

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDÈS
FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE



DÉPARTEMENT TRANSPORT ET EQUIPEMENT DES HYDROCARBURES

Mémoire de fin d'études en vue d'obtention du diplôme de Master

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Mécanique des chantiers pétrolier

Thème :

Contrôle de qualité d'une aube de turbine en exploitant la
Méthode ICP

Présenté par :

OURADJ Mohamed Abderrahmane
YAHIA Lahsene Mohamed

Devant le jury composé de :

Président : **Pr. M. GACEB**Université de Boumerdès

Examineur : **Dr. D. HALIMI**..... Université de Boumerdès

Examineur : **Dr. R. HARHOUT**..... Université de Boumerdès

Encadreur : **Dr. B. BLOUL**.....Université de Boumerdès

Année Universitaire : 2021/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDES



FACULTE DES HYDROCARBURES ET DE LA CHIMIE
DEPARTEMENT TRANSPORT ET EQUIPEMENT DES HYDROCARBURES

FILIERE : HYDROCARBURES

SPECIALITE : GENIE MECANIQUE

OPTION : MECANIQUE DES CHANTIERS PETROLIERS

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Thème :

Contrôle de qualité d'une aube de turbine en exploitant la
Méthode ICP

Présenté par :

OURADJ Mohamed Abderrahmane
YAHIA Lahsene Mohamed

Avis favorable de l'encadrant :

Le : /.... /2022

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous tenons en premier lieu de remercier ALLAH, de nous avoir aidés et donnés courage pour arriver au terme de ce travail, et notamment nos familles qui nous ont soutenus avec tous les moyens pour notre réussite.

Nos remerciements les plus sincères vont à notre promoteur Mr le Dr Benattia Bloul pour ces conseils et orientations qui nous ont été d'un apport précieux durant l'élaboration de notre projet de fin d'étude. Nous rendons grâce à tous les enseignants

De notre département de transport et équipement des hydrocarbures, qui nous ont suivis durant notre cursus, et tous ceux qui

Ont contribué, à ce que ce travail prenne forme, comme nous tenons également à remercier nos amis et nos camarades de la promotion, ainsi que tous ce qui nous ont aidé de loin ou de près. Nous remercions chaleureusement les membres du jury qui nous feront l'honneur d'examiner notre travail

Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes cher parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien, leur

*Encouragement et leur présence à mes côtés a toujours été ma source De force
pour affronter les différents obstacles.*

A mes deux chères sœurs Bouchera, Ouassila et mon chère neveu Mohamed,

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

*A mes chères amies et camarades Ahmed et Mohamed, pour les souvenirs que
nous emporterons avec nous.*

*A mon chère binôme Mohamed qui était comme un grand frère, je le remercie
pour tout.*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du
secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

Ouradj Mohamed Abderrahmane

Dédicaces

Je dédie ce projet

A ma très chère mère : Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père : Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A ma grande chère sœur, Toutes mes sœurs et mon frère Puisse Dieu vous donner santé, bonheur, courage et surtout réussite

A mes chères amis colocataires Abderrahmane, Mohamed, Ahmed, Adnan, Pour nos moments inoubliables, leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.

A mes chères : Mon ami Amin qui m'a soutenu dans mon parcours académique

A mon chère binôme Abderrahmane ; Pour son entente et sa sympathie.

A tous mes collègues de groupe MAcp17 ; Que dieu vous accorde la réussite.

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Nahia Lahsene Mohamed

Sommaire

Introduction générale

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

Chapitre I :

Généralité d'inspection des aubes de turbine leurs vérifications

I.1	Historique de la turbine	2
I.2	Généralité sur les turbines	3
I.2.1	Définition	3
I.3	Turbine à gaz	4
I.3.1	Définition	4
I.3.2	Principe de fonctionnement.....	4
I.3.3	Classification de turbine à gaz	5
I.3.4	Avantages et inconvénients des turbines à gaz.....	6
I.4	Aubages	6
I.4.1	Grille d'aubes	7
I.4.2	Détail d'aubes.....	8
I.4.3	Catégories des aubes	8
I.4.3.1	Les aubes de rotor	8
I.4.3.2	Aubes de stator.....	9
I.5	Fabrication des aubes.....	10
I.5.1	Fraisage d'aube de turbine	10
I.5.2	Moulage des aubes de turbine à gaz.....	10
I.5.2.1	Moulage au contact	10
I.5.2.2	Moulage par projection	11
I.5.2.3	Moulage sous vide	12
I.5.2.4	Moulage à cire perdue.....	13
I.6	Technique de refroidissement des aubes de turbine	14
I.7	Ingénierie inverse.....	14
I.8	Conclusion.....	17

Chapitre II :

Technologie de machine de mesure tridimensionnelle (Sans contact et avec contact)

II.1	Aperçu historique	18
II.2	Introduction	18
II.3	Métrologie tridimensionnelle	19
II.3.1	Le rôle de la métrologie dans l'entreprise	19

II.3.2	Machines à mesurer tridimensionnelles avec contact	20
II.3.3	Constitution d'un MMT à contact	20
II.3.4	Types de machines MMT	21
II.4	Machines tridimensionnelles sans contact.....	22
II.5	L'incertitude de mesure et l'erreur	22
II.5.1	L'incertitude de mesure	22
II.5.2	Incetitude type A	23
II.5.3	Incetitude type B	23
II.6	Erreur de mesurage.....	23
II.6.1	Erreur systématique ES	23
II.6.2	Erreur aléatoire EA.....	23
II.6.3	Différence entre l'erreur et l'incertitude de mesure	24
II.7	Les causes possibles des incertitudes de mesure sur un MMT.....	24
II.7.1	Erreur géométrique de la machine (MMT)	25
II.8	Mode de fonctionnement de MMT.....	26
II.8.1	Introduction	26
II.8.2	Méthode de mesure	27
II.8.3	Aspect pratique.....	27
II.8.4	Aspect théorique.....	27
II.9	Dispositif de palpage	28
II.9.1	Palpeur à contact à bille	28
II.9.2	Les Palpeurs rigides	29
II.9.3	Palpeurs de scanning	29
II.9.4	Palpeurs à déclenchement	30
II.9.4.1	Palpeur dynamique à déclenchement.....	30
II.9.4.2	Tête de palpage statique.....	31
II.9.5	Palpeur sans contact	31
II.10	Avantages et inconvénients des MMT.....	32
II.10.1	MMT à contact	32
II.10.2	MMT sans contact	33
II.10.2.1	Avantages	33
II.10.2.2	Inconvénients	33
II.11	Conclusion.....	33

Chapitre III :

L'adaptation et Calcul mathématique de superposition par la méthode ICP

III.1	Introduction	34
III.2	Courbes d'aube de gaz et leurs équations.....	34
III.2.1	Cas d'aube à action	34
III.2.2	Calcul de la section d'aube.....	35

III.2.2.1	Calcul des sections des segments de cercles S_1 et S_2	37
III.2.2.2	Calcul de la section de trapèze.....	37
III.2.2.3	Exemple typique	40
III.3	Conception de model d'aube de gaz.....	41
III.4	Nuage de points	43
III.4.1	Filtrage d'un nuage de points	43
III.5	Superposition entre le model CAO et nuage de points.....	44
III.5.1	Méthode ICP (itérative closest point).....	45
III.5.2	Variantes de la méthode ICP	45
III.5.3	Précision de la méthode de recalage.....	47
III.5.4	Applications de la méthode ICP.....	47
III.5.4.1	Application de ICP sur un surface Gauche	47
III.6	Adaptation et calcul d'erreur entre le model CAO et pièce mesurer.....	50
III.6.1	Algorithme d'ICP par Matlab.....	51
III.7	. Calcul les erreurs entre le modèle et la pièce mesurée	52
III.7.1	Méthodes	52
III.7.1.1	La programmation.....	52
III.7.1.2	Résultat de premier algorithme	53
III.7.1.3	Résultat de deuxième algorithme.....	54
III.7.2	Interprétation comparative	55
III.8	Superposition entre nuage de points et le modèle théorique	55
III.8.1	L'association 2D.....	55
III.8.2	Association 3D	56
III.9	Traitement et visualisation les défauts de l'aube de turbine gaz	57
III.9.1	Principe visualiser les défauts de forme de l'aube de turbine	57
III.9.2	Résultats de visualisation des defaults de forme	58
III.9.3	Interprétation de résultat.....	60
Conclusion générale		61

Liste des figures

<i>Figure I-1 Turbine à gaz.....</i>	<i>3</i>
<i>Figure I-2 schéma de turbine</i>	<i>3</i>
<i>Figure I-3 Principe de fonctionnement de turbine à gaz.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I-4 Classification de la turbine à gaz.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I-5 Profile d'aube de turbine à gaz.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I-6 Différents types d'aube de turbine.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I-7 Types de grille d'aubes</i>	<i>8</i>
<i>Figure I-8 Schéma délai l'aube</i>	<i>8</i>
<i>Figure I-9 Montage d'aube dans la roue du rotor</i>	<i>9</i>
<i>Figure I-10 Aube de stator et rotor</i>	<i>9</i>
<i>Figure I-11 Usinage d'une aube de turbine sur la machine cinq axes</i>	<i>10</i>
<i>Figure I-12 Moulage au contact.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I-13 Moulage par projection.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I-14 Schéma de moulage sous vide.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I-15 Principe de Moulage à cire perdue.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I-16 Organigramme représente les différentes méthodes de refroidissement</i>	<i>14</i>
<i>Figure I-17 Processus de prototypage rapide.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure II-1 : Graphe schématisé la métrologie.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure II-2 : Schéma définit les sous-ensembles de MMT.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II-3 : Machine de mesure tridimensionnelle</i>	<i>22</i>
<i>Figure II-4 : illustration de la déférence entre l'erreur et l'incertitude.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure II-5 Diagramme cause-effet de l'erreur de mesure</i>	<i>25</i>
<i>Figure II-6 Erreurs géométriques de la MMT.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure II-7 Principe de palpage</i>	<i>27</i>
<i>Figure II-8 Synoptique schématise la méthode de mesurée pièce par MMT</i>	<i>28</i>

<i>Figure II-9 Bras poly-articule et le palpeur rigide</i>	<i>29</i>
<i>Figure II-10 Processus de mesurage avec un palpeur rigide.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure II-11 Scan du profil.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure II-12 Tête de palpation dynamique</i>	<i>30</i>
<i>Figure II-13 Palpeur dynamique à déclenchement</i>	<i>30</i>
<i>Figure II-14 tête de palpeur statique</i>	<i>31</i>
<i>Figure II-15 Camera CCD (lumière structurée).....</i>	<i>32</i>
<i>Figure II-16 Palpeur laser (Zephyr II)</i>	<i>32</i>
<i>Figure III-1 Décomposition de l'aube à action profil</i>	<i>34</i>
<i>Figure III-2 Profil d'aube a action.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure III-3 Conception d'aube de turbine à gaz par SolidWorks.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure III-4 Format STL d'aube de gaz.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure III-5 Nuage de points d'aube de turbine à gaz (droite, front, Top, 3D)</i>	<i>43</i>
<i>Figure III-6 Etapes de filtrage dans CAO.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure III-7 Nuage de points d'aube de gaz après le filtrage.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure III-8 Appariement des points les plus proches appartenant à une courbe</i>	<i>45</i>
<i>Figure III-9 Point le plus proche au plan tangentiel à une surface dans un point connu .</i>	<i>46</i>
<i>Figure III-10 Un échantillonnage favorisé par rapport à l'échantillonnage uniforme</i>	<i>46</i>
<i>Figure III-11 Profils des surface (modèle, data).....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III-12 Position finale superposition (après 15 itérations)</i>	<i>49</i>
<i>Figure III-13 Position initiale</i>	<i>49</i>
<i>Figure III-14 Evolution de l'erreur résiduelle de distance pour l'algorithme ICP</i>	<i>50</i>
<i>Figure III-15 Modèle et data</i>	<i>51</i>
<i>Figure III-16 Evolution de l'erreur de distance.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure III-17 Evolution de l'erreur en fonction de temps.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure III-18 Evolution de l'erreur de distance.....</i>	<i>54</i>

<i>Figure III-19 Evolution de l'erreur en fonction de temps.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure III-20 Association après 5 itérations</i>	<i>55</i>
<i>Figure III-21 Après 10 itérations.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure III-22 Association finale (après 25 itérations).....</i>	<i>56</i>
<i>Figure III-23 Association après 5 itérations</i>	<i>56</i>
<i>Figure III-24 Après 10 itérations.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure III-25 Association finale (après 25 itérations).....</i>	<i>57</i>
<i>Figure III-26 Analyses de déviation entre les points d'aube</i>	<i>58</i>
<i>Figure III-27 Analyses de déviation entre les surfaces d'aube (3D view)</i>	<i>59</i>
<i>Figure III-28 Analyses de déviation entre les surfaces (left view)</i>	<i>59</i>
<i>Figure III-29 Top view</i>	<i>59</i>
<i>Figure III-30 Front view.....</i>	<i>60</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau I-1 : les avantages et les limitants de moulage au contact.....</i>	<i>11</i>
<i>Tableau I-2 : les avantages et limitants de moulage par projection</i>	<i>12</i>
<i>Tableau I-3 : Les avantages et limitants de moulage sous vide</i>	<i>12</i>
<i>Tableau II-1 : Avantages et les limitants de palpeur à contact</i>	<i>32</i>
<i>Tableau III-1 Caractéristiques de matière de l'aube.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau III-2 : Nuage de points du model.....</i>	<i>48</i>
<i>Tableau III-3 Deux algorithmes utilisé</i>	<i>52</i>

Introduction générale

L'hydrocarbure est toujours, à ce jour, une ressource naturelle indispensable à l'homme qui l'utilise dans son quotidien, c'est ce qui fait l'industrie pétrolière traitée de la chaîne industrielle du pétrole et du gaz du gisement jusqu'au consommateur, L'industrie pétrolière contient une grande chaîne des équipements commencer à partir de forage en passant par production et transport se terminer par traitement et consommation, de ces Équipements il y'a un mécanisme appelle turbomachine. D'une manière générale, les turbomachines peuvent être définies comme des appareils permettant un échange d'énergie entre un fluide et un dispositif mécanique. L'énergie motrice du système pouvant être aussi bien fournie par le fluide que par le dispositif mécanique, la famille des turbomachines est composée par les compresseurs, pompes, turbine, c'est trois dispositifs sont le plus commun dans les domaines pétroliers.

Une turbine à gaz industrielle est une machine thermique qui convertit l'énergie chimique d'un carburant en une énergie mécanique en utilisant l'air comme moyen de conversion. Cette énergie mécanique peut être utilisée pour entraîner plusieurs types d'équipement rotatifs. Les arbres de turbine sont utilisés comme force motrice pour un groupe compresseur ou comme entraînement mécanique pour une charge mécanique telle qu'un compresseur à gaz ou une pompe à eau de puissance, sa c'est grâce aux aubes disposées autour des arbres tournant à grande vitesse. L'aube est un élément vital de la turbine à gaz, il joue un rôle très important dans le fonctionnement de celle-ci, la turbine comporte un ensemble d'aubes fixés sur le corps de la turbine appelé stator et un ensemble d'aubes mobile montés sur l'arbre tournant appelé rotor, ces aubes mobiles permettent de produire l'énergie cinétique à partir de fluide, qui sera convertie en énergie mécanique capable de générer le mouvement nécessaire sur l'arbre rotatif lié à l'alternateur. Pour cela une bonne conception des aubes permet d'avoir un bon rendement et une grande efficacité, pour produire le maximum d'énergie mécanique. Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur la turbine à gaz et son principe de fonctionnement et leur classification, puis nous avons abordé l'aubage avec ces différents types, catégories et aussi fabrication, finalement nous parlons de « reverse engineering » et technique de prototypage rapide.

Le deuxième chapitre, présente la métrologie tridimensionnelle à savoir : contact et sans contact avec son mode de fonctionnement et ces incertitude et erreur de mesurage, enfin nous présentons le dispositif de palpé et finissons par les avantages et les limitants.

Dans le troisième chapitre nous traitons un contrôle de qualité d'une aube de turbine en exploitant une méthode de « la mise en correspondance » ou bien association appelle ICP pour l'adaptation entre le modèle théorique qui obtenu par conception assisté par ordinateur (SolidWorks) et le nuage de points obtenu par numérisation de MMT. A la fin du mémoire une conclusion et perspective son développée.

I. Chapitre I

Généralités d'inspection des aubes de turbine leurs vérifications

I.1 Historique de la turbine

Parmi les précurseurs de la turbine à gaz moderne, on doit mentionner, en premier lieu, les inventeurs de moteurs thermiques fonctionnant avec un gaz permanent bien que ces moteurs aient été conçus d'après le principe des machines à vapeur à piston. Ces inventions ont en effet permis de déterminer les différentes transformations qui doivent être subies par un gaz permanent servant de fluide moteur, transformation dont l'ensemble forme le cycle thermodynamique de la turbine à gaz. D'ailleurs, certains cycles portent encore à présent le nom de leur inventeur tel que les cycles de joule etc...

1791 : le premier brevet relatif à la turbine à gaz fut décerné à John barber en Angleterre, l'installation comportée un générateur de gaz muni d'un réservoir intermédiaire, des compresseurs à piston, une chambre de combustion et une turbine alimentée du mélange gazeux sortant de cette chambre.

1861 : le brevet de Mennons décrit une turbine à gaz dont la conception se rapproche des turbines à gaz moderne à circuit ouvert. La compression était réalisée dans un compresseur centrifuge et la détente de gaz chaude dans une turbine radiale à un seul étage, un récupérateur de chaleur et une chambre à combustion prévue pour fonctionner avec des combustibles solides.

1884 : c'est Parsons qui prévoit pour la premier fois, l'emploi d'un compresseur et d'une turbine comportant chacun plusieurs étages, les aubes de la turbine pouvaient être refroidies par une circulation d'eau.

1895 : le brevet de Curtis prévoit aussi un refroidissement de la turbine au moyen d'une circulation d'eau, mais dans ce dernier cas, la turbine est de type à chutes de vitesse.

1905 : une étape importante dans la réalisation industrielle d'une turbine à gaz a été constituée par la turbine d'Armengaud et Lemale construite par la société des turbomoteurs à Paris. (Caractérisée par un rendement faible de 3%)

1908 : pour palier à ce faible rendement du principalement au mauvais rendement des compresseurs, sur l'idée de Holzwarth de munir la turbine d'une chambre de combustion alimentée avec de l'air à pression atmosphérique, la société Korting de Hanovre a construit la turbine à explosion

1933 : Brown, Boveri et Cie a construit la turbine Holzwarth avec une alimentation en air soumise à une compression préalable de 3 bars. Depuis l'évolution des turbines à gaz à explosion a connu une multitude de difficultés du au fonctionnement discontinu et elle fut abandonnée avec l'arrivée de la 2^{ème} guerre mondiale.

1939 : les progrès importants réalisés dans le principe de la suralimentation des moteurs, ont abouti à la création de la première turbine à combustion destinée à la production d'énergie électrique. Cette turbine construite par Brown Boveri et Cie a été présentée à l'exposition nationale Suisse à Zurich, elle était alimentée par des gaz à la température de 550°C, sa puissance utile 4 MW et son rendement 17%.

1944 : Turbine à gaz pour la propulsion marine (Elliot).

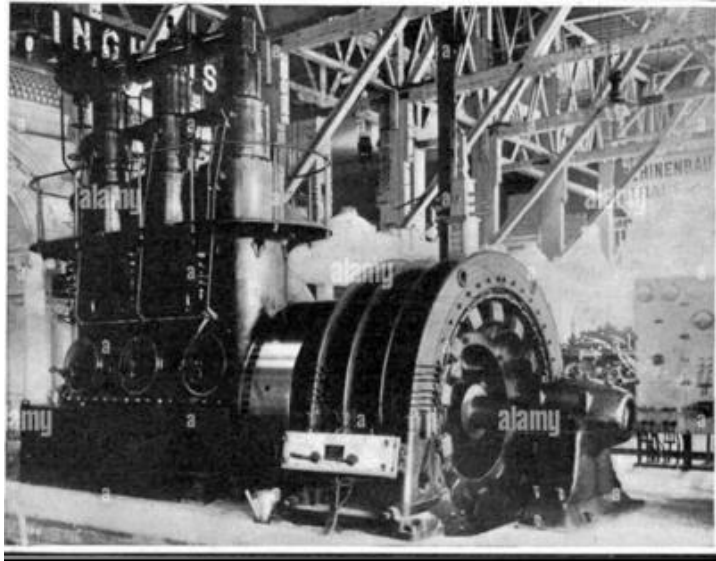


Figure I-1 Turbine à gaz

I.2 Généralité sur les turbines

I.2.1 Définition

Une turbine est un dispositif rotatif qui convertit une partie de l'énergie interne d'un liquide (état liquide ou gazeux) en énergie mécanique grâce aux aubes (pales) disposées sur un arbre tournant à grande vitesse.

Selon le type de fluide utilisé, on dit fluide actif ou fluide moteur, on a affaire à une turbine hydraulique, à une turbine à vapeur ou à une turbine à gaz. Plus généralement, c'est un organe qui permet à un fluide de se dilater en captant son énergie sous forme mécanique. La figure (02) représente un schéma générale turbine

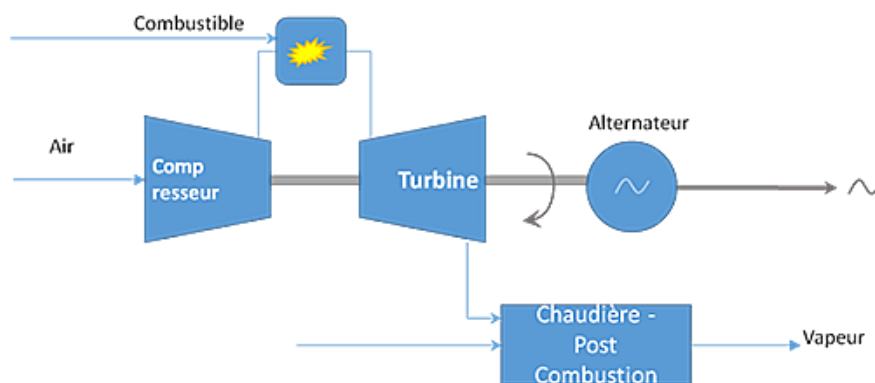


Figure I-2 schéma de turbine

I.3 Turbine à gaz

I.3.1 Définition

Une turbine à gaz (nom historique), également appelée turbine à combustion ou parfois turbine à gaz à combustion, est un type de machine tournante thermodynamique de la famille des moteurs à combustion interne, dont le rôle est de produire de l'énergie thermique est générée sous forme de rotation d'un arbre, directement à partir de l'énergie cinétique du gaz produit par la combustion d'hydrocarbures (fioul, gaz...) en détente dans la turbine. Le comburant, généralement de l'air ambiant, est généralement comprimé avant d'entrer dans la chambre de combustion, à l'aide d'un compresseur rotatif entraîné par le même arbre que la turbine.

Le mot "gaz" dans l'ancien nom "turbine à gaz" (le plus longtemps utilisé le plus largement) fait référence à la nature gazeuse des produits de la combustion comme dans le Sahara ou bien le Domain des hydrocarbures en utilise les turbines à gaz cela est dû à la disponibilité des produits de la combustion de nature gazeux, par opposition à une turbine à vapeur dans laquelle fonctionne un fluide (vapeur d'eau). Un liquide.

Une turbine à réaction est une turbine à gaz spécifique qui utilise le principe de la réaction pour propulser certains types d'avions rapides.

I.3.2 Principe de fonctionnement

Une turbine à gaz est un moteur à combustion interne qui prélève et comprime l'air atmosphérique, généralement dans son propre compresseur, augmentant la puissance énergétique de l'air dans sa chambre de combustion, et convertit cette puissance en énergie mécanique utile lors du processus de détente qui se produit dans la partie de turbine. L'énergie mécanique générée est transmise par l'accouplement à la machine réceptrice, qui génère industriel. (Voir la figure 03)

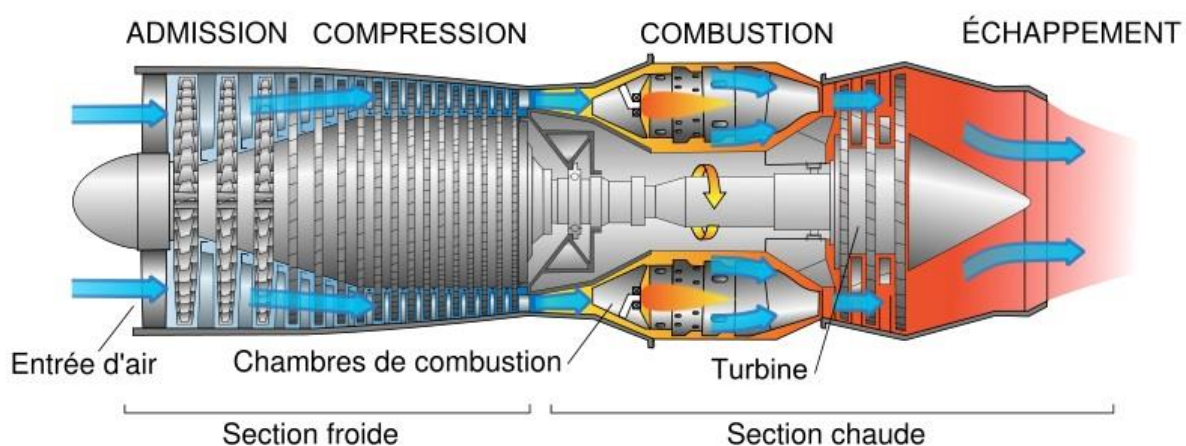


Figure I-3 Principe de fonctionnement de turbine à gaz

D'autre façon, Une turbine à gaz fonctionne suivante ces étapes :

- Admission : elle extrait de l'air du milieu environnant.
- Compression : elle le comprime à une pression plus élevée.
- Combustion : elle augmente le niveau d'énergie de l'air comprimé en ajoutant et en brûlant le combustible dans une chambre de combustion.
- Détente : elle achemine l'air à pression et à température élevées vers la section de la turbine.
- Échappement : elle décharge à l'atmosphère les gaz à basse pression et température.

I.3.3 Classification de turbine à gaz

On peut le diviser selon les différents points suivants :

- Par mode de travail.
- Par mode de fonctionnement thermodynamique.
- Par mode de construction.

L'organigramme ci-dessus montre les classifications de turbine à gaz selon les points mentionnés précédemment. (La figure 04).

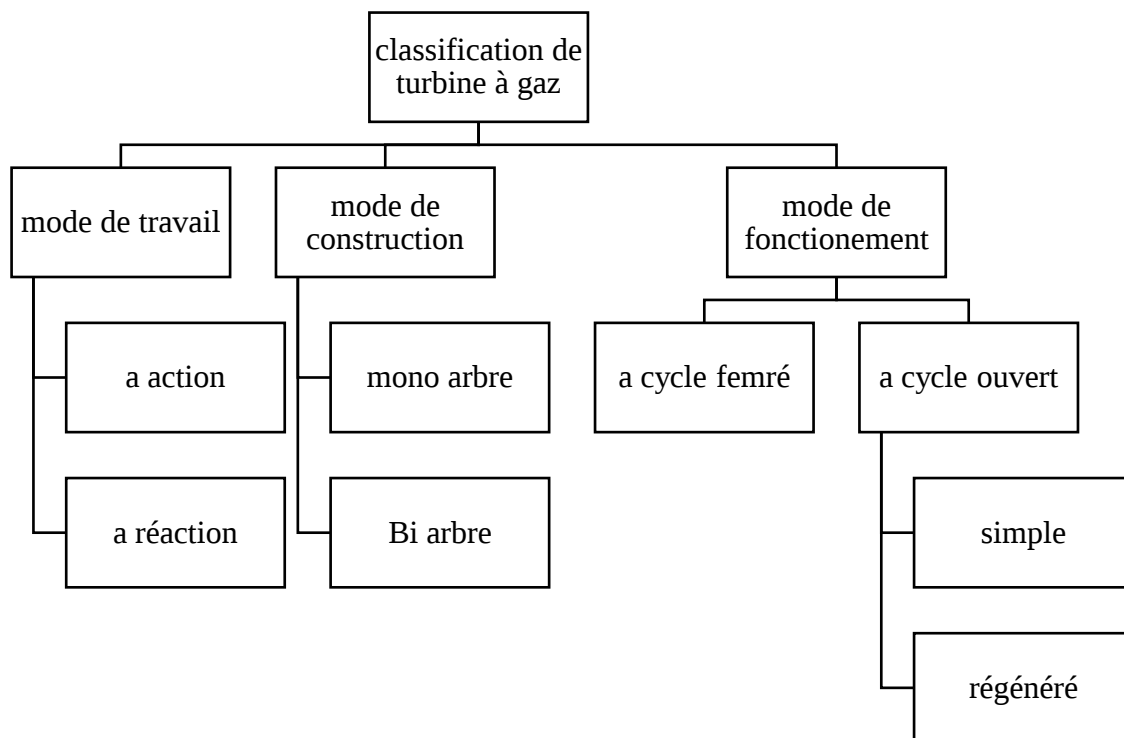


Figure I-4 Classification de la turbine à gaz

I.3.4 Avantages et inconvénients des turbines à gaz

I. Les avantages

Les turbines présentent de nombreux avantages par rapport aux autres types de moteurs. Sa plus grande caractéristique est son rapport poids/puissance élevé. Cela la rend Turbine à gaz ou turboréacteur, moteur d'avion préféré. Par rapport au moteur à piston Alimentées à l'essence, les turbines fonctionnent avec un carburant moins cher et plus sûr. Relativement Par rapport aux moteurs alternatifs, le fonctionnement sans vibration de la turbine rend Plus populaire dans les avions. Moins de vibrations réduit la charge sur la batterie. Exister Un navire de guerre, l'absence de vibrations à basse fréquence des turbomachines les rend Préférable aux moteurs diesel car les sous-marins sont moins bruyants pour les ramassages prolongés Portée.

- Poids inférieur (15 t. pour le module LM2500)
- Montée en puissance très rapide
- Facilité d'entretien (échanges standard d'éléments)

II. Les inconvénients

Les turbines présentent certains inconvénients. Car ce sont des moteurs Haute performance, de nombreuses pièces sont soumises à de fortes contraintes. Un mauvais entretien et un manque d'attention aux détails des procédures maintenance conduiront à Affecte négativement les performances du moteur et peut provoquer une panne du moteur. Une note de crayon sur une pale de turbine de compresseur peut entraîner la défaillance de ce dernier. La plupart des systèmes de commande (contrôle) de propulsion des turbomachines sont très complexes et de nombreux paramètres et conditions de fonctionnement doivent être surveillés. Ce système de contrôle doit réagir rapidement aux conditions de fonctionnement de la turbine pour ne pas perdre l'équipement.

On peut site autre inconvénients :

- Consommation spécifique plus élevée que les moteurs diesel (235 g/kWh à 25 °C)
- Sensible à la température ambiante (LM 2500 : 23000 kW à 25 °C et 21000 kW à 35 °C)
- Volumes importants des conduites d'arrivée d'air et d'échappement des gaz
- Nécessité d'un compresseur et d'une pompe à combustible

I.4 Aubages

L'aube est une partie de la turbine en forme de cuillère ou de lame, sur laquelle l'action de fluide est appliqué. Une turbine comporte un certain nombre d'aubes uniformément réparties sur sa circonférence. Les aubes sont définies comme des obstacles profilés immergés dans l'écoulement qui forment entre eux les canaux par lesquels s'écoule le fluide. Spécialement conçu pour assurer un débit capable de fournir un travail mécanique. Comme une aube à deux faces : supérieure et inférieure (l'extrados et l'intrados voire la figure 05), le fluide est déviée dans les rainures du rotor provoquant une différence de pression sur les faces supérieure et inférieure. Dans le fonctionnement des turbines industrielles, la génération d'explosions revêt une grande importance économique, d'où la nécessité de faire appel à différentes disciplines

comme l'aérodynamique. Résistance des matériaux, propriétés physiques des vibrations pour obtenir des pales optimales en termes de profit global (voir la figure 6)

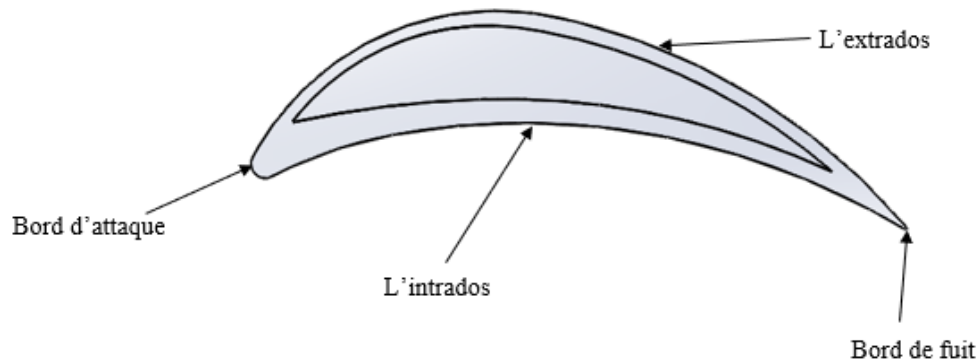


Figure I-5 Profil d'aube de turbine à gaz



Figure I-6 Différents types d'aube de turbine

I.4.1 Grille d'aubes

On appelle une grille d'aubes l'ensemble des obstacles (fixe ou mobile) profilés les uns des autres par un déplacement géométrique, L'écoulement du fluide et pour échanger avec lui les efforts mécanique. La vitesse du fluide par rapport à chaque grille d'aubes fixes ou mobiles d'une turbine axiale est définie par trois vecteurs différents V , W , U qui représentent respectivement les vitesses, absolue et relative de fluide ainsi que la vitesse d'entraînement de l'aube.

Le courant de fluide provient de distributeur avec un vitesse absolu V , les aubes suivant la vitesse tangentielle (d'entraînement) U et la somme de ces deux vitesses résulte la vitesse relative W .

Il existe plusieurs types de grille tel que : (voir la figure 7)

- La grille plane parallèle.
- La grille cylindrique de la turbine axiale.
- La grille radiante de la turbine radiale

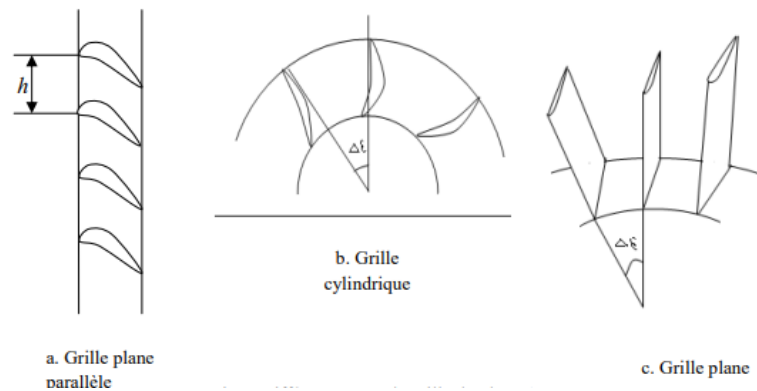


Figure I-7 Types de grille d'aubes

I.4.2 Détail d'aubes

Ci-dessous deux sortes d'ailettes avec pied de sapin. A droite l'ailette porte un talon. L'ensemble de ces talons forment une couronne. Face à cette couronne est fixé sur l'anneau extérieur ou les demi-carters un joint abradable, ce qui permet d'améliorer l'étanchéité et donc d'augmenter le rendement de la turbine. (Schéma de figure 8)



Figure I-8 Schéma détaillé de l'aube

I.4.3 Catégories des aubes

I.4.3.1 Les aubes de rotor

Comme une aile, une aube est composée d'un bord d'attaque d'une âme et d'un bord de fuite, et son profil est optimisé pour respecter le domaine d'utilisation de l'étage du compresseur auquel elle appartient. (Voir la figure 10)

Il y a différentes technologies de liaison entre le disque (roue) et l'aube suivant les constructeurs et les compresseurs. En voici quelques unes.

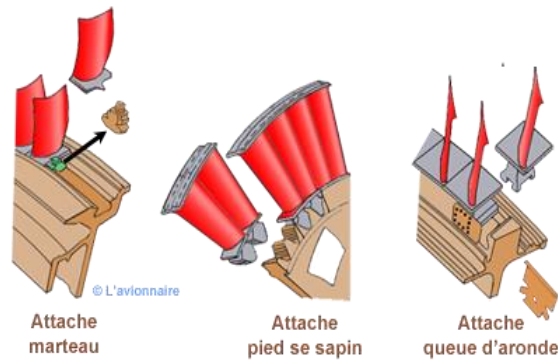


Figure I-9 Montage d'aube dans la roue du rotor

I.4.3.2 Aubes de stator

Comme les aubes de rotor, les pales de stator ont également une forme de profil aérodynamique. De plus, l'angle d'attaque des aubes du stator peut être fixe ou variable. Ces aubes à calage variable sont portées par le carter du stator et peuvent être positionnées autour de leur axe pour optimiser le flux (l'écoulement) de gaz. L'angle d'attaque des aubes est commandé en fonction des conditions de fonctionnement par un système d'asservissement qui commande le mouvement de la couronne tournante, qui est située à l'extérieur du carter et est reliée aux dites aubes par des biellettes respectives. Le système d'asservissement peut être électrique, pneumatique ou hydraulique et il est contrôlé par l'unité de contrôle du carburant. (Voir la figure 10)

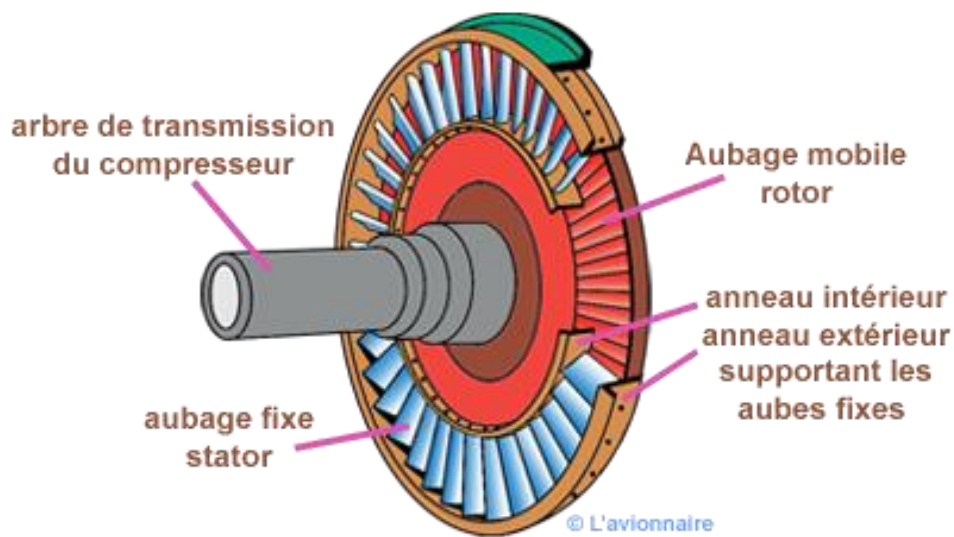


Figure I-10 Aube de stator et rotor

I.5 Fabrication des aubes

La compétitivité de l'usinage d'aubes de turbines à gaz et à vapeur est un défi car ces pièces regroupent la plupart des caractéristiques les plus difficiles à usiner

- L'usinabilité des matières dans lesquelles sont faites les pièces est variable (certaines matières nécessitent des plaquettes spécifiques),
- Des quantités très importantes de matière doivent être enlevées et de bons états de surface doivent être produits (sans effets négatifs sur les aubes, notamment des contraintes résiduelles),
- La forme des pièces est complexe (certaines aubes demandent une programmation FAO avancée avec les meilleures méthodes),
- Les aubes sont sujettes aux vibrations pendant l'usinage (pièces longues et minces qui demandent des outils avec une coupe légère capables d'absorber les vibrations),
- L'efficacité de la production est importante (production en grands volumes),
- Plusieurs outils sont nécessaires et ils doivent être appliqués correctement (du simple surfacage au profilage avec 4 ou 5 axes voire la figure au-dessus).

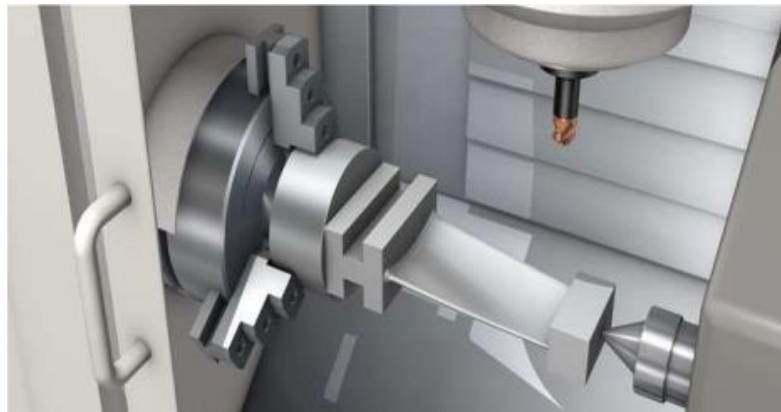


Figure I-11 Usinage d'une aube de turbine sur la machine cinq axes

I.5.1 Fraisage d'aube de turbine

Les aubes des turbines sont fraisées avec une précision de forme de l'ordre du centième de millimètre.

- Ébauche de brut quelconque 3D
- Usinage en bout d'aube de turbine 5 axes
- Usinage en roulant d'aube de turbine 5 axes

I.5.2 Moulage des aubes de turbine à gaz

I.5.2.1 Moulage au contact

Le processus manuel de production de pièces à partir de résines thermodurcissables, Température ambiante et pas de pression. Le matériau de renfort est déposé sur le moule et imprégné Résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée. (Voir la figure 12)

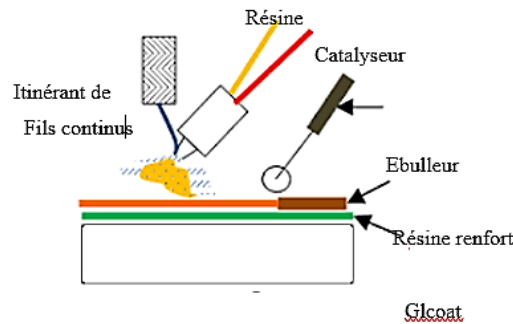


Figure I-12 Moulage au contact

Les avantages	Les limitant
Très larges possibilités de forme. Pas de limite dimensionnelle. Une surface lisse, gel coartée (aspect, tenue à la corrosion) Propriétés mécaniques moyennes à bonnes Investissements spécifiques très faibles. Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne.	Une seule face lisse. Nécessité de finition (Détourage, perçage, etc....) Qualité tributaire de la main d'œuvre. Faible cadence de production par moule. Espace de travail important. Conditions de travail médiocres

Tableau I-1 : les avantages et les limitants de moulage au contact

I.5.2.2 Moulage par projection

Procédés manuels ou robotisés permettant de produire des pièces en résine Thermodurcissable à température ambiante et sans pression. La matière première est Implémenté à l'aide d'un appareil de projection contient :

La figure 13 schématise le moulage par projection :

- Un dispositif de coupe
- Projection du renfort
- Un ou deux pistolets projetant simultanément la résine
 - A : alimentation du premier composant,
 - B : alimentation du second composant,
 - C : alimentation en air sous pression,
 - D : alimentation en fibres,
 - E : pistolet de découpe de fibres et de pulvérisation des deux composants et des fibres découpées.

Avantages	Limitants
Très larges possibilités de forme et dimensions. Travail simplifié, suppression de la mise en Forme obtenue directement par la projection. •Productivité plus élevée qu'au contact. •Investissements très modérés. •Moules simples, peu onéreux. Rapides à Réaliser en interne.	Une seule face lisse. Propriétés mécaniques moyenne. Qualité tributaire de la main d'œuvre. Conditions de travail très médiocres si absence d'agencements nécessaires.

Tableau I-2 : les avantages et limitants de moulage par projection

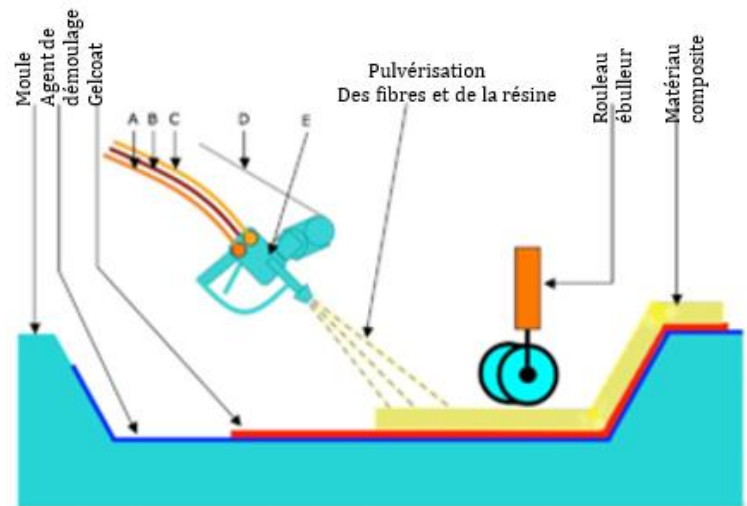


Figure I-13 Moulage par projection

I.5.2.3 Moulage sous vide

Moulage sous vide entre moules et contre-moules rigides, semi-rigides ou souples. Dépend de la technologie utilisée. Des matériaux de renfort (nattes, tissus, préformes) sont placés à l'intérieur du moule, la résine catalytique est versée vers le renfort. La pression appliquée au moule pendant le processus de mise sous vide est utilisée pour la résine est distribuée et le renfort est imprégné. (La figure 14).

Dans ce tableau on a aussi cité quelques avantages et limitants

Les avantages	Les limitants
Deux faces lisses, éventuellement gelcoatées Qualité non tributaire de la main d'œuvre. Qualité constante. Bonne cadence de production Nécessite peu de surface	Possibilités de formes plus réduites qu'au contact. Mise au point parfois difficile.

Tableau I-3 : Les avantages et limitants de moulage sous vide

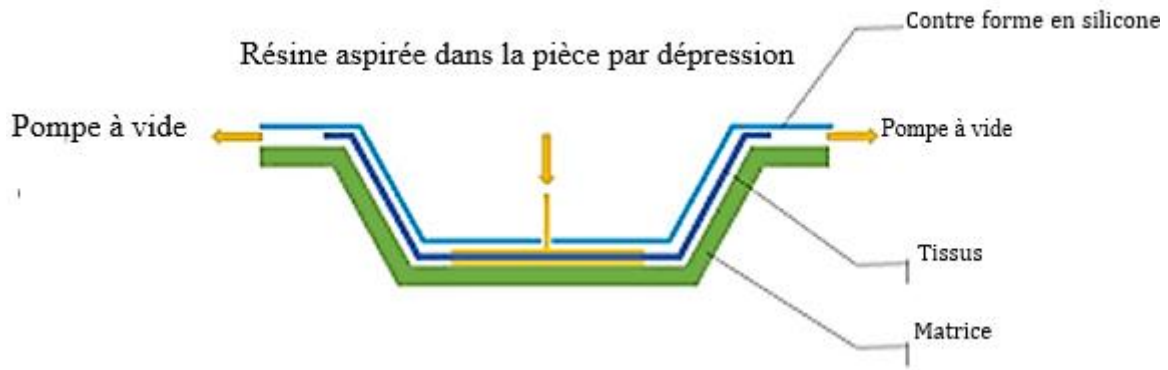


Figure I-14 Schéma de moulage sous vide

I.5.2.4 Moulage à cire perdue

La fonderie à cire perdue ou la fonderie de modèles non permanents sont issues de métier d'art, où le besoin de répliquer des objets métalliques est nécessaire (reproduction de sculpture en bronze). L'industrie est rapidement intéressée au procédé, ce qui lui a permis de prendre forme très complexe et difficile à passer par le processus de fonderie (sable, moule permanent...) ou usinage classique. En effet, le procédé à cire perdue consiste à fabriquer un moule en céramique (boîtier) qui entoure une pièce de modèle, généralement en cire. Cette coquille, Partiellement vidé du modèle et rempli de métal liquide. Lorsque le métal se solidifie, Le boîtier est cassé pour récupérer les pièces métalliques.

Ce procédé permet ainsi de mouler des pièces pour lesquelles la réalisation d'un moule permanent pour la fonderie serait très complexe et donc coûteuse.

Procédé de précision, les caractéristiques dimensionnelles des pièces, mais surtout d'état de surface sont supérieures aux autres procédés de fonderie. (La figure 15)

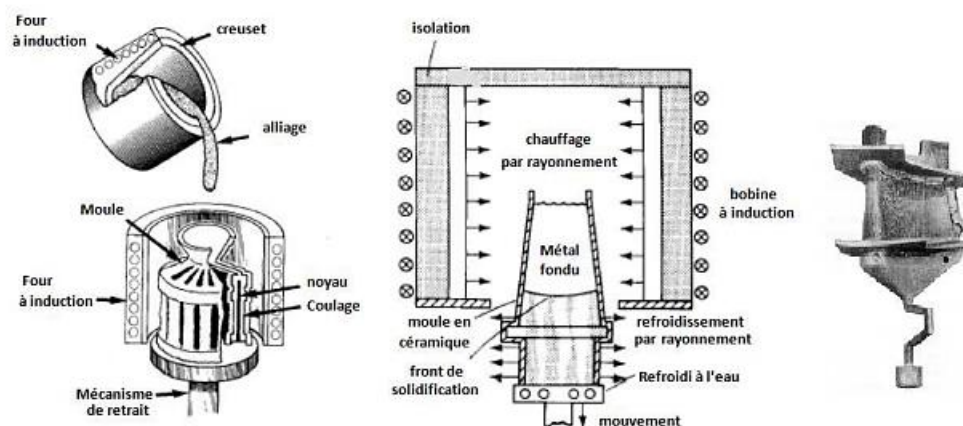


Figure I-15 Principe de Moulage à cire perdue

I.6 Technique de refroidissement des aubes de turbine

Dans l'organigramme suivant nous avons résumé les différents techniques et méthodes de refroidissements des aubes de turbine (voir la figure 16).

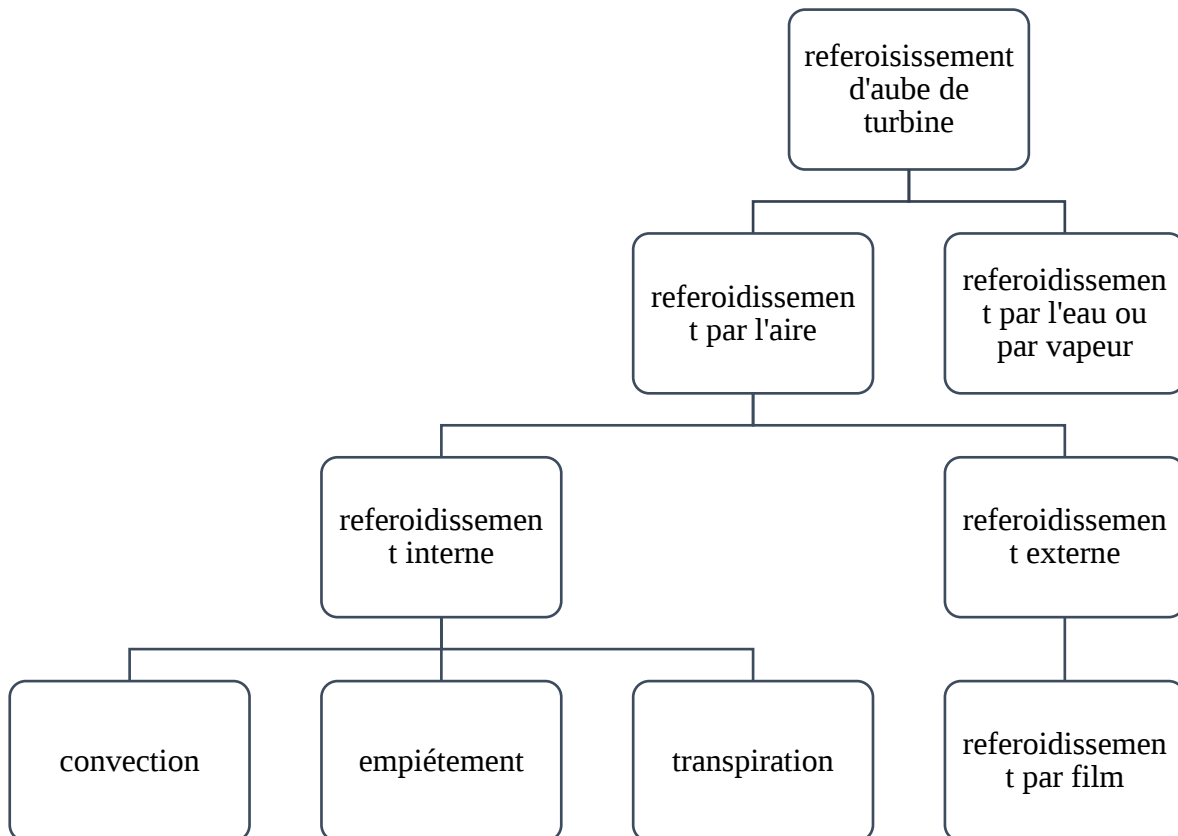


Figure I-16 Organigramme représente les différentes méthodes de refroidissement

I.7 Ingénierie inverse

Contrairement à l'ingénierie conventionnelle, qui commence par la description de ce que va faire une pièce et produit un modèle géométrique adapté à sa fabrication, la rétro-ingénierie commence par la pièce fabriquée et en produit un modèle géométrique. Une interprétation plus large du terme « ingénierie inverse » pourrait peut-être impliquer de déduire dans une certaine mesure l'intention du concepteur d'origine. Si nous disons que l'ingénierie convertit un concept en artefact, alors l'ingénierie inverse convertit un artefact en concept.

La rétro-ingénierie se limite à la qualité de la mesure et aux activités complémentaires de modélisation assistée par ordinateur. Certaines des principales limitations sont les suivantes :

- Erreurs de détection : les erreurs survenant au cours de la phase d'acquisition des données peuvent être réduites en améliorant la précision des techniques de détection. Mais la mesure sera toujours soumise à une certaine tolérance, car un capteur parfait ne peut pas exister
- Erreurs d'approximation : Selon les méthodes utilisées pour la reconstruction, certaines hypothèses sur l'ensemble de données sont faites et cela influence la façon

dont les données sont approximées. Nous appelons ces types d'erreurs des erreurs d'approximation.

- Erreur numérique : Le bruit est introduit dans le processus par des méthodes numériques
- Utilisées lors de la reconstruction. Cela peut être réduit en utilisant des méthodes numériquement plus stables, mais cela ne peut pas être évité tant que nous calculons avec Erreur numérique : Le bruit est introduit dans le processus par des méthodes numériques utilisées lors de la reconstruction. Cela peut être réduit en utilisant des méthodes numériquement plus stables, mais cela ne peut pas être évité tant que nous calculons avec des nombres à virgule flottante.
- Usure de l'objet : La surface externe des objets mécaniques est toujours soumise à l'usure. Ainsi, même lorsque nous évitons les erreurs de mesure, nous avons un accès limité à la géométrie correcte. Dans le cas des aubes de turbine, un polissage final à la main est généralement effectué sur la surface du profil aérodynamique, ce qui entraîne des erreurs géométriques inégales restant sur la pièce.
- Méthode de fabrication particulière : Les aubes de turbine sont généralement fabriquées par moulage à la cire perdue. L'analyse du processus montre qu'afin d'éviter les déviations du profil aérodynamique dans l'état final, le profil aérodynamique est parfois coulé plus grand, puis les dimensions sont affinées par un mélange. Ainsi, les erreurs de fabrication de chaque pièce diffèrent des autres. Comme autre exemple, lors de l'utilisation d'un moule pour créer une pièce, les faces latérales sont généralement légèrement tournées afin de s'assurer que la pièce peut être facilement retirée du moule.

La pratique du reverse engineering s'est généralisée dans l'industrie, tout particulièrement dans le domaine automobile pour des maquettes design, dont la définition numérique ou les plans papiers sont indisponibles.

L'utilisation de ces matériaux permet d'éventuelles formes diverses telles que des ensembles architecturaux, des statues, des formes humaines, des objets communs, des ..., mais surtout des modèles (faits manuellement) de design et de bureaux élégants. Le bureau conçu avec ces modèles doit être reconstruit numérique le plus rapidement possible. Par conséquent, les progrès réalisés dans les bureaux de conception importants augmentent, accompagnés de l'offre de matériaux croissants que le coût a fortement chuté et peut donc être accessible davantage. Le principe des systèmes d'acquisition basés sur la prise des points de la surface de l'objet sera numérisé (. Ces scores sont traités via le logiciel de reconstruction de surface pour déterminer la surface de l'objet en fonction des entités mathématiques d'objet (carreaux Béziérs, Bsplines, Nurbs). Exportation vers la CAO, des objets identifiés numériques peuvent être modifiés, adaptés à son environnement, à son architecture interne.

Des interfaces spécifiques permettent, à partir du nuage de points, de créer un maillage STL de l'objet. Le fichier peut donc être utilisé par différentes machines de prototypage rapide, ainsi que des logiciels de programmation d'usinage capables de gérer ce type de fichier. Nous avons rapidement eu plusieurs copies qui correspondaient aux originaux

Principe de la rétro-conception repose sur la collecte d'un nuage de points issu de la surface de l'objet à scanner numériquement (au moyen d'un scanner tridimensionnelle) ou à palper mécaniquement.

Ce nuage de points est traité par des fonctions CAO (Conception Assistée par Ordinateur) permettant la reconstruction de surfaces à partir desquelles un modèle paramétrique est défini par l'utilisateur et le système générateur (choix des côtes et des relations inter-cotes, tolérance...).

L'arbre de construction est ainsi redéfini dans sa majeure partie. Cette méthode n'est applicable que pour des objets CAO « manufacturables » car seules des opérations de conception (extrusion, trou débouchant...) et de fabrication (retrait, tolérances...) non virtuelles sont potentiellement acceptables pour la reproduction physique de l'objet.

La rétro-conception peut être utilisée pour diverses raisons :

- La conception originelle n'est pas supportée par une documentation suffisante ou adéquate.
- Le modèle original de CAO n'est pas suffisant pour soutenir des modifications et/ou les procédés de fabrication courante.
- Le fabricant original n'existe plus ou ne fabrique plus le produit, mais il y a des besoins pour le produit.
- Composants usés ou cassés pour lesquels il n'y a aucune source d'approvisionnement.
- Renforcement des fonctionnalités.

Amélioration de la performance et/ou les fonctionnalités de produit.

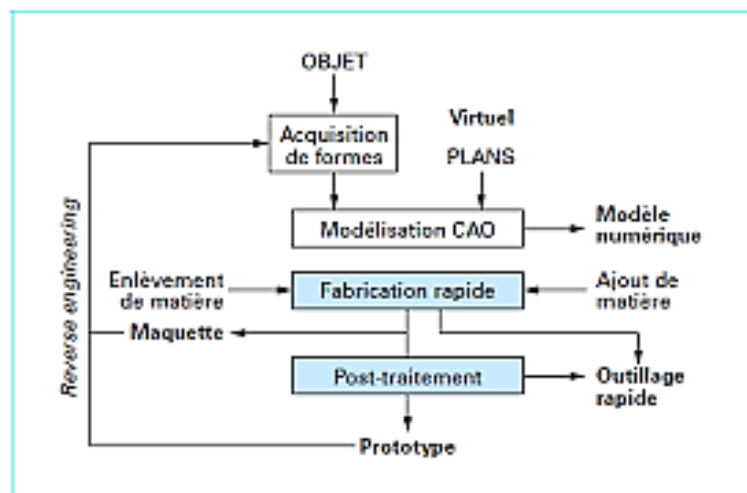


Figure I-17 Processus de prototypage rapide

I.8 Conclusion

Les turbines en générale sont des dispositifs rotatifs permet de la transformation de l'Energie interne de fluide (gaz ou liquide) à une énergie mécanique qui à son tour d'alimente une machine réceptrice (pompe, compresseur, etc...), l'aube joué un rôle important dans la turbine ou biens la transformation d'Energie (énergie de fluide à énergie mécanique) et dans la plupart des cas, les aubes ont des géométries complexes et Surface gauche ce qui rend difficile le mesure par les méthodes normales (pied coulisse etc.....), grâce à la machine de mesurer tridimensionnelle (MMT) nous pouvons mesure ce type de surface complexe, l'une du besoin de mesure de La géométrie du produit (aube) est le contrôle de qualité de ce dernier selon les norme et les condition qui son préétablie par le constructeur. Les données requises par la mesure sont Compare avec la géométrie nominale (données CAO ou pièces de base ou bien référence).

II. Chapitre II

Technologie de machine de mesure tridimensionnelle

(Sans contact et avec contact)

II.1 Aperçu historique

Les mesures dimensionnelles et géométriques représentent la grande majorité des prestations de contrôle et de métrologie de l'entreprise. Ces technologies ont connu une évolution vertigineuse au cours des trois dernières décennies grâce à l'avènement des machines de mesure 3D. Il permet de fournir des moyens de mesure efficaces et automatisés pour l'atelier de production. La machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) est née au début des années 1960 et ne s'est vraiment développée qu'après l'invention du palpeur à déclenchement par contact en 1970. Au fil des années, ils se sont développés uniquement dans la partie mécanique et uniquement dans la partie logicielle. Les principaux concepts régissant la mise en œuvre et le fonctionnement de ces machines existent depuis le début des années quatre-vingt. Pendant longtemps, les MMT ont eu leur place dans un laboratoire de métrologie dans une salle climatisée (thermiquement stable).

II.2 Introduction

Une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) est une machine utilisée dans la mesure des dimensions. (MMT) sont des unités importantes dans le contrôle de la qualité des pièces fabriquées et aussi dans le contrôle dimensionnel et géométrique des pièces mécaniques, D'autre part, ils permettent le contrôle de la conformité des pièces de forme complexe, en 3D, rapidement et avec une grande précision. Permet d'obtenir les coordonnées de points de mesure sur une pièce mécanique (mesure avec coordonnées). Les MMT doivent être fiables pour réussir leur mission dans la chaîne de production. Les pièces mécaniques testées et certifiées à l'aide de la MMT seront assemblées sur la chaîne de montage rapidement sans problème et accomplirons leur fonction tout au long de leur durée de vie prévue.

La performance de ces machines caractériser par la précision de positionnement du point de stylet par rapport aux pièces mesurer, un des causes de positionnement incorrect du point de stylet c'est l'écart cinématique associé à l'articulation des MMT.

La métrologie sur machine à mesurer tridimensionnelle s'oriente vers l'objectif de mesurer, vérifier et comparer la surface réelle à sa définition théorique pour s'assurer que ces limites tolérables ont été bien respectées lors de la phase de production.

II.3 Métrologie tridimensionnelle

II.3.1 Le rôle de la métrologie dans l'entreprise

C'est la science de la mesure. il s'agit d'une science transversale qui s'applique dans tous les domaines où les mesures quantitatives sont effectuées. la métrologie est l'ensemble des systèmes dédiés au contrôle des pièces fabriquées afin de s'assurer de la qualité et de la conformité de ces pièces, voir le graphe Ci-dessous :

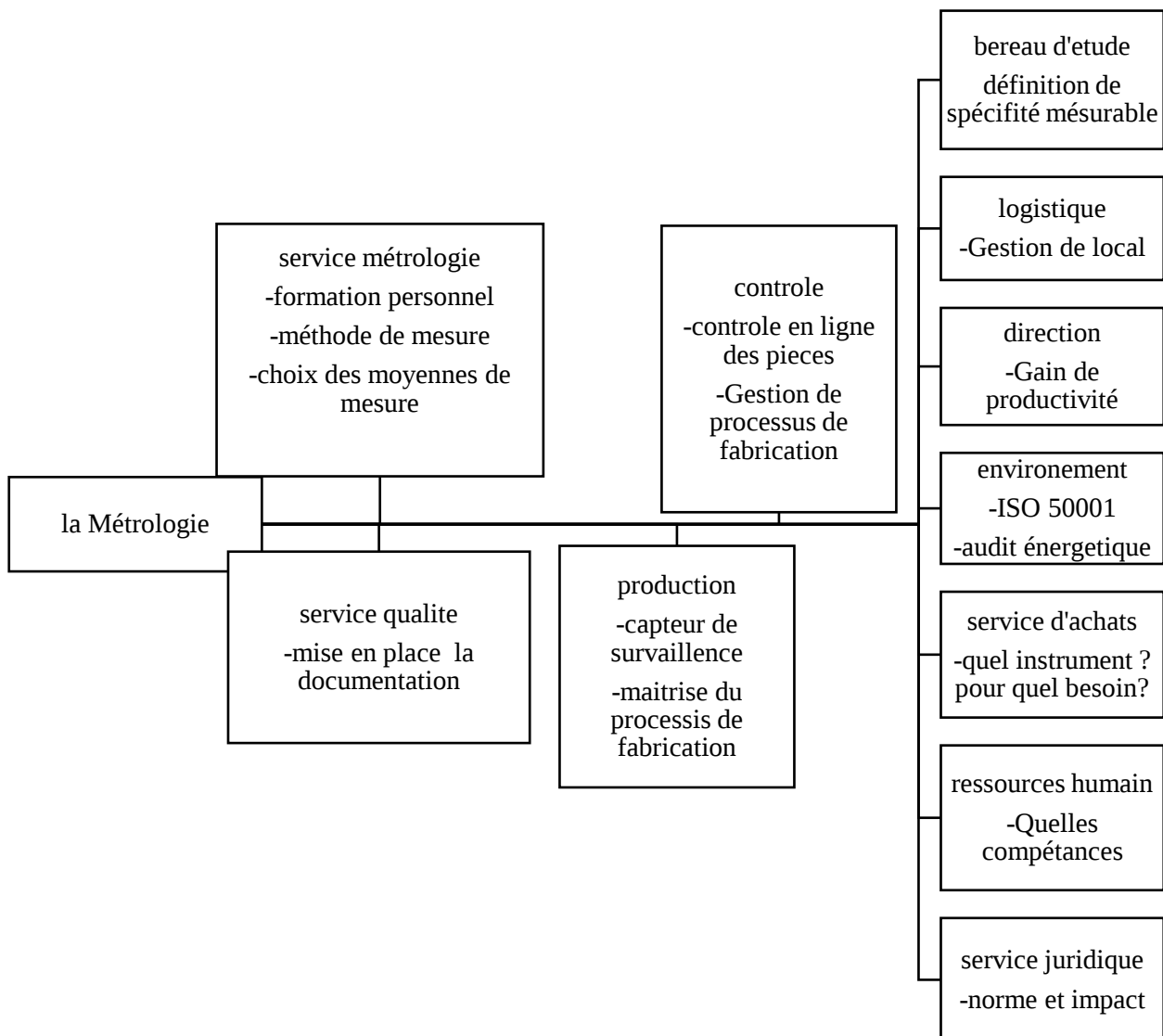


Figure II-1 : Graphe schématisé la métrologie

Les moyens de mesures 3D sont aujourd'hui complète par des techniques de mesure tridimensionnelle qui permettent d'accèdes à la géométrie des pièces mécaniques complexes avec un précision et rapidité important.

****En distinguent en 2 catégories selon le type de capteur : à contact ou sans contact.**

II.3.2 Machines à mesurer tridimensionnelles avec contact

Ces appareils sont basés sur un système de palpation vis-à-vis d'une pièce à mesurer :

La machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) est constituée en général de trois axes de mesure montés en série, un palpeur est fixé à l'extrémité du dernier axe. Il est alors possible de relever les trois déplacements du palpeur et par suite de déduire après calcul les trois coordonnées x , y , z du point de contact entre le palpeur et la surface à mesurer (géométrie de pièce).

II.3.3 Constitution d'un MMT à contact

Une MMT est constituée de 4 sous-ensembles distincts : (voir la figure 2)

- La structure de déplacement.
- Le système de palpation.
- Le système électronique.
- Le système informatique et le pupitre de commande.
- La structure de déplacement.

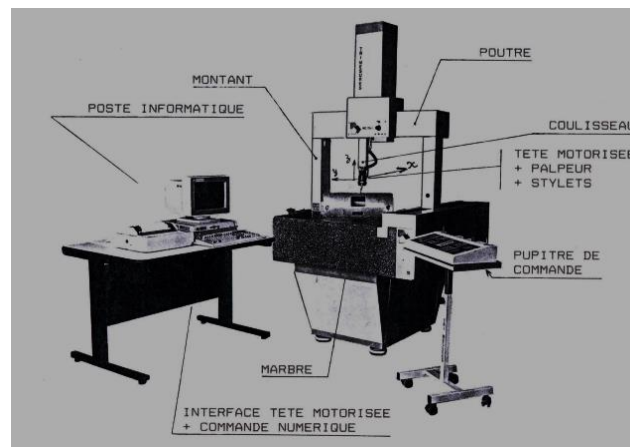


Figure II-2 : Schéma définit les sous-ensembles de MMT

Elle comprend 3 guidages en translation orthogonaux deux à deux notés X , Y et Z . Ces guidages, sans jeu ni frottements, permettent d'atteindre tous les points d'un volume parallélépipédique.

• Système de palpation

Son rôle est de détecter le contact entre le stylet et la pièce et, à cet instant, d'envoyer une impulsion au système électronique pour qu'il lise les coordonnées du point de contact sur les systèmes de mesure.

• Système électronique

Il a plusieurs fonctions essentielles :

- Recevoir les impulsions de contact en provenance de la tête de palpation
- Envoyer les ordres de lecture sur les 3 systèmes de mesure au moment du contact
- Recevoir du système informatique les ordres de mouvement pour la commande des moteurs d'axes (Machines à CN)

- Gérer les sécurités telles que pression d'air mini sur les patins aérostatiques, fins de courses des mouvements etc.

- **Système informatique et le pupitre de commande**

- Acquisition et mise en mémoire des gammes de contrôle des pièces,
- Exécution des gammes de contrôle,
- Traitement des informations et édition des résultats,
- Logiciel conversationnel permettant l'utilisation de la machine.

II.3.4 Types de machines MMT

- **Morphologie des pièces :**

Il en existe de différents types qui sont fonction de la morphologie des pièces à Mesurer, des précisions à atteindre, de la facilité d'utilisation... etc.

MMT col de cygne à plateau fixe - a - - b -	MMT à portique mobile - a - - b -
MMT pont - a - - b -	MMT à portique en L - a - - b -
MMT à portique fixe - a - - b -	MMT col de cygne à plateau mobile - a - - b -
MMT à colonne - a - - b -	MMT à bras horizontal mobile (trusquin) - a - - b -
MMT à bras horizontal à plateau fixe - a - - b -	MMT à bras horizontal à plateau mobile - a - - b -

- Commandes de MMT

- Machines manuelles :

Ce type de machine caractérisé par le déplacement manuel c'est-à-dire l'opérateur se déplace le palpeur mais ce type de machine a des inconvénients important (par exemple : la présence de l'opérateur dans chaque palpation, petite dimension, incertitude de mesurage important... etc.)

- Machines motorisées :

- opérateur commande le déplacement par une manette,
- pas de limite de dimension,
- plus faible influence de l'opérateur.

- Machines à commande Numérique :

Les axes de déplacement sont asservis en vitesse et position. La pièce est modélisée par des éléments géométriques calculés à partir des points palpés.

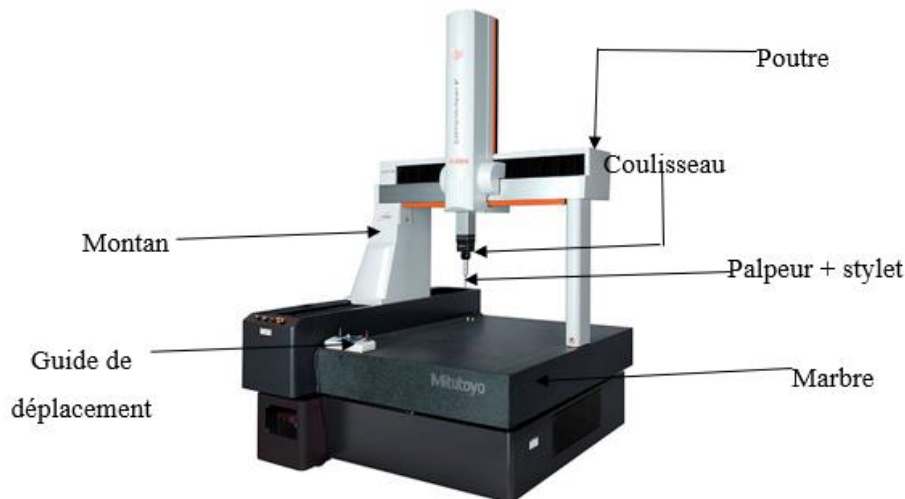


Figure II-3 : Machine de mesure tridimensionnelle

II.4 Machines tridimensionnelles sans contact

La mesure sans contact a vu son essor dans les années 1990 pour l'acquisition des pièces souples qui ne peuvent être mesurées par contact pour des raisons de flexion de la pièce durant la mesure ou d'intégrité de la pièce (surface détériorée par l'acquisition avec contact). Dans les années 2000 ces systèmes ont été plus en plus utilisés à des fins de reverse engineering (RE). Nous présentons les technologies de système de mesure de ce type plus tard.

II.5 L'incertitude de mesure et l'erreur

II.5.1 L'incertitude de mesure

En tant qu'indicateur de la qualité d'un résultat de mesure, c'est la quantification du doute, obtenue à partir du résultat d'une mesure. L'incertitude de mesure est un paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs pouvant raisonnablement être attribuées au mesurande

- Le paramètre peut être, par exemple, l'écart type (ou un multiple de celui-ci) ou la moitié de largeur d'un intervalle de confiance donné.

• L'incertitude de mesure comprend généralement plusieurs composantes. Certains peuvent être estimés à partir de la distribution statistique des résultats de la série de mesures et peuvent être caractérisés par l'écart-type expérimental. D'autres composantes, qui peuvent également être caractérisées par des écarts-types, sont évaluées en supposant des distributions de probabilité, par des informations obtenues empiriquement ou autres. Qui provoque des erreurs incertaines. Les exemples incluent les cinq éléments suivants :

- Environnement
- Méthode de mesurage
- Opérateur
- Pièce à mesurer
- Appareil de Mesure

**Ces incertitudes peuvent être divisé en 2 composants :

II.5.2 Incertitude type A

Ces mesures sont celles qui sont évaluées par des méthodes statistiques, qui donnent des mesures représentées par un transfert typique (ces transferts typiques sont représentés par le symbole UI).

II.5.3 Incertitude type B

La mesure de TYPE B est une mesure qui est évaluée par d'autres méthodes. Il est basé sur des travaux de laboratoire, où toutes les informations pertinentes sont disponibles, ce qui peut inclure des mesures antérieures, l'expérience, la connaissance du comportement et plus encore.

II.6 Erreur de mesurage

L'erreur de mesurage c'est la différence entre la valeur indiquée par mesurage et la valeur vraie. C'est le résultat de Mesurage (RM) moins la valeur vraie (VV) de mesurande.

$$EM = RM - VV$$

Une erreur de mesure a deux formats d'occurrence : l'erreur systématique et l'erreur aléatoire.

II.6.1 Erreur systématique ES

Une erreur de mesure systématique est une erreur qui peut être réduite ou corrigée, si ses causes exactes sont découvertes. Ce type d'erreur est prévisible, grâce à une série de mesures répétées, de sorte qu'une analyse de l'occurrence et des relevés est tracée pour détecter la cause spécifique. L'erreur systématique se reproduit en valeur absolue et en signe. Elle est pratiquement constante. On évolue régulièrement en fonction de condition de mesurage.

II.6.2 Erreur aléatoire EA

D'autre part, une erreur de mesure aléatoire favorise les comportements imprévisibles, et il n'est pas pratique d'agir sur eux de la même manière qu'une erreur systématique. Son aspect imprévisible génère des lectures variées, en raison des variations temporelles et spatiales de la température, de l'humidité, de la pression, etc. Elles ne sont pas corrigibles, mais la dispersion autour de la valeur moyenne peut être réduite.

L'erreur aléatoire fluctue d'une manière imprévisible lorsqu'on répète le mesurage. Pratiquement, on considère que la dispersion est normale.

$$E = EA + ES$$

II.6.3 Différence entre l'erreur et l'incertitude de mesure

Une erreur et une incertitude diffèrent, en ce sens que l'erreur est la représentation de la différence entre une valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence, et que l'incertitude évalue quantitativement la qualité d'un résultat de mesure, par un écart type.

L'incertitude de mesure exprime toutes les erreurs non corrigées. Lorsqu'on évalue les erreurs expérimentalement et que les corrections appropriées sont appliquées, il reste encore une incertitude sur la validité du résultat annoncé. La Figure (4) illustre la différence entre l'erreur de mesure et l'incertitude.

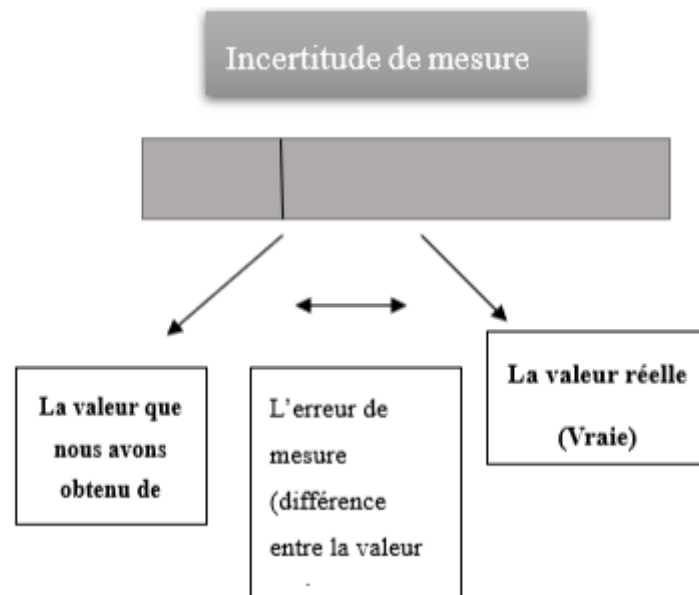


Figure II-4 : illustration de la différence entre l'erreur et l'incertitude

II.7 Les causes possibles des incertitudes de mesure sur un MMT

Il y a plusieurs facteurs qui affectent la qualité de mesure sur une MMT .

Parmi ces facteurs :

- Défaut géométrique sur les axes de la machine.
- Algorithmes mal conçus.
- L'état de surface de la pièce à mesurer.
- Conditions environnementales où se trouve la machine (par exemple : sensibilité à la variation de température).
- Erreur systématique dû à l'inflexion du stylet.
- Stratégie de palpation...etc.

La figure (05) présent les différents facteurs qui influence le processus de mesure

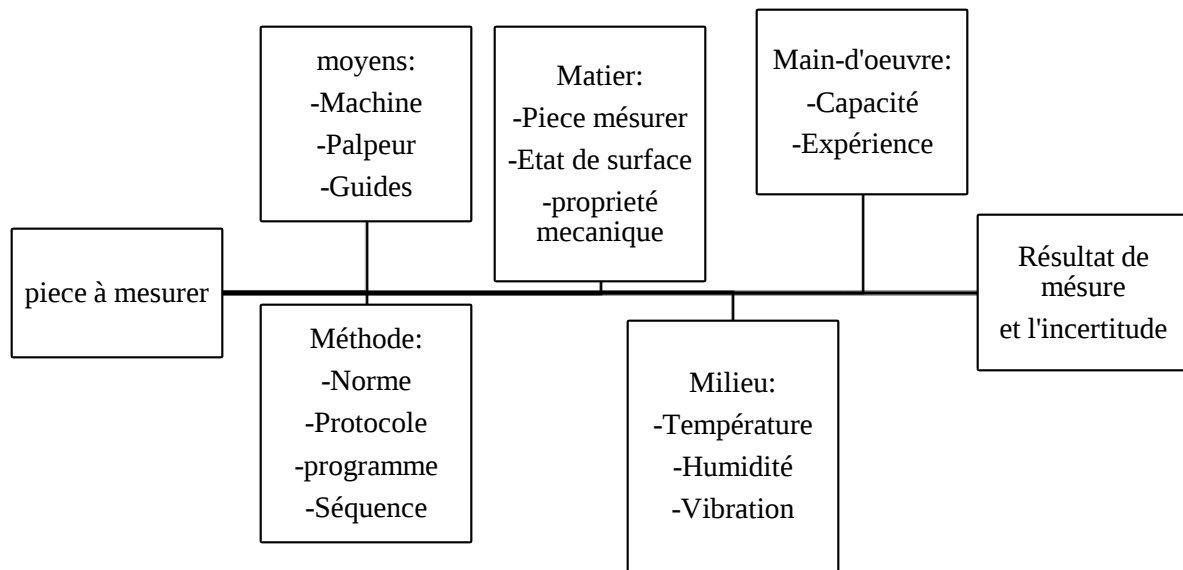


Figure II-5 Diagramme cause-effet de l'erreur de mesure

II.7.1 Erreur géométrique de la machine (MMT)

Les mesures effectuées sont limitées en volume, donc La valeur mesurée est toujours inférieure au seuil défini par le fabricant. Le volume de travail présent des Défauts, généralement dus à des erreurs géométriques du système de mesure (Figure 6). Par conséquent, l'étalonnage du système de mesure est considéré comme un nécessaire étape pour Quantifier ces défauts. Comme pour tout autre système de contrôle, avant chaque utilisation La mesure 3D nécessite un étalonnage. Ce dernier devrait faire périodiquement à l'aide des cales étalons pour déterminer les erreurs géométriques Et vérifier les performances de la machine. Dans la figure en bas (6) nos présentant les différentes erreurs géométriques qui peut apparaitre dans le mesurage avec machine de mesure tridimensionnelle.

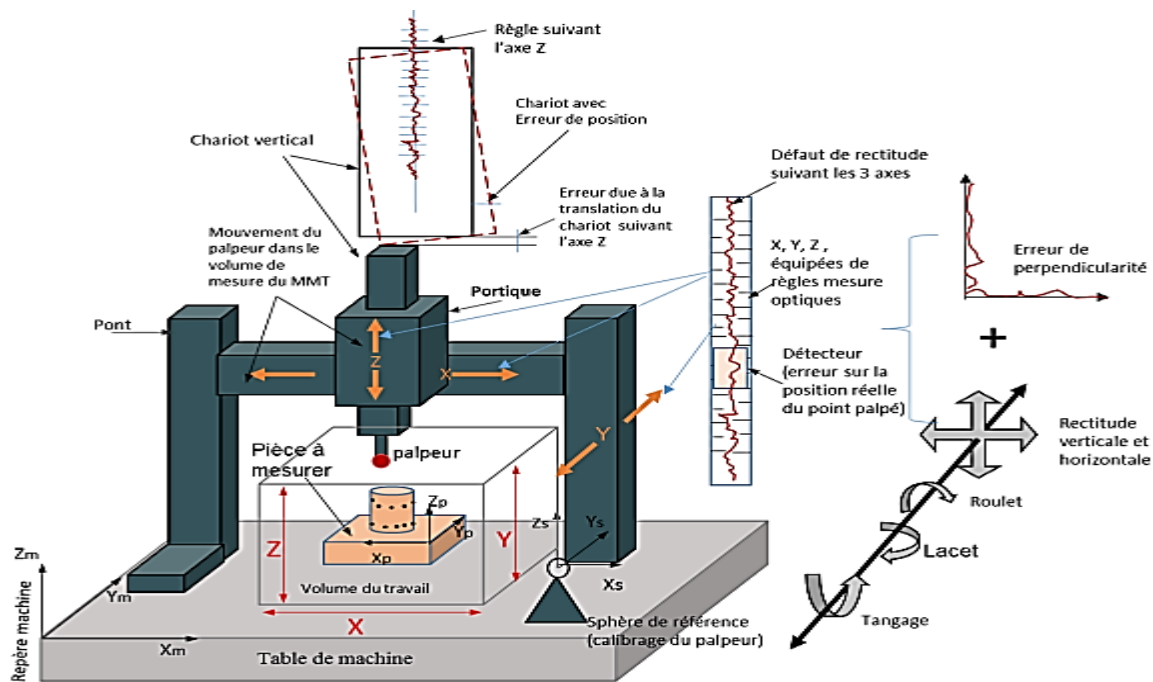


Figure II-6 Erreurs géométriques de la MMT

II.8 Mode de fonctionnement de MMT

II.8.1 Introduction

Une MMT matérialiser un repère orthonormé à 3 dimensions (o, x, y, z)

Pour chaque point palpé, on recueille les coordonnées du centre du palpeur :

$$o_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

En fonction des déplacements des axes des mesures associées à la règle de haute précision, les coordonnées x, y et z du point de contact entre la touche palpeur et la surface à mesurer peuvent être estimées. La pièce à mesurer est montée sur un marbre. Le système de palpé établit une relation entre le contact physique de sur la surface à mesurer et les lectures des trois déplacements. Les coordonnées calculées sont ensuite traitées par un logiciel dans le but d'effectuer des mesures tridimensionnelles et de vérifier les propriétés des tolérances dimensionnelles et géométriques du des pièces mécaniques.

La pièce à mesurer est alors modélisée à l'aide des éléments géométriques définis par le technicien (points, droites, plans, cercles, cylindres, cônes et sphères). A partir d'un nuage de points palpé, le traitement des moindres carrés permet de quantifier les éléments géométriques. Pour définir un élément géométrique sur la machine TRIMESURES, le logiciel METROMECC nécessite un nombre minimum de (1) point palpé, par exemple (4) points sont palpés pour déterminer un plan. Si on s'en tient au nombre minimum de points (3), le calcul d'optimisation selon la méthode des moindres carrés, ainsi que le calcul du défaut de forme ne sera pas possible.

Pour mesurer la forme de la surface d'une pièce posée sur de la MMT, le toucher du stylet, qui est une sphère de centre ω_i située à l'extrémité du stylet, touche les différents points du M_i sur la surface à mesurer. Le système de contrôle de la machine a reçu coordonnées du centre ω_i . En

fonction de la normale n (doit être estimée) à la surface au point M_i et du rayon apparent r_j (calculé pour chaque orientation du palpeur et chaque stylet), les coordonnées du point de mesure M_i sont calculées selon la relation suivante :

$$\overrightarrow{SM_i} = \overrightarrow{S\omega_i} - r_j \vec{n}_i$$

La figure (7) schématisé le principe de palpation :

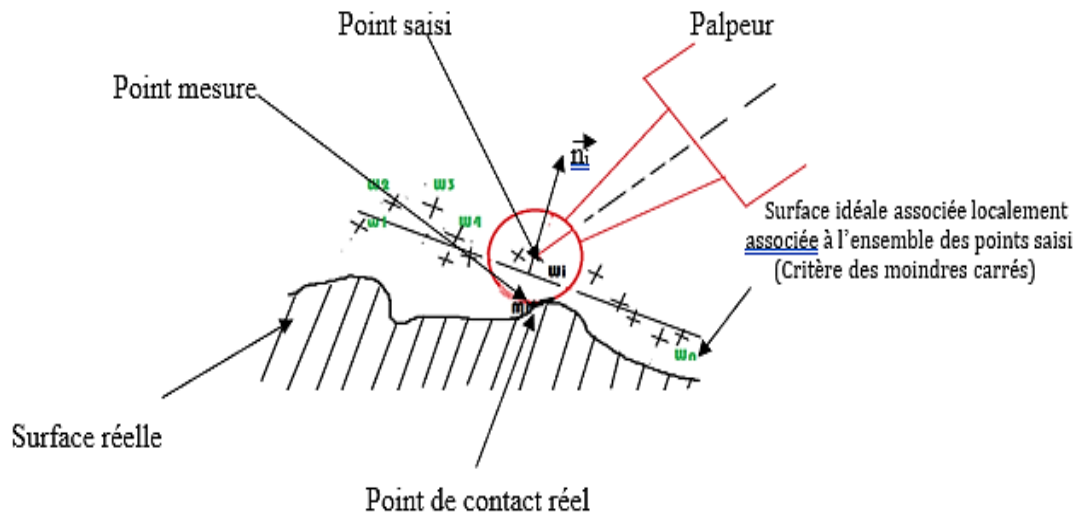


Figure II-7 Principe de palpation

II.8.2 Méthode de mesure

Le contrat est complété par des ateliers de production ou de fabrication qui obtiennent un produit selon la définition de dessin. Par conséquent, de Celui-ci que nous déterminerons les dimensions fonctionnelles de mesures.

Depuis lors, travaillant, d'une part de l'aspect pratique, d'autre part, l'aspect théorique peut être conduit en parallèle.

II.8.3 Aspect pratique

a) Position de la pièce dans le repère de la machine

Il est nécessaire de définir une position unique possible pour la pièce, à quelques dixièmes de mm près, si vous souhaitez la mesurer automatiquement en exécutant une gamme de mesure. Cet emplacement sera précisé dans la référence machine.

b) Définition du système de palpation

Il est nécessaire de définir tous les systèmes de palpation (Angles A et B de la tête motorisée, longueur des stylets et des rallonges) qui sont nécessaires à la mesure d'une pièce et de les étalonner sur la sphère étalon.

II.8.4 Aspect théorique

Le préparateur devra déterminer à partir du plan les éléments géométriques à déterminer dans les palpations. Dans le cas contraire, une définition de repères dégauchissage est nécessaire pour représenter avec précision les résultats de mesure. Seulement on pourra créer la gamme de palpation de la pièce, puis la gamme de vérification des cotes fonctionnelles qui conduira à l'édition du procès-verbal de contrôle.

La méthode de mesure de pièce peut être schématisée par le synoptique ci-dessous :

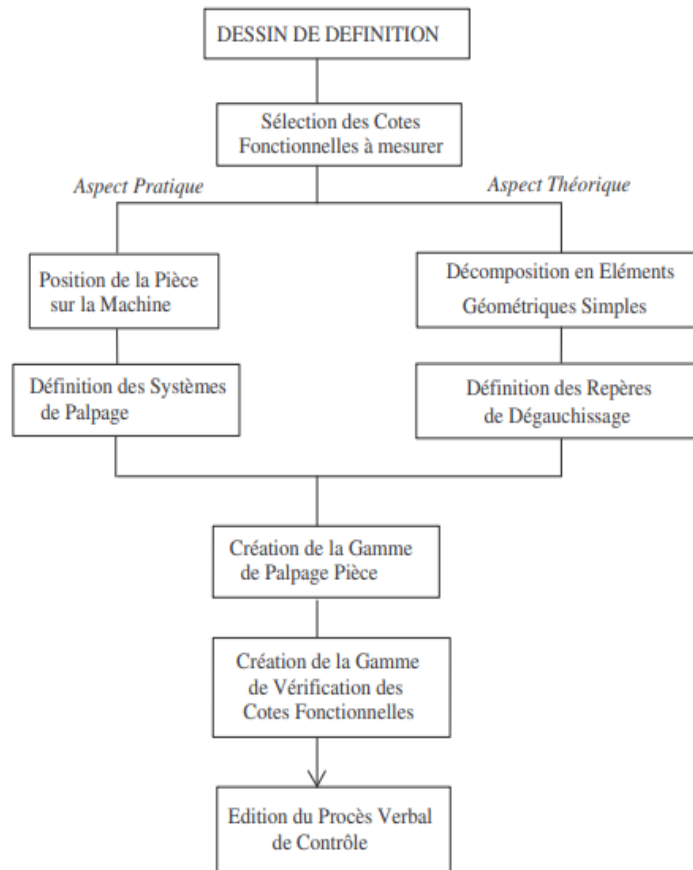


Figure II-8 Synoptique schématise la méthode de mesurée pièce par MMT

II.9 Dispositif de palpage

Les palpeurs constituent l'interface entre la machine à mesurer et la pièce. Ils sont des facteurs principaux qui ont permis l'évolution de la machine à mesurer tridimensionnelle. On trouve deux catégories de palpeurs : les palpeurs à contact à bille et les palpeurs sans contact Palpage par contact.

II.9.1 Palpeur à contact à bille

L'idée du palpeur de contact universel est simple : il s'agit de détecter le contact d'une bille sur la pièce pour localiser un point sur la surface. Le choix d'une valeur de l'effort de contact est le résultat d'un compromis entre l'effort suffisamment important pour assurer la praticité du contact et l'effort suffisamment faible pour éviter une déformation excessive. Les valeurs réelles vont de 0,1N à quelques 0,1N. Le diamètre des billes couramment utilisées est de 1 à 8 mm, on trouve actuellement trois types de palpeur à contact :

- Les palpeurs rigides
- Les palpeurs de scanning
- Les palpeurs à déclenchement.

II.9.2 Les Palpeurs rigides

Ils sont constitués d'une sphère fixée au corps du capteur (voir la figure 9). Habituellement, ce type de palpeur n'est utilisé qu'avec des bras poly-articulés. En effet, lorsque le palpeur touche la surface à mesurer, le déclenchement exécuter, qui permet à l'encodeur du bras d'enregistrer point à acquérir.

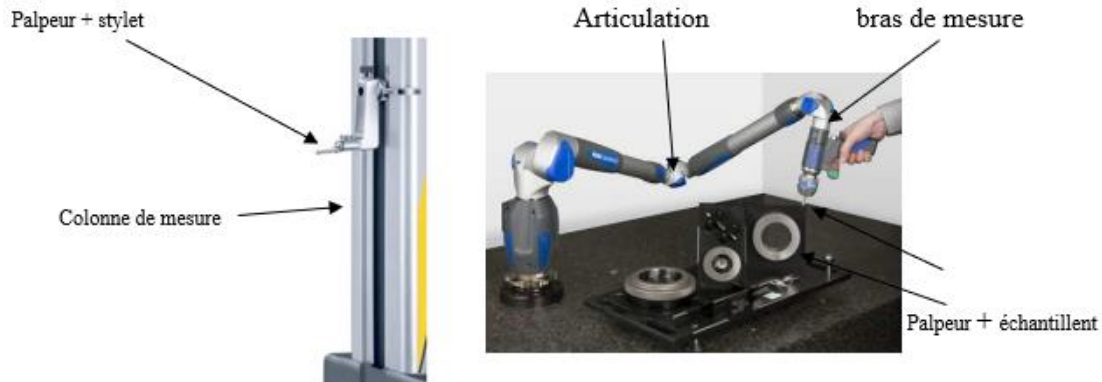


Figure II-9 Bras poly-articulé et le palpeur rigide

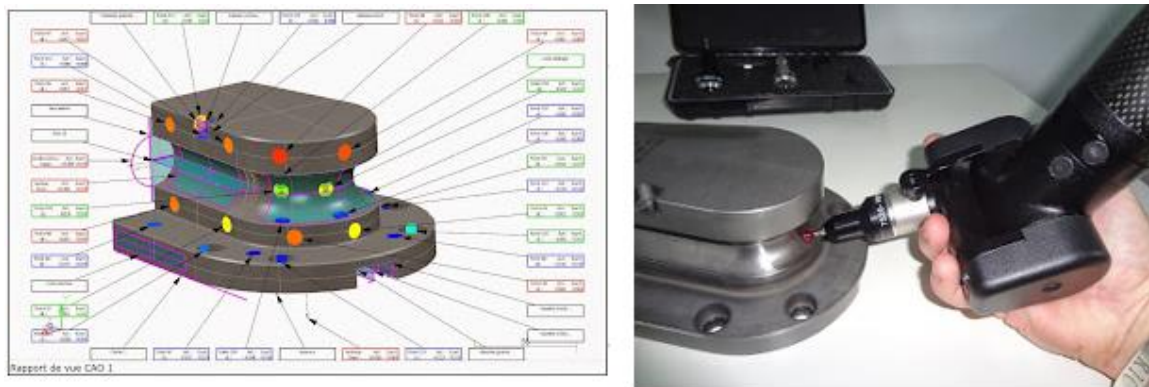


Figure II-10 Processus de mesurage avec un palpeur rigide

Dans la figure (10) on présent le processus de mesurage d'une pièce mécanique avec un palpeur rigide et le résultat obtenu après l'acquisition.

II.9.3 Palpeurs de scanning

Les palpeurs de scanning (voir la figure 11), peuvent saisir un grand nombre de points par seconde sur une surface, ce qui permet de mesurer des formes complexes, où lorsqu'il s'agit de mesurer des pièces flexible (tel que les tôles fines par exemple) ou de la matière plastique peu résistante. Ce type de palpeurs permet d'obtenir une image plus claire de la forme et du profil de la pièce à mesurer.

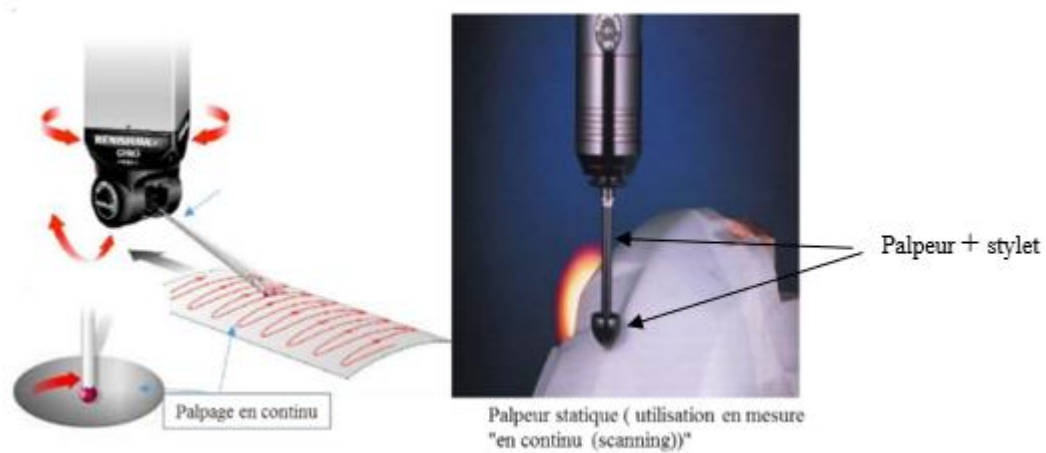


Figure II-11 Scan du profil

II.9.4 Palpeurs à déclenchement

Ces capteurs sont constitués d'une partie mobile (stylet) dont l'extrémité on trouve généralement une bille mise en contact avec la surface à mesurer, ces sont les capteurs les plus largement utiliser dans la métrologie tridimensionnelle.

II.9.4.1 Palpeur dynamique à déclenchement

Le système fonctionne comme un simple contact électrique et est basé sur le principe d'un tripode (liaison de Boys à trois vis disposées à 120 degrés). Au moment du contact entre le palpeur et la surface qu'en veut mesurer, une rupture de contact électrique se produit qui mener à déclencher une commande de lecture de la position de la sphère située à l'extrémité du palpeur (en coordonnées X, Y, Z) (voir la figure 12). L'acquisition des données se produit lorsque l'un des six contacts de la liaison de Boys est rompu. Quand un seuil prédéfini est atteint (seuil de déclenchement), la sortie du récepteur cette déclenche est la mesure s'affiche directement sur les règles optiques de la machine.

La figure (13) représente une tête de palpation dynamique à déclenchement.

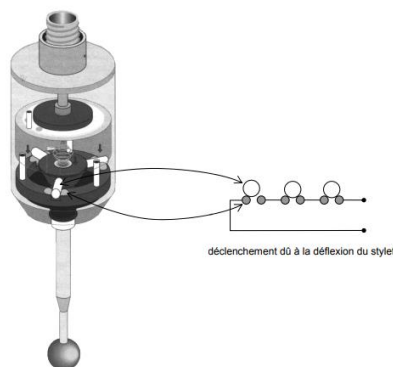


Figure II-13 Palpeur dynamique à déclenchement

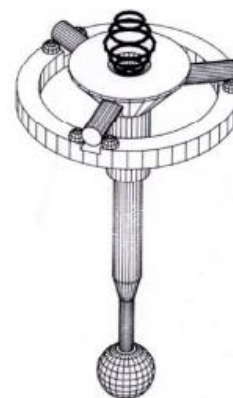


Figure II-12 Tête de palpation dynamique

II.9.4.2 Tête de palpation statique

Le palpeur actionne trois capteurs internes à la tête (comme indiquée dans les figures ci-dessus), qui délivrent en continue des informations sur la situation de la partie active du palpeur. Ces informations permettent le pilotage des moteurs actionnant les différents mouvements de la machine et permettent donc un palpation en continu des surfaces.



Figure II-14 tête de palpeur statique

II.9.5 Palpeur sans contact

Si l'on souhaite mesurer des pièces type tôles fines ou en matière plastique peu résistante, les palpeurs à bille ne conviennent plus parce qu'ils introduisent un effort de contact qui pourrait déformer ces dernières. Il est donc préférable de mesurer ces pièces avec des palpeurs sans contact. Pour cela il existe deux types de palpeurs

- Palpeur laser (voir la figure 16)
- Palpeur à camera CCD [charge-coupled device] (voir la figure 16)

La première consiste à envoyer un faisceau laser en direction de la pièce sur le point à mesurer. Point à mesurer et récupérer sa réflexion sur la photodiode sensible. Pour le second type, Capturez des points en utilisant des techniques de recherche contrastive.

La technologie de mesure sans contact comprend un grand nombre d'instruments différentes méthodes et techniques d'acquisition généralement basées sur la corrélation d'images, Tels que stéréographie, la méthode Moiré, le temps de vol, lumière structurée, la triangle laser, .Le choix de ces technologies dépend souvent de différents critères, tels que : la précision, vitesse d'acquisition, méthode de calcul, poids, taille, et enfin Coût . Comme tout autre système de mesure, ces techniques ont leurs avantages et leurs limitants ou biens inconvenants dont nous parlerons plus tard.

Dans la figure précédent nous illustrons le fonctionnement d'une de capteur de triangulation, capteur laser par un simple schéma et le résultat qui on obtient après le processus c'est un nuage de points (coordonnées cartésien X, Y, Z).



Figure II-16 Palpeur laser (Zephyr II)

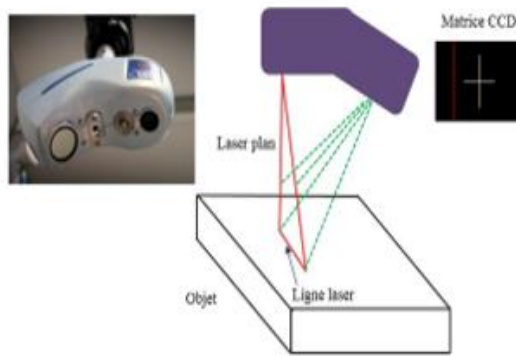


Figure II-15 Camera CCD (lumière structurée)

II.10 Avantages et inconvénients des MMT

Selon leur type de Palpeur :

II.10.1 MMT à contact

	Avantages	Limitants
Palpeur statique	○ Précision ○ Convienent aux applications de contrôle de forme et de numérisation ○ Adaptés aux mesures dans les endroits difficiles d'accès.	○ Cout ○ Vitesse de prise de point plus lente qu'un capteur dynamique ○ Fragilité
Palpeur dynamique	○ Très rapide ○ Solidité (robustesse) ○ Compacité ○ Faible cout et une précision importante du l'ordre de micron ○ Convienent à la pris rapide des points discret	○ Peu adaptée aux matériaux déformables ○ Peu adaptée aux mesures dans les endroits fermés ○ Sensibilité du capteur fonction de la direction d'accostage, car le moment de basculement du tripode n'est pas identique dans toutes les directions (pour dynamique)
Palpeur de scanning	○ Le temps d'acquisition de 100 (à 1000 pour certains outils) points par seconde. ○ Donne une image plus claire	○ Moins précis par rapport par rapport aux palpeurs point à point.

Tableau II-1 : Avantages et les limitants de palpeur à contact

II.10.2 MMT sans contact

II.10.2.1 Avantages

- Rapidité
- Possibilité de mesurer dans les endroits difficiles d'accès aux palpeurs à contact
- Mesurage des matériaux déformables
- N'exercent aucun effort sur la pièce

II.10.2.2 Inconvénients

- Précision limitée
- Sensibilité à l'état de surface des pièces
- Sont Limité uniquement aux mesures des points que les rayons lumineux peuvent toucher.

II.11 Conclusion

Ces dernier années le domaine de la métrologie montre un développement continue dans les systèmes de mesure tridimensionnelle (3D) et leurs technologies, techniques et méthodes dans tous les domaines mais surtout dans le secteur de la conception et fabrication mécanique (contrôle d'alignement de machine, reverse engineering, le contrôle dimensionnelle des pièces usinée, contrôle 3D d'assemblage, contrôle de qualité) , mais quelle que soit leur efficacité ces systèmes présentent des avantages et des inconvénients peu pratique, pour cela pour choisir un système de mesure il faut pris en compte des différents critères tels que la précision, temps d'acquisition et fiabilité etc. ,les données de numérisation (d'aube de turbine) seront associé avec le modèle géométrique ou bien de référence par une des méthodes de la mise en correspondance dont le but de contrôlé de qualité de notre produit, dans notre cas nous avons exploiter un méthode appelle ICP dont nous parlons en détail dans le troisième chapitre.

III. Chapitre III

Adaptation et Calcul mathématique de superposition par la méthode ICP

III.1 Introduction

Après avoir scanné l'aube de turbine par l'une des méthodes citées dans le chapitre précédent, nous avons alors deux ensembles de données, le premier ensemble est un modèle CAO au format STL réalisé par la conception et un deuxième nuage de points 3D. Ceux-là en supposant que chaque donnée est représentée dans son propre repère, la première opération à effectuer et la mise en correspondance dans lequel on superpose ces deux ensembles des données en calculant la transformation (Rotation + translation). On a plusieurs méthodes d'association d'un élément géométrique à un nuage des points comme la méthode TPD la plus utilisée dans les MMT due à sa simplicité, La méthode non linéaire quant à elle n'impose pas de condition sur les repères mais son caractère non linéaire pose de sérieux problèmes de programmation surtout pour les surfaces gauches. La troisième méthode traitée est la méthode ICP qui est une méthode assez nouvelle qui converge facilement vers un minimum local et qui est facile à mettre en œuvre surtout avec le choix qu'on a fait pour la modélisation de la surface théorique. Tout ça, fait de cette méthode-là plus favorite pour être utilisée pour notre problème, donc dans ce chapitre on va exploiter la méthode ICP pour le calcul mathématique de la superposition (Rotation + Translation) afin d'adapter les deux ensembles des données.

III.2 Courbes d'aube de gaz et leurs équations

III.2.1 Cas d'aube à action

Pour ce type d'aube on a adapté une méthode analytique pour déterminer la section d'aube, ça c'est grâce à la régularité du profil (droit et arc de cercle), on a divisé l'aube en trois sections un trapèze et deux segments de cercle.

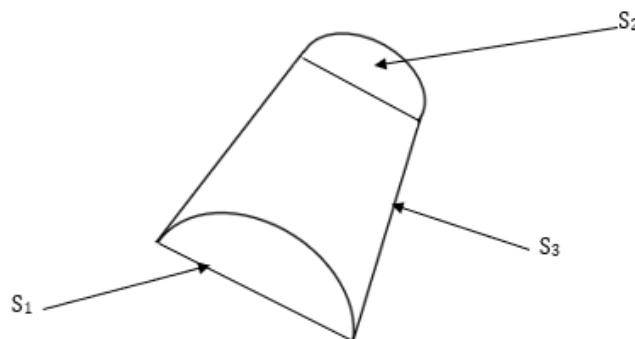


Figure III-1 Décomposition de l'aube à action profil

Pour déterminer la section de ce type d'aube on utilisera souvent des données représentant les caractéristiques géométriques de cette aube, à savoir :

β_1 : Angle que forme W1 avec U.

β_2 : Angle que forme W2 avec U.

La : Pied de l'aube.

Pa : Pas de l'aube.

Le profil qui correspond à la section de cette aube et donné sur la figure en bas, la méthode de traçage de ce profil et obtenu géométriquement par un ensemble adéquat de droites et d'arcs de cercle conçus spécialement en se basant sur l'étude théorique des triangles de vitesses.

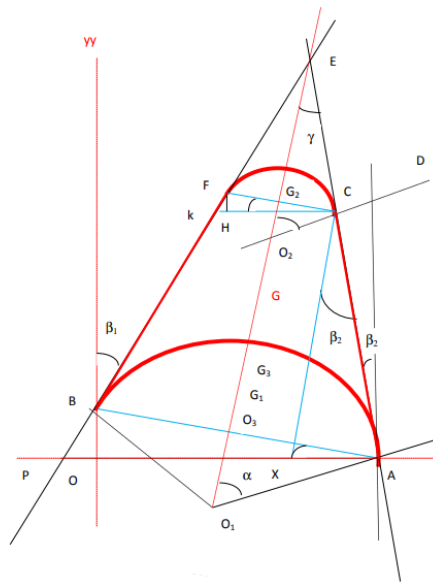


Figure III-2 Profil d'aube à action

Le profil de l'aube [ACFB] a les caractéristiques géométriques suivantes :

Le rayon de courbure est obtenu par la relation analytique :

$$\rho = r_1 = \frac{OA}{\cos\beta_1 + \cos\beta_2} \dots\dots\dots (1)$$

α est obtenu à partir des triangles (O_2CE) et (O_1AE) par la relation géométrique suivant :

$$\alpha = \frac{\pi - \beta_1 - \beta_2}{2} \dots\dots\dots (2)$$

γ est obtenu à partir du triangle (AOB) par la relation :

$$\gamma = \frac{\beta_1 - \beta_2}{2} \dots\dots\dots (3)$$

III.2.2 Calcul de la section d'aube

On a divisé l'aube en trois parties, un trapèze et deux segments de cercle dont les sont obtenues analytiquement par les relations géométriques suivantes :

$$S_1 = \frac{r_1^2(2\alpha - \sin(2\alpha))}{2} \dots\dots\dots (4)$$

$$S_2 = \frac{r_2^2(2\alpha - \sin(2\alpha))}{2} \dots\dots\dots (5)$$

r_1 : rayon de courbure du grand segment de cercle : $r_1 = O_1A$

r_2 : rayon de courbure du petit segment de cercle : $r_2 = O_2C$

En A et C, on peut écrire :

$$\frac{O_1A}{O_2C} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{AE}{CE} \dots\dots\dots (6)$$

Le point E comme indiqué sur la figure représente l'intersection des deux droites (y_1) et (y_2).

$$E = (X_1) \cap (X_2)$$

Rapportons le profil [ACFB] à un repère orthogonal (OXY) et déterminons les coordonnées du point E par rapport à ce repère.

Les équations des deux droites sont : $\{y_1=a_1.x \text{ et } y_2=a_2.x\}$.

Posons : $b_1= OB$

Et considérons le triangle (OAB) rectangle en O alors : $\tan \gamma = OB/OA \Rightarrow OB = OA.\tan \gamma$

Si a_1 représente la pente de la droite (y_1) alors :

$$a_1 = \tan (\pi/2 - \beta_1) \dots\dots\dots (7)$$

Si a_2 représente la pente de la droite (y_2) on a aussi :

$$a_2 = \tan (\pi/2 - \beta_2) \dots\dots\dots (8)$$

Pour : $x = OA$

On a : $y_2 = 0$

Cela implique que :

$$0 = a_2 \cdot OA + b_2 \dots\dots\dots (9)$$

Donc :

$$b_2 = -a_2 \cdot OA \dots\dots\dots (10)$$

Alors :

$$y_2 = a_2 \cdot x - a_2 \cdot OA \dots\dots\dots (11)$$

Or : $E = (X_1) \cap (X_2)$

Cela implique que : $y_1 = y_2$ et $x_1 = x_e$

Donc :

$$a_1 \cdot x_e + OB = a_2 \cdot x_e - a_2 \cdot OA \dots\dots\dots (12)$$

Faisant que :

$$x_2 = \frac{(-a_2.OA-OB)}{(a_1-a_2)} \dots\dots\dots(13)$$

Et :

$$y_E = a_1 x_2 + OB = a_1 \frac{(-a_2.OA-OB)}{(a_1-a_2)} + OB \dots\dots\dots (14)$$

Sachant que :

$$(AE)^2 = (x_A - x_E)^2 + (y_E - y_A)^2 \dots\dots\dots(15)$$

Ainsi on obtient :

$$AE = \sqrt{(x_A - x_E)^2 + (y_E - y_A)^2} \dots\dots\dots (16)$$

De notre figure nous avons :

$$AC = AD \cdot \cos \beta_2$$

Avec : AD=Pa

Et : EC = AE-AC

On a finalement :

$$r_2 = r_1 \cdot \frac{EC}{AE} = \frac{AE-AC}{AE} \dots\dots\dots (17)$$

III.2.2.1 Calcul des sections des segments de cercles S₁ et S₂

Si r₁ est donné d'après la relation et r₂ calculé d'après la relation précédent, on pourra alors calculer les sections des segments de cercles S₁ et S₂ en appliquant les formules.

III.2.2.2 Calcul de la section de trapèze

Soit, S₃ la section du trapèze [ACFB] comme montré sur la figure (2). On partage l'aire du trapèze [ACFB] en cinq aires comme suit :

$$\text{Aire [ACFB]} = \text{aire [KCAP]} + \text{aire [KFH]} + \text{aire [FHC]} - \text{aire [POB]} - \text{aire [AOB]}$$

et on note:

$$\text{Aire [ACFB]} = S_3 \quad ; \quad \text{Aire [KCAP]} = S_4$$

$$\text{Aire [KFH]} = S_5 \quad ; \quad \text{Aire [FHC]} = S_6$$

$$\text{Aire [POB]} = S_7 \quad ; \quad \text{Aire [AOB]} = S_8$$

Donc:

$$S_3 = S_4 + S_5 + S_6 - S_7 - S_8 \dots\dots\dots(18)$$

La section de trapèze [KCAP] est donnée par la relation :

$$S_4 = 1/2.CX.[KC+PA] \dots\dots\dots(19)$$

Les sections des triangles sont données par les relations suivant :

$$S_5 = 1/2.[KH.HF] \dots\dots\dots (20)$$

$$S_6 = 1/2.[HF.HC] \dots\dots\dots (21)$$

$$S_7 = 1/2.[OP.OB] \dots\dots\dots(22)$$

$$S_8 = 1/2.[OB.OA] \dots\dots\dots (23)$$

Calcul de FC et HC

D'après le graph sur la figure (2) :

Triangle [OAB]:

$$r_1 = \frac{OA}{\cos\beta_1 + \cos\beta_2} \dots\dots\dots(24)$$

Triangle [HFC]:

$$r_2 = \frac{HC}{\cos\beta_1 + \cos\beta_2} \dots\dots\dots (25)$$

$$\text{On a : } \frac{r_1}{r_2} = \frac{OA}{HC}$$

Alors :

$$HC = OA \cdot \frac{r_2}{r_1} \dots\dots\dots (26)$$

Et d'après le triangle rectangle [FHC] on a finalement :

$$FC = \frac{HC}{\cos\gamma} \dots\dots\dots(27)$$

Calcul de cx

Considérons le triangle [CXA] :

$$\cos\beta_2 = \frac{CX}{AC} \dots\dots\dots(28)$$

Ce qui donne :

$$CX = AC \cdot \cos \beta_2 \dots\dots\dots (29)$$

Calcul OP

Considérons le triangle [OPB] où :

$$\tan\left(\frac{\pi}{2} - \beta_2\right) = \frac{OP}{AO} \dots\dots\dots (30)$$

Donc :

$$OP = OB \cdot \tan(\beta_1) \dots\dots\dots (31)$$

Alors :

$$PA = OA + OP \dots\dots\dots (32)$$

Calcul de HF

Considérons le triangle [HFC] :

$$\sin(\gamma) = \frac{HF}{FC} \dots\dots\dots (33)$$

Alors :

$$HF = FC \cdot \sin(\gamma) \dots\dots\dots (34)$$

Calcul de KH

Considérons le triangle [KFH]

$$\tan(\beta_1) = \frac{KH}{HF} \dots\dots\dots (35)$$

Ce qui implique que

$$KH = HF \cdot \tan(\beta_1) \dots\dots\dots (36)$$

Et :

$$KC = KH + HC \dots\dots\dots (37)$$

Finalement la section totale de l'aube S et donnée par la relation suivante :

$$S = S_2 + S_3 - S_1 \dots\dots\dots(38)$$

III.2.2.3 Exemple typique

On se propose de calculer la section des aubes à action de l'étage d'une turbine à vapeur avec les caractéristiques ci-dessous :

1. Largeur de l'aube : $La = OA = 280 \text{ mm}$
2. Angles d'entrée et de sortie du courant de vapeur : $\beta_1 = 31,66^\circ$; $\beta_2 = 20^\circ$.
3. Rayon de la plus grande courbure de l'aube : $\rho = r_1 = O_1A = 156.3 \text{ mm}$.
4. Pas de l'aube : $Pa = AD = 220 \text{ mm}$

5. Angle α :

$$\alpha = \frac{\pi + \beta_1 - \beta_2}{2} = 64,17^\circ$$

6. Angle γ :

$$\gamma = \frac{\beta_1 - \beta_2}{2} = 5,85^\circ$$

Calcul de r_2

$$r_2 = \sqrt{(x_A - x_E)^2 + (y_E - y_A)^2} = 1248,6 \text{ mm}$$

$$AC = AD \cdot \cos(\beta_2) = 206,7 \text{ mm}$$

$$EC = AE - AC = 1041,9 \text{ mm}$$

$$r_2 = r_1 \frac{EC}{AE} = \frac{AE - AC}{AE} = 130,4 \text{ mm}$$

Calcul des sections S_1 et S_2

$$S_1 = \frac{r_1^2 (2\alpha + \sin(2\alpha))}{2} = 17833,67 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = \frac{r_2^2 (2\alpha + \sin(2\alpha))}{2} = 12412,03 \text{ mm}^2$$

Calcul de la section S_3

Sachant que :

$$S_3 = S_4 + S_5 + S_6 - S_7 - S_8$$

Et d'après les relations présentes en haut on a donc :

$$S_4 = 68037,97 \text{ mm}^2$$

$$S_5 = 171,1 \text{ mm}^2$$

$$S_6 = 2783,62 \text{ mm}^2$$

$$S_7 = 2468,18 \text{ mm}^2$$

$$S_8 = 4004 \text{ mm}^2$$

**la section finale d'aube et donnée par la relation suivante :

$$S = S_2 + S_3 - S_1 = (124113,03 + 64520,51 - 17833,67) = 59099,87 \text{ mm}^2$$

III.3 Conception de model d'aube de gaz

Généralement, Le model géométrique d'aube a été réaliser en utilisant un logiciel de CAO (conception assistée par ordinateur), dans notre cas on à utiliser le programme SolidWorks, le format obtenu est (sldpart) et qui est illustre dans les figures ci-dessus, mais ce type d'extension ne peut pas être utiliser dans la fabrication assistée par ordinateur donc en à obliger de changer l'extension au format STL.

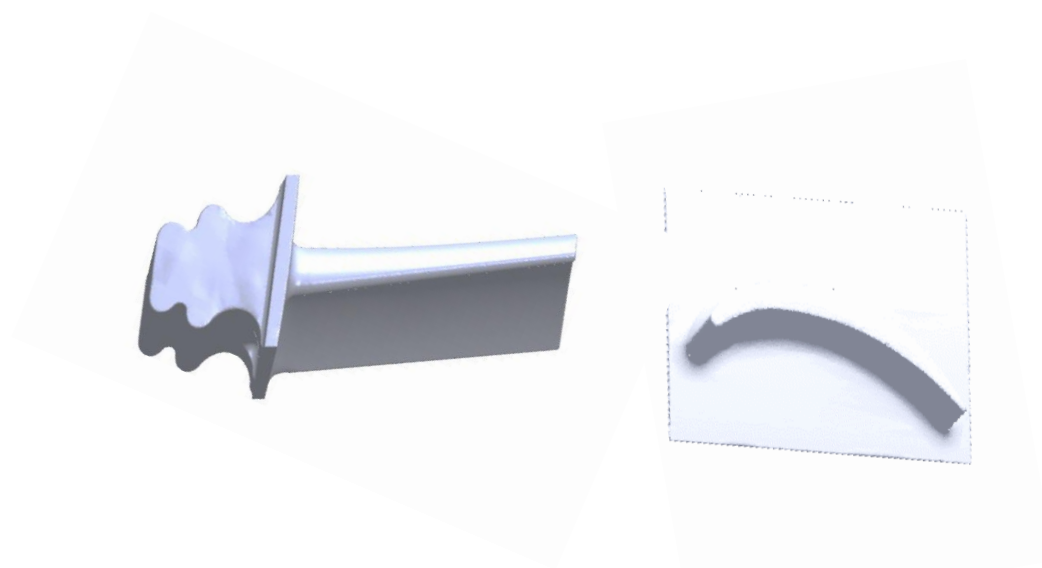


Figure III-3 Conception d'aube de turbine à gaz par SolidWorks

Le tableau représente quelques propriétés de la matière utiliser dans la fabrication de l'aube

Propriétés	Valeur	Unités
Elastic Modulus	$2.049999984e^{+11}$	N/m ²
Poisson's Ratio	0.29	N/A
Tensile strength	585000002.9	N/m ²
Yield strength	282685049	N/m ²
Thermal expansion coefficient	$1.1e^{-0.5}$	/K
Mass density	7894.999987	Kg/m ³
Hardening factor	0.85	N/A

Tableau III-1 Caractéristiques de matière de l'aube

Format STL

STL, abréviation de Stéréo lithographie, c'est un format de fichier ou bien une extension créée par 3D système pour son logiciel CAO, il est également pris en charge par de nombreux autres logiciels. Qu'il s'agisse d'outil de CAO ou d'édition de maillage, ce format exprime les surfaces du modèle par le petit triangle, le format STL est le format de fichier le plus couramment utilisé pour l'impression 3D, le prototypage rapide et la fabrication assistée par ordinateur.

Le modèle au format STL est obtenu généralement par une triangulation d'un modèle exact à l'aide d'un logiciel de CAO qui nous fournit un fichier au format STL. Ce fichier contient les sommets (vertex1 X1 Y1 Z1) et la normale (face normal1 n1, n2, n3) orientée vers l'extérieur pour chaque triangle.

Dans la figure 5 on a le format STL de notre aube de gaz qui est représenté par 33173 triangles et de 99519 points. À partir du fichier STL on peut extraire un nuage de points représentant les sommets des nœuds relatifs à chaque triangle.

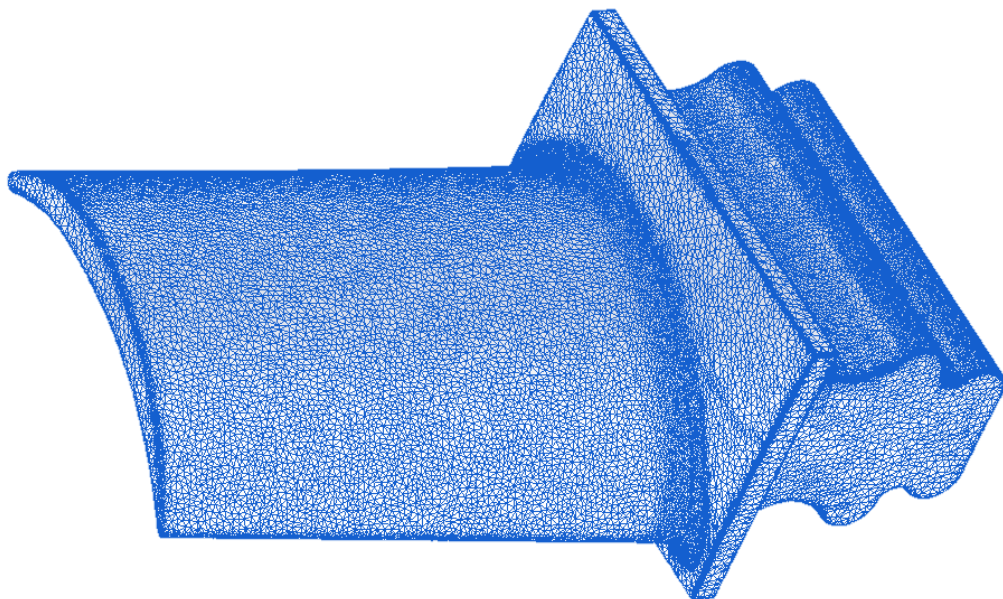


Figure III-4 Format STL d'aube de gaz

On peut passer de ce type d'extension (format STL) au nuage de points, pour le calcul de l'erreur entre les ensembles des données (model et data) que on va faire plus tard par logiciel Matlab.

III.4Nuage de points

Tous les machines de mesure tridimensionnelle effectuent l'acquisition d'un nuage de points. Chaque point est représenté par ses coordonnées cartésien (X, Y et Z). Le processus de contrôle de qualité de la pièce débute par une étape d'acquisition des surfaces réelles. Les données nécessaires sont principalement un fichier des points qui sont obtenu via scanner 3D. A partir de cet instant l'adaptation entre le modèle théorique et réel peut être exécuté. Les données acquises ne peuvent être utilisées directement : elles présentent du bruit de mesure, des données inutiles (environnement) ... Elles doivent donc être traitées afin d'être utilisables.

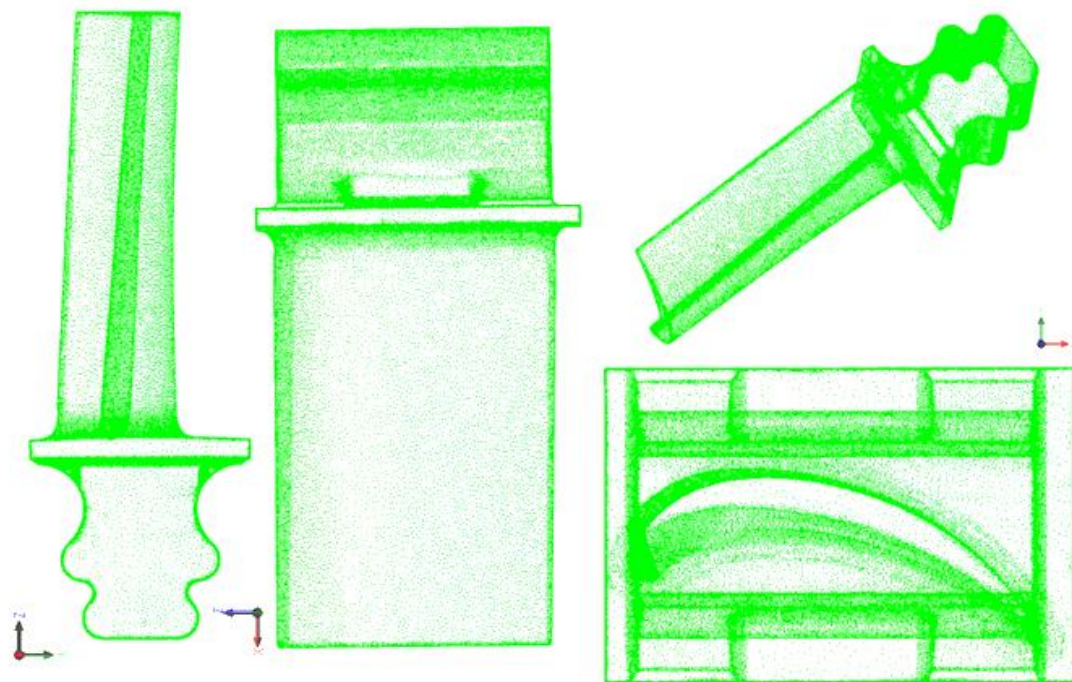


Figure III-5 Nuage de points d'aube de turbine à gaz (droite, front, Top, 3D)

III.4.1 Filtrage d'un nuage de points

Le filtrage est une opération requise pour plusieurs raisons en analyse des états de surface peut être appliqué pour corriger l'effet de stylet sur le profil mesure ou bien pour nettoyer les données de mesure de bruit résultant par capture optique de machine de mesure tridimensionnelle, aussi utilisée pour minimiser les coordonnées palpées.

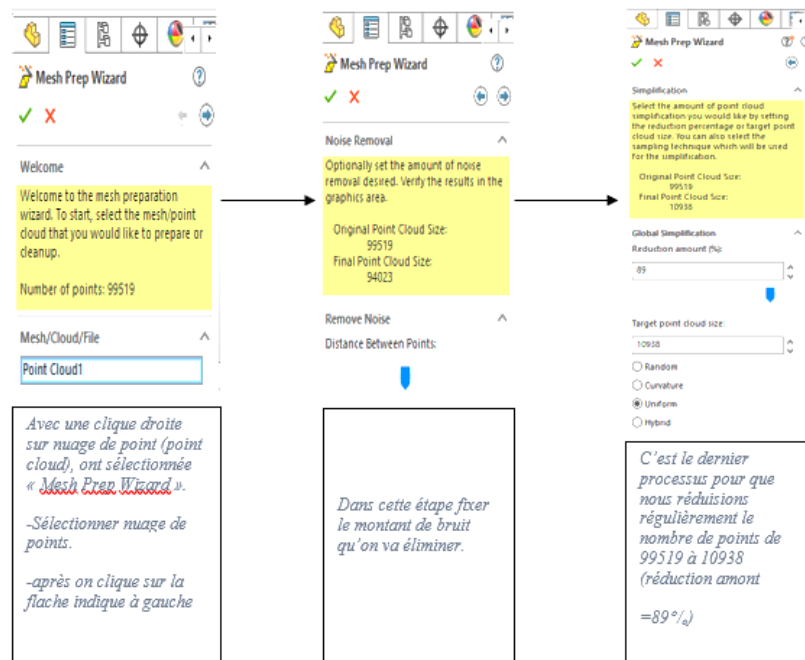


Figure III-6 Etapes de filtrage dans CAO

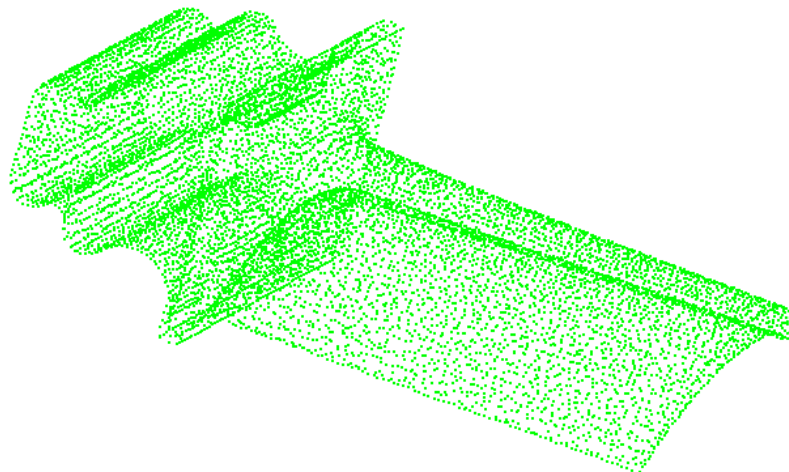


Figure III-7 Nuage de points d'aube de gaz après le filtrage

III.5 Superposition entre le model CAO et nuage de points

Après la numérisation de la pièce, nous avons deux ensembles de données, le premier est nuage de points de modèle théorique dessein à l'aide de logicielle CAO et le second, le nuage de points (Data) obtenue par MMT (processus de palpage). L'opération qui consiste à d'adaptée ces deux ensembles en calculant la transformation rigide (rotation + translation) est celle que l'on appelle le recalage ou la mise en correspondance. L'application de l'algorithme ICP va permettre de minimiser les écarts entre les deux ensembles des données.

III.5.1 Méthode ICP (itérative closest point)

L'ICP est une méthode précise et fiable pour la mise en correspondance de surface gauche. Le but de l'ICP est trouvé la transformation rigide qui va correspondre au mieux un nuage de points P et un modèle géométrique X. le processus d'alignement tente de minimiser la somme des carrés des distances entre les points du nuage et leurs correspondants appartenant au modèle. L'ICP est efficace, elle converge d'une façon monotone vers un minimum local. Pour chaque itération l'algorithme calcule la correspondance en cherchant les points les plus proches, puis il minimise l'erreur des moindres carrés entre les points correspondants .

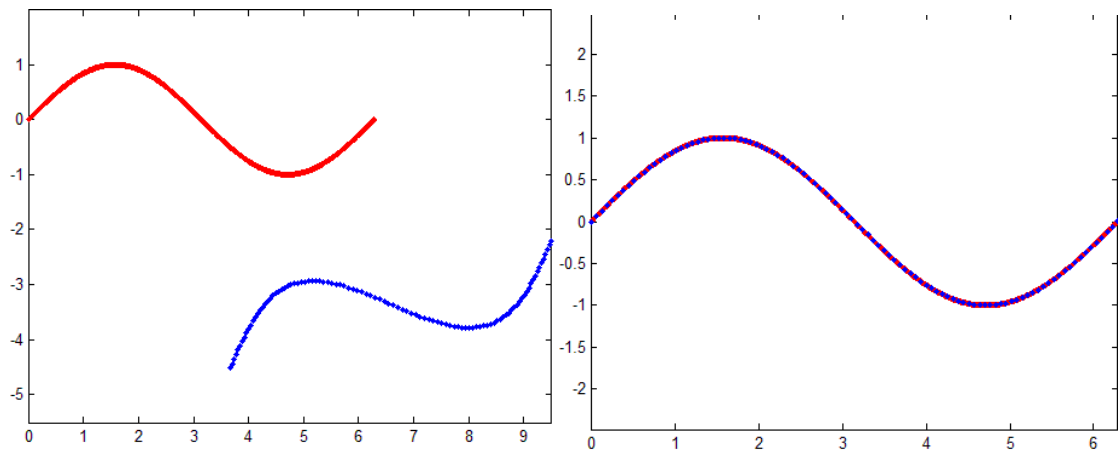


Figure III-8 Appariement des points les plus proches appartenant à une courbe

Des préliminaires mathématiques sont étudiés pour définir le point le plus proche à un autre point connu. Par exemple la distance entre un point et un ensemble des points est celle minimale entre ce point et chaque point de l'ensemble. Le point de l'ensemble qui rend ce minimum est celui le plus proche, ainsi on peut coupler deux ensembles de points $\{X_i, P_i\}$. Supposons que R la matrice de rotation et que T le vecteur de la translation, sont les paramètres de la transformation rigide, la fonction à minimiser est :

$$e(R, t) = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^N \|X_i - R \cdot P_i - T\|^2 \dots\dots\dots (39)$$

Une fois ces paramètres calculés, l'ensemble sera transformé, et on peut réappliquer les étapes précédentes de manière itérative jusqu'à ce que les distances ne dépassent plus un certain seuil. Pour pouvoir résoudre le système surdéterminé par les moindres carrés, on peut linéariser les équations et poursuivre la solution traditionnelle des moindres carrés.

III.5.2 Variantes de la méthode ICP

Après la présentation de la méthode plusieurs améliorations ont été proposées qui affectent une ou plusieurs étapes de l'algorithme original pour tenter d'augmenter ces performances mesurées essentiellement par la précision finale des résultats et la vitesse de calcul ce qui a donné naissance à plusieurs variantes de l'algorithme ICP.

Les inconvénients principaux de cette méthode dans sa forme originale est d'une part qu'elle converge vers un faux minimum spécialement lorsqu'il existe beaucoup de bruit dans les données, et d'autre part le grand nombre d'itérations nécessaires à la convergence. Plusieurs solutions ont été mises en œuvre pour surmonter ces inconvénients, comme celle de CHEN en 1992 qui remplace la distance entre les points par celle entre un point et entre le plan tangentiel au deuxième plan, en d'autres termes elle intègre les normales d'une des deux surfaces dans l'équation précédent.

$$E = \sum ((X_i - R \cdot P_i - T) \cdot n_i)^2 \dots\dots\dots (40)$$

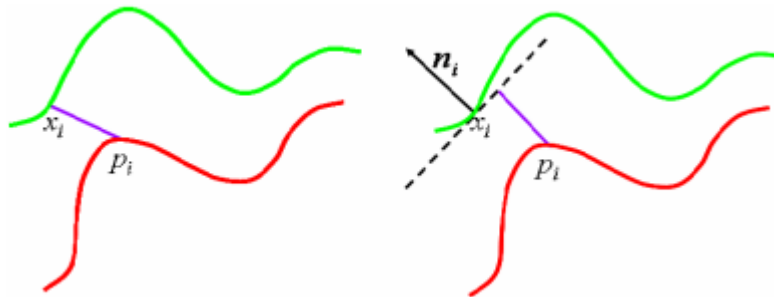


Figure III-9 Point le plus proche au plan tangentiel à une surface dans un point connu

SEUNG-HWAN proposent une version de ICP utilisant un sous échantillonnage des points suivant la direction radiale en partant du centre de gravité du nuage de points à échantillonner. Les auteurs montrent que leur algorithme est aussi efficace que l'algorithme Classique (sans échantillonnage), et a l'avantage d'être considérablement plus rapide.

GELFAND, proposent une méthode originale pour la sélection des points à utiliser dans ICP lors du recalage de deux ensembles de points 3D. Cette méthode se base sur la notation de « stabilité géométrique » du recalage. Cette stabilité concerne le glissement des surfaces à recaler l'une par rapport à l'autre. Les auteurs sont capables d'estimer les transformations de repère susceptible, de causer un glissement important entre les deux surfaces et donc une instabilité, et choisissent les points de ces surfaces pour lesquels ce glissement est minimum.

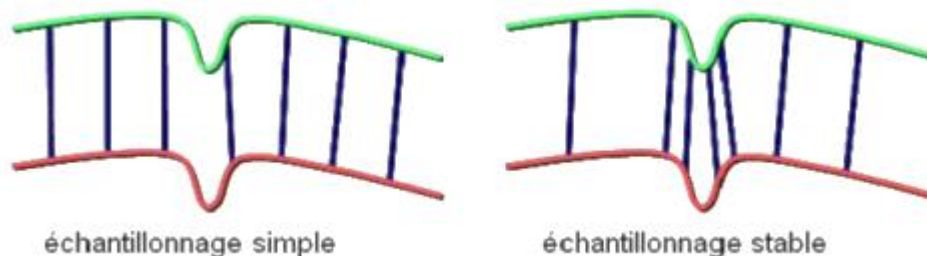


Figure III-10 Un échantillonnage favorisé par rapport à l'échantillonnage uniforme

qui dégraderont les transformations par intégré un test statique lorsque chaque itération est réussie, ce test prend en compte la moyenne des distances et l'erreur moyenne quadratique qui

supprimer les points qui ne donne pas des bonnes informations, il existe aussi des algorithmes qui essaient d'attribuer un type quelconque de segmentation aux données de ICP comme l'algorithme de qui reconstruit la méthode de floue en introduisant à chaque itération une fonction d'Adhésion qui intervient dans toutes les étapes de calcul comme un facteur de poids, Elle classifié les points soit point objet ou bien bruit. Cette méthode fonctionne bien lorsqu'il s'agit de la reconnaissance d'un objet dans un nuage des points.

On trouve encore des autres méthodes qui adoptante le même algorithme de ICP mais en améliorant les fonctions de calcul.

Due que L'ICP considéré comme un algorithme de descente itérative cette méthode peut converge vers un minimum local au lieu de minimum globale recherché, mais dans la plupart des méthodes la transformation initiale est considérée proche à la transformation recherchée.

Il existe quelque solution pour le choix de la transformation initiale que nous mentionnons que la transformation rigide sont approximativement estimées à partir des axes principaux de l'objet dans chaque vue, et aussi selon le raisonnement de P. BESL qui dite la solution pour être sûr de trouve le minimum global est de recherché le minimum de tous les minimums locaux.

III.5.3 Précision de la méthode de recalage

Moron a étudié en 1996 l'erreur de la méthode de recalage en fonction du paramètre de convergence de l'algorithme ICP, c'est-à-dire fonction de la valeur de $\mathcal{E} = \tau \cdot \delta$. La valeur de celle-ci a été fixée à $\mathcal{E} = 10^{-8}$.

Les paramètres internes N_s et N_t interviennent directement dans la précision du résultat fourni par la méthode de recalage. L'influence de ceux-ci sur la qualité du recalage a été évaluée. D'une manière générale, il a été constaté que l'erreur de position diminue lorsque N_t augmente et lorsque N_s diminue. Par ailleurs, le temps de calcul augmente lorsque N_t et N_s augmentent, ce qui se comprend aisément puisque le nombre d'opérations à réaliser augmente proportionnellement à N_t et N_s . Par conséquent, après une évaluation de ces paramètres, Moron a trouvé qu'un bon choix [$N_t = 10 / N_s = 30$].

Avec ces paramètres, l'erreur de la méthode de recalage a été estimée à une valeur moyenne par point de $\mu = 0.7\mu.m$ avec une variance $\delta = 0.1$. Donc, l'erreur introduite par la méthode de recalage est petite par rapport à l'application d'inspection envisagée. Par conséquent, nous ne tiendrons pas compte de cette erreur.

III.5.4 Applications de la méthode ICP

III.5.4.1 Application de ICP sur un surface Gauche

Dans ce cas en a appliqué la méthode ICP sur une surface gauche, on cherche les transformations rigide (Rotation + Translation), l'exécution de la mise correspondance ou bien le recalage nous donne une adaptation entre les deux données que on a (model, data),

Remarque : on obtienne les coordonnées (X, Y, Z) de data par simulation

Le model est un ensemble des coordonnées (X, Y, Z) représenté par un matrix de (6400*3)

	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
1	-2.000	-2.000	0.3784
2	-2.000	-1.9494	0.3361
3	-2.000	-1.8987	0.2929
4	-2.000	-1.8481	0.2489
5	-2.000	-1.7975	0.2044
N	.	.	.
N	.	.	.
N	.	.	.
6399	2.000	1.9494	-0.3361
6400	2.000	2.000	-0.3784

Tableau III-2 : Nuage de points du model.

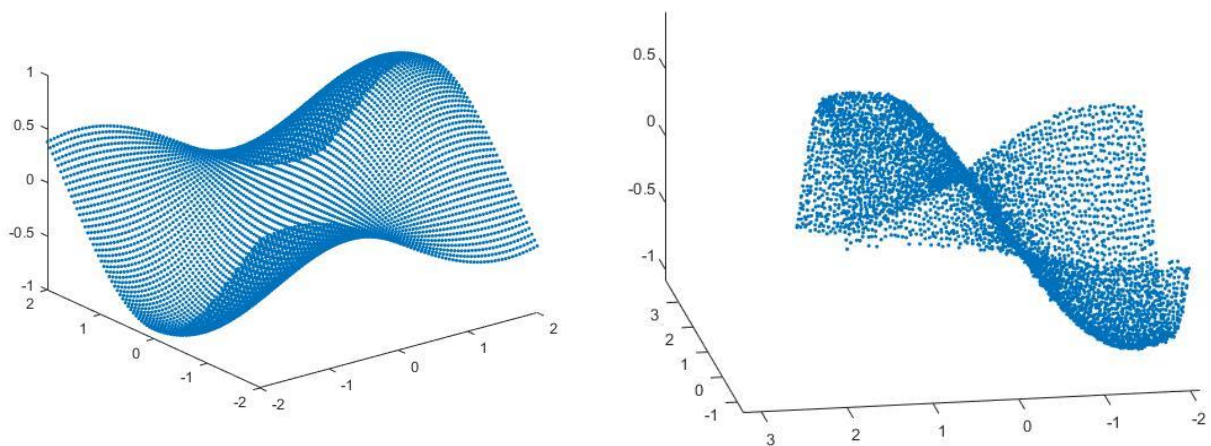


Figure III-11 Profiles des surface (modèle, data)

L' algorithme:

$m = 80$; width of grille

$n = m^2$; number of points

$[X,Y] = \text{meshgrid}(\text{linspace}(-2,2,m), \text{linspace}(-2,2,m));$

$X = \text{reshape}(X,1,[]);$

$Y = \text{reshape}(Y,1,[]);$

$Z = \sin(X) \cdot \cos(Y);$

Création de data points matrix

$D = [X; Y; Z];$

Translations values :

$T_x = 0.5;$

$T_y = -0.3;$

$T_z = 0.2;$

```

% Translation vector
T = [Tx ; Ty ; Tz] ;
% Rotation values (rad.):
rx = 0.3;
ry = -0.2;
rz = 0.05;
Rx = [1  0  0;
      0 cos(rx) -sin(rx);
      0 sin(rx) cos(rx)];

Ry = [cos(ry) 0 sin(ry);
      0 1 0;
      -sin(ry) 0 cos(ry)];
Rz = [cos(rz)-sin(rz) 0;
      sin(rz) cos(rz) 0;
      0 0 1];
Rotation matrix
R = Rx*Ry*Rz ;
Transform data-matrix plus noise into model-matrix
M = R * D + repmat(T, 1, n);

Add noise to model and data
rng(2912673);
M = M + 0.01*randn(3,n);
D = D + 0.01*randn(3, n);

```

Exécution de la méthode

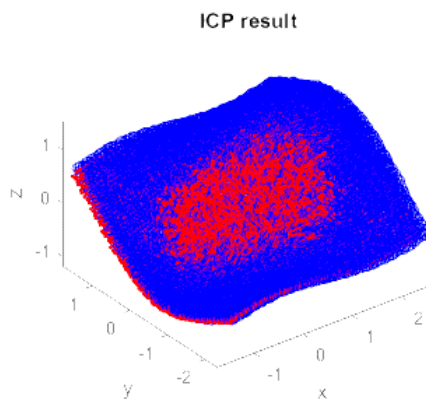


Figure III-12 Position finale
superposition (après 15 itérations)

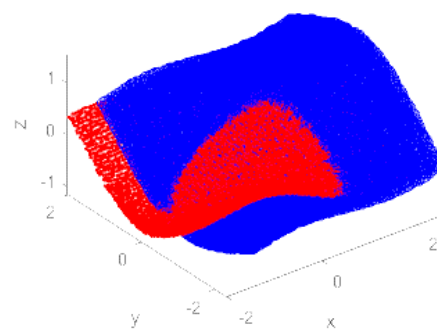


Figure III-13 Position initiale

Les figures (12,13) illustrent les résultats des mises en correspondant ou bien le recalage entre le nuage du points (model et data), en utilisant la méthode ICP.

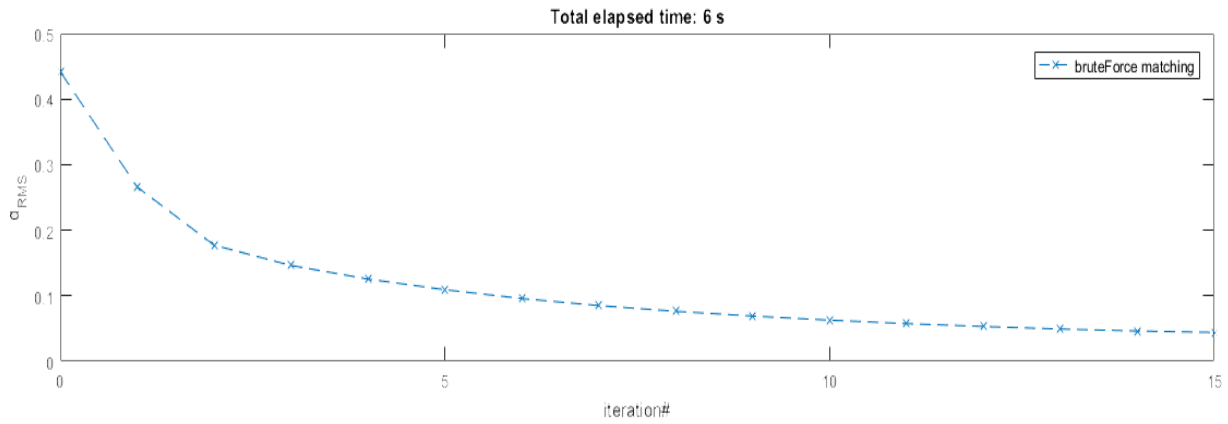


Figure III-14 Evolution de l'erreur résiduelle de distance pour l'algorithme ICP

La figure (14) représente l'évolution de l'erreur résiduelle de distance entre les points, en fonction des itérations de l'algorithme de méthode ICP. L'adaptation des deux données converge rapidement sur une solution stable à partir de dixième itération avec une erreur maximale de (0.0442mm) après la convergence. L'erreur au début d'association et d'ordre (0.4419mm).

III.6 Adaptation et calcul d'erreur entre le model CAO et pièce mesurer

Dans cette application un control qualité d'une aube de turbine est traitée, le processus est destiné à déterminer c'est l'aube conforme ou non à ses spécification ou exigences préétablis par le labo de recherche.

Sachant que l'erreur globale est une contribution de ces deux types d'erreurs :

- Erreur de la méthode de mise en correspondance seule, dans notre cas c'est l'erreur de la méthode ICP.

- Erreur de modélisation STL.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Modèle STL : 59306 triangles} \\ \text{translation initiale : } \{1.2835, -0.2819, 0.8450\} \\ \text{Rotation initiale: } R_0 = \begin{pmatrix} 0,9453 & -0,3260 & 0,0063 \\ 0,3073 & 0,8971 & 0,3174 \\ -0,1092 & -0,2981 & 0,9483 \end{pmatrix} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{données 3D : 10938 points} \\ N_t = 50 \\ N_s = 30 \end{array} \right.$$

III.6.1 Algorithme d'ICP par Matlab

L'algorithme de ICP peut efficacement estimer la transformation rigide entre le modèle théorique et le nuage de points ou pour simplifier deux ensembles des points $P = \{P_1, \dots, P_M\}$ et $Q = \{Q_1, \dots, Q_M\}$, l'algorithme peut être divisé en deux parties : la première phase consiste à trouver pour chaque point de model son point le plus proche dans le nuage, la seconde phase sera alors de déterminer la transformation rigide entre les deux ensembles de points.

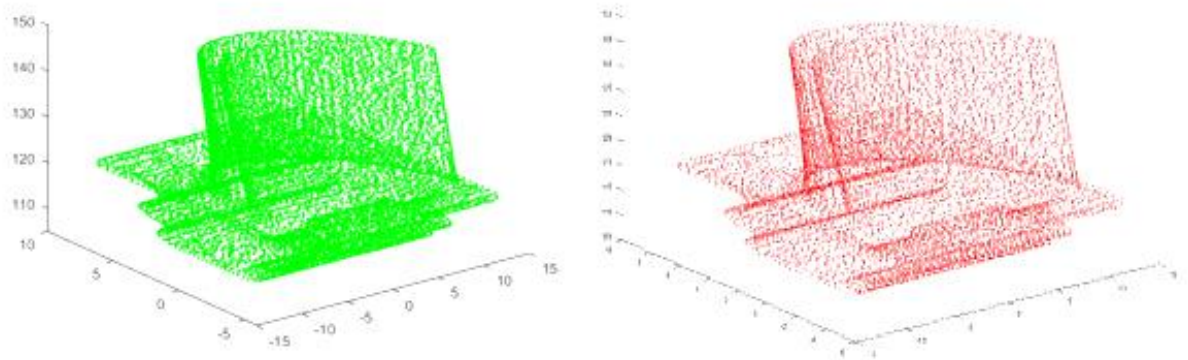


Figure III-15 Modèle et data

Donné deux ensembles comme nous l'avons dit $P = \{P_1, \dots, P_M\}$ et $Q = \{Q_1, \dots, Q_N\} \in \mathbb{R}^n$ on optimise une transformation rigide sur P (représenté par une matrice de rotation $R \in \mathbb{R}^{d \times d}$ et vecteur de translation $T \in \mathbb{R}^d$) pour aligner P avec Q :

$$\min_{R, T} \sum_{i=1}^M (D_i(R, T))^2 + I_{SO(d)}(R) \dots \dots \dots (41)$$

Avec :

$$D_i(R, T) = \min_{q \in Q} \|R \cdot P_i + T - q\| \dots \dots \dots (42)$$

Est la distance du point transformé $R \cdot p_i + T$ à l'ensemble de point Q , $I_{SO(d)}$ est un fonction indicatrice de orthogonale spéciale groupe $SO(d)$ qui nécessite que R soit une matrice de rotation : $I_{SO(d)}(R) = \begin{cases} 0 & \text{Si } R^T \cdot R = I \text{ et } \det(R) = 1 \\ +\infty & \text{Sinon} \end{cases}$

Par ailleurs L'algorithme ICP résout ce problème en utilisant une méthode itérative approche qui alterne entre les deux étapes suivantes :

Etape de correspondance : trouver le point le plus proche $q_i^{(k)}$ dans d'ensemble Q pour chaque point $p_i \in P$ base sur la transformation $(R^{(k)}, T^{(k)})$:

$$q_i^{(k)} = \operatorname{argmin} \|R^{(k)} \cdot p_i + T^{(k)} - q\| \dots \dots \dots \text{Équation 43}$$

Étape d'alignement : mettre à jour la transformation en minimisant la distance entre les points correspondants :

$$(R^{(k+1)}, T^{(k+1)}) = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^M \|R \cdot p_i + T - q_i^{(k)}\|^2 + I_{so(d)}(R) \dots \dots \dots \text{Équation 44}$$

III.7 . Calcul les erreurs entre le modèle et la pièce mesurée

Pour le calcul nous avons utilisé deux différentes méthodes chacun d'eux a ses résultats (rotation + translation, erreur de méthode, et le temps de chaque itération).

III.7.1 Méthodes

III.7.1.1 La programmation

KDTree	Brut force Matching
<pre> %% Run ICP (fast kDtree matching and extrapolation) [Ricp2, Ticp2, ER2, t2] = icp(M, D, 50, 'Matching', 'kDtree', 'Extrapolation', true); % Transform data-matrix using ICP result Dicp = Ricp2 * D + repmat(Ticp2, 1, n); % Plot model points blue and transformed points red figure;subplot(2,2,1); plot3(M(1,:),M(2,:),M(3:),'bo',D(1,:),D(2,:), D(3:),'r'); axis equal; xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z'); title('Red: z=sin(x)*cos(y), blue: transformed point cloud'); % Plot the results subplot(2,2,2); plot3(M(1,:),M(2,:),M(3:),'bo',Dicp(1,:),Dicp (2,:),Dicp(3:),'r'); axis equal; xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z'); title('ICP result'); % Plot RMS curve subplot(2,2,[3 4]); plot(0:50,ER2,'--x'); xlabel('iteration#'); ylabel('d_{RMS}'); legend('kDtree matching and extrapolation'); title(['Total elapsed time: ' num2str(t2(end),2) ' s']); </pre>	<pre> ** Run ICP (standard settings) [Ricp1, Ticp1, ER1, t1] = icp(M, D, 50); ** Transform data-matrix using ICP result Dicp = Ricp1 * D + repmat(Ticp1, 1, n); ** Plot model points and transformed points Figure ;subplot(2,2,1); plot3(M(1,:),M(2,:),M(3:),'bo',D(1,:),D(2,:), D(3:),'r'); axis equal; xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z'); title('Red: z=sin(x)*cos(y), blue: transformed point cloud'); ** Plot the results subplot(2,2,2); plot3(M(1,:),M(2,:),M(3:),'bo',Dicp(1,:),Dic p(2,:),Dicp(3:),'r'); axis equal; xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('z'); title('ICP result'); ** Plot RMS curve subplot(2,2,[3 4]); plot(0:50,ER1,'--x'); xlabel('iteration#'); ylabel('d_{RMS}'); legend('bruteForce matching'); title(['Total elapsed time: ' num2str(t1(end),2) ' s']); </pre>

Tableau III-3 Deux algorithmes utilisé

III.7.1.2 Résultat de premier algorithme

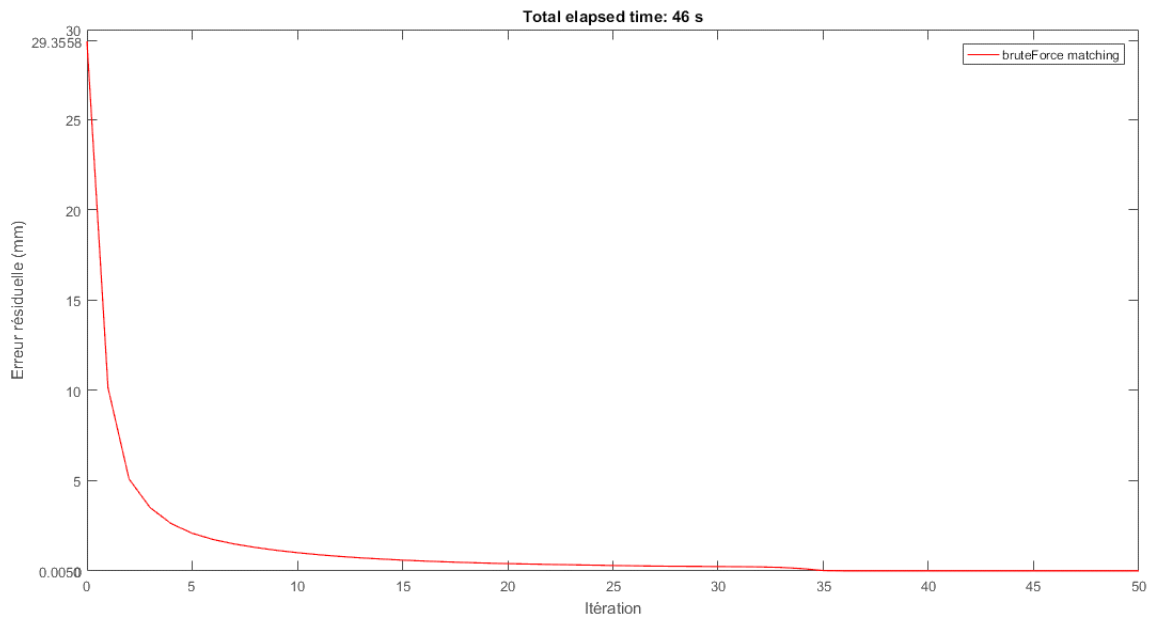


Figure III-16 Evolution de l'erreur de distance

La figure (16) illustre l'évolution des erreurs résiduelles de distance entre les deux ensembles de point, en fonction d'itérations de l'algorithme de ICP, l'erreur est maximale avant l'exécution de méthode, mais dans le cas d'ICP programme converge vite sur une solution stable, l'erreur maximale après la convergence est (0,0050 mm) ce qui est acceptable pour ce nombre d'application.

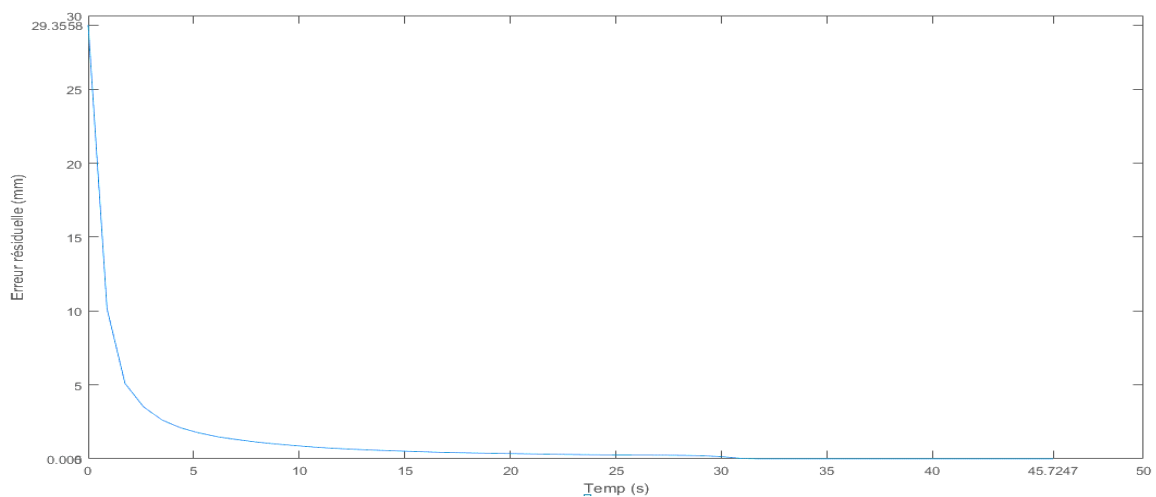


Figure III-17 Evolution de l'erreur en fonction de temps

La figure (17) représente un courbe d'évolution de l'erreur résiduelle en fonction de temps totale des itérations, le temps total d'adaptation et (45,7247s) ce qui est grand mais acceptable pour la valeur finale de l'erreur de distance.

III.7.1.3 Résultat de deuxième algorithme

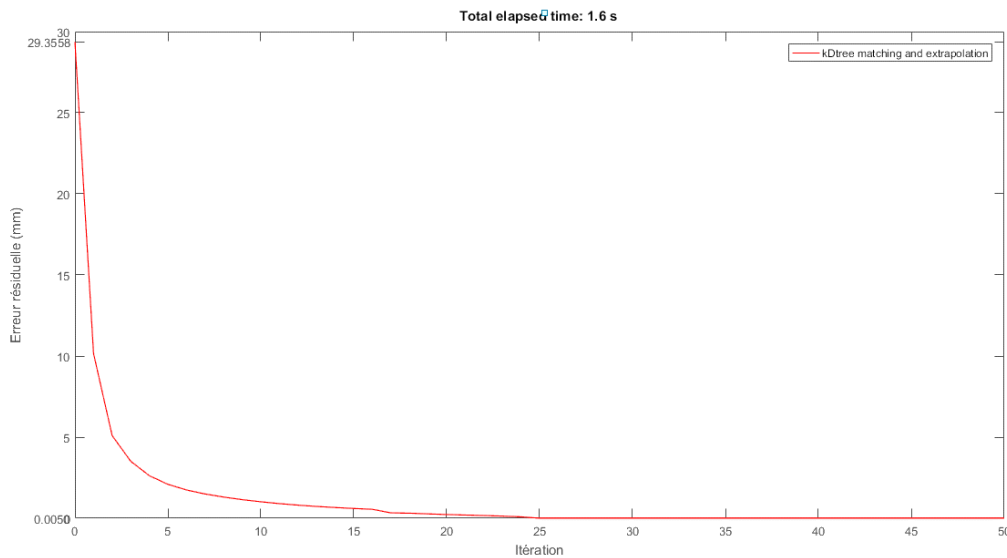


Figure III-18 Evolution de l'erreur de distance

La figure (18) illustre l'évolution des erreurs résiduelles de distance entre les deux ensembles de point, en fonction d'itérations de l'algorithme de ICP, l'erreur est maximale avant l'exécution de méthode, mais dans le cas d'ICP programme converge vite sur une solution stable, l'erreur maximale après la convergence est (0,005 mm) ce qui est acceptable pour ce nombre d'application.

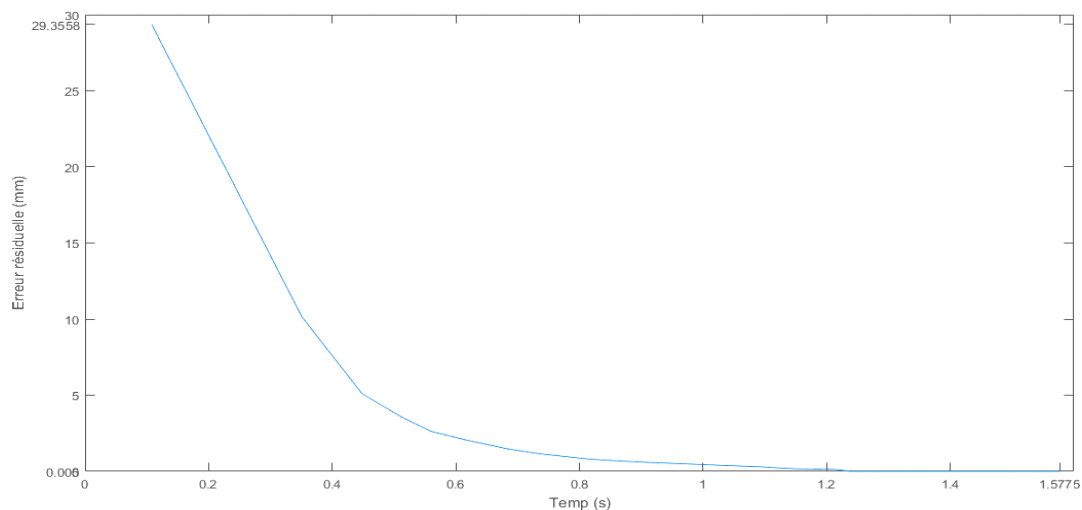


Figure III-19 Evolution de l'erreur en fonction de temps

La figure (19) représente un courbe d'évolution de l'erreur en fonction des temps de chaque itération, Le temps totale d'exécutions de cette méthode est petit par rapport à la première programmation qui est estimé à (1.5775 s) bien que ce programme donne les mêmes résultats que le programme précédent.

III.7.2 Interprétation comparative

D'après les résultats des erreurs résiduelles obtenue par les deux programmations nous observons qu'il y'a une différence de temps total d'itération pour chaque programme, dans lequel l'erreur résiduelle est le même dans les deux et il est estimé par (0.0050 mm) Le temps de traitement (KDTree) est très réduit par rapport à la première méthode.

Donc la méthode que on a adaptée c'est la deuxième (KDTree) ça s'est due à son résultats :

$$D_{RMS} = 0,005 \text{ mm}$$

$$T_{TI} = 1,4835 \text{ s}$$

Donc L'erreur de la mise en correspondance est négligeable (0,005 mm)

III.8 Superposition entre nuage de points et le modèle théorique

Dans les figures en bas nous présentons quelque résultat de l'association entre le model et nuage de points par la méthode ICP en 2D (front view) et 3D, on à choisir la méthode de « KDTree » parce que c'est rapide par rapport au premier et donnée les même résultat (erreur résiduelle de distance) que l'autre méthode.

III.8.1 L'association 2D

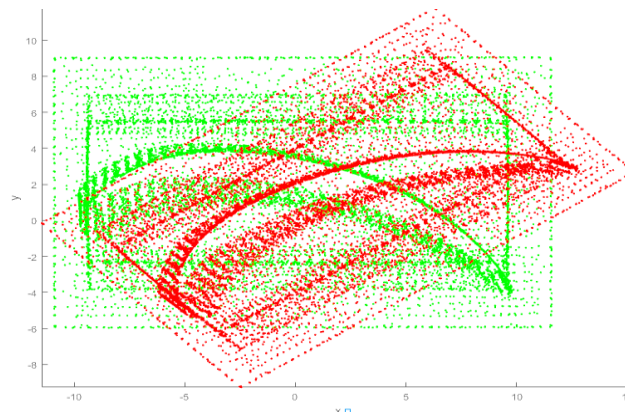


Figure III-20 Association après 5 itérations

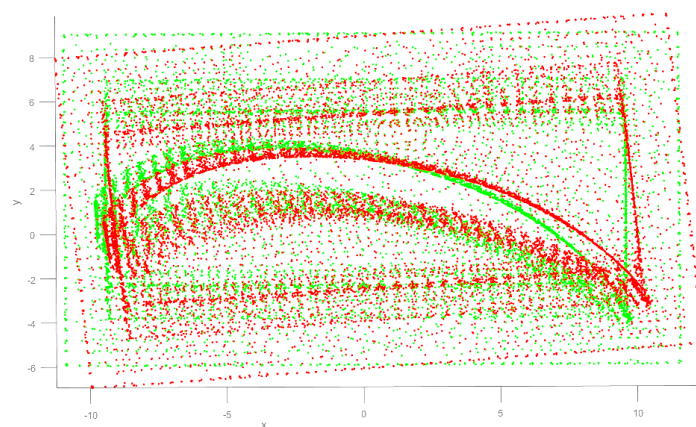


Figure III-21 Après 10 itérations

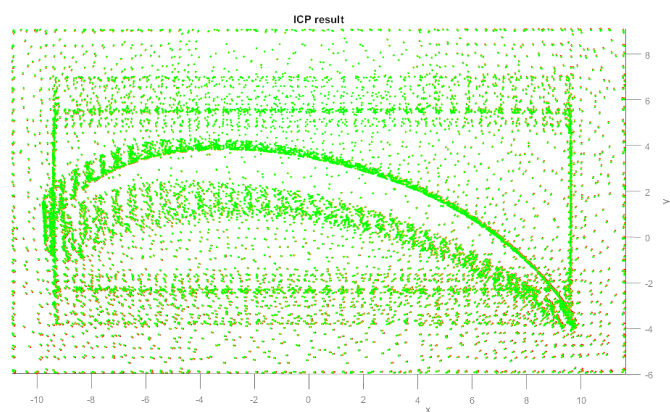


Figure III-22 Association finale (après 25 itérations)

III.8.2 Association 3D

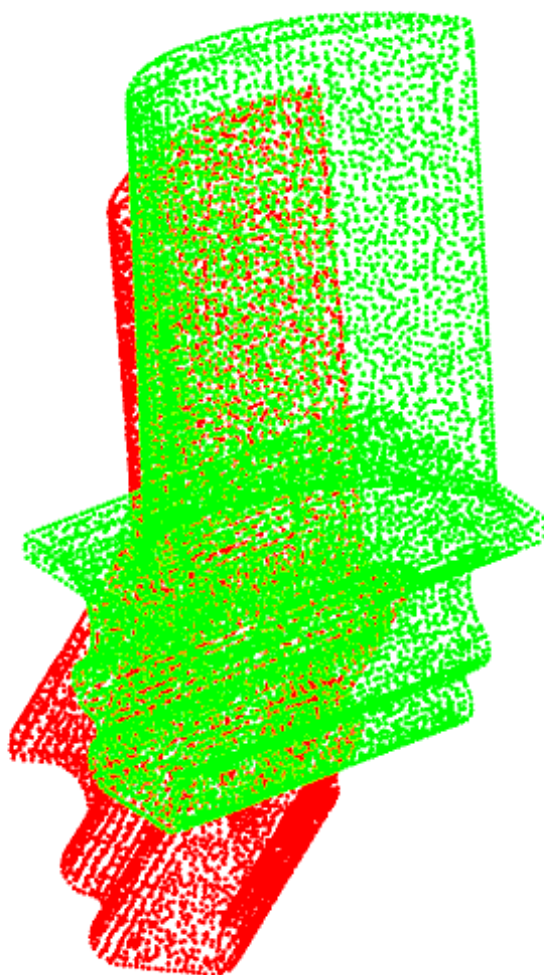


Figure III-23 Association après 5 itérations

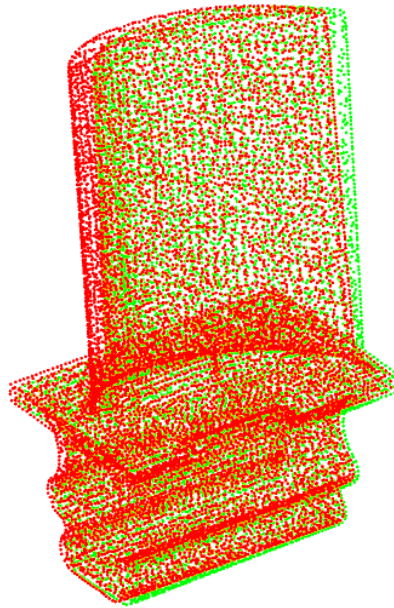


Figure III-24 Après 10 itérations

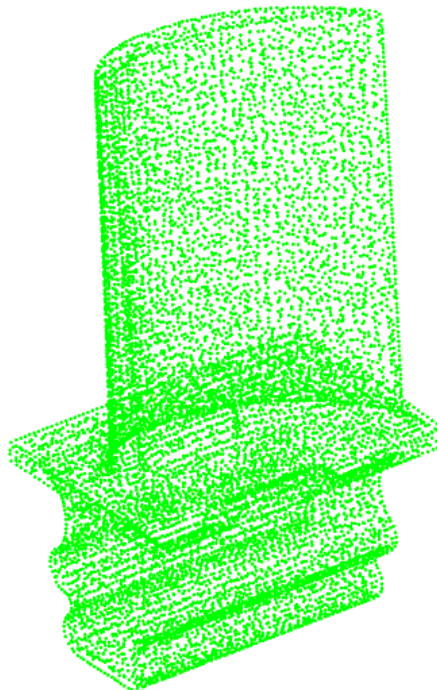


Figure III-25 Association finale (après 25 itérations)

III.9 Traitement et visualisation les défauts de l'aube de turbine gaz

III.9.1 Principe visualiser les défauts de forme de l'aube de turbine

Comme nous avons mentionné précédemment l'erreur globale est une contribution entre l'erreur de méthode et l'erreur de modélisation, ce dernier appelé aussi la défaite de forme pour déterminer ce type d'erreur de forme nous avons utilisée en logicielle de CAO. En premier lieu nous avons importé deux types des données le premier c'est le modèle théorique d'aube et le

deuxième c'est son nuage de points qui sont déjà adapté sous l'environnement MATLAB comme il est montré précédèrent.

Ensuite grâce à l'outil « Analyses déviation » nous avons calcul l'erreur de déviation E qui est visualisé par dégradation des couleurs de rouge vers violet, D'après les résultants de ce calcul on déduit les valeurs des déviations minimale et maximale la différence entre ces derniers en valeur absolue donne le défaut de forme.

$$\text{defaut de forme} = |\text{déviations max} - \text{déviations min}|$$

III.9.2 Résultats de visualisation des defaults de forme

Grace à l'outil « analyses déviation » on peut visualiser les defaults de forme entre les points modèle théorique et son homologue dans la pièce mesurer, ou bien entre leurs surfaces comme nous indiquons dans les figures au-dessous :

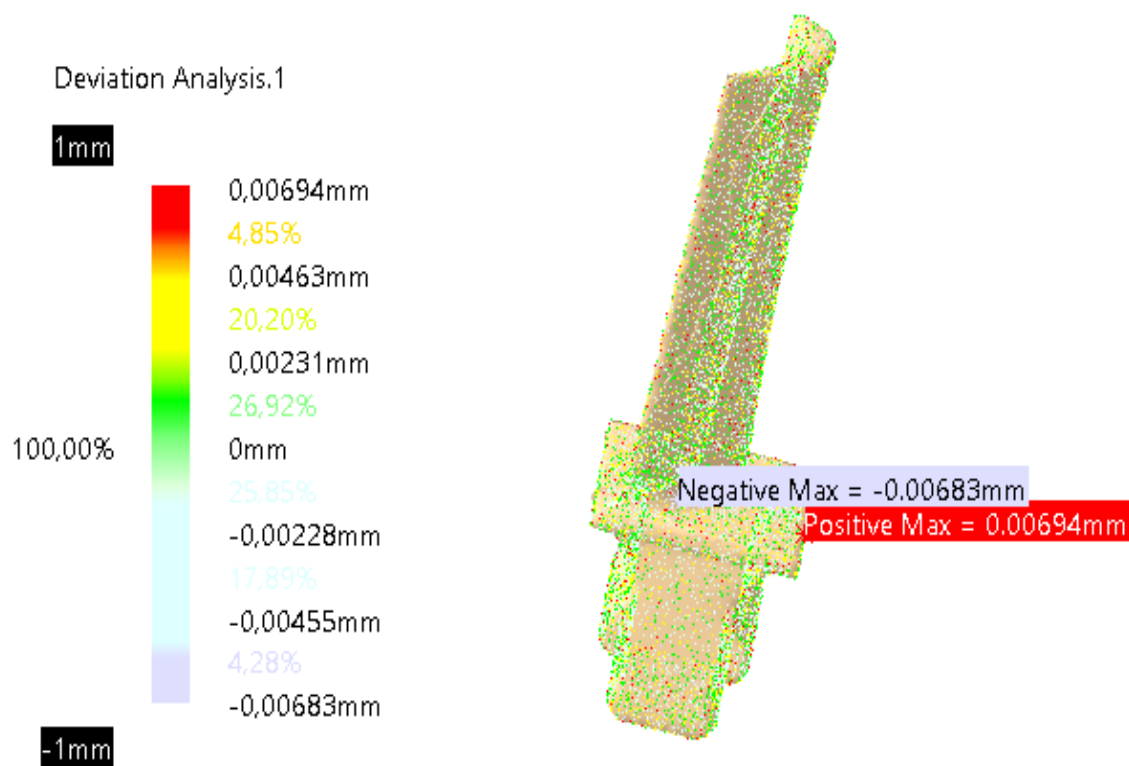


Figure III-26 Analyses de déviation entre les points d'aube

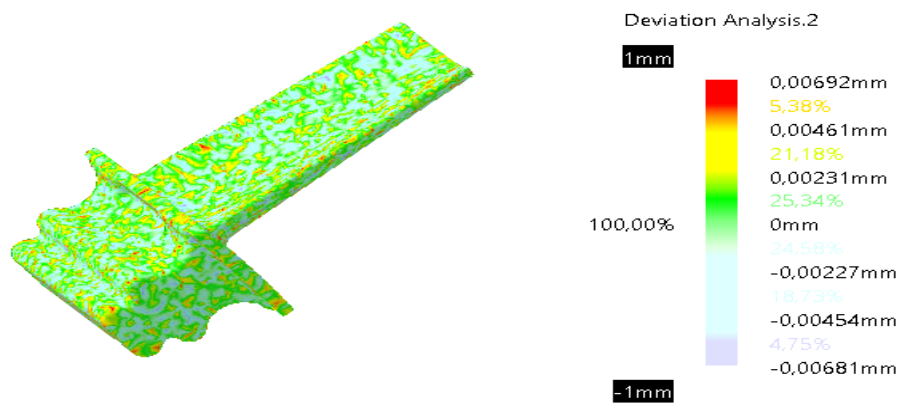


Figure III-27 Analyses de déviation entre les surfaces d'aube (3D view)

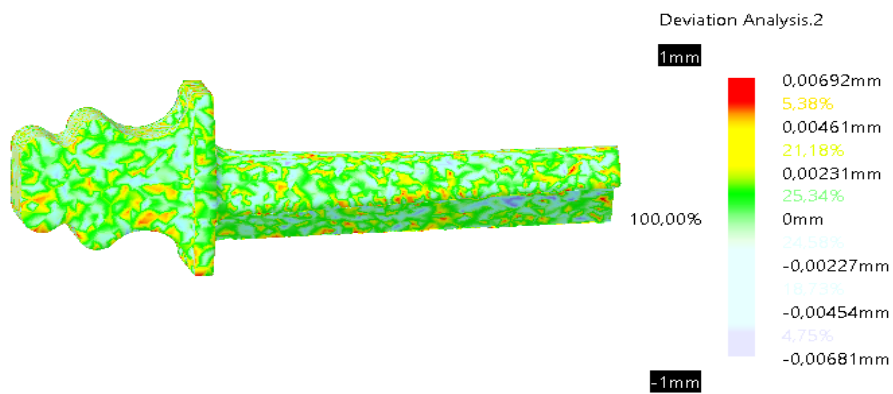


Figure III-28 Analyses de déviation entre les surfaces (left view)

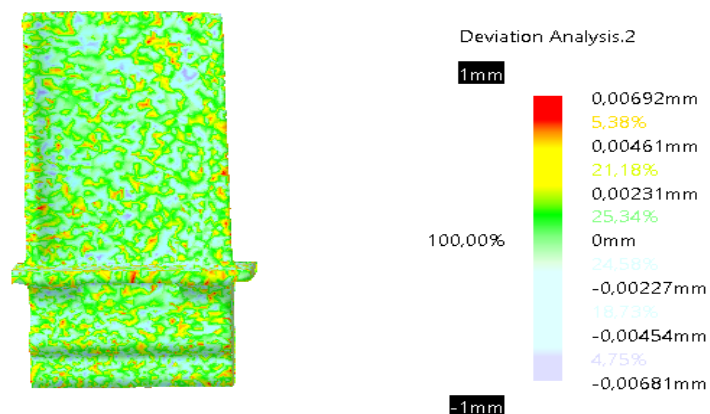


Figure III-29 Top view

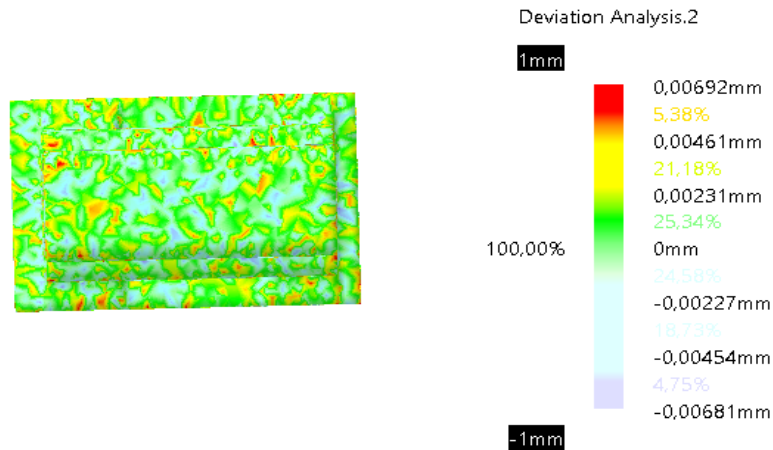


Figure III-30 Front view

III.9.3 Interprétation de résultat

La figure (30) illustre la forme d'aube en 3D, par le calcul de déviation d'erreur E en à trouver qui ce dernier varie entre $E_{max} = 0,00692 \text{ mm}$ et $E_{min} = 0,00681 \text{ mm}$

Tel quel elle est visualisée comme nous disons par dégradation du couleur de rouge jusqu'au violet et les figures (28,29,30) représente des différentes formes de vue de nos analyses.

D'après notre observation de l'échelle nous avons conclu que les surfaces avec un déviation maximale et minimale son relativement petite par rapport aux surfaces avec moyennes.

$$\text{defaute de forme} = |E_{max} - E_{min}| = |0,00692 - 0,00681| = 0,00011 \text{ mm}$$

Ce que l'on peut dire c'est que la méthode qu'on propose pour le contrôle de qualité des surfaces gauches est une méthode générale pour le contrôle de pièces mécanique que l'on peut trouver dans le domaine pétrolier comprenant des surfaces gauches. Son application pour le contrôle du défaut de forme d'une aube de turbine à gaz a donnée bon résultat.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est lié au contrôle de qualité d'une aube de turbine à gaz à l'aide d'une méthode itérative appelé ICP (iterative closest point) qui est appliqué pour la mise en correspondance (recalage rigide). Il alterne entre la recherche du point le plus proche de l'ensemble Q et son homologue dans l'ensemble P tout en minimisant la distance entre les points correspondants.

ICP basé sur la transformation de la distribution normale, Cet algorithme permet de dépasser les limites de la recherche des points correspondants et de réduire la complexité du calcul et d'économiser considérablement la durée consacrée au calcul, tout en garantissant une précision équivalente ou supérieure à celle conventionnelle. En même temps, l'algorithme a obtenu des résultats satisfaisants dans deux types de nuages de points (modèle théorique et la pièce mesurée). La machine de mesure tridimensionnel (MMT) est un outil qui est capable de définir de manière unique et avec une extrême précision la position de ces points dans l'espace tridimensionnel, et de déterminer les paramètres significatifs des figures géométriques notamment la surface gauche afin de réaliser le nuage de points de la pièce.

Pour remplacer la MMT on a effectué une simulation par SOLIDWORKS pour déformer un peu et obtenir le nuage de points de pièce mesurée. Après utilisant Matlab on a déterminé la transformation rigide de la superposition (adaptation) entre le modèle théorique et la pièce mesurée.

Dans l'étape de mise en correspondance l'algorithme ICP est utilisé en conséquence. Cet algorithme permet de trouver la transformation allant d'un modèle 3D à un ensemble de données obtenu par un système d'acquisition.

Les courbes de l'erreur d'adaptation en fonction de nombre d'itération obtenu par Matlab et utilisant les deux algorithmes d'ICP nous montre que l'algorithme le plus adapté à notre calcul est le « KDtree » algorithme considèrent leur court temps de traitement par rapport à celui de « Brutforce Matching ».

Les distances entre la surface nominale et les points mesurés (c'est-à-dire les défauts de forme) sont calculés après que les étapes d'alignement soient nécessaires pour corriger les erreurs cumulées pendant la phase de fabrication. Pour l'étape de correction du modèle STL, la technique d'éléments finis appliquée aux objets déformables doit être utilisée.

La dernière chose que nous pouvons dire et d'après les résultats que on a obtenue par l'application de cette méthode pour le contrôle de qualité d'aube de turbine à gaz, nous concluons que cette méthode est applicable sur les pièces mécaniques qui contiennent des surfaces complexes (surface gauche : aube dans notre cas) qui ne sont pas toujours faciles à mesurer avec les techniques traditionnelles, on peut dire aussi que les résultats ont été suffisamment bons mais ils peuvent être améliorés d'avantage au niveau de la précision.

Références

- [1] M. Hadjar, « Critères Mécaniques D'amendées Pour La Fabrication De L'aubage D'une Turbine, » 26 Juin 2018.
- [2] Mise En Œuvre Des Turbines A Gaz Dans L'industrie, Par « Technique De L'ingénieur » (Yves Loranchet).
- [3] Article Groupement De Recherche Cea Cnrs Edf –Framatome Gedepeon Perpignan – 19 & 20 Juin 2003.
- [4] D. O. E. S. Ali, « Analyse Et Simulation Des Aubes D'une Turbine A Gaz En Presence Des, » Ouargla, 15/06/2019.
- [5] E.N. Jacobs, K.E. Ward, & R.M. Pinkerton. Naca Report No. 460, « The Characteristics of 78 Related Airfoil Sections from Tests in The Variable-Density Wind Tunnel »
- [6] Manuel D'exploitation De Turbine A Gaz Type (Taurus 60) Par « Solar Turbine » (Sonatrach Sp3 Lotaya W. Biskra).
- [7]. Développement D'une Méthodologie De Réduction Des Défauts Géométriques : Application L'usinage 5-Axes De Composants De Turbomachine Julien Chaves-Jacob 28 /09/2009 Ecole Nationale Supérieure D'arts Et Métiers.
- [8] K. Eftikhar, « Conception D'une Aube De Turbine A Gaz En Matériaux Composites,» 14/09/2015
- [9] Bensaada, Biskra, 05 04 2022
- [10] Carma, « Glossaire Des Matériaux Composites, » Actualisation Octobre 2006.
- [11] E. J. M. Gell, «Turbine Engine, » 2002.
- [12] La Fonderie Cire Perdue Zone Artisanale 35320 Pance France. Lien Vers Le Site De Nowak.
- [13] K. M. M. H. S. A. Abdullah, January 2007
- [14] M. F. Makhloufi, « Métrologie 02, » Institut Des Sciences Et Des Techniques Appliquées Université Des Frères Mentouri Constantine 1.
- [15] F. Mounir, « Métrologie Et Appareils De Mesure, » Institut Supérieur Des Sciences Appliquées Et De Technologie De Sousse.
- [16] C. N, « Morphologie Et Architecture Des Mmt, » Institut Supérieur Des Etudes Technologiques De Sousse.
- [17] « Métrologie Tridimensionnelle, » Institut Universitaire De Technologie De Mulhouse, 26/04/2005.
- [18] M. Priel, « Incertitudes De Mesure Et Tolérances, » Techniques De L'ingénieur, Traité Mesures Et Contrôle, Vol. R-285, 1999
- [19] J. R. R. Mayer, « Cours Mec4500 – Contrôle Dimensionnel (Département De Génie mécanique – Ecole Polytechnique De Montréal), » 2007.

- [20] M. Désenfant, M. Priel, And C. Rivier, « Évaluation Des Incertitudes Des Résultats d'analyse, » Techniques De L'ingénieur, Traité Mesures Et Contrôle, Vol. P 105, Pp. 1-17, 2005.
- [21] A. K. El shennawy, I. Ham, And P. H. Cohen, « Evaluating The Performance of Coordinate Measuring Machines » Quality Progress, Vol. 21, Pp. 59-65, 1988.
- [22] A. Weckenmann, M. Knauer, And T. Killmaier, « Uncertainty of Coordinate Measurement on Sheet-Metal Parts in The Automotive Industry, » Journal of Materials Processing
- [23] J.-M. David, T. Coorevits, (1993), Les Limites De La Correction Par Logiciel Des Erreurs De Géométrie Des M.M.T. : Définition D'une Architecture Nouvelle De Machine. 6^{ième} Congrès International De Métrologie, Technology, Vol. 115, Pp. 9-13, 2001.
- [24] Jean-Paul Mathien, Contrôle Des Machines A Mesurer, Techniques De L'ingénieur, Traité Mesures Et Contrôle.
- [25] J. A. Bosch, Coordinate Measuring Machines and Systems, Marcel Dekker Ed. New York.
- [26] H. Gheribi, « Contribution A L'estimation Des Incertitudes De Mesure Dans La Chaîne De Traitement D'une Machine A Mesurer Tridimensionnelle, » Université Des Frères Mentouri Constantine Faculté Des Sciences De La Technologie Département De Génie Mécanique, Constantine.
- [27] Nicolas Audfray, (2012) Une Approche Globale Pour La Métrologie 3d Automatique Multi-Systèmes, Thèse De Doctorat De L'école Normale Supérieure De Cachan, Ensc 2012 N°423, Laboratoire Universitaire De Recherche En Production Automatisée Ens Cachan/Ea 1385/Université Paris Sud 11, 61 Avenue Du Président Wilson, 94235 Cachan Cedex (France).
- [28] François Hannebelle, (05 Décembre 2007), Détermination Des Incertitudes De Mesures Sur Machines A Mesurer Tridimensionnelles Application Aux Engrenages, Thèse De Doctorat.
- [29] Renshaw Apply Innovation, Palpeur A Contact Pour Tour Olp40.
- [30] Mathias Ferraton, (27 Octobre 2010), Réalisation D'un Système D'acquisition 3d Pour Des Objet Transparents, Thèse De Doctorat, Université De Bourgogne.
- [31] Al Shawa, Majd. 2006. Consolidation Des Nuages De Points En Laser grammetrie Terrestre. Strasbourg : Mémoire Du Master De Recherche, 2006.
- [32] Besl, P Et Mckay, N. 1992. A Méthode for Registration of 3d Shapes. Trans. Vol. 14, 2. 1992.
- [33] Seung-Hwan, Kim, Et Al. 2004. Reducing Computation Time For Range Image Registration Using Radial Distance Down-Sampling. Fukuoka Japan: Proceedings 10th Korea-Japan Joint Workshop Frontiers of Computer Vision Fcv, 2004.
- [34] Gelfand, N, Rusinkiewicz, Set Levoy, M. 2003. Geometrically Stable Sampling for The Icp Algorithm. Canada: In Proc, 2003. Ieee 3dim.
- [35] Zhang, Z. 1992. Iterative Point Matching for Registration of Free-Form Curves and Surfaces. Comput Vision, 1992.
- [36] Krebs, B, Sieverding, P Et Korn, B. 1996. A Fuzzy Icp Algorithm for 3d Free Form Object Recognition. Vienna : Proceedings Of The 13th International Conférence.

[37] Moron, Véronique. 1996. Mise En Correspondance De Données 3d Avec Un Modelé Cao : Application A L'inspection Automatique. Lyon France. Thèse Automatique Industrielle : Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon (Insa), 1996.

[38] Azzam, Noureddine. « Mise en Place d'un Modèle d'inspection des Surfaces a Geometries complexes En vue D'une Correction Process : Application A L'usinage des Protheses Par Prototypage Rapide. » Université Mentouri Constantin.

Annexe

Avant le processus d'adaptation et exécute les deux ensembles (le modèle d'aube et le nuage de points) sont confondu, alors nous appliquons une transformation initiale (T_0+R_0) connus sur ces points afin de séparer ces deux ensembles.

Programme:

```
% size of model/data
n_model=10938;
n_data=10938;
% weights
weights=ones(1,n_data);weights=rand(1,n_data);
% Transform points in data (move away from start position).
deg=20;
v1=2*(rand-0.5)*deg*(pi/180);
v2=2*(rand-0.5)*deg*(pi/180);
v3=2*(rand-0.5)*deg*(pi/180);
TR0=[cos(v1) sin(v1) 0;-sin(v1) cos(v1) 0;0 0 1];
TR0=TR0*[cos(v2) 0 sin(v2);0 1 0;-sin(v2) 0 cos(v2)];
TR0=TR0*[1 0 0;0 cos(v3) sin(v3);0 -sin(v3) cos(v3)];
TT0=3.0*(rand(3,1)-0.5);
D=TR0*D+repmat(TT0,1,n_data)
% randvec
rndvec=uint32(randperm(n_data)+1);
% sizerand, number of point-matchings in each iteration.
sizernd=ceil(1.45*n_data);
n=10938;
Résultat :
```



Association initiale