4-1 Cas d'une pièce prismatique :

#### A/ Méthode 1 : Optimisation par « Fmincon »

Comme présenté à la figure (VI-4), nous avons choisi premièrement les points de départ (start points) et les bornes (Bounds).

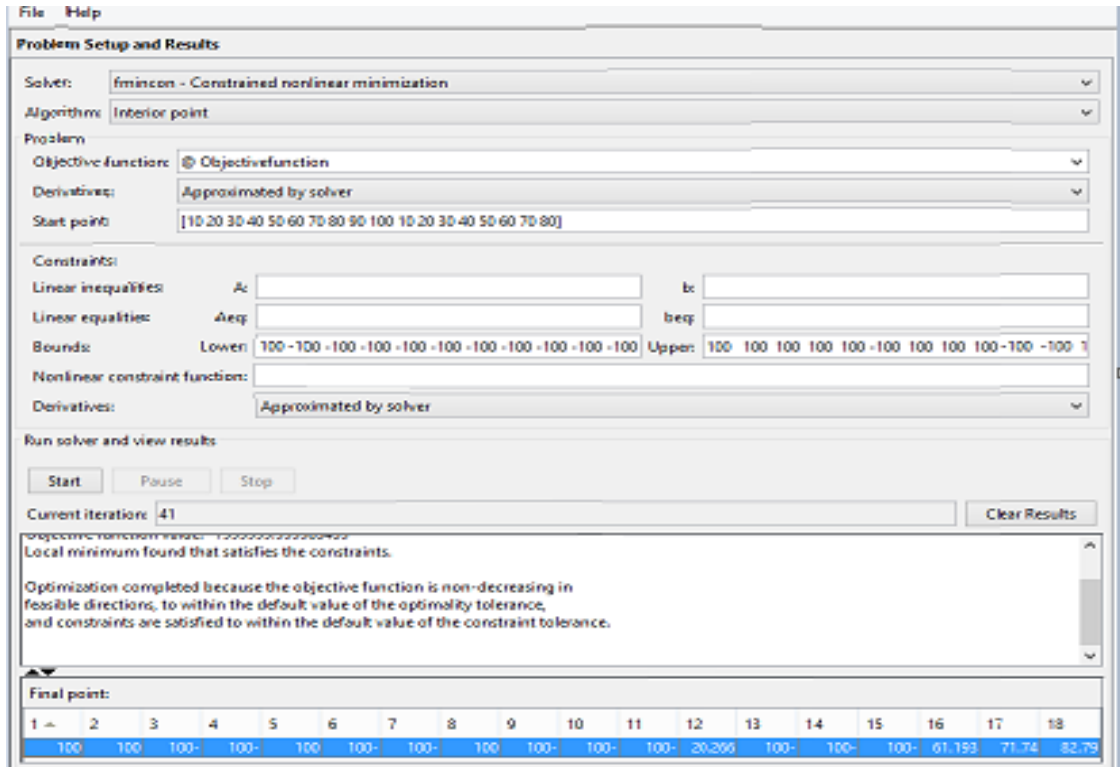


Figure (VI-4) Interface d’optimisation par Fmincon (test1)

Comme la figure (VI-5) le montre, la routine d’optimisation converge vers une solution après 41 itérations.

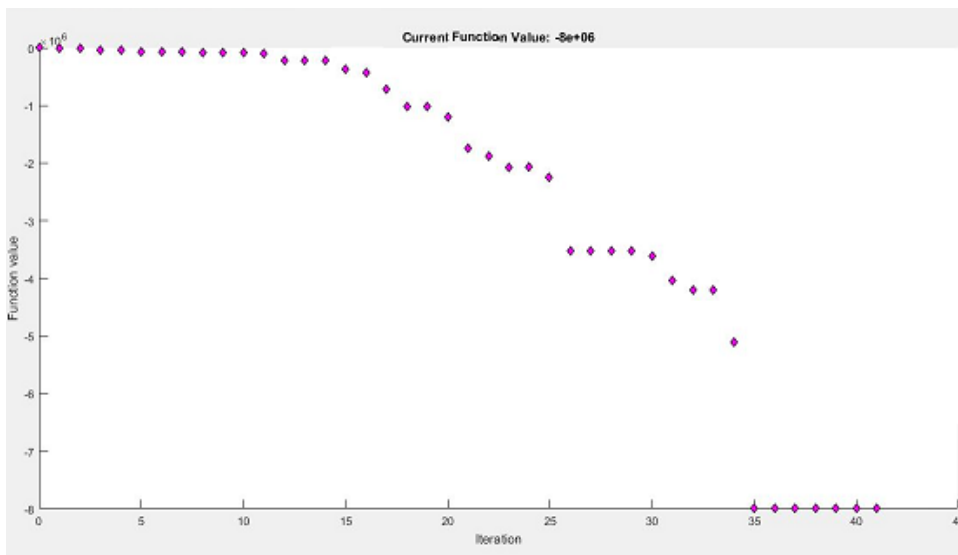


Figure (VI-5) Résultat graphique d’optimisation par Fmincon (1)

Le tableau (VI-1) présente des exemples de résultats obtenus pour chaque cas de test, tandis que les figures VI-6, VI-7 et VI-8 illustrent une visualisation graphique de la distribution des localisateurs sur chaque face pour chaque cas étudié. On peut voir clairement à partir de ces résultats que le test 1 donne le meilleur déterminant ( $8 \times 10^6$ ). Les figures VI-6, VI-7 et VI-8 montrent également que les localisateurs sont bien éloignés.

Tableau(VI-1) Résultats obtenus après la routine d'optimisation par Fmincon

Numéro de test	Coordonnées des placements d'appui			Valeurs du déterminant	Valeurs du conditionnement
	x	y	z		
1	100	-100	-100	8x10 <sup>6</sup>	264.71
	100	100	-100		
	-100	-100	-100		
	100	-100	61.193		
	-100	-100	71.74		
	-100	20.266	82.79		
2	-90	89.993	-100	5.832x10 <sup>6</sup>	255.34
	90	-90	-100		
	90	90	-100		
	-90	-100	39.996		
	90	-100	88.659		
	-100	90	19.998		
3	-66	66	-100	2.30x10 <sup>6</sup>	158.51
	3.631	-66	-100		
	66	66	-100		
	-66	-100	39.719		
	66	-100	40.002		
	-100	66	19.906		

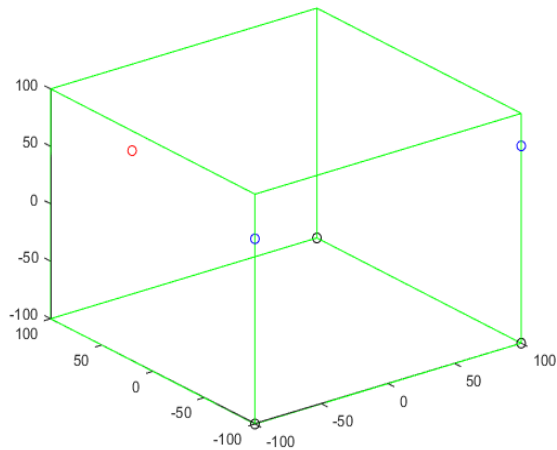
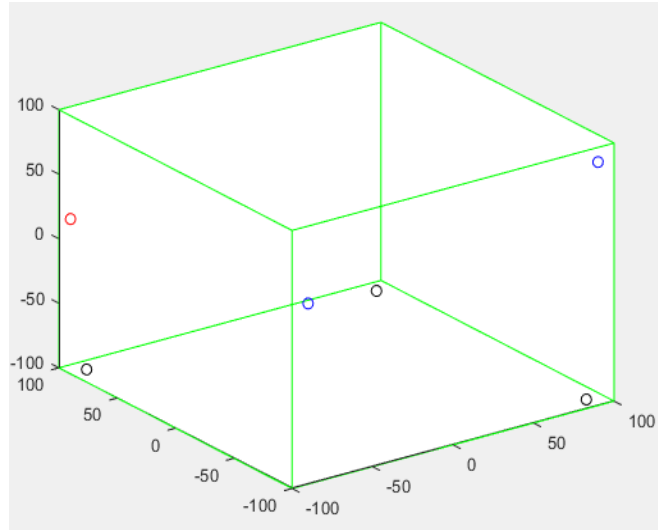
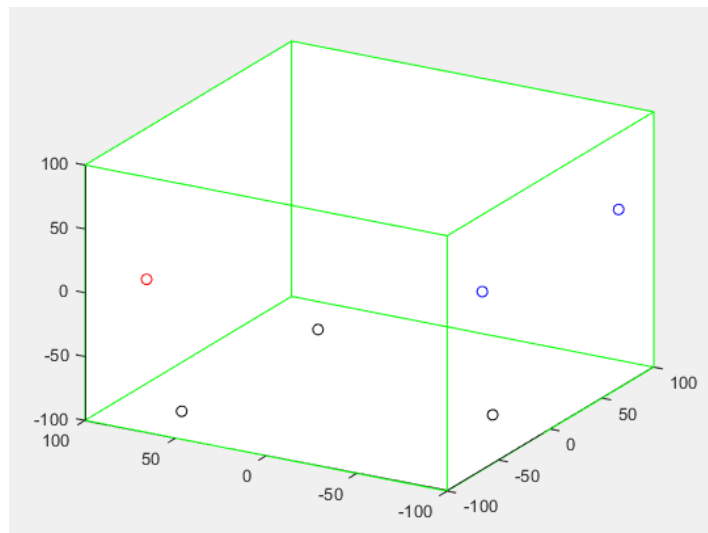


Figure (VI-6) placement des appuis (optimisation par Fmincon) (test1)



**Figure (VI-7)** placement des appuis (optimisation par Fmincon) (test2)



**Figure (VI-8)** placement des appuis (optimisation par Fmincon) (test3)

**B/ Méthode 2 : Algorithme génétique (ga)**

Similairement à la méthode précédente, les points de départ (start points) et les bornes (Bounds) sont premièrement introduits dans l'interface "optimtool" présenté à la figure VI-9.

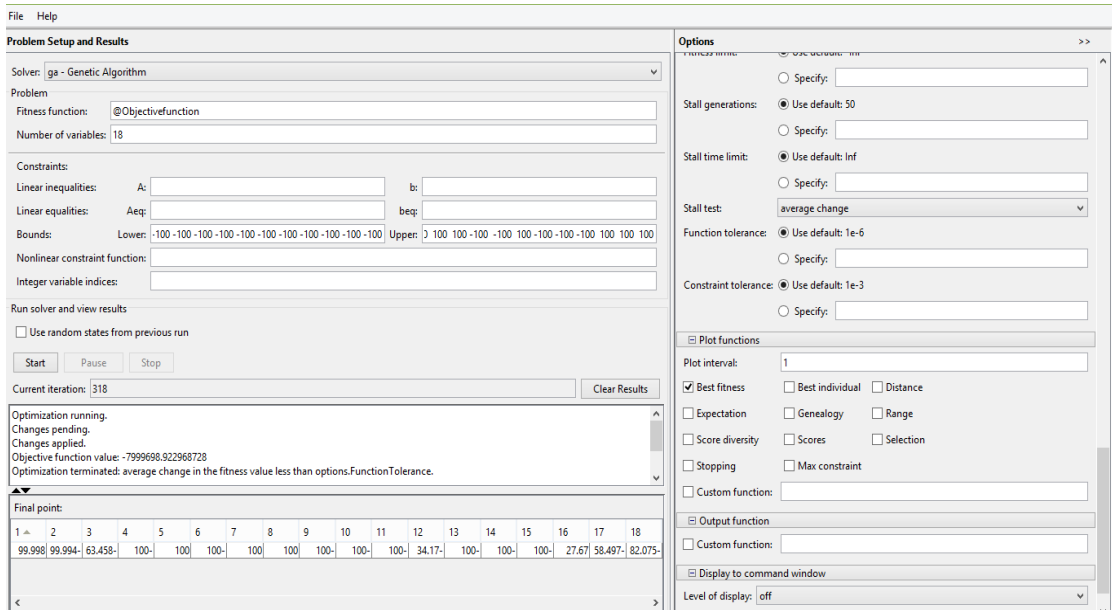


Figure (VI-9) Interface d'optimisation par Algorithme génétique (test1)

Comme le montre la figure VI-10 la fonction ga converge vers une solution après environ 350 générations.

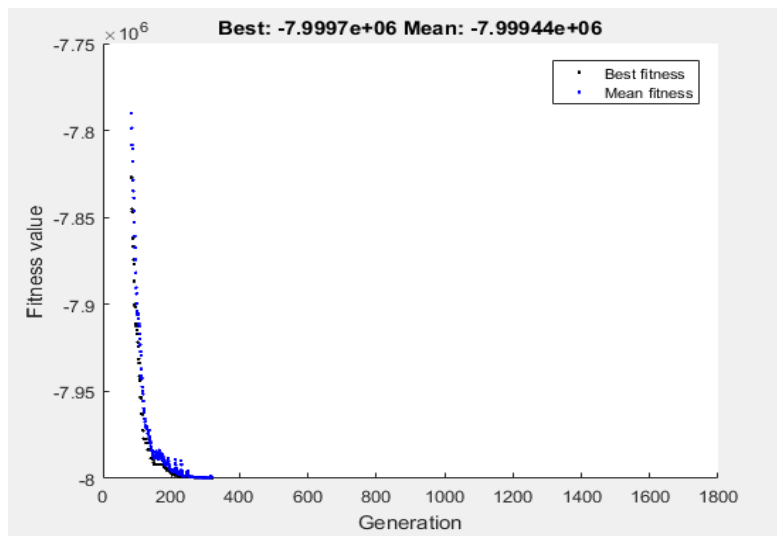


Figure (VI-10) Résultat graphique d'optimisation par Algorithme génétique (1)

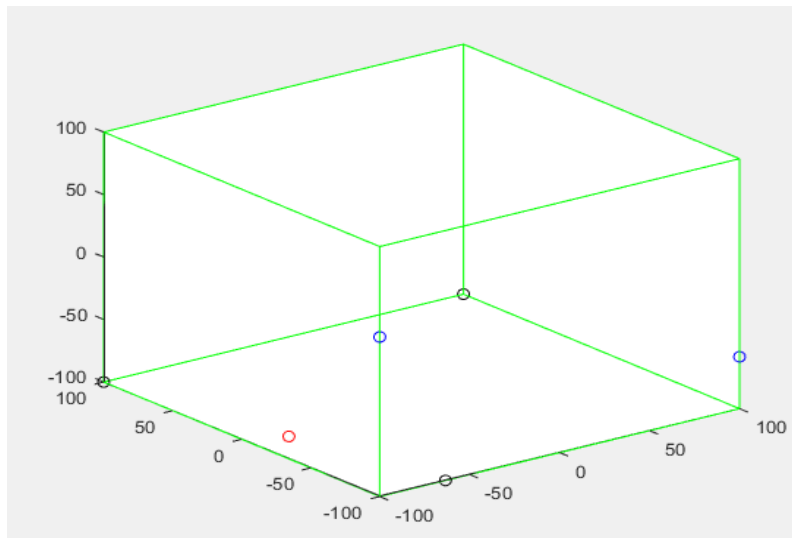


Figure (VI-11) placement des appuis (optimisation par algorithme génétique) (test1)

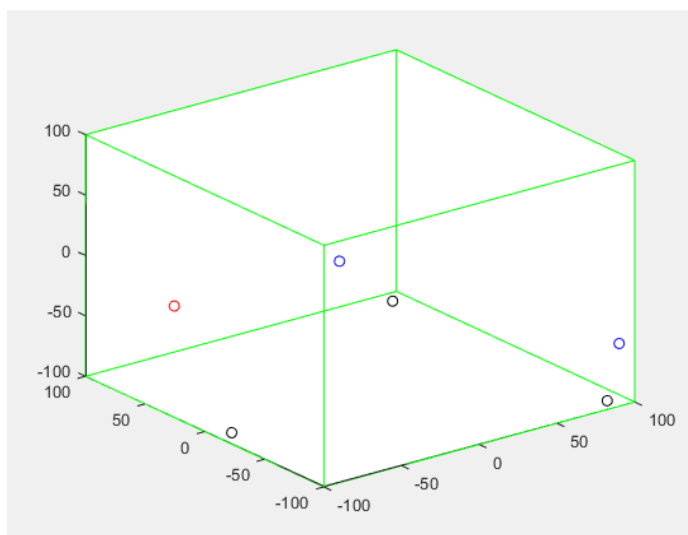


Figure (VI-12) placement des appuis (optimisation par algorithme génétique) (test2)

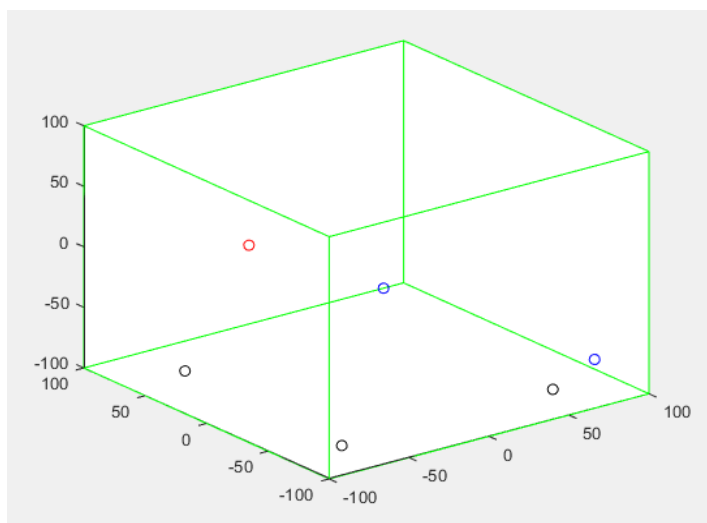


Figure (VI-13) placement des appuis (optimisation par algorithme génétique) (test3)

## Chapitre VI Application de la méthode proposée sur différentes pièces

Tableau (VI-2) montre qu'en terme de déterminant, la méthode d'optimisation par algorithme génétique donne des résultats similaires à ceux obtenus par Fmincon. Par contre, la méthode algorithme génétique (ga) semble plus robuste car elle fournit dans la majorité des cas des conditionnements plus petits que ceux obtenus par Fmincon.

**Tableau(VI-2) Résultats obtenus après la routine d'optimisation par algorithme génétique (ga)**

Numéro de test	Coordonnées des placements d'appui			Valeurs du déterminant	Valeurs du conditionnement
	X	y	z		
1	99.998	100	-100	$8 \times 10^6$	250
	-99.994	100	-100		
	-63.458	-100	-100		
	-100	-100	27.67		
	100	-100	-58.497		
	-100	-34.17	-82.075		
2	-90	-9.631	-100	$5.83173 \times 10^6$	189.74
	89.997	-89.998	-100		
	90	89.999	-100		
	-89.997	-100	83.325		
	90	-100	-48.039		
	-100	25.521	-7.73		
3	-65.999	-66	-100	$2.29939 \times 10^6$	220.89
	66	-65.999	-100		
	-62.803	66	-100		
	-65.998	-100	45.51		
	66	-100	-59.678		
	-100	-34.619	62.993		

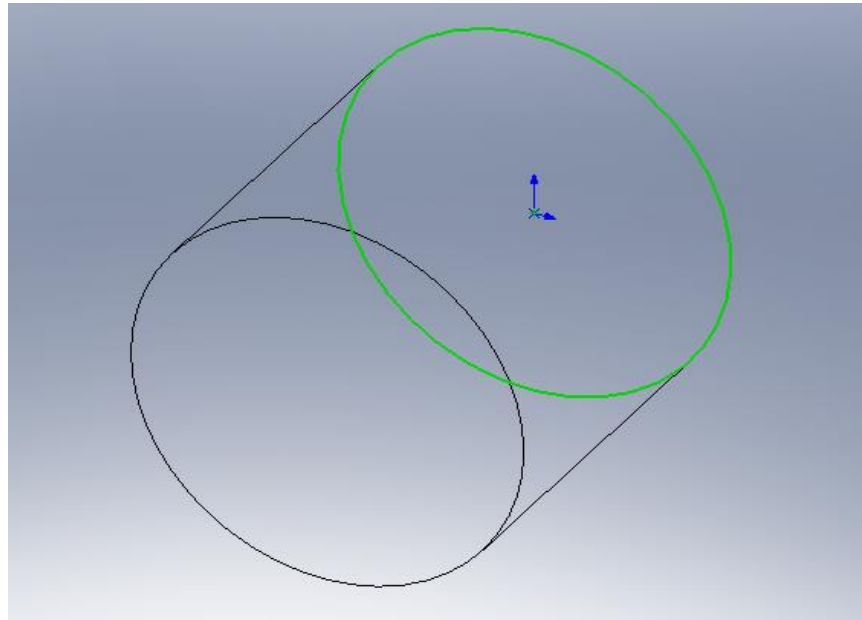
### VI-4-2 Cas d'une pièce cylindrique

Pour les pièces cylindriques et les pièces de formes complexes et afin de résoudre le problème de détermination des bornes inférieures (Lower) et supérieures (Upper), nous avons adopté l'approche de modélisation paramétrique par les surfaces de Bézier ou B-spline et cela avant d'entamer la procédure d'optimisation.

#### Model pièce

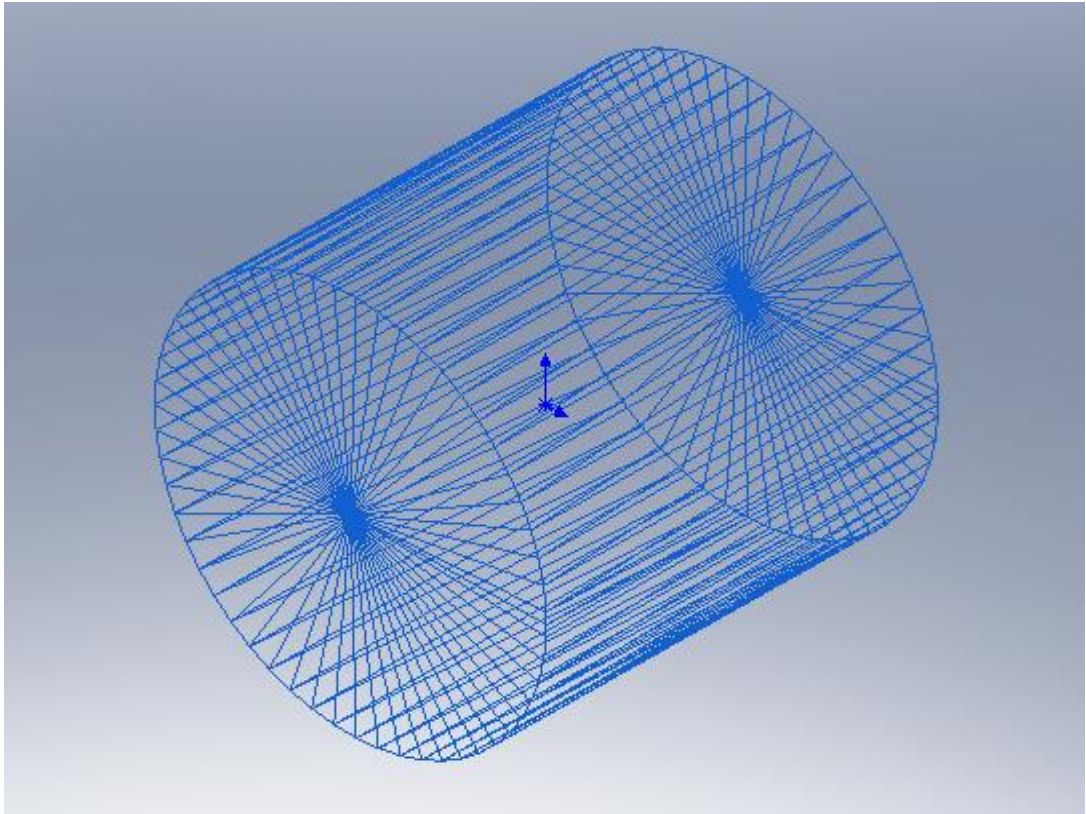
Nous avons la pièce cylindrique (figure VI-13) qui nécessite une modélisation surfacique de Bézier ou B-spline.

Tout d'abord, on doit sauvegarder la pièce dessinée sur SolidWorks (Figure (VI-14)) sous format '*Stl file*'.



**Figure (VI-14)** Pièce cylindrique dessinée sur SolidWorks

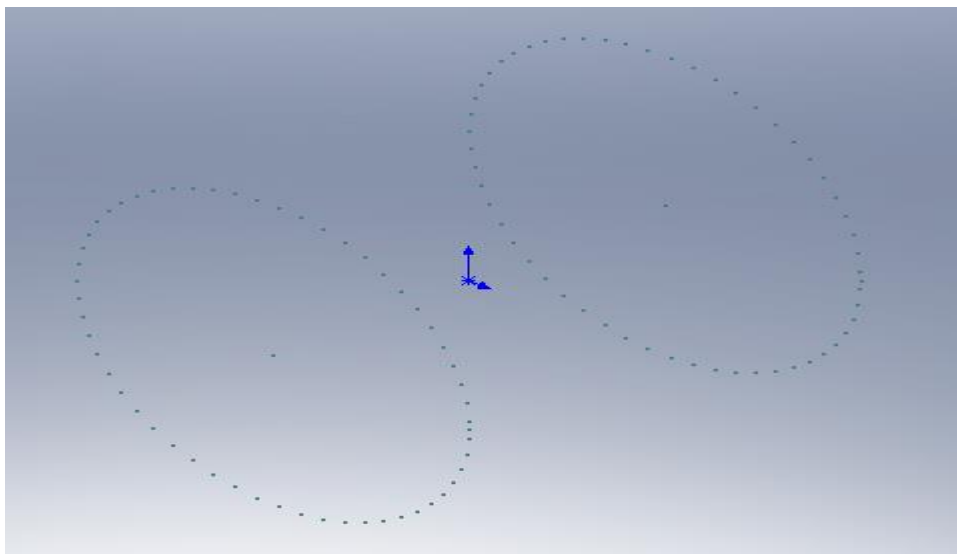
Puis, on ouvre le fichier '*STL file*' sous forme de maillage '*Mesh file*' on obtient la figure (VI-15)



**Figure (VI-15)** Mesh file

On sauvegarde le fichier 'Mesh file' sous forme de 'Scan to 3D XYZ file'

En fin, on ouvre le fichier 'Scan to 3D XYZ file' sous forme de nuage de point 'point cloud file' figure (VI-16)

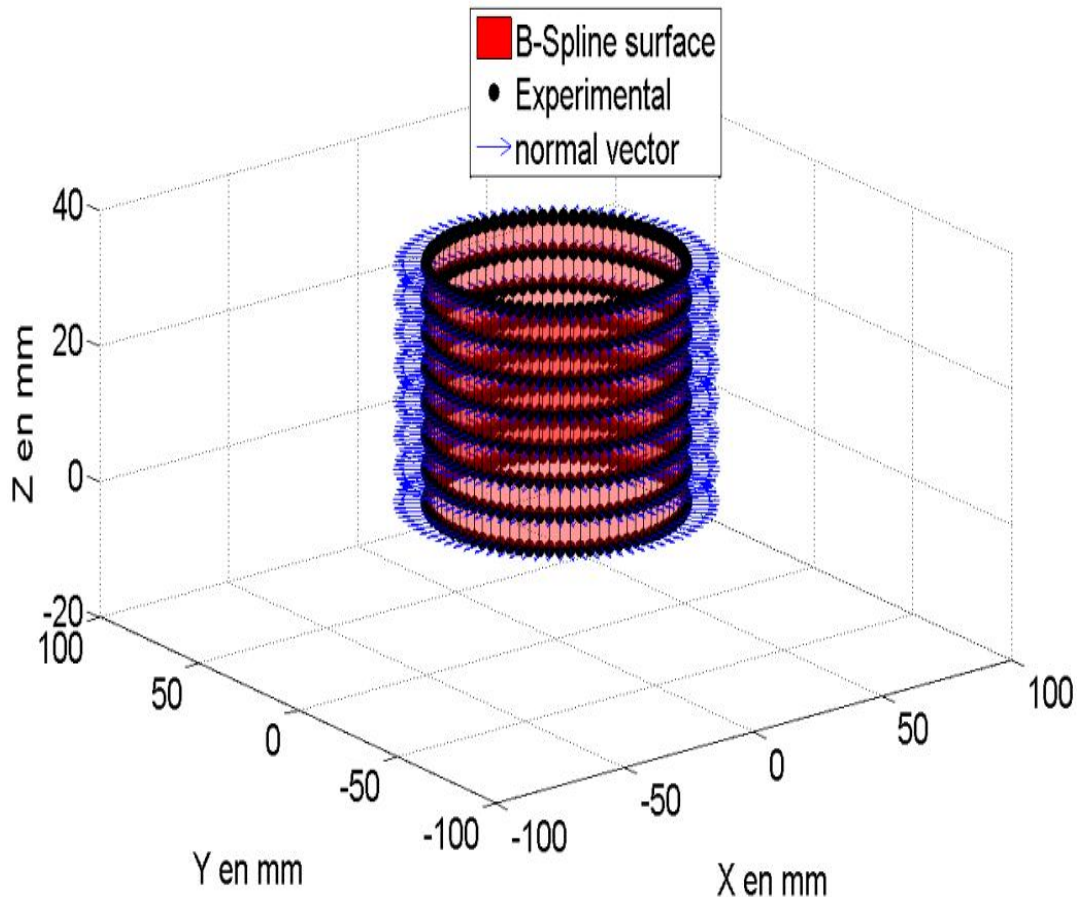


**Figure (VI-16)** nuage de points

Le nuage de points extrait sera enregistré sous forme de fichier 'TXT',

Les fichiers textes ont la structure d'une liste de X, Y, Z indiquant l'emplacement de chaque point candidat.

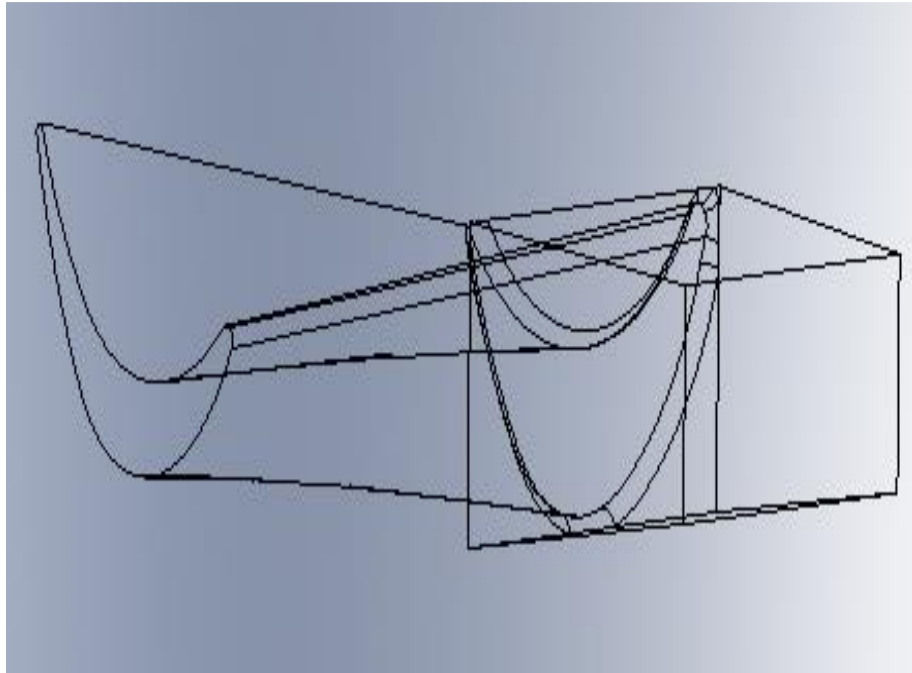
Avant d'entamer la procédure d'optimisation une modélisation surfacique par B-spline a été réalisée sur Matlab puis les vecteurs normaux pour chaque point sont identifiés. Les vecteurs normaux calculés sont présentés à la figure (VI-17).



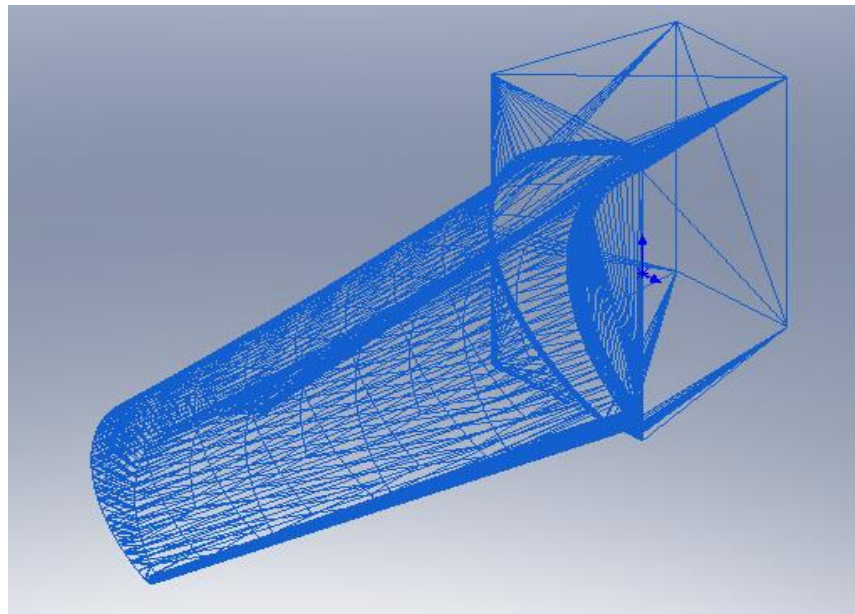
**Figure (VI-17)** Nuage de points pour cylindre, surface B-spline et vecteurs normaux

### VI-4-3 Cas d'une pièce complexe (surface gauche) :

Similairement à l'étape précédente, le dessin de l'ailette est premièrement conçu sur un logiciel CAO figure (VI-17). Le maillage de cette pièce est donné à la figure (VI-18).



**Figure (VI-18)** Fichier 'Stl file' de l'ailette



**Figure (VI-19)** Fichier 'Mesh file'

Après l'obtention du fichier nuage de points (*Figure (VI-19)*), ce dernier est téléchargé sous Matlab pour une modélisation surfacique par B-spline et calculer les vecteurs normaux (*Figure (VI-20)*).

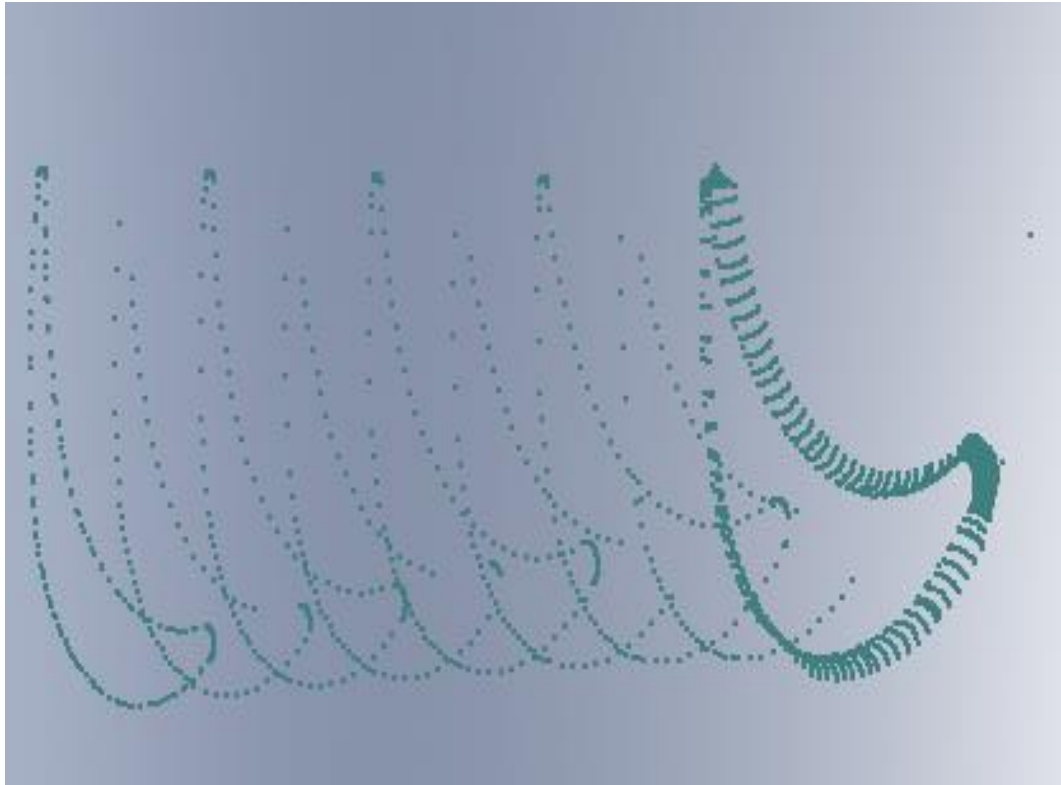


Figure (VI-20) Fichier 'Cloud point file'

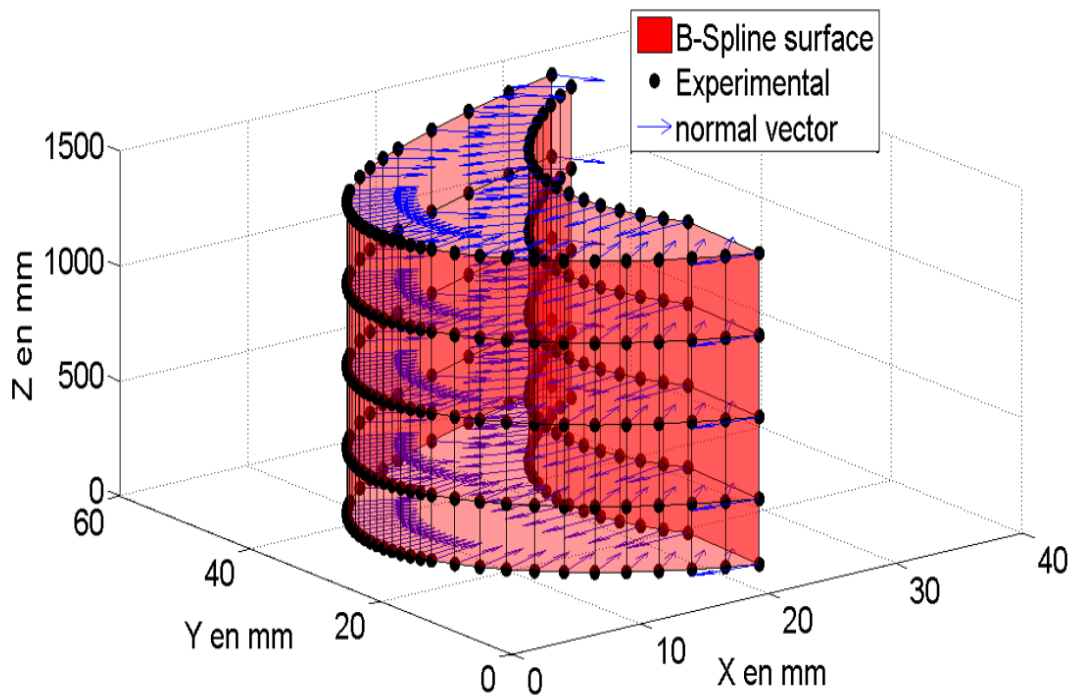


Figure (VI-21) Nuage de points pour ailette, surface B-spline et vecteurs normaux

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

### Conclusion générale

L'optimisation des placements des localisateurs (éléments d'appuis) est une étape indispensable dans le cadre de l'usine intelligente et industrie 4.0.

L'objectif de ce travail est de proposer une méthodologie de résolution des problèmes de conception du placement des éléments d'appui d'un montage d'usinage.

Les résultats de cette étude montrent que l'optimisation des éléments d'appuis à l'aide d'algorithmes génétiques s'est avérée efficace pour trouver des solutions de haute qualité, qui pourraient être intégrées dans l'industrie de la conception automatisée de montages d'usinage. Ces résultats démontrent également la robustesse de GA par rapport à la fonction d'optimisation  $f_{mincon}$  en produisant un déterminant élevé et un conditionnement bas.

L'avantage principal de cette approche est de réduire de manière significative la dépendance à l'égard de l'expertise des concepteurs humains et de produire des conceptions de montage d'usinage de haute qualité, même pour des composants complexes.

Ce modeste travail est l'un des travaux qui ouvrent un nouvel horizon de l'industrie moderne (automatisée) vers une autre perspective d'amélioration des montages d'usinages.

## Références bibliographiques

### Références bibliographiques:

- [1] R.Butin et M.Pinot Fabrications mécaniques Technologie ; les éditions FOUCHER ; Paris 1981.
- [2] B.Vieille, Méthodes et fabrications, Conservatoire National des arts et métiers .
- [3] Pierre BOURDET, Gamme d'usinage, Novembre 2003, Ecole Normale Supérieure de CACHAN.
- [4] Said Zirmi, Conception de montages d'usinage modulaire pour le fraisage, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010
- [5] N. H. Wu, K. C. Chart - "A Genetic Algorithm Based Approach to Optimal Fixture Configuration", Computrs ind. Engng, VoL 31, No. 3/4, pp. 919 - 924, 1996.
- [6] Subramanian Vallapuzha, Edward C. De Meter , Shabbir Choudhuri , Raghunath P. Khetan - "An investigation into the use of spatial coordinates for the genetic algorithm based solution of the fixture layout optimization.
- [7] A. M. CHOUBEY, PRAKASH, F. T. S. CHAN and M. K. TIWARI- "Solving a fixture configuration design problem using genetic algorithm with learning automata approach", International Journal of Production Research, Vol.43, N°. 22, 15 November 2005, 4721-4743.
- [8] Kulankara Krishnakumar, Shreyes N. Melkote- "Machining fixture layout optimization using the genetic algorithm", International Journal of Machine Tools& Manufacture 40 (2000) 579-598.
- [9] Necmettin Kaya - "Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms", Computers in Industry 57 (2006) 112– 120.
- [10] Fatima Zahra Oujebbour ; Méthodes et applications industrielles en optimisation multi-critère de paramètres de processus et de forme en emboutissage.
- [11] Maria Güell i Pons, Cours MATLAB UNIL-FGSE – Hiver 2009-2010 X. Algorithmes d'optimisation.
- [12] F. Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Computers and Operations Research, 13 :533–549, 1986.
- [13] I. Envoldsen and J.D. Sorensen. Reliability based optimization in structural engineering. Structural safety, 15 :169–196, 1994.
- [14] [WWW.unit.eu/cours](http://WWW.unit.eu/cours) optimisation mécanique.
- [15] [www.mathworks.com.Mathworks](http://www.mathworks.com.Mathworks).
- [16] Pierre BOURDET, Modèles géométriques pour la maîtrise des spécifications en conception du couple produit-processus, Ecole Nationale de Cachan ,2006.

## Références bibliographiques

- [17] P.Bourdet et A.Clément ,Controlling a complex surface with a 3 axis measuring machine, Annals of CIRP, Vol 25/1/1976.
- [18] Daniel DURET, Qualité de la mesure en production, Éditions d'Organisation Groupe Eyrolles 61, bd Saint-Germain 75240 Paris cedex 05.
- [19] Dr Slamani Mohamed, usinage des surfaces gauches , Université Med Boudiaf –M'sila.
- [20] SHEN Xia, TCHOU Benjamin -Courbes et Surfaces B-Splines, Université de Bourgogne Département de Mathématiques, UV : MatLab, Master1 MIGS 2006/2007.
- [21] M2-MIA-GICAO, Courbes & Surface -Université Joseph Fourier - Année 2012-13.

## Résumé :

La conception et la fabrication des montages d'usinage dans l'industrie reste encore et jusqu'à présent dépendent fortement de l'expertise humaine. Les concepteurs de montages d'usinage n'ont pas encore pleinement utilisé les outils de modélisation et de simulation disponibles pour prédire le comportement des montages. Ceux-ci entraînent une différence entre le comportement attendu et final du montage après fabrication et, par conséquent, un délai et un coût supplémentaire dans l'ensemble du processus de conception.

Toutefois, ces problèmes deviennent plus sérieux pour le cas des composants complexes et les pièces de forme libre.

Dans ce travail, une étude comparative entre deux méthodes d'optimisation a été proposée. L'objectif de cette approche est d'optimiser la localisation des éléments d'appuis sur différents types de pièces. Les méthodes d'optimisation choisies pour cette étude sont la fonction `fmincon` de Matlab et les algorithmes génétiques (ga).

Les résultats de cette étude montrent que la méthode AG est la plus robuste vis-à-vis à la fonction `fmincon`.

Nous espérons que la méthode proposée pourra être utile pour optimiser les étapes de conception, réduire le coût et augmentant ainsi l'efficacité du processus de développement des montages d'usinage.

**Mots clés :** Montage d'usinage, localisation des éléments d'appuis, optimisation, algorithmes génétiques

## Abstract:

The design and manufacture of machining fixtures in industry today is still highly dependent on human expertise. Machining fixture designers have not yet fully used the available modeling and simulation tools to predict the behavior of fixtures. These result in a difference between the expected and final behavior of the assembly after manufacture and, consequently, a delay and an additional cost in the whole design process.

However, these problems become more serious in the case of complex components and free-form parts.

In this work, a comparative study between two optimization methods was proposed. The objective of this approach is to optimize the placement of the localization elements on different types of parts. The optimization methods chosen for this study are the `fmincon` function of Matlab and the genetic algorithms (ga).

The results of this study show that the AG method is the most robust toward the `fmincon` function.

We hope that the proposed method can be useful for optimizing the design fixture, reducing the cost and thus increasing the efficiency of the development process of the machining fixture.

**Keywords:** Machining fixture, placement of the localization elements, optimization, genetic algorithms

## ملخص:

في الصناعة، لا يزال تصميم وتصنيع تركيبات الصنع يعتمد اعتمادا وثيقا على الخبرة البشرية. لم يستخدم مصممو هذه التركيبات أدوات النمذجة والمحاكاة بشكل كلي للتنبؤ بسلوك التركيبات. مما نتج عنه اختلاف بين المتوقع والنهائي للتركيب بعد التصنيع وبالتالي تأخير وتكلفة إضافية في عملية التصميم بأكملها. إضافة إلى ذلك، تصبح هذه المشاكل أكثر صعوبة في حالة المكونات المعقدة والقطع ذات الأشكال الحرة. في هذا العمل، تم اقتراح دراسة مقارنة بين طريقتين للتحسين، الهدف من هذه المقارنة هو تحسين وضعية عناصر الإسناد في مختلف أنواع القطع. طريقتا التحسين المختارة في هذه الدراسة هما الدالة (`fmincon`) من (Matlab) والخوارزميات الجينية. تظهر هذه الدراسة أن طريقة الخوارزميات الجينية هي الأكثر قوة مقارنة بالدالة `fmincon`. نأمل أن تكون هذه الطريقة المقترحة مفيدة لتحسين مراحل التصميم، تقلل التكلفة وتزيد في فعالية مراحل تطوير تركيبات التصنيع.