



HAL
open science

Métrieologie 3D de pièces de formes complexes par moyens optiques : Une application à l'équilibrage de vilebrequins

Alexandre Zuquete Guarato

► **To cite this version:**

Alexandre Zuquete Guarato. Métrieologie 3D de pièces de formes complexes par moyens optiques : Une application à l'équilibrage de vilebrequins. Sciences de l'ingénieur [physics]. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2013. Français. NNT : . tel-00942486

HAL Id: tel-00942486

<https://theses.hal.science/tel-00942486>

Submitted on 5 Feb 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THESE DE DOCTORAT
DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN**

Présentée par

Monsieur Alexandre ZUQUETE GUARATO

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN

Domaine :

MECANIQUE- GENIE MECANIQUE – GENIE CIVIL

Sujet de la thèse :

**METROLOGIE 3D DE PIECES DE FORMES COMPLEXES PAR MOYENS
OPTIQUES : UNE APPLICATION A L'EQUILIBRAGE DE
VILEBREQUINS**

Thèse soutenue à Cachan le 11 décembre 2013 devant le jury composé de :

| | | |
|-----------------------|--|--------------------|
| Jean-Yves HASCOET | Professeur, Ecole Centrale de Nantes | Rapporteur |
| Sébastien REMY | MCF HDR, Université de Technologie de Troyes | Rapporteur |
| Jean-Philippe PERNOT | Professeur, Arts et Métiers Paris Tech Aix en Provence | Examineur |
| Nicolas PERRY | Professeur, Arts et Métiers Paris Tech Bordeaux | Examineur |
| Claire LARTIGUE | Professeur, Université Paris-Sud | Directeur de thèse |
| Charyar MEHDI-SOUZANI | MCF, Université Paris-Nord | Co-encadrant |
| Yann QUINSAT | Professeur agrégé, Docteur, ENS Cachan | Co-encadrant |
| Shadan TABIBIAN | Docteur-ingénieur, Renault SA | Examineur |
| Edoardo SURA | Docteur-ingénieur, Renault SA | Invité |



Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée
ENS CACHAN / EA 1385 / Université Paris Sud 11
61, avenue du Président Wilson, 94235 CACHAN CEDEX (France)

Table des matières

| | |
|--|-----|
| Table des matières..... | i |
| Liste des tableaux..... | v |
| Liste des figures..... | vii |
| Introduction..... | 1 |
| Chapitre 1 : Problématique de l'équilibrage par numérisation 3D | 5 |
| 1. Problèmes industriel et scientifique..... | 6 |
| 1.1. Procédure actuelle d'équilibrage de vilebrequins | 8 |
| 1.2. Procédure d'équilibrage de vilebrequins par numérisation 3D..... | 13 |
| 1.3. Numérisation 3D et caractéristiques des données acquises | 14 |
| 1.4. Calcul des éléments d'inertie sur données discrètes | 18 |
| 2. Synthèse et démarche pour la résolution de la problématique..... | 23 |
| Chapitre 2 : Calcul d'inertie sur données discrètes..... | 27 |
| 1. Introduction..... | 28 |
| 2. Equilibrage et calcul d'inertie sur données continues..... | 29 |
| 2.1. Notions d'équilibrage..... | 29 |
| 2.2. Détermination des vecteurs-balourd | 30 |
| 3. Algorithme de calcul d'inertie basé sur une <i>voxelmap</i> | 32 |
| 3.1. Construction de la <i>voxelmap</i> et calcul des éléments d'inertie | 33 |
| 3.2. Etude de cas | 38 |
| 4. Optimisation des paramètres..... | 41 |
| 4.1. Influence du maillage et de la voxélisation..... | 42 |
| 4.2. Choix des paramètres optimaux..... | 44 |
| 5. Étude de sensibilité de l'algorithme aux défauts de numérisation..... | 45 |
| 6. Conclusions..... | 50 |
| Chapitre 3 : Evaluation des systèmes de numérisation pour l'opération d'équilibrage..... | 53 |
| 1. Introduction..... | 54 |
| 2. Caractéristiques des systèmes de numérisation 3D retenus..... | 55 |
| 2.1. Description des systèmes | 55 |
| 2.2. Configuration des systèmes de numérisation..... | 58 |

| | | |
|---|--|-----|
| 3. | Evaluation des systèmes de numérisation..... | 59 |
| 3.1. | Indicateurs de qualité selon le protocole QUALIPSO..... | 59 |
| 3.2. | Indicateurs spécifiques à la complexité géométrique..... | 65 |
| 3.3. | Synthèse sur l'évaluation des systèmes de numérisation..... | 72 |
| 4. | Conclusions..... | 73 |
| Chapitre 4 : Elaboration d'une stratégie de numérisation..... | | 75 |
| 1. | Introduction..... | 76 |
| 2. | Notion de point de vue capteur..... | 77 |
| 3. | Méthodes de planification de trajectoires de numérisation..... | 79 |
| 3.1. | Recherche des points de vue..... | 80 |
| 3.2. | Détermination des points de vue avec prise en compte de la qualité..... | 83 |
| 3.3. | Synthèse sur les méthodes de détermination des points de vue..... | 87 |
| 4. | Détermination des points de vue à partir d'une <i>voxelmap</i> : Voxel2scan..... | 88 |
| 4.1. | Principe de la méthode..... | 88 |
| 4.2. | Définitions..... | 90 |
| 4.3. | Description de la méthode Voxel2scan..... | 94 |
| 5. | Applications..... | 100 |
| 6. | Conclusions..... | 105 |
| Chapitre 5 : Application Industrielle..... | | 107 |
| 1. | Introduction..... | 108 |
| 2. | Validation de la méthode Voxel2scan..... | 109 |
| 2.1. | Mise en œuvre des essais de numérisation avec le système GOM..... | 109 |
| 2.2. | Mise en œuvre des essais de numérisation avec le système Kreon..... | 111 |
| 2.3. | Synthèse sur la mise en œuvre des systèmes..... | 114 |
| 2.4. | Résultats de numérisation..... | 114 |
| 3. | Validation de la méthode Voxel2inertia..... | 118 |
| 3.1. | Post-traitements des nuages de points pour le calcul des éléments d'inertie..... | 119 |
| 3.2. | Calcul des balourds sur données numérisées..... | 122 |
| 4. | Synthèse sur les systèmes de numérisation..... | 124 |
| 5. | Conclusion..... | 126 |
| Conclusions et perspectives..... | | 129 |
| Références..... | | 135 |
| Bibliographie..... | | 136 |

| | |
|--|-----|
| Normes..... | 146 |
| Annexes..... | 147 |
| A. Capteurs de numérisation 3D..... | 148 |
| 1. Système de numérisation Kreon Zephyr KZ25 | 150 |
| 2. Système de numérisation Gom Atos III..... | 152 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1 : Erreurs sur le calcul des éléments d'inertie calculés analytiquement et par l'algorithme Voxel2inertia..... | 41 |
| Tableau 2 : Influence du bruit sur l'erreur de balourd dans le plan de référence volant. | 46 |
| Tableau 3 : Erreur de balourd dans le plan de référence volant par rapport à facteur d'échelle. | 46 |
| Tableau 4 : Erreurs des éléments d'inertie en fonction des trous de numérisation..... | 49 |
| Tableau 5 : Niveaux de bruit selon le système de numérisation..... | 62 |
| Tableau 6 : Evaluation de la justesse. | 64 |
| Tableau 7 : Angle d'étendue mesurée pour les trois systèmes. | 68 |
| Tableau 8 : Densité surfacique pour les trois systèmes. | 69 |
| Tableau 9 : Surface mesurée selon le système de numérisation. | 72 |
| Tableau 10 : Synthèse pour le choix des systèmes de numérisation..... | 73 |
| Tableau 11 : Paramètres de numérisation pour les deux capteurs. | 100 |
| Tableau 12 : Résultats de l'algorithme Voxel2scan pour les systèmes Gom et Kreon. | 102 |
| Tableau 13 : Pourcentages de surface non vue sur données CAO pour les systèmes Gom et Kreon. | 116 |
| Tableau 14 : Pourcentages de surface non vue et non numérisée avec les systèmes Gom et Kreon. | 118 |
| Tableau 15 : Balourds normalisés des vilebrequins bruts mesurés en berceau mécanique. | 119 |
| Tableau 16 : Moyenne et écart-type de la distance entre les sphères associées et les nuages de points pour le vilebrequin 3. | 120 |
| Tableau 17 : Distance entre les sphères du nuage inférieur et le nuage supérieur après recalage. | 120 |
| Tableau 18 : Comparaison entre les balourds normalisés mesurés en berceau mécanique et ceux calculés avec Voxel2inertia pour le système Gom. | 123 |
| Tableau 19 : Comparaison entre les balourds mesurés en berceau mécanique et calculés avec Voxel2inertia pour le système Kreon. | 124 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Géométrie des vilebrequins à 4 cylindres K9 (en haut) et M9 (en bas)..... | 6 |
| Figure 2 : Chaîne simplifiée de production de vilebrequins..... | 8 |
| Figure 3 : Equilibrage en 3 étapes et dispersions des balourds associées..... | 9 |
| Figure 4 : Surfaces cylindriques usinées aux extrémités du vilebrequin (encerclées en rouge)..... | 10 |
| Figure 5 : Position des plans de référence (en rouge) pour la mesure des balourds..... | 10 |
| Figure 6 : Ecart de la peau de la pièce par rapport à la définition CAO..... | 12 |
| Figure 7 : Principaux constituants d'un système de numérisation [CON 02, AUD 12]. | 15 |
| Figure 8 : Sources d'imprécision [LAR 04]. | 15 |
| Figure 9 : Caractéristiques des données numérisées..... | 16 |
| Figure 10 : Matrice d'inertie d'un solide. | 18 |
| Figure 11 : Détermination des axes principaux à partir de données de points bruités [LUI 09]..... | 19 |
| Figure 12 : Extraction d'un plan de symétrie sur un nuage de points [CHA 08]. | 20 |
| Figure 13 : Modélisation d'objets 3D pour le calcul approché d'éléments d'inertie [LIC 03]. | 21 |
| Figure 14 : Modélisation d'objets 3D pour le calcul approché d'éléments d'inertie [CRI 98]. | 22 |
| Figure 15 : Démarche globale de calcul de balourds par numérisation 3D. | 25 |
| Figure 16 : Vecteurs balourd..... | 31 |
| Figure 17 : Représentation d'une tranche de la structure de voxelisation [PAT 05]. | 33 |
| Figure 18 : Représentation de l'influence de la taille des voxels sur la description du volume. | 35 |
| Figure 19 : Identification des voxels de surface et définition de la voxelisation finale sur une sphère [SUB 06]. | 36 |
| Figure 20 : Algorithme de calcul Voxel2inertia. | 37 |
| Figure 21 : Représentation de la taille du maillage (S_m), de flèche (S_f) et de voxel (S_V)..... | 38 |
| Figure 22 : Erreur sur la détermination de l'aire d'un cercle en fonction du rayon et de la taille de flèche..... | 39 |
| Figure 23 : Pièce test utilisée pour la définition des niveaux de maillage..... | 39 |
| Figure 24 : Influence de la taille de voxel sur l'estimation de la masse totale pour différents maillages. | 43 |
| Figure 25 : Influence de la taille de voxel sur le balourd dans le plan de référence volant pour différents maillages..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Figure 26 : Temps de calcul en fonction de la taille de voxel utilisée pour différents maillages..... | 45 |
| Figure 27 : Trous de numérisation pour les systèmes : (a) Gom et (b) Kreon..... | 47 |
| Figure 28 : Trous générés et bouchés sur (a) les vallées et (b) sur l'axe de rotation du vilebrequin. .. | 48 |
| Figure 29 : Démarche de validation du calcul de balourds par numérisation 3D..... | 51 |
| Figure 30 : (a) Kreon Zéphyr Z25, (b) Noomeo Optinum RE, et (c) Gom Atos..... | 56 |
| Figure 31 : Capteur Kreon monté sur MMT [MEH 06b]. | 56 |
| Figure 32 : Paramétrisation des capteurs à triangulation [AUD 12b]..... | 59 |
| Figure 33 : Plan en marbre et représentation graphique du bruit [AUD 12b]. | 60 |
| Figure 34 : Nuages de points du plan en marbre pour les trois systèmes. | 61 |
| Figure 35 : Hauteur de marche calibrée (en rouge) et représentation graphique..... | 63 |
| Figure 36 : Calcul de l'hauteur de marche. | 63 |
| Figure 37 : Nuages de points de la marche pour les trois systèmes..... | 64 |
| Figure 38 : Cylindre et la zone utile pour la numérisation en rouge..... | 66 |
| Figure 39 : Direction de vue du capteur vis-à-vis du cylindre..... | 66 |
| Figure 40 : Découpage du nuage de points en tranches et calcul de l'angle d'étendue et de la densité surfacique..... | 67 |
| Figure 41 : Nuages de points du cylindre pour les trois systèmes..... | 68 |
| Figure 42 : Le vilebrequin brut..... | 70 |
| Figure 43 : Points de vue utilisés pour la mesure des contrepoids centraux du vilebrequin. | 71 |
| Figure 44 : Nuages de points de la zone centrale du contrepoids pour les trois systèmes..... | 71 |
| Figure 45 : Trajectoire de numérisation avec un capteur à laser plan. | 77 |
| Figure 46 : Occultation de la caméra pour un capteur à laser plan..... | 78 |
| Figure 47 : Collision du capteur lors de la numérisation d'une surface profonde. | 79 |
| Figure 48 : Trajectoire (à gauche) associée à une section de la pièce (à droite) [XI 99]..... | 81 |
| Figure 49 : Calcul de visibilité globale [REM 04]..... | 84 |
| Figure 50 : Trajectoire de numérisation suivant la surface de l'objet [MAR 05]. | 85 |
| Figure 51 : Calcul de la visibilité (gauche) et représentation sur une carte (droite) [RAF 13]. | 87 |
| Figure 52 : Fenêtre de mesure optimale, plane (à gauche), et tridimensionnelle (au milieu) et modélisation du cône de visibilité du capteur..... | 89 |
| Figure 53 : Représentation des points de vue initiaux pour une surface quelconque..... | 90 |
| Figure 54 : Calcul de la normale des voxels à partir des normales locales. | 91 |
| Figure 55 : Analyse de la cohérence d'un voxel. | 93 |
| Figure 56 : Classification des voxels selon une direction de vue. | 94 |

| | |
|---|-----|
| Figure 57 : Modélisation de la surface par <i>voxelmap</i> (voxels et normales locales). | 95 |
| Figure 58 : Raffinement de la <i>voxelmap</i> en fonction des normales locales..... | 96 |
| Figure 59 : Définition des points de vue et gestion des collisions..... | 97 |
| Figure 60 : Ajout de directions de vue supplémentaires..... | 98 |
| Figure 61 : Démarche de l’algorithme Voxel2Scan. | 99 |
| Figure 62 : Voxélisation divisée pour le capteur Gom (à gauche) et pour le capteur Kreon (à droite). | 101 |
| Figure 63 : Points de vue avec le capteur Gom Atos (à gauche) et avec le capteur Kreon KZ25 (à droite)..... | 102 |
| Figure 64 : Voxels non vus avec le système Gom (à gauche) et avec le système Kreon. | 103 |
| Figure 65 : Voxels non vus dus à la collision entre le système Kreon et le vilebrequin. | 103 |
| Figure 66 : Intersection de la visibilité source lumière et la visibilité caméra. | 104 |
| Figure 67 : Typologies étudiées (a) M9T, (b) F9, (c) R9M et (d) H5Bt..... | 109 |
| Figure 68 : Configurations du capteur Gom par rapport au vilebrequin lors des numérisations..... | 110 |
| Figure 69 : Montage avec cibles utilisé avec le système GOM..... | 111 |
| Figure 70 : Montage avec sphères calibrées utilisé avec le système Kreon | 112 |
| Figure 71 : Recalage du (a) nuage de points supérieur avec le (b) nuage de points inférieur et (c) nuage de points assemblé..... | 113 |
| Figure 72 : Voxels non vus sur données CAO pour le système Gom (à gauche) et pour le système Kreon (à droite)..... | 115 |
| Figure 73 : Voxels non vus sur données CAO dû à la collision pour les vilebrequins (a) M9T, (b) F9 et (c) R9M avec le système Kreon..... | 116 |
| Figure 74 : Maillages issus de la numérisation d’un vilebrequin F9 avec le système Gom (à gauche) et avec le système Kreon (à droite)..... | 117 |
| Figure 75 : Vilebrequin M9T initial (en marron) et après bouchage des trous (en bleu). | 121 |
| Figure 76 : Recalage du maillage grâce à des associations d'entités. | 122 |
| Figure 77 : Validation d’une cellule robotisée pour la numérisation avec le capteur GOM. | 126 |
| Figure 78 : Triangulation pour (a) un système à un détecteur et (b) un système à deux détecteurs [CHA 04a]..... | 148 |
| Figure 79 : Capteur Kreon avec fenêtre de mesure (à gauche) et la MMT sur laquelle il est monté [MEH 06b]..... | 151 |
| Figure 80 : Système de numérisation Gom et la fenêtre de mesure..... | 152 |
| Figure 81 : Cibles de positionnement collées sur le vilebrequin et sur la surface de posage. | 154 |

Figure 82 : Calibration du système Gom à l'aide d'un panneau doté de cibles..... 154

Introduction

Dans tous les domaines de l'industrie, la quête pour la réduction des coûts et pour la flexibilisation des processus est constante. Cela est flagrant dans le domaine de l'automobile avec, par exemple, l'utilisation de la même ligne de production pour différentes voitures d'une marque, voire même de marques différentes. En effet, grâce à la flexibilisation de lignes de production existantes, des dizaines de millions d'euros sont économisés par rapport à l'implantation d'une nouvelle ligne.

La société Renault n'échappe pas à ce contexte. Cette société cherche à rendre flexible une des opérations de production de vilebrequins : l'équilibrage des vilebrequins. A l'heure actuelle, l'opération d'équilibrage des vilebrequins nécessite des moyens de mesure mécanique relativement onéreux et peu flexibles vis-à-vis des différentes géométries de vilebrequins. De ce constat, il semble intéressant de remplacer ces moyens de mesure mécanique par des moyens de mesure de géométrie plus flexibles vis-à-vis des typologies de pièces.

L'intérêt de la société Renault s'est porté sur la mesure de géométrie au moyen de systèmes de numérisation 3D optiques (ou sans contact). De plus en plus présents dans l'industrie, ces systèmes permettent l'acquisition, en des temps relativement courts, de la géométrie externe des surfaces des pièces sous forme de grands nuages de points. Cependant, la mise en œuvre de tels systèmes dans un contexte d'équilibrage de pièces tournantes met en évidence deux problématiques majeures. La première est liée au caractère discret et surfacique des données acquises par numérisation 3D. En effet, l'équilibrage s'appuie sur le calcul des éléments d'inertie d'un solide, calcul mené à partir de données volumiques. La deuxième

problématique concerne la définition d'une méthode de numérisation 3D cohérente vis-à-vis du calcul précédent.

Dans ce travail doctoral, nous proposons une solution novatrice afin de répondre à la première problématique, qui n'est que très peu abordée dans la littérature. Concernant la deuxième problématique, il s'agit d'une part de déterminer les systèmes de numérisations admissibles vis-à-vis de la méthode de calcul et d'autre part de proposer une stratégie de numérisation générique pour tous systèmes de numérisation et performante en terme de qualité et de temps de cycle. En réponse à cette problématique, nous avons basé notre approche de choix de systèmes de numérisation admissibles sur les travaux préalablement menés au LURPA sur la qualification des systèmes de numérisation [CON 02] [MEH 06b] [AUD 12b]. Le présent mémoire est structuré en 5 chapitres.

Le chapitre 1, *Problématique de l'équilibrage par numérisation 3D*, présente la problématique liée à l'équilibrage de vilebrequins à partir de la mesure de géométrie discrète. Nous présentons d'abord les caractéristiques des vilebrequins bruts ainsi que la méthode actuelle permettant de les équilibrer, qui dépend fortement de la typologie et de la géométrie des vilebrequins et qui est donc peu flexible. Nous présentons ensuite la démarche d'équilibrage de vilebrequins par mesure de géométrie externe par numérisation 3D que nous proposons et les problématiques scientifiques qui en découlent.

Le chapitre 2, *Calcul d'inertie sur données discrètes*, s'attache à présenter la méthode de calcul des balourds sur données discrètes que nous avons mise en place. La méthode Voxel2inertia que nous avons développée est basée sur une représentation volumique des données numérisées sous forme d'une *voxelmap*. Une première analyse est effectuée sur la pertinence de la méthode vis-à-vis d'un calcul continu. Une attention particulière est donnée à la sensibilité de l'algorithme aux défauts de numérisation tels le bruit de numérisation, la complétude ou encore la justesse. Cette étude de sensibilité conduit à déterminer un jeu de

défauts admissibles assurant un calcul des balourds cohérent vis-à-vis des exigences attendues. Ces valeurs de défauts constituent une référence pour le choix des systèmes de numérisation admissibles en regard de l'opération d'équilibrage.

Le chapitre 3, *Evaluation des systèmes de numérisation*, est consacré à la détermination des systèmes de numérisation admissibles. Nous proposons un protocole d'évaluation de systèmes basé sur l'évaluation des indicateurs de qualité classiques [AUD 12b] complété par la définition d'indicateurs permettant de prendre en compte la complexité géométrique des vilebrequins. Cette analyse conduit au choix des systèmes de numérisation admissibles par rapport aux exigences d'équilibrage définies par Renault.

Dans le chapitre 4, *Elaboration d'une stratégie de numérisation*, nous présentons une méthode originale de détermination des points de vue assurant la numérisation complète des pièces. Elle conduit à déterminer un ensemble réduit de points de vue permettant la numérisation de la pièce avec une qualité suffisante.

Le chapitre 5, *Application industrielle* concerne la validation de notre démarche d'équilibrage de vilebrequins par mesure de géométrie par numérisation 3D. Cette démarche est mise en œuvre sur un ensemble de vilebrequins de typologies et géométries différentes pour deux systèmes particuliers. A partir des numérisations effectuées, nous présentons la validation de l'algorithme Voxel2inertia. Il s'agit de comparer les résultats obtenus avec notre algorithme aux résultats issus de mesures de balourds sur ligne de production. L'efficacité de la méthode est ainsi démontrée pour le calcul de balourds mais pas au niveau du temps de cycle. Des propositions d'industrialisation de la méthode sont proposées.

Le mémoire se clôt par les conclusions et les perspectives en rapport avec les besoins industriels liés à l'équilibrage de vilebrequins.

Cette thèse, réalisée dans le cadre d'une collaboration entre le LURPA et la société Renault, a bénéficié d'un financement de l'ANRT à travers une bourse CIFRE n°243/2010.

Chapitre 1

Problématique de l'équilibrage par numérisation 3D

1. Problèmes industriel et scientifique

Le vilebrequin est un dispositif mécanique présent sur les moteurs thermiques qui transforme l'énergie générée par la détente des gaz lors de l'explosion en énergie mécanique de rotation. Pour cela il possède une géométrie particulière correspondant à des manivelles.

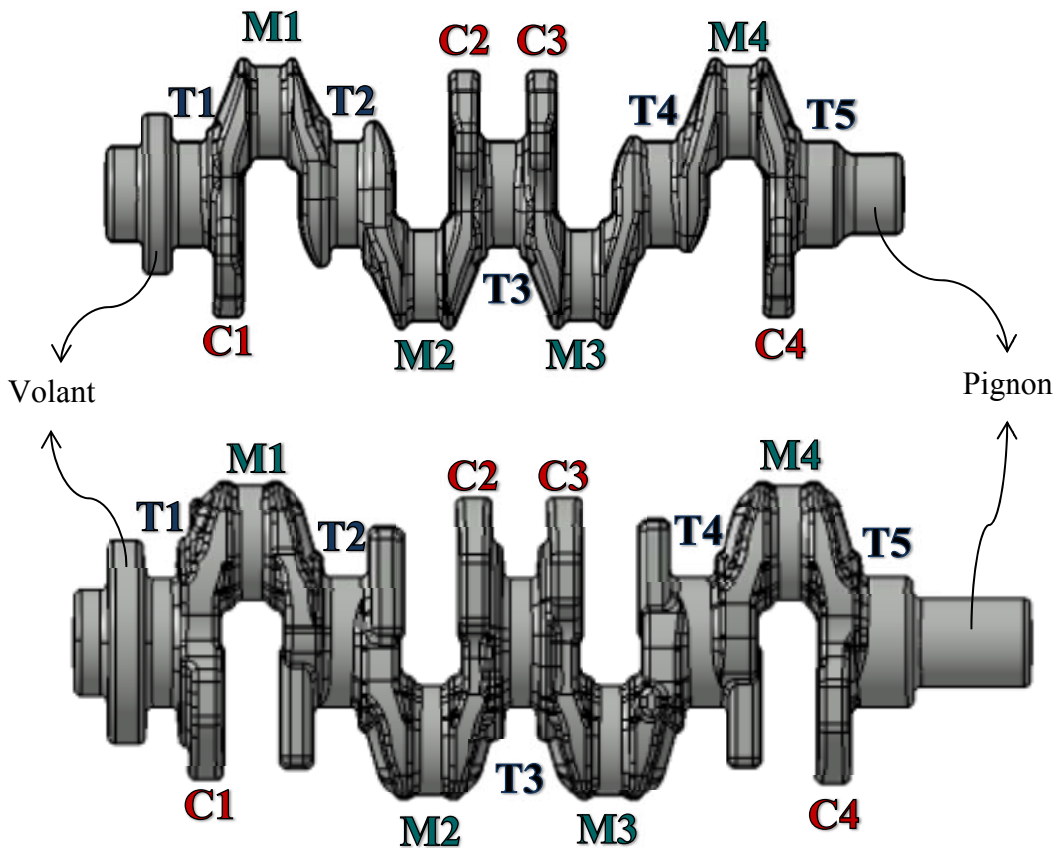


Figure 1 : Géométrie des vilebrequins à 4 cylindres K9 (en haut) et M9 (en bas).

Un vilebrequin classique est composé de tourillons (T1 à T5), de manetons (M1 à M4), de bras de liaison, et de contrepoids (C1 à C4). Les tourillons constituent les cinq points d'appui du vilebrequin permettant de réaliser le guidage en rotation. La liaison avec les bielles est réalisée au niveau des manetons qui sont des portées cylindriques sur lesquelles sont placés des coussinets. Les bras de liaison sont les parties brutes qui relient les tourillons et les manetons. Afin de compenser les efforts générés par la rotation des manetons, des contrepoids sont nécessaires. Ils permettent d'équilibrer les masses en rotation et sont aux nombres de 4 ou 8 sur les moteurs 4 cylindres.

Il existe plusieurs typologies et géométries de vilebrequins selon l'architecture et la cylindrée du moteur à combustion interne. La typologie du vilebrequin est liée au nombre de cylindres du moteur (trois, quatre ou six cylindres). La géométrie concerne les dimensions des entités du vilebrequin (tourillons, manetons, bras de liaison et contrepoids) et elle dépend de la cylindrée du moteur. Par exemple, le vilebrequin K9 est utilisé sur des moteurs 4 cylindres allant de 41kW à 82kW et le vilebrequin M9 est utilisé sur des moteurs 4 cylindres allant de 93kW à 119kW. En fonctionnement nominal, les vilebrequins subissent des rotations importantes (jusqu'à 7000 tr/min pour les moteurs à essence) qui produisent des efforts centrifuges dus à la répartition non équilibrée des masses par rapport à l'axe de rotation et ce malgré la présence des contrepoids. Les effets centrifuges sont modélisés par les balourds, quantifiés par le poids de la masse non équilibrée multipliée par la distance à l'axe de rotation.

Actuellement la société RENAULT équilibre les vilebrequins en deux étapes. La première, le balancement du vilebrequin pré-usiné, est une opération au cours de laquelle les efforts centrifuges du vilebrequin sont mesurés, puis les balourds sont corrigés par l'usinage d'un axe de référence. Au cours de la deuxième étape, l'équilibrage final, le défaut d'équilibrage est corrigé par enlèvement de matière sur les contrepoids, afin d'éliminer les balourds résiduels.

La mesure des balourds est réalisée dans des berceaux mécaniques de mesure dynamique. Compte tenu de la fidélité souhaitée de $\pm 5 \text{ g.cm}$, ces instruments de mesure sont des machines complexes et onéreuses, nécessitant une maintenance régulière. De plus, de par le principe d'identification des balourds ainsi que les contraintes liées à la production, ces machines de mesure sont dédiées à une typologie et une géométrie unique de vilebrequin (par exemple K9).

L'investissement initial et les coûts de maintenance élevés ainsi que la spécialisation de ces appareils sont pénalisants pour les coûts et les besoins de flexibilité de la ligne de production. Ainsi, la société Renault cherche un système de mesure non dépendant de la géométrie de la pièce à équilibrer et ayant un coût d'investissement et de maintenance plus faible. Après avoir présenté la

procédure actuelle d'équilibrage de vilebrequins basée sur la mesure dynamique, nous présentons la méthode envisagée basée sur la mesure directe de la géométrie externe du vilebrequin.

1.1. Procédure actuelle d'équilibrage de vilebrequins

Le procédé d'équilibrage dynamique est classiquement réalisé par mesure d'efforts ou de vibrations [PUG 97, BIG 79]. Actuellement il est défini par la norme NF E90-600 (1985-10) [NFE90-600]. Comme précisé précédemment, l'équilibrage de vilebrequins de la société RENAULT se réalise en deux étapes : le balancement et l'équilibrage final. Le balancement est réalisé en début de ligne et l'équilibrage final en fin de ligne (Figure 2).

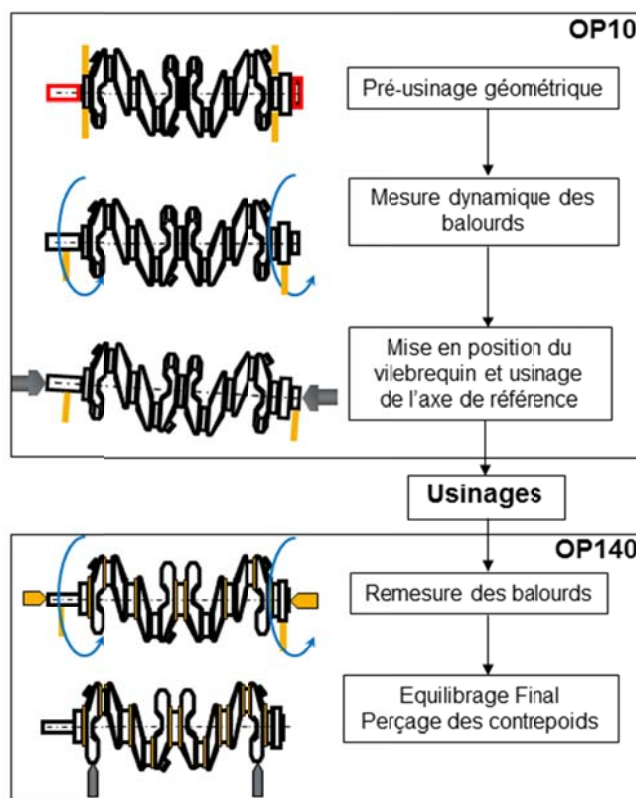


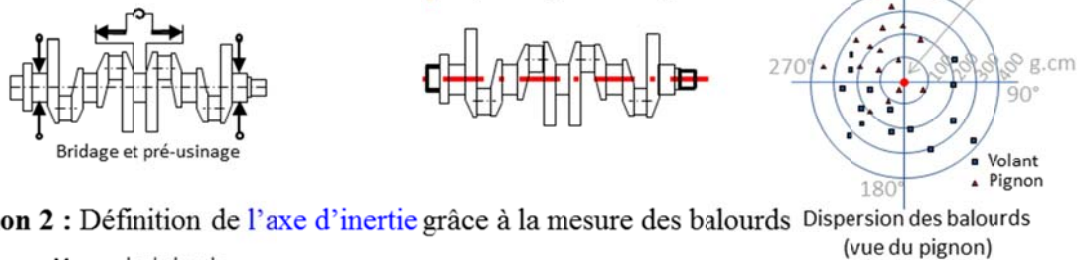
Figure 2 : Chaîne simplifiée de production de vilebrequins.

Le balancement de vilebrequins, ou OP10, est le premier groupe d'opérations de la ligne de production de vilebrequins. Dans cette étape, les pièces brutes arrivent en début de ligne avec une dispersion de balourds très importante vis-à-vis du poids total des pièces. Cette dispersion très

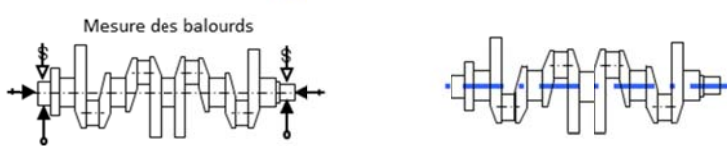
étendue est générée par la distribution de masse du vilebrequin non homogène autour de l'axe géométrique. Le balancement est réalisé par le passage du vilebrequin sur 3 stations (Figure 3) :

- Station 1 : pré-usinage des portées cylindriques ;
- Station 2 : mesure dynamique des balourds ;
- Station 3 : matérialisation de l'axe de référence sur la pièce grâce au perçage de deux centrages de référence.

Station 1 : Définition de l'axe géométrique par le pré-usinage



Station 2 : Définition de l'axe d'inertie grâce à la mesure des balourds



Station 3 : Définition de l'axe de référence par le perçage des centrages de référence

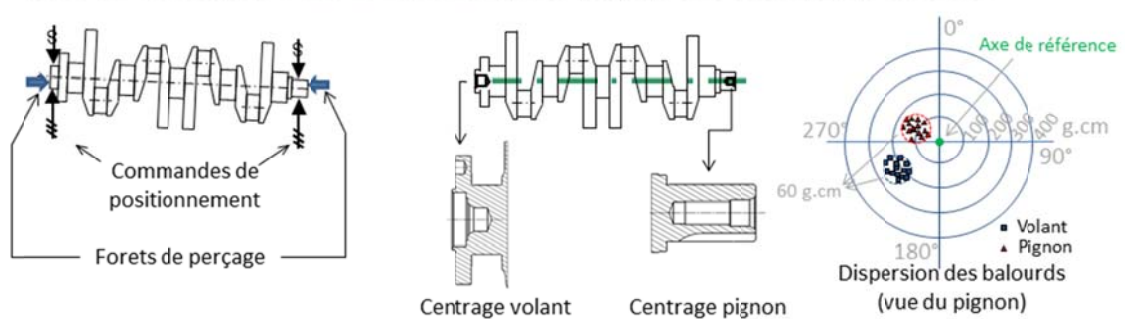


Figure 3 : Equilibrage en 3 étapes et dispersions des balourds associées.

Le vilebrequin subit une rotation lors de la mesure dynamique des balourds à la station 2. Il est nécessaire que les extrémités du vilebrequin soient usinées à la station 1 avant la mesure (Figure 4). L'objectif principal du pré-usinage est de matérialiser des surfaces cylindriques lisses sur les extrémités du vilebrequin pour que les balourds puissent être mesurés sur le berceau mécanique.



Figure 4 : Surfaces cylindriques usinées aux extrémités du vilebrequin (encadrées en rouge).

Le vilebrequin est posé de façon à ce que les extrémités usinées du vilebrequin soient en contact avec des rouleaux d'entraînement du berceau mécanique. La mesure des efforts dus aux masses non équilibrées est réalisée dans les plans de référence au centre des surfaces cylindriques usinées (Figure 5).

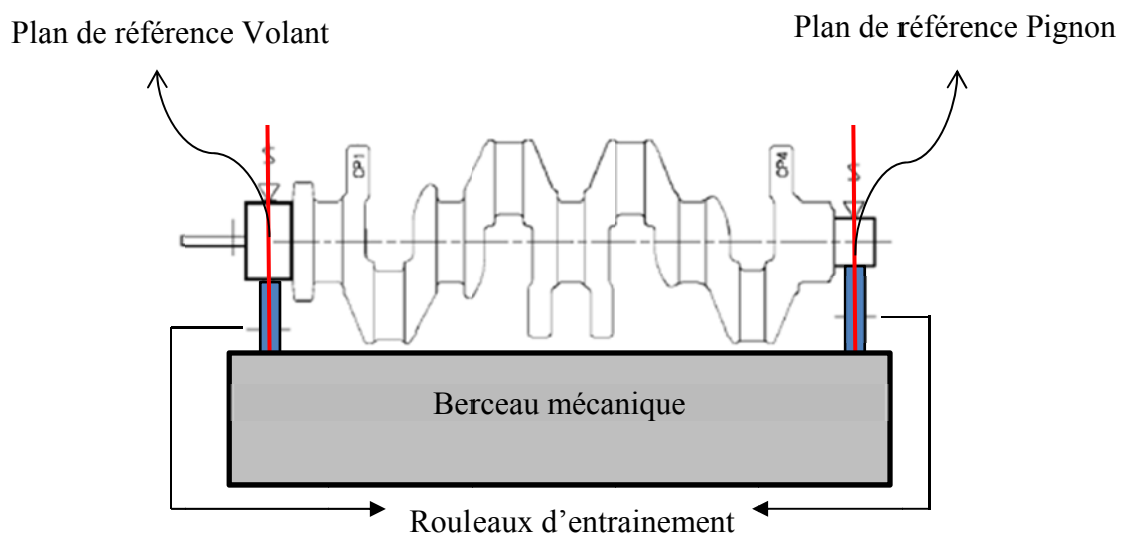


Figure 5 : Position des plans de référence (en rouge) pour la mesure des balourds.

A partir des mesures des balourds, l'axe principal d'inertie du vilebrequin est calculé et sa position par rapport à l'axe de référence est définie. Le vilebrequin est ainsi repositionné sur le poste d'usinage (Station 3) grâce à des appuis pilotables, au nombre de deux dans chaque plan de mesure. Ce repositionnement est fait par rapport au repère de la machine d'usinage de façon à ce que l'axe principal d'inertie du vilebrequin soit coïncidant avec l'axe des broches réalisant les centrages (Figure 3). Les centrages de référence définissent ainsi l'axe de référence qui est l'axe autour duquel le vilebrequin est mis en rotation pour la gamme d'usinage.

A la fin de l'opération OP10, qui inclut le repositionnement du vilebrequin et l'usinage des centres de référence, la dispersion des balourds est réduite afin que les balourds résiduels puissent être corrigés lors de l'équilibrage final (Figure 2). Nous pouvons noter qu'à ce moment-là, la dispersion est réduite mais elle n'est pas centrée sur l'axe de référence de la pièce. Effectivement, l'objectif de l'opération OP10 est de réduire la dispersion des balourds à un niveau de assurant que le vilebrequin puisse être équilibré à la fin de la gamme d'usinage. Les opérations d'usinage modifient la distribution des masses ce qui empêche l'équilibrage dans les exigences souhaitées à l'OP10. Ainsi une opération finale d'équilibrage est nécessaire. Elle est réalisée par perçage des contrepoids (OP140). La dispersion des balourds est ainsi encore réduite et elle est centrée sur l'axe de référence. Le passage par les postes de mesure des balourds et d'usinage de l'axe de référence est réalisé en 42 secondes, ce qui correspond à un temps de cycle référent pour une production de 50000 pièces par an.

Comme mentionné précédemment, la mesure des balourds se fait avec une machine de mesure mécanique dédiée à une géométrie de vilebrequin. Cette mesure est réalisée dans des plans de référence (Figure 5). La position des plans de référence côté pignon et volant dépend très fortement de la typologie du vilebrequin. Ainsi l'étalonnage des berceaux mécaniques est dédié à une typologie unique. Lors de la fabrication du vilebrequin brut, la surface du vilebrequin, communément appelée « peau », présente une variation pouvant aller jusqu'à $\pm 0,9$ mm par rapport à la surface nominale définie par la maquette numérique. Nous présentons cette variation due à la fabrication sur une section d'un vilebrequin sur la Figure 6.

Compte tenu de la forte dépendance à la géométrie du vilebrequin, l'opération d'équilibrage de vilebrequins actuelle est peu flexible. Elle nécessite une mise au point des configurations du berceau mécanique de mesure des balourds à chaque changement de typologie de vilebrequin fabriqué. C'est une opération onéreuse compte tenu du prix élevé des machines d'équilibrage (entre

300000€ et 450000€) et de la maintenance associée car il s'agit de machines de grande précision mécanique.

L'une des pistes envisagée pour rendre flexible et moins chère l'opération d'équilibrage est de calculer les balourds à partir de la géométrie externe mesurée du vilebrequin. Il s'agit alors de calculer les éléments d'inertie de la pièce à partir de sa géométrie et de la répartition des masses.

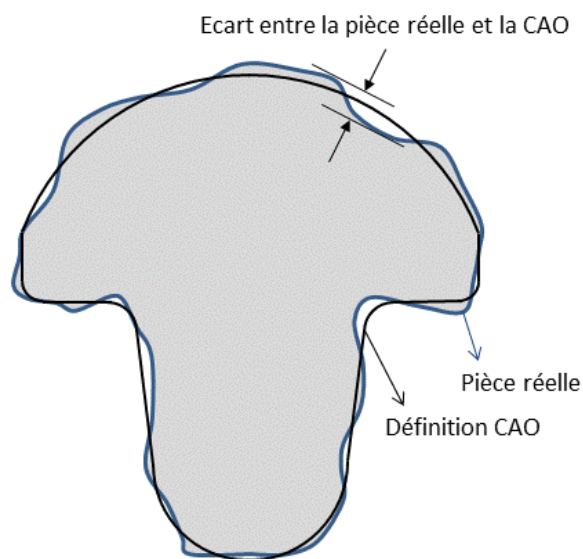


Figure 6 : Ecart de la peau de la pièce par rapport à la définition CAO.

Afin de mesurer la géométrie externe du vilebrequin en un temps de mesure contraint par la cadence de la ligne de production, il est envisagé de remplacer le système de mesure mécanique par un système d'acquisition de forme sans contact. En effet, les systèmes de numérisation optiques permettent d'acquérir une représentation numérique de la peau d'un objet sous forme de données discrètes (nuages de points ou maillages) en un temps relativement court. Cette nouvelle méthode pourrait permettre une mesure flexible et moins onéreuse, puisque le même système de mesure pourrait être utilisé pour toute typologie de pièces. Nous présentons dans le prochain paragraphe la démarche proposée pour réaliser l'équilibrage de vilebrequins à partir d'une définition discrète de la surface du vilebrequin et les problématiques scientifiques qui en découlent.

1.2. Procédure d'équilibrage de vilebrequins par numérisation 3D

La littérature mentionne peu de travaux relatifs à l'équilibrage de vilebrequins à partir d'une représentation discrète de la géométrie des formes. La seule référence sur l'équilibrage de vilebrequins à partir de la numérisation 3D existante concerne le brevet européen EP06300854.4 déposé P. Boujon [BOU 06]. Il s'agit en réalité d'un processus de mesure de balourds qui consiste à déterminer si un vilebrequin peut être équilibré ou non. Le système de mesure est constitué d'un ensemble de 16 paires de caméras. Ce procédé est également peu flexible car le positionnement des caméras dépend fortement de la géométrie du vilebrequin.

De ce constat, nous nous intéressons à développer un procédé générique permettant de calculer les éléments d'inertie et les balourds quelle que soit la typologie de la pièce étudiée.

L'équilibrage par numérisation 3D n'est plus réalisé par la mesure des effets des masses non équilibrées, mais par le calcul des éléments d'inertie directement à partir des données issues de numérisation. Un système de numérisation permet la mesure de différentes typologies et géométries de vilebrequin, ce qui le rend plus flexible que le moyen actuel.

Il est intéressant de souligner qu'avec cette démarche il n'est plus nécessaire de réaliser le pré-usinage avant la mesure des balourds. L'équilibrage commence ainsi directement par la mesure de la géométrie externe (ou peau) du vilebrequin à l'aide d'un système d'acquisition de formes. Il s'agit ensuite d'identifier les axes principaux d'inertie de la pièce et de calculer les balourds associés à partir des nuages de points issus de la numérisation. Les balourds sont définis dans le même repère lié à la pièce, ce qui conduit à une modification mineure dans le reste de la ligne de production. Dans le poste suivant, celui du centre d'usinage, les trous de centrage sont usinés de façon à matérialiser l'axe de référence pour les opérations restantes d'usinage.

La difficulté majeure consiste à calculer des grandeurs volumiques à partir d'une représentation discrète de la géométrie externe du vilebrequin. Cette difficulté met en avant deux problématiques :

- Comment calculer les éléments d'inertie nécessaires au calcul de balourds à partir de données discrètes issues de numérisation ?
- Comment sélectionner un système de numérisation 3D délivrant des données dont la qualité est suffisante vis-à-vis des calculs précédents ?

La première problématique est liée d'une part au calcul d'éléments d'inertie à partir d'une représentation discrétisée de la peau de la pièce, et d'autre part à la nature de cette représentation discrète provenant de numérisation. En effet, les données issues de numérisation sont en général bruitées, inhomogènes et incomplètes [CON 02b, LAR 02, LAR 04, MEH 06b].

La seconde problématique est liée au choix du système d'acquisition 3D de forme, ainsi qu'à la définition de la stratégie de numérisation conduisant à une qualité suffisante pour permettre l'équilibrage. L'entreprise Renault souhaite équilibrer les vilebrequins avec une erreur maximale de $\pm 5\%$. L'essentiel des difficultés étant en relation avec la nature des données acquises, nous rappelons dans un premier temps, ce qu'est un système de numérisation 3D et quelles sont les caractéristiques associées aux données numérisées.

1.3. Numérisation 3D et caractéristiques des données acquises

Les systèmes de numérisation sont composés d'un système d'acquisition de données, d'un système de déplacement et d'un système de traitement des informations acquises (Figure 7). La principale fonction de ces systèmes est d'obtenir une représentation numérique de la géométrie à mesurer sous forme d'un nuage de points, un maillage, ou d'autres types de représentation (imagerie par résonance magnétique ou par tomographie).

Le système d'acquisition (ou capteur) permet d'acquérir des données de la surface. Le capteur est très généralement un capteur optique comme un capteur laser-plan, ou un capteur à projection de franges. Le système de déplacement (ou porteur) permet de déplacer le capteur et / ou l'objet afin d'avoir une numérisation complète. Le système de traitement est nécessaire à l'obtention

de données géométriques cohérentes (coordonnées 3D) à partir des données brutes issues du système [AUD 12b].

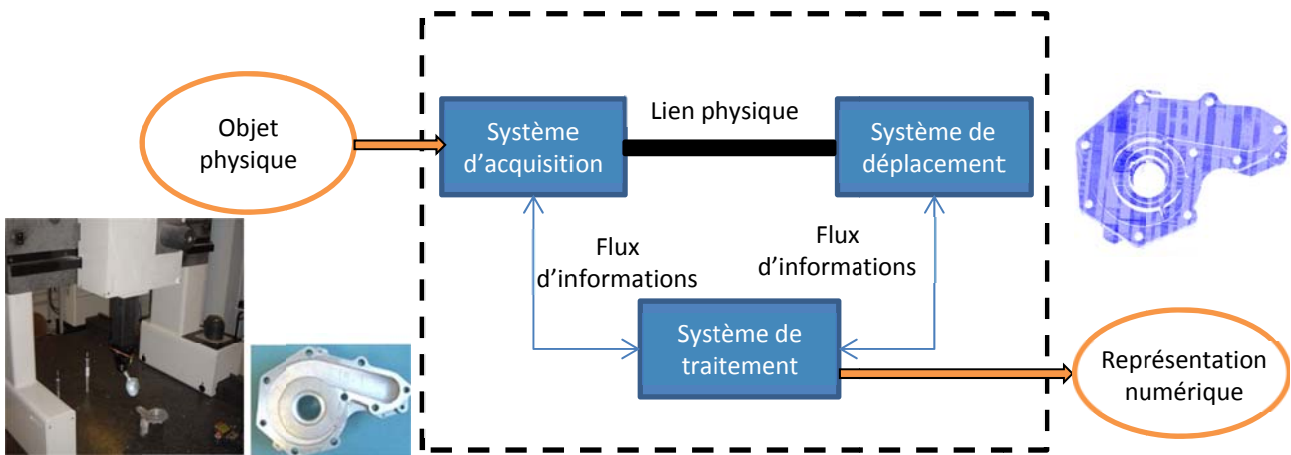


Figure 7 : Principaux constituants d'un système de numérisation [CON 02, AUD 12].

Chacun des systèmes de la chaîne de numérisation constitue une source d'erreur potentielle et influence la qualité des données acquises (Figure 8). Notons également que la stratégie de numérisation, c'est-à-dire la façon dont le capteur est positionné puis déplacé relativement à la surface constitue une source importante d'imprécisions.

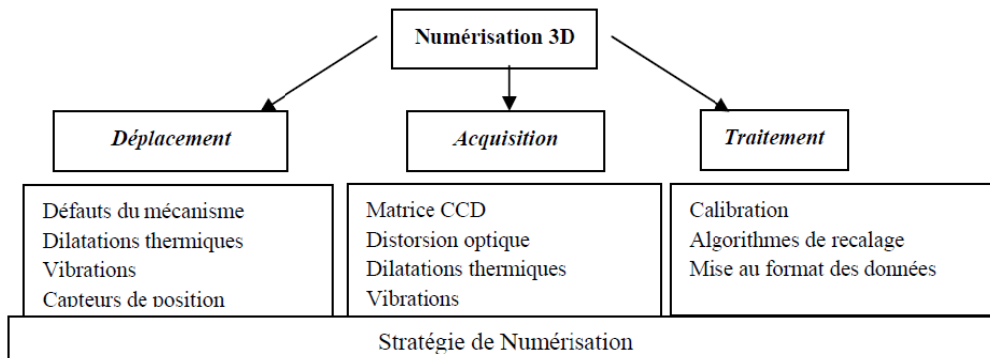


Figure 8 : Sources d'imprécision [LAR 04].

L'étude des sources d'imprécisions a largement été traitée [PRI 99, CON 02b, LAR 02, LAR 04, MEH 06b, MAH 11, AUD 12b]. Nous nous intéressons aux conséquences de ses sources d'imprécisions sur les caractéristiques des données numérisées.

Les systèmes de numérisation 3D permettent de restituer une représentation numérique d'un objet réel sous la forme d'un nuage de points ou sous la forme d'un maillage, soit un ensemble de données discrètes. Ainsi, ce type de représentation de la surface d'une pièce est **discontinu**. Notons que la terminologie nuage de points sera utilisée dans ce document pour parler des données issues de la numérisation ; en effet, le maillage s'appuie également sur des points. Visuellement le nuage de points forme un espace séparé mais il n'est pas structuré comme dans un modèle CAO, ce qui rend le nuage de points **désorganisé**. (Figure 9).

De plus le nuage de points peut être caractérisé comme **dense**, la densité n'étant pas, la plupart du temps, homogène. En effet, afin de numériser la surface complète d'un objet, il est nécessaire de réaliser plusieurs vues de numérisation. Or, le recalage entre une vue et l'autre crée des zones de recouvrement de densité variable. Ainsi, le nuage de points est également qualifié d'**inhomogène** (Figure 9).

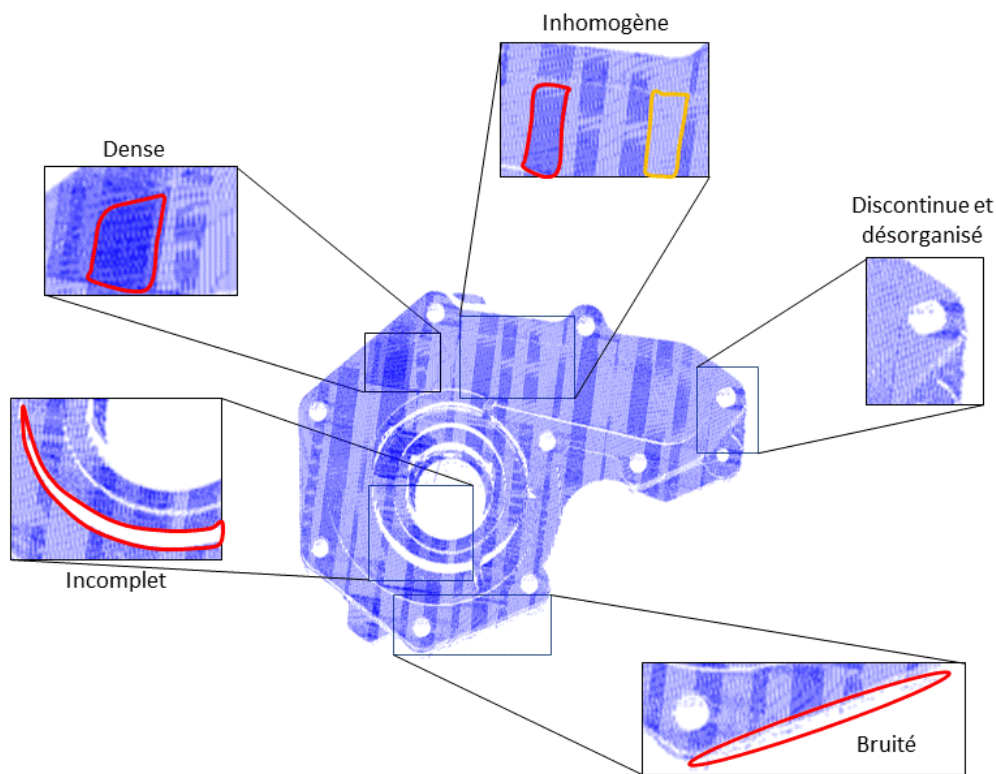


Figure 9 : Caractéristiques des données numérisées.

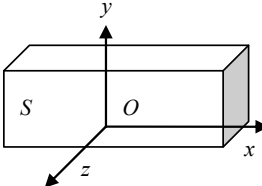
Malgré les larges possibilités offertes par les porteurs, certaines zones de la pièce restent inaccessibles au capteur et ne sont pas numérisées, conduisant à des trous ou lacunes de numérisation (Figure 9). Les données sont alors qualifiées d'**incomplètes** vis-à-vis de l'objet initial. Les sources d'erreur génèrent en plus des erreurs aléatoires ou systématiques. Les erreurs aléatoires rendent le nuage de points **bruité**, alors que les erreurs systématiques dégradent la **justesse de mesure** [CON 02] [MEH 06b] [AUD 12b].

Ainsi, nous pouvons qualifier les données : elles sont discrètes, denses, inhomogènes, bruitées et présentant des lacunes de numérisation. La qualité des données est en général appréhendée au moyen d'indicateurs de qualité. Comme nous le verrons au chapitre 3, la qualité est fortement liée au capteur qui effectue l'acquisition. Elle dépend également de la stratégie de numérisation adoptée, c'est-à-dire du positionnement relatif du capteur vis-à-vis de la pièce, qui sera traité au chapitre 4.

La qualité du nuage de points influence l'exploitation future qui en est faite [CON 02]. Un nuage incomplet ou fortement bruité altère les exploitations telles la reconstruction de surface ou l'inspection. De même, un nuage de points très dense et volumineux augmente les temps de calcul. L'exploitation est souvent facilitée grâce à des traitements des données tels que le filtrage du bruit ou encore la structuration afin de recréer une continuité [AUD 12b]. Notons cependant que la majorité des applications qui sont faites sont : la reconstruction de surface, le prototypage rapide, la visualisation, ou encore l'inspection. Le traitement des données discrètes issues de numérisation pour des applications spécifiques comme le calcul des éléments d'inertie est peu développé. Les difficultés sont doubles : calcul d'éléments volumiques sur données discrètes représentatives de la peau et traitement de données numérisées. Dans le prochain paragraphe, nous abordons la problématique liée au calcul des éléments d'inertie à partir des données discrètes.

1.4. Calcul des éléments d'inertie sur données discrètes

Rappelons que les éléments d'inertie permettent de caractériser la géométrie des masses, c'est-à-dire la répartition géométrique de la matière. Pour un solide, c'est la matrice d'inertie en un point, exprimée dans un repère associée au solide qui rend compte de la géométrie des masses (Figure 10).

$$I(O, S) = \begin{pmatrix} A & -F & -E \\ -F & B & -D \\ -E & -D & C \end{pmatrix}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})}$$


$$\text{Avec } \begin{cases} A = I_{xx} = \int_S (y^2 + z^2) dm \\ B = I_{yy} = \int_S (x^2 + z^2) dm \\ C = I_{zz} = \int_S (x^2 + y^2) dm \\ D = I_{yz} = \int_S yz \cdot dm \\ E = I_{xz} = \int_S xz \cdot dm \\ F = I_{xy} = \int_S xy \cdot dm \end{cases}$$

Figure 10 : Matrice d'inertie d'un solide.

Dans la matrice d'inertie, les termes de la diagonale (principale) sont les moments d'inertie traduisant la répartition de la masse autour de chacun des axes du repère, alors que les autres termes sont des produits d'inertie qui caractérisent les symétries ou absences de symétrie. Lorsque le solide présente des plans de symétrie, cela entraîne la nullité des produits d'inertie. Ainsi, si O_{xy} est plan principal d'inertie, $E = F = 0$. Si le solide possède deux plans de symétrie distincts, $D = E = F = 0$. Dans le repère principal d'inertie, la matrice est diagonale.

Pour un solide, le calcul des éléments d'inertie est réalisé de manière continue. Lorsque le milieu est constitué d'un ensemble discret de masses ponctuelles, le calcul est réalisé par sommes discrètes.

Il existe peu de travaux dans la littérature qui s'attachent au calcul des éléments d'inertie à partir des données discrètes relatives à la peau de l'objet issues de numérisation. La plupart des travaux concernent la détermination d'un volume, d'un moment d'inertie calculé sur la peau de la pièce, d'un plan de symétrie ou d'axes principaux géométriques. Rappelons que le calcul d'éléments volumiques est plus délicat à partir de la simple connaissance de la frontière de l'objet. Nous proposons ici quelques éléments proches de notre problématique issus de la littérature.

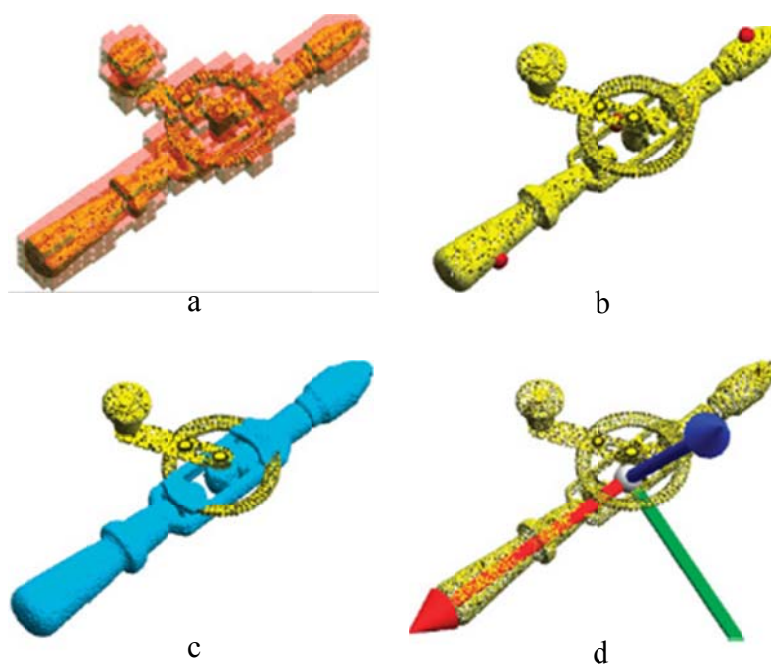


Figure 11 : Détermination des axes principaux à partir de données de points bruités [LUI 09]

Liu et al. [LIU 09a] travaillent sur la détermination des axes principaux géométriques à partir de la donnée d'un nuage de points pouvant être bruité. Les axes principaux d'un objet, très utilisés dans le domaine de la vision, définissent sa position et son orientation par rapport à un repère orthonormé donné. La technique la plus courante est l'analyse en composantes principales (*Principal Component Analysis*). Celle-ci permet de déterminer les axes qui rendent le mieux compte de la

dispersion des formes ou encore de trouver une projection qui permette de décrire au mieux le nuage de points au sens des moindres carrés.

Les auteurs démarrent en choisissant un sous-ensemble réduit de points exempt de points aberrants qu'ils qualifient de région principale (Figure 11b) à partir de la voxélisation qui correspond à un découpage en éléments volumiques de la pièce (Figure 11a). La région est augmentée par l'ajout d'échantillons de points de façon itérative (Figure 11c). Les points de la région principale servent de support au calcul des axes principaux (Figure 11d), les régions mineures étant considérées comme constituées de points aberrants.

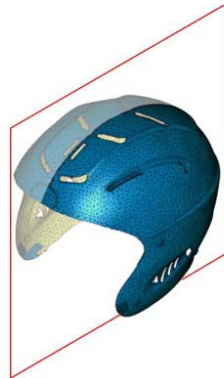


Figure 12 : Extraction d'un plan de symétrie sur un nuage de points [CHA 08].

Chang et al. [CHA 08] proposent l'extraction de plans de symétrie (Figure 12) à partir d'un nuage de points bruités pouvant présenter des asymétries. Dans un premier temps, un maillage est réalisé sur le nuage de points. Puis un plan de symétrie approximatif est déterminé manuellement. Ce plan de symétrie initial partage le nuage de points en 2 sous-ensembles SP1 et SP2. SP1 est alors symétrisé par rapport au plan initial de symétrie, puis recalé sur SP2 par une méthode ICP adaptée. Ainsi, il est possible de mettre en correspondance les points des deux sous-ensembles et de déterminer pour chacun d'entre eux le point milieu. L'ensemble des points milieux constitue le plan de symétrie. Cette méthode qui ne fonctionne pas de manière totalement automatisée donne de bons résultats pour les données bruitées. Elle reste dédiée à des applications de rétro-conception mais

pourrait s'appliquer à la recherche d'un des plans de symétrie contenant l'axe d'inertie principal du vilebrequin.

Lichter et al. [LIC 03] proposent une méthode qui estime la position dynamique, la forme géométrique et les paramètres d'inertie d'un objet à partir d'une séquence d'images en niveau de gris générée par un groupe de capteurs coopératifs. Les auteurs proposent donc de discrétiser l'espace en voxels dont le niveau d'occupation est proportionnel au nombre de points à l'intérieur du voxel. Un seuil de saturation du niveau de gris est appliqué à chaque voxel afin de réduire l'effet la proximité de certains capteurs. Les moments et axes principaux sont calculés à partir de cette modélisation volumique du nuage de points par des voxels (Figure 13). Les auteurs tiennent compte ici des points contenus dans chaque voxel et calculent les axes principaux géométriques de façon analogue aux moments d'inertie, mais sans inclure la notion de masse. Il est important de noter que les axes fournis par leur méthode ne correspondent pas en réalité aux axes principaux d'inertie car les calculs ne sont basés que sur les données de surface de l'objet. L'objectif est ici de retrouver la position, l'orientation de l'objet ainsi que sa trajectoire.

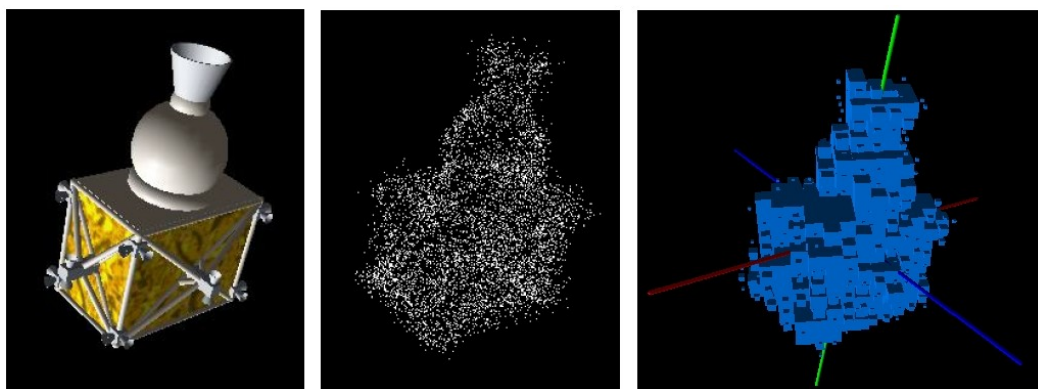


Figure 13 : Modélisation d'objets 3D pour le calcul approché d'éléments d'inertie [LIC 03].

Crisco et al. [CRI 98] montrent qu'il est possible d'avoir une évaluation correcte du volume, du centre d'inertie et des moments d'inertie à partir d'une représentation sous forme de sections du volume 3D étudié (Figure 14). Leur méthode s'appuie sur la transformation en un ensemble discret (associé au nombre de sections) des intégrales de volume en intégrales simples et de contour par le

théorème de Green. L'influence du nombre de sections sur la qualité du résultat est étudiée, et montre que l'approximation est très bonne dès que le nombre de sections augmente. Cette méthode très performante ne fonctionne qu'à partir de la connaissance des contours continus de l'objet.

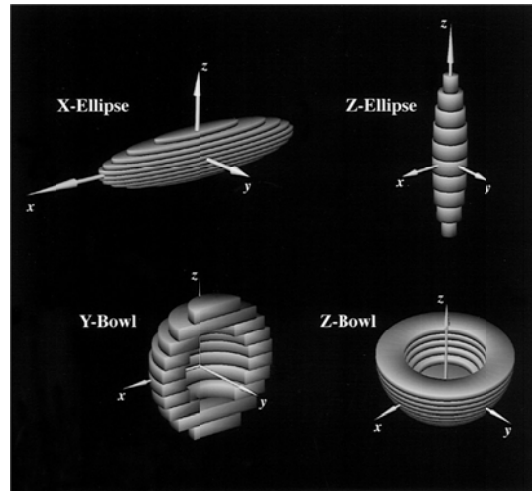


Figure 14 : Modélisation d'objets 3D pour le calcul approché d'éléments d'inertie [CRI 98].

Tuzikov et al. [TUZ 03] proposent le calcul du volume et des moments de surface pour un polytope. Les auteurs se basent sur les facettes formées par trois points (a , b et c) de l'objet pour en créer des tétraèdres $T(a, b, c)$ avec l'origine o du système de coordonnées. A partir de l'ensemble de tétraèdres composant l'objet, il est possible de calculer le volume total et les moments de surface de manière explicite. Leur méthode est simple et très sensible à la forme des tétraèdres car la qualité du facteur de forme des facettes n'est pas prise en compte. D'une façon générale, les paramètres d'inertie peuvent être calculés à partir du maillage de la pièce. Pour ce faire, il faut un remaillage volumique de la pièce, les entités volumiques de ce maillage pouvant être considérés alors comme des masses ponctuelles. Cependant, la forme de ces entités volumiques (en général des tétraèdres) n'est pas homogène et leur position (barycentre) est très sensible au facteur de forme des facettes constituant les tétraèdres. Cela rend difficile le calcul peu robuste et très sensible aux entités volumiques utilisés.

Néanmoins, il pourrait être possible d'utiliser ce type de démarche en s'appuyant non pas sur un maillage volumique mais sur une représentation simplifiée sous forme de voxels. Chaque voxel

définissant la forme se verrait alors affecté d'une masse ponctuelle. Le calcul des éléments d'inertie serait simplement mené de manière discrète considérant l'ensemble des voxels définissant l'objet affecté de leur masse. Ce type d'approche que nous avons retenu dans nos travaux est proche de celle proposée par Lichter et al. [LIC 03], la difficulté majeure étant que seuls les points définissant la peau de l'objet sont connus. Les difficultés étant alors de définir l'ensemble des voxels à partir du nuage de points numérisés, et de s'assurer de la robustesse de la méthode vis-à-vis des défauts de numérisation, et en particulier du bruit.

2. Synthèse et démarche pour la résolution de la problématique

Nous constatons que la méthode d'équilibrage utilisé à ce jour est peu flexible car la mesure dynamique des balourds est réalisée dans des plans de référence très dépendants de la géométrie et de la typologie des vilebrequins. De plus, les machines permettant cette mesure ont un coût élevé et elles doivent être étalonnées à chaque changement de typologie de vilebrequin fabriqué. De ce fait, il semble intéressant de remplacer les systèmes de mesure mécanique par un système de mesure permettant l'acquisition de forme sans contact.

L'acquisition de la forme peut être réalisée à l'aide de systèmes de numérisation optiques permettant d'acquérir une représentation numérique de la peau sous forme de données discrètes. Le calcul des vecteurs balourds pourrait être réalisé directement à partir des données représentant la peau de l'objet et non plus par la mesure de l'effet des masses non équilibrées. Cette démarche est moins chère et plus flexible par rapport à la mesure dynamique des balourds car le même système de numérisation 3D sans contact peut être utilisé pour différentes typologies de pièces.

Les systèmes de numérisation 3D sans contact délivrent une grande quantité d'informations en un temps relativement court. Néanmoins, les caractéristiques des données numérisées possèdent certaines limites (bruit, manque d'informations, inhomogénéité, etc.) qui doivent être maîtrisées afin

que le calcul des balourds soit possible. Outre, comme nous venons de le voir, il n'existe pas de travaux de la littérature qui proposent une démarche complète d'équilibrage d'objets tournants à partir de la mesure de la géométrie externe de ces derniers. La démarche que nous proposons est synthétisée sur la Figure 15. Nous avons mis en évidence deux verrous scientifiques principaux : le calcul d'éléments d'inertie sur données discrètes issues de numérisation représentatives de la surface de l'objet, et la définition d'une méthode de numérisation 3D cohérente vis-à-vis du calcul précédent.

Partant de travaux proches de la littérature, nous proposons une méthode de calcul des éléments d'inertie sur données discrètes basée sur une représentation sous forme d'une *voxelmap* des données. Cette méthode est détaillée au chapitre 2. Le calcul des balourds à partir des données discrètes dans les plans de référence est alors possible. Une étude de robustesse complétée par une étude de sensibilité de l'algorithme aux défauts de numérisation est également proposée. Cette étude conduit à définir la qualité exigée des données d'entrée qui assure un équilibrage respectant la qualité attendue, c'est-à-dire, quel est le niveau maximum de défauts tolérables sur le nuage de points numérisé.

Le troisième chapitre porte sur la mise en œuvre d'un protocole d'évaluation de capteurs afin de faciliter le choix d'un capteur adapté à la mesure de vilebrequins bruts, prenant en compte les caractéristiques de la pièce et les conditions de numérisation. Nous proposons ce protocole d'évaluation de capteur car il n'existe pas à ce jour de normes permettant de qualifier les systèmes de mesure sans contact. Les données issues du protocole de comparaison peuvent ainsi être comparées aux seuils de qualité déterminés par simulation. Cette analyse permet d'aboutir à la sélection de capteurs admissibles assurant la qualité requise.

Cependant, la qualité requise est également fonction de la stratégie de numérisation. Il convient donc de choisir parmi les capteurs admissibles celui qui permettra d'assurer la qualité attendue et d'élaborer la stratégie de numérisation en conséquence. Au chapitre 4, nous présentons une méthode de calcul d'un ensemble réduit de points de vue permettant la numérisation de la pièce

avec une qualité suffisante tout en minimisant le temps de mesure. Il s'agit d'une méthode générique basée sur une représentation simplifiée du capteur (par son cône de visibilité) et de la pièce (par une voxélisation de la peau) qui est applicable à tout type de capteur de numérisation 3D sans contact et toute typologie de pièce.

Le cinquième chapitre concerne une application des algorithmes et méthodes développés pour l'équilibrage de vilebrequin à partir de données numérisées. Nous détaillons la validation de la démarche globale d'équilibrage de vilebrequins à l'aide de la numérisation 3D. Cette validation prend en compte les contraintes du temps de cycle de la ligne de production et les exigences de qualité de RENAULT.

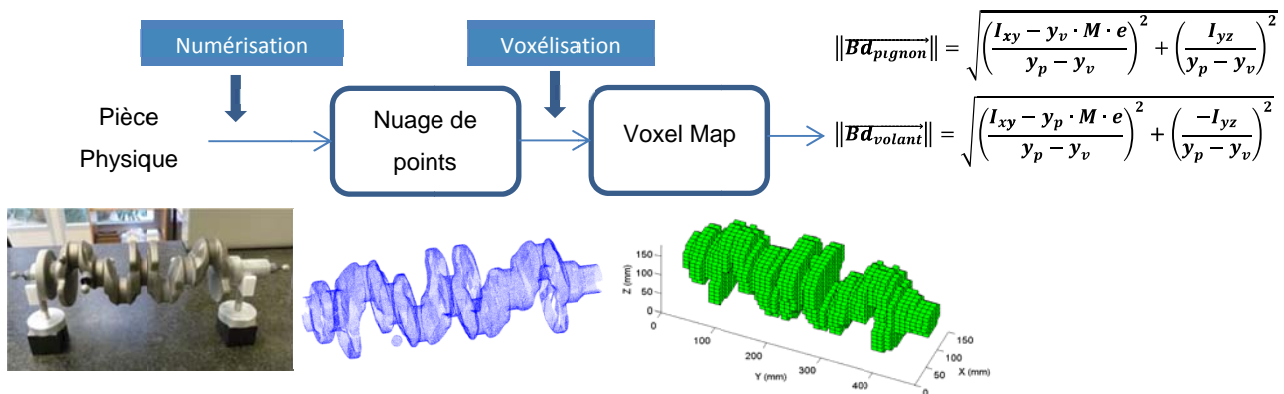


Figure 15 : Démarche globale de calcul de balourds par numérisation 3D.

Chapitre 2

Calcul d'inertie sur données discrètes

1. Introduction

Actuellement la société RENAULT équilibre les vilebrequins par la mesure d'efforts centrifuges dans des berceaux mécaniques de mesure dynamique des balourds. Afin de rendre flexible l'opération d'équilibrage, il est envisagé de remplacer le système de mesure mécanique par un système de mesure optique sans contact, permettant de rendre compte de la géométrie de la surface du vilebrequin.

Les systèmes optiques délivrent une très grande quantité d'informations, généralement sous forme d'un nuage de points, en un temps relativement court. Néanmoins les informations mesurées sont souvent bruitées, biaisées et incomplètes. La caractérisation de la qualité des nuages de points obtenus peut être faite au travers d'indicateurs, en particulier pour le bruit de numérisation, la justesse, la densité ainsi que la complétude. Ainsi, la plupart des systèmes de numérisation sans contact délivrent une information surfacique discontinue et incomplète de l'objet à mesurer.

Il est donc nécessaire de mettre au point une méthode générique de calcul de la matrice d'inertie de la pièce, nécessaire au calcul des balourds, à partir des données discrètes numérisées. La principale difficulté est que les éléments d'inertie sont calculés classiquement à partir d'une description continue de la répartition de la masse volumique de la pièce et non d'une description discrète de sa peau. Nous proposons dans ces travaux un algorithme de calcul des éléments d'inertie sur données discrètes basé sur une représentation sous forme de voxels des données numérisées. Cette représentation appelée *voxelmap*, construite à partir d'une première représentation sous forme de maillage STL de la pièce, définit ainsi une pseudo-continuité du volume inclut dans le maillage surfacique.

Après avoir rappelé les définitions nécessaires aux calculs des éléments d'inertie, nous présentons la méthode utilisée (*Voxel2inertia*) pour calculer les balourds à partir de données discrètes. Etant donné que cette méthode nécessite une représentation de la pièce en forme de maillage, nous présentons ensuite la démarche adoptée afin d'optimiser les paramètres d'entrée de

l'algorithme. Enfin, une dernière partie s'attache à une étude de sensibilité de l'algorithme aux défauts de numérisation. Cette dernière partie conduit à définir les défauts de numérisation admissibles assurant le calcul des éléments d'inertie. Il est alors possible de choisir le ou les capteurs permettant de garantir la qualité de numérisation.

2. Equilibrage et calcul d'inertie sur données continues

2.1. Notions d'équilibrage

L'équilibrage d'une pièce mécanique en rotation autour d'un axe fixe Δ nécessite la connaissance de sa matrice d'inertie I_Q , dont le calcul s'appuie sur la connaissance de la géométrie des masses du solide S à équilibrer ; elle est définie par rapport à un point du solide à partir du calcul des moments et des produits d'inertie.

$$I_Q = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix}_{(\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{z}_1)} \quad (1)$$

Où Q est un point du solide S , I_{ij} sont les termes de la matrice d'inertie et $(\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{z}_1)$ un repère attaché au solide étudié. Les termes d'inertie sont définis par les relations suivantes :

$$I_{ii} = \int_S (j^2 + k^2) dm \quad (2)$$

$$I_{ij} = - \int_S (ij) dm \quad (3)$$

Où i, j et k prennent les valeurs x, y et z .

Un solide est dit équilibré lors de sa rotation autour d'un axe fixe si et seulement si le centre de masse G est sur l'axe de rotation Δ et si l'axe de rotation Δ (défini par $(G, \vec{\delta})$, où $\vec{\delta}$ est la direction de l'axe) est un axe principal d'inertie pour ce solide. Ceci se traduit par une matrice d'inertie

exprimée en G dans un repère $(\vec{X}_1, \vec{\delta}_1, \vec{Z}_1)$ attaché au solide pour laquelle les produits d'inertie sont nuls dans les plans contenant Δ .

$$I_G = \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & I_{xz} \\ 0 & I_{\delta\delta} & 0 \\ I_{zx} & 0 & I_{zz} \end{pmatrix}_{(\vec{X}_1, \vec{\delta}_1, \vec{Z}_1)} \quad (4)$$

En pratique, l'équilibrage des pièces tournantes dans l'industrie automobile est essentiellement réalisé par la mesure d'effort sur deux paliers et par l'ajout ou le retrait de matière sur le solide [NFE90-601]. La matrice d'inertie n'est donc pas utilisée directement et elle est ainsi remplacée par la notion de vecteurs balourds [NFE90-602]. Ceux-ci sont calculés dans deux plans de référence préalablement définis, orthogonaux à l'axe de rotation comme présenté sur la Figure 16. Ces vecteurs sont caractérisés par leur norme exprimée en $g.cm$ et par leur phase (angle entre le vecteur-balourd et l'axe z_1) exprimé en degrés.

2.2. Détermination des vecteurs-balourd

Dans le cadre de l'équilibrage de vilebrequin, les deux plans de référence choisis sont définis au milieu des portées cylindriques du volant et du pignon (Figure 5). Ces plans correspondent aux plans utilisés lors de la mesure des défauts d'équilibrage sur berceau mécanique. Les vecteurs balourds correspondants sont appelés respectivement \overrightarrow{Bd}_v et \overrightarrow{Bd}_p . Chaque balourd peut être caractérisé par une masse ponctuelle m_v et m_p respectivement en $P_{Bd_{volant}}(x_v, y_v, z_v)$ et $P_{Bd_{pignon}}(x_p, y_p, z_p)$ deux points définis dans un repère tournant $(O_1, \vec{x}_1, \vec{\delta}_1, \vec{z}_1)$ lié au vilebrequin équilibré. O_{proj_v} et O_{proj_p} sont respectivement les projections de O_1 sur les plans de référence Volant et Pignon. G est le centre de masse et e est la position radiale du centre de masse par rapport à l'axe géométrique.

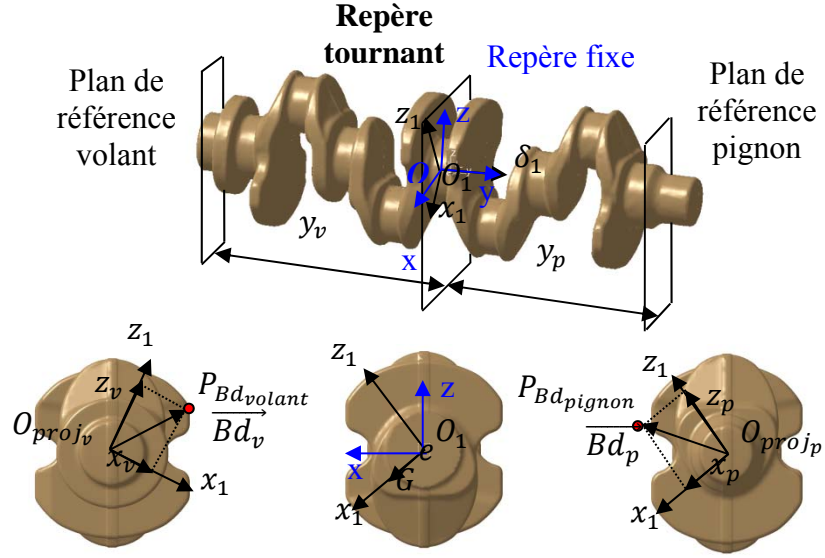


Figure 16 : Vecteurs balourd.

Les balourds sont définis en cherchant le système composé par le vilebrequin équilibré, le balourd volant et le balourd pignon équivalent au vilebrequin non équilibré de masse totale M . Le vilebrequin équilibré a son centre de masse sur l'axe de rotation (condition d'équilibrage statique) :

$$M \cdot \overrightarrow{O_1 G} = m_v \cdot \overrightarrow{O_1 B d_v} + m_p \cdot \overrightarrow{O_1 B d_p} \quad (5)$$

Lorsque le vilebrequin est équilibré dynamiquement, l'axe de rotation est axe principal d'inertie et par conséquent, les produits d'inertie sont nuls. Par application du théorème de Huyghens, ceci conduit à déterminer les balourds de référence :

$$\|\overrightarrow{B d_{volant}}\| = m_v \sqrt{x_v^2 + z_v^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{xy} - y_p \cdot M \cdot e}{y_p - y_v}\right)^2 + \left(\frac{-I_{yz}}{y_p - y_v}\right)^2} \quad (6)$$

$$\|\overrightarrow{B d_{pignon}}\| = m_p \sqrt{x_p^2 + z_p^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{xy} - y_v \cdot M \cdot e}{y_p - y_v}\right)^2 + \left(\frac{I_{yz}}{y_p - y_v}\right)^2} \quad (7)$$

Où e est la position radiale du centre de gravité G du vilebrequin non équilibré dans le repère tournant.

Cette formulation nécessite la connaissance de la matrice d'inertie de la pièce étudiée, dont les termes sont calculés en considérant une distribution continue des masses dans le volume de la pièce. Or, dans le cas de l'équilibrage par mesure sans contact de la géométrie externe, la pièce à équilibrer sera connue :

- Uniquement par la peau : les données recueillies correspondant à la mesure de la surface extérieure de la pièce.
- De façon discrète : les données recueillies étant délivrées sous la forme de maillage ou de nuage de points.

Cette méconnaissance sur la pièce à équilibrer impose une approximation sur les intégrations nécessaires à la détermination des éléments d'inertie tant sur le calcul lui-même que sur les limites. Ainsi la détermination des balourds n'est possible que par la mise au point d'une méthode de calcul des produits d'inertie adaptée au caractère discret des bornes d'intégration.

3. Algorithme de calcul d'inertie basé sur une *voxelmap*

Les vecteurs balourds étant définis à partir des éléments d'inertie et de la position des plans de référence, il est indispensable de connaître le volume intérieur englobé par la peau. Les données numérisées ne représentent que la peau de la pièce et uniquement de façon discrète. Afin de revenir à une information volumique, nous proposons de structurer les données grâce à une modélisation sous forme de voxels. Cette modélisation volumique servira de support au calcul des éléments d'inertie. De part de sa structuration, la voxélisation permet de mieux modéliser la position des plans de référence, nécessaires pour le calcul des balourds, par rapport aux méthodes basées uniquement sur des maillages volumiques. En effet, à partir d'une *voxelmap* des sections de la pièce parallèles à un axe du système de coordonnées peuvent facilement être obtenues.

3.1. Construction de la *voxelmap* et calcul des éléments d'inertie

Un voxel peut être défini comme un pixel 3D, les plus couramment utilisés étant de forme parallélépipédique. Considérant la numérisation d'une pièce, les voxels peuvent être construits à partir de la géométrie externe de la surface numérisée, chaque voxel étant associé à un ensemble de points représentatifs de la peau [JON 96]. Classiquement les voxels construits à partir du nuage de points sont classés selon deux types [CON 02b, OST 02] :

- Les voxels vides ne contenant pas de points mesurés ;
- Les voxels non-vides contenant des points M_i du nuage de points.

Cette construction usuelle des voxels n'est pas suffisante dans le cadre du calcul des éléments d'inertie. En effet elle ne permet pas de distinguer les voxels intérieurs à la pièce. Ainsi, nous décidons d'utiliser l'algorithme de voxélisation proposé par Patil et al. [PAT 05]. Celui-ci délivre une structure 3D de voxels (*voxelmap*) à partir d'un maillage STL (Figure 17) et permet de plus d'identifier les voxels situés à l'intérieur de la pièce.

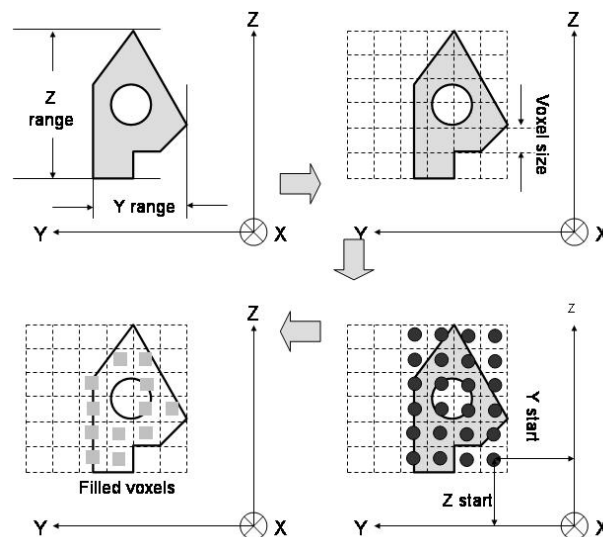


Figure 17 : Représentation d'une tranche de la structure de voxélisation [PAT 05].

Les voxels sont orientés selon les axes du système de coordonnées X, Y et Z. L'ensemble de voxels construit par cet algorithme est réalisé conformément au repère lié à la pièce, les arêtes des voxels sont donc parallèles aux axes. De plus, il est imposé qu'un des sommets des voxels corresponde à la plus petite des coordonnées selon chacune des directions du repère, ainsi un ensemble de voxels englobant la pièce est construit.

Le principe général de la méthode basée sur les travaux de Patil et al. [PAT 05] consiste à calculer les intersections entre le maillage étudié et un ensemble de droites. L'algorithme calcule les intersections entre des rayons parallèles à un des axes du repère passant par le centre des voxels et le maillage STL. Les voxels situés entre deux intersections seront considérés comme faisant partie de la pièce. Cette opération d'intersection est ensuite répétée sur les deux autres directions du repère, afin d'affiner la représentation en améliorant la détection de parois fines. Les opérations d'intersection peuvent être facilement parallélisées à l'aide de cartes graphiques, ce qui constitue un avantage par rapport aux méthodes basées uniquement sur des maillages.

De par son fonctionnement, cet algorithme nécessite un maillage fermé en entrée. En effet si le maillage est ouvert, la gestion des intersections pour définir les zones intérieures n'est plus suffisante. Or, en numérisation 3D les trous de numérisation sont très récurrents. Nous présentons au paragraphe 5 une étude sur l'influence de ces trous de numérisation. Une autre limite de cet algorithme concerne sa sensibilité à la taille de voxel choisie. En effet, en fonction de cette dernière, il est possible de ne pas détecter des parois fines.

Par ailleurs, la modélisation du volume de la pièce par des voxels peut évoluer en fonction de la taille des voxels. Une diminution de la taille de voxel permet de mieux représenter les courbures de la pièce, modélisée par un maillage STL, et permet d'éviter ainsi les erreurs d'estimation de la masse. Alors que pour une taille importante des voxels par rapport au volume de la pièce, certains détails de géométrie de la pièce sont négligés.

Pour illustrer cette influence de la taille de voxel choisie, nous appliquons cet algorithme sur une surface cylindrique comportant une rainure de 20 mm (Figure 18). Deux tailles différentes de voxel sont utilisées. A gauche, la taille de voxel de 30 mm est supérieure à la largeur de l'encoche et la modélisation n'est pas correcte. Dans ce cas, lors du calcul d'inertie, ceci risque d'entraîner une erreur sur la détermination des balourds.

Sur la Figure 18 à droite, une voxelisation plus fine (2 mm) permet de mieux représenter la géométrie de la pièce et de réduire les erreurs de modélisation du volume de la pièce. Ainsi, les valeurs des éléments d'inertie obtenues seront plus proches des valeurs réelles. Néanmoins, ceci se traduira nécessairement par une augmentation du temps de calcul, la taille de voxel induisant directement le nombre d'intersection à calculer.

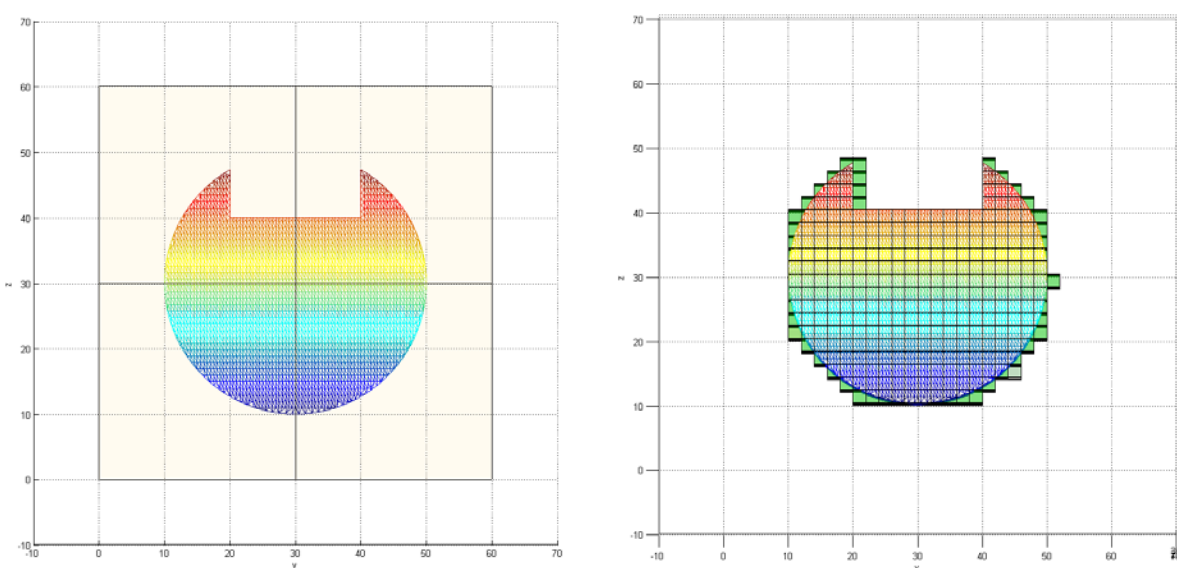


Figure 18 : Représentation de l'influence de la taille des voxels sur la description du volume.

Les voxels de surface, ceux contenant au moins une portion de facette du maillage initial et au moins une face exposée (sans voxel voisin), sont identifiés. Les voxels de surface sont ainsi classés comme des voxels vides et exclus de la liste des voxels intérieurs au maillage. L'identification des voxels de surface est réalisée itérativement selon chaque direction principale jusqu'à la voxelisation finale qui ne possède que des voxels intérieurs (Figure 19).

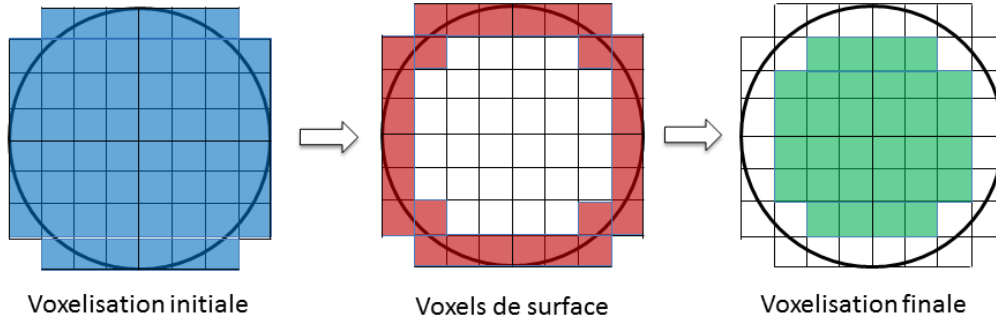


Figure 19 : Identification des voxels de surface et définition de la voxelisation finale sur une sphère

[SUB 06].

Après la construction de cette représentation sous forme de voxels de la pièce, nous attribuons aux voxels faisant partie de la pièce (voxel intérieurs) un indice β égal à 1 et un indice β égal à zéro pour ceux considérés comme extérieurs. A chaque voxel d'indice $\beta = 1$ est affectée une masse définie par $\Delta m = \rho V$ où V est le volume du voxel et ρ la densité volumique de masse.

Considérant que l'application concerne un vilebrequin en acier forgé, il est possible d'utiliser l'hypothèse de masse volumique ρ homogène sur l'ensemble de la structure. Ainsi, nous obtenons une structure 3D de masses élémentaires identiques centrées sur le barycentre de chaque voxel. Dans notre étude, les voxels sont considérés comme des cubes d'arêtes S_v . A partir de la *voxelmap*, les termes de la matrice d'inertie sont calculés, considérant l'espace V de voxels englobant le maillage initial :

$$I_{xx} = \sum_V \Delta m \cdot \beta_i \cdot (y_i^2 + z_i^2) \quad (8)$$

$$I_{yy} = \sum_V \Delta m \cdot \beta_i \cdot (x_i^2 + z_i^2) \quad (9)$$

$$I_{zz} = \sum_V \Delta m \cdot \beta_i \cdot (x_i^2 + y_i^2) \quad (10)$$

$$I_{xy} = I_{yx} = -\sum_V \Delta m \cdot \beta_i \cdot (x_i \cdot y_i) \quad (11)$$

$$I_{xz} = I_{zx} = -\sum_V \Delta m \cdot \beta_i \cdot (x_i \cdot z_i) \quad (12)$$

$$I_{yz} = I_{zy} = -\sum_V \Delta m \cdot \beta_i \cdot (y_i \cdot z_i) \quad (13)$$

Où x_i, y_i, z_i sont les coordonnées des barycentres des voxels, β est un indice égal à 1 pour les voxels intérieurs et égal à 0 sinon, et $\Delta m = \rho V$ avec V volume d'un voxel.

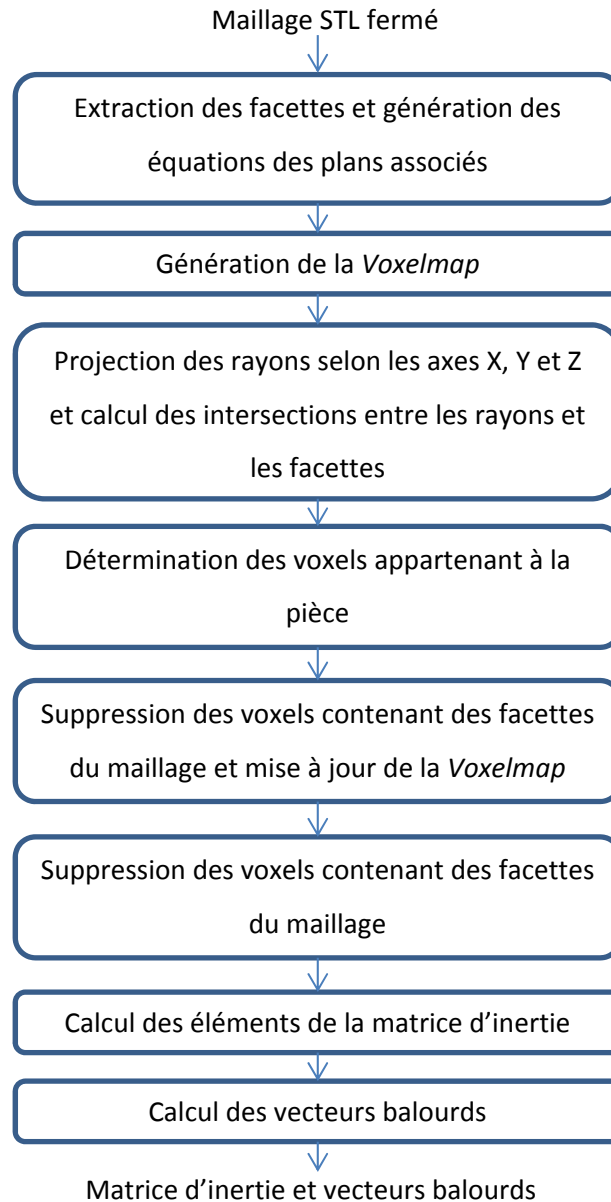


Figure 20 : Algorithme de calcul Voxel2inertia.

Nous calculons ainsi les termes de la matrice d'inertie à l'aide des équations 8 à 13, ainsi que la position du centre de gravité G . Les balourds sont ensuite calculés à partir des Equations 6 et 7.

Cet algorithme, implémenté sous *MATLAB*[®], est présenté Figure 20. La pièce est modélisée d’abord par un maillage STL surfacique puis par une voxelmap, ce qui conduit nécessairement à une approximation des termes d’inertie. Il convient donc d’évaluer la qualité de l’approximation vis-à-vis d’un calcul exact.

3.2. Etude de cas

Le calcul des termes de la matrice d’inertie présenté précédemment s’appuie sur la voxelisation réalisée à partir d’une représentation sous forme de maillage de la pièce. Deux éléments interviennent sur la qualité de la modélisation finale (Figure 21) :

- la représentativité du maillage au regard de la surface initiale,
- la représentativité de la voxelisation au regard du maillage.

Dans notre démarche, nous utilisons deux paramètres classiques d’analyse de la qualité du maillage : l’erreur de flèche S_f , qui est exprimée par la distance entre la facette du maillage et la définition surfacique issue de la CAO, et la longueur d’arête S_m du maillage. La représentativité de la *voxelmap* par rapport à la surface extérieure de la pièce délimitant son volume est exprimée par la taille de voxel S_V (Figure 21).

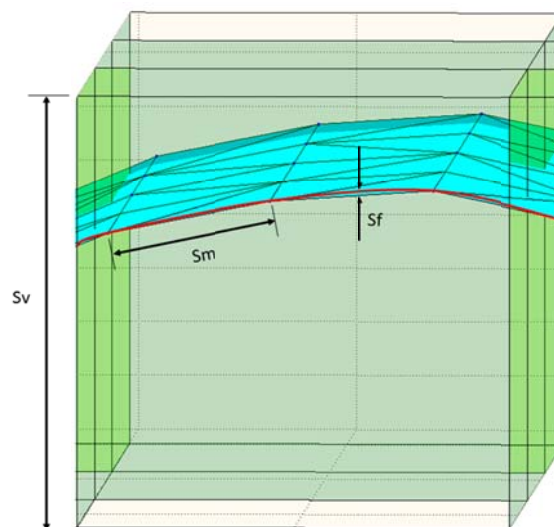


Figure 21 : Représentation de la taille du maillage (S_m), de flèche (S_f) et de voxel (S_V).

Les erreurs de représentation des maillages par rapport à la surface nominale sont très impactées par les courbures de la surface. Par exemple pour un cercle de rayon R , l'erreur relative sur la description de l'aire du cercle par un polygone est représentée à la Figure 22. L'erreur peut rapidement atteindre les 4% pour de faibles rayons. Pour des rayons plus importants, la tolérance de flèche a une influence plus réduite.

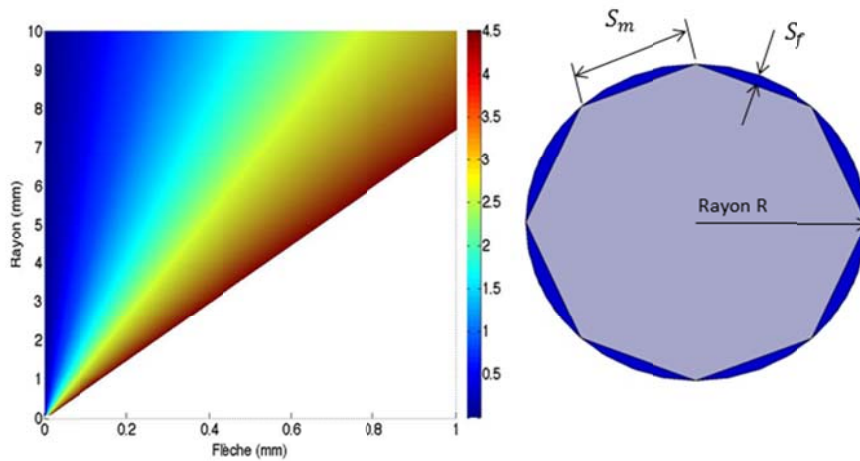


Figure 22 : Erreur sur la détermination de l'aire d'un cercle en fonction du rayon et de la taille de flèche.

Afin d'illustrer l'influence relative des différents paramètres et de valider notre méthode de calcul, nous étudions une pièce test composée d'un axe cylindrique et d'un disque central qui peut être représentatif des contrepoids (Figure 23).

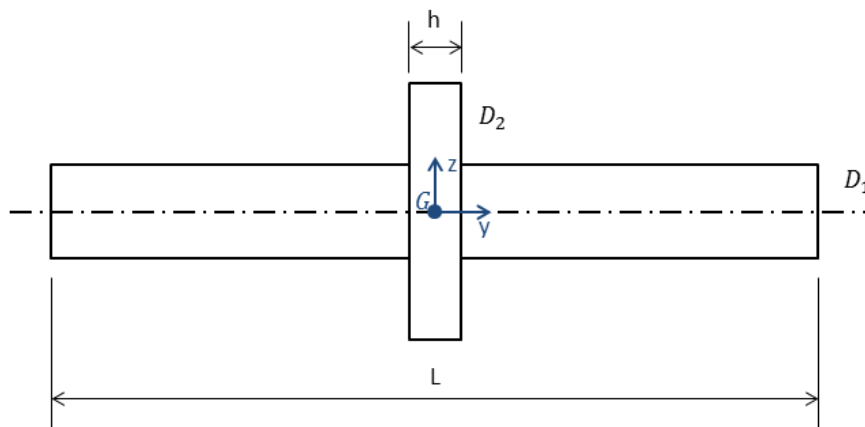


Figure 23 : Pièce test utilisée pour la définition des niveaux de maillage.

Il s'agit dans un premier temps de valider le calcul des éléments d'inertie avec la méthode proposée vis-à-vis d'un calcul analytique (Eqs. 2 à 7) et d'illustrer l'influence des paramètres pilotant la représentation de la pièce. Nous calculons ainsi la masse et les termes de la matrice d'inertie analytiquement et au travers de l'algorithme de calcul d'inertie Voxel2inertia.

$$m_1 = \pi \cdot R_1^2 \cdot L \cdot \rho \quad (14)$$

$$m_2 = \pi \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot h \cdot \rho \quad (15)$$

$$I_{xx} = \frac{1}{12} \cdot m_1 (3 \cdot R_1^2 + L^2) + \frac{1}{12} \cdot m_2 \cdot (3 \cdot (R_1^2 + R_2^2) + h^2) \quad (16)$$

$$I_{yy} = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot R_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot (R_1^2 + R_2^2) \quad (17)$$

$$I_{zz} = \frac{1}{12} \cdot m_1 (3 \cdot R_1^2 + L^2) + \frac{1}{12} \cdot m_2 \cdot (3 \cdot (R_1^2 + R_2^2) + h^2) \quad (18)$$

Où m_1 est la masse de l'axe, m_2 est la masse du disque et ρ est la masse volumique. $R_1 = D_1/2$ et $R_2 = D_2/2$. Les calculs sont réalisés au centre de masse G de la pièce, dont les dimensions sont : $L = 400 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ mm}$, $D_1 = 56 \text{ mm}$ et $D_2 = 100 \text{ mm}$.

Pour évaluer notre méthode, un maillage STL est obtenu en considérant 2 niveaux de paramètre S_f . Ce paramètre conditionne en partie la qualité du maillage point d'entrée de la voxelisation. Nous utilisons aussi 2 niveaux pour le paramètre S_v (Figure 21). Les erreurs relatives par rapport au calcul analytique sont reportées dans le Tableau 1.

Nous pouvons constater que le maillage dont la valeur de flèche est la plus petite présente les résultats les plus proches du résultat analytique sur la pièce de référence, soit 0,83% d'erreur sur la détermination de la masse par exemple.

Le volume du voxel de taille $0,65 \text{ mm}$ est $0,27 \text{ mm}^3$ et celui du voxel de taille 3 mm est 27 mm^3 . Il est intéressant de noter qu'en réduisant le volume du voxel d'un facteur de 100, et pour une même taille de flèche, l'erreur sur l'estimation de la masse est presque divisée par deux

pour le maillage de flèche 0,2 mm. En réduisant 5 fois la taille de flèche et pour une taille donnée de voxel, par exemple 3 mm, l'erreur sur l'estimation de la masse est divisée par deux. Il apparaît donc que l'influence du maillage et de la voxélisation sur les résultats reste importante. Il est donc nécessaire d'étudier la sensibilité du calcul des éléments d'inertie sur une plage plus étendue de tailles de flèche et de voxel.

Dans le paragraphe 4 nous présentons plus en détail l'influence du maillage et de la voxélisation par rapport au calcul des éléments d'inertie en particulier dans le cas de vilebrequins non équilibrés.

| Maillage | Masse | Ixx | Iyy | Izz |
|-----------------------------|--------------|------------|------------|------------|
| Flèche 0,2 mm Voxel 0,65 mm | 0,83% | 0,86% | 3,51% | 0,86% |
| Flèche 1 mm Voxel 0,65 mm | 3,51% | 4,24% | 6,90% | 4,24% |
| Flèche 0,2 mm Voxel 3 mm | 1,52% | 2,32% | 4,04% | 2,31% |
| Flèche 1 mm Voxel 3 mm | 3,41% | 4,57% | 6,80% | 4,57% |

Tableau 1 : Erreurs sur le calcul des éléments d'inertie calculés analytiquement et par l'algorithme Voxel2inertia.

4. Optimisation des paramètres

Afin de valider notre démarche de calcul d'inertie, nous nous sommes intéressés à l'étude de sensibilité de l'algorithme de calcul des balourds aux différents paramètres d'entrée. L'objectif est de déterminer des intervalles de paramètres optimaux vis-à-vis de la qualité du résultat et du temps de calcul. Afin de déterminer les influences relatives des différentes représentations, nous décidons de travailler sur un modèle CAO dont le défaut d'équilibrage est connu. Ce modèle servira de référence pour établir les niveaux nécessaires pour la définition du maillage et de la *voxelmap* ainsi que la description des défauts de numérisation.

Nous procédons à une facettisation du modèle CAO sous environnement *CATIA V5R20*[®]. Les maillages générés ont différentes valeurs de flèche et d'arrête. En effet, la facettisation est nécessaire car la frontière définie par la peau du vilebrequin doit être connue sous forme de maillage afin de construire la *voxelmap*. Cette dernière est générée à travers l'algorithme *Voxel2inertia*, implémenté sous *MATLAB*[®], qui calcule également les éléments d'inertie.

4.1. Influence du maillage et de la voxélisation

Pour réaliser l'étude de sensibilité sur des vilebrequins, nous faisons varier la taille du maillage S_m selon 3 niveaux (3 mm, 1 mm et 0,5 mm), l'erreur de flèche S_f selon trois niveaux : 0,1 mm, 0,06 mm et 0,02 mm, et la taille de voxel S_v selon 26 niveaux : entre 0,45 mm à 1,2 mm par pas de 0,05 mm, 1,2 mm, 1,3 mm, 1,4 mm, 1,6 mm, 1,8 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm, 3,5 mm et 4 mm). Chaque maillage (selon les combinaisons de S_m et S_f) est simulé avec les 26 tailles différentes de voxel. Les indicateurs étudiés pour évaluer la qualité de l'algorithme sont l'erreur sur la masse totale et l'erreur sur les balourds de référence par rapport aux valeurs théoriques calculées.

La masse est un bon indicateur de la qualité de représentation du volume par la *voxelmap*. Néanmoins nous nous intéressons également à l'erreur sur la détermination de la masse ainsi qu'au temps de calcul. Le temps de calcul est une contrainte forte d'industrialisation de la méthode sur ligne de production. L'erreur sur le calcul des éléments d'inertie doit rester inférieure au seuil admissible de $\pm 5\%$ compte tenu des exigences de production de Renault [E41.36.419.R]. L'erreur de masse est présentée comme un écart relatif entre la masse calculée sur le modèle CAO et celle calculée avec l'algorithme *Voxel2inertia*. La masse calculée est toujours inférieure à la masse issue du modèle CAO compte tenu de la construction de la *voxelmap* à l'intérieur du maillage (Figure 19).

$$Erreur_{masse} = \left\| \frac{m_{CAO} - m_{calculée}}{m_{CAO}} \right\| \quad (19)$$

L'erreur sur l'estimation de la masse décroît avec la diminution de la taille des voxels, cette erreur se stabilisant autour de 2,3% (Figure 24) pour une taille de voxels inférieure à 1mm. A l'exception du maillage obtenu pour une taille de maille de 3 mm, les résultats sont très proches quelles que soient les tailles de maillage et de flèche. L'erreur d'estimation du balourd est calculée par :

$$Erreur_{balourd} = \left\| \frac{bd_{CAO} - bd_{calculée}}{bd_{CAO}} \right\| \quad (20)$$

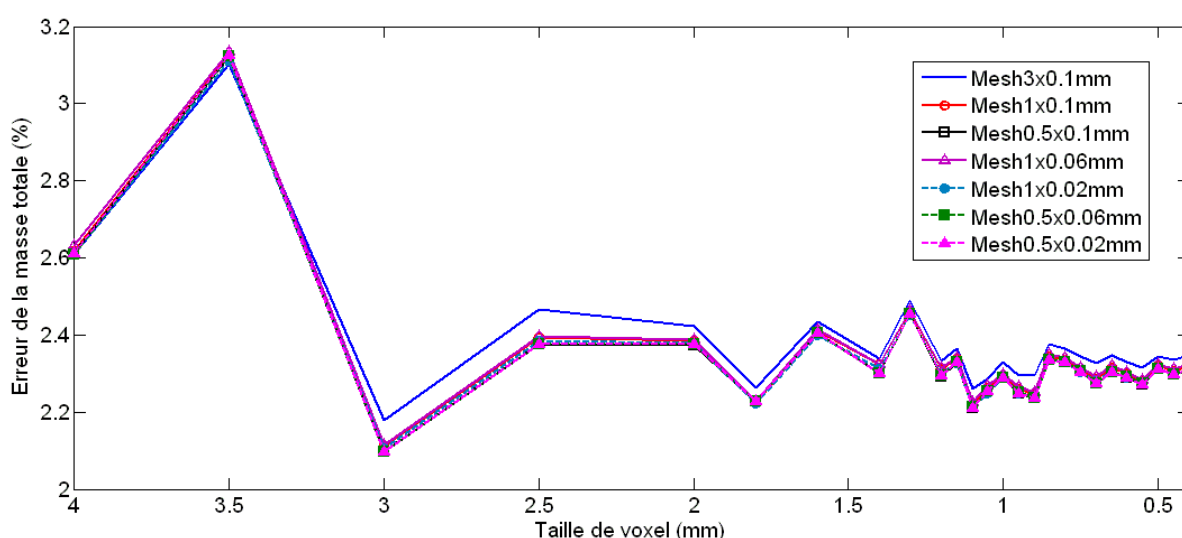


Figure 24 : Influence de la taille de voxel sur l'estimation de la masse totale pour différents maillages.

Concernant le calcul de balourds, ici encore les dimensions du maillage d'entrée influent peu sur le calcul. Nous pouvons constater sur la Figure 25 que l'erreur d'estimation du Balourd Volant varie de moins de 1% entre les différents maillages pour une même taille de voxel. Par contre, les erreurs sont très importantes pour des voxels dont la taille est au-dessus de 1,2 mm. Dans la plage de voxels entre 0,7 mm et 1,2 mm, les erreurs varient entre 10% et 25% et pour les voxels au-dessous de 0,65 mm les erreurs se stabilisent autour de 2,5% (Figure 25).

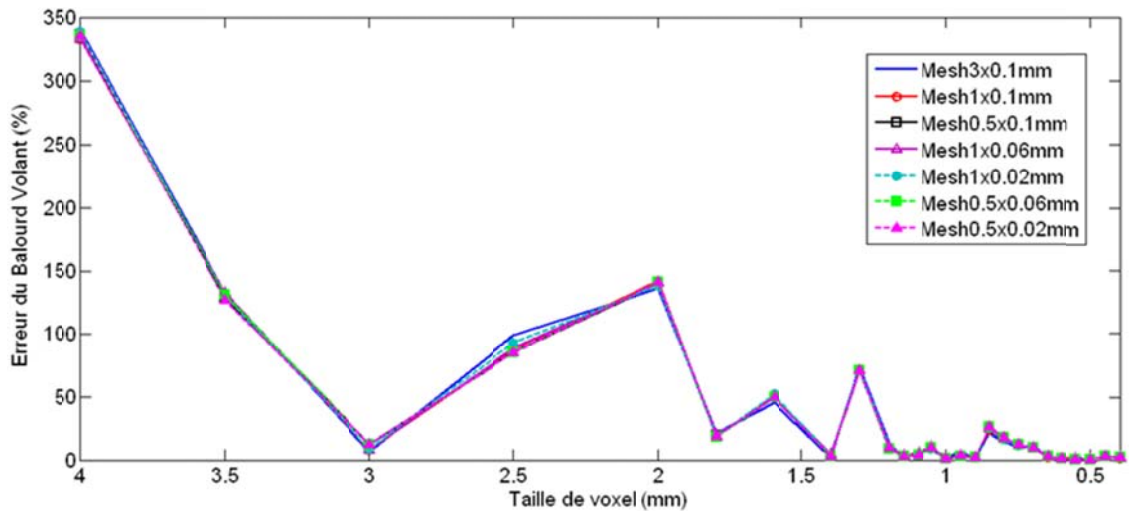


Figure 25 : Influence de la taille de voxel sur le balourd dans le plan de référence volant pour différents maillages.

4.2. Choix des paramètres optimaux

Pour le groupe de maillages choisis, les paramètres de maillage (taille de maillage et de flèche) influent très peu sur le résultat obtenu. La méthode de calcul proposée est ainsi peu sensible à la taille de maille ainsi qu'à l'erreur de flèche pour la plage de valeurs choisie.

Le paramètre le plus influant sur le temps de calcul reste cependant la taille du voxel, puisque le temps de calcul augmente très significativement pour des voxels de taille inférieure à $0,85\text{ mm}$ (Figure 26). Cependant, pour conserver une estimation satisfaisante des balourds, nous choisissons $S_V = 0,65\text{ mm}$ comme taille de voxel admissible. Cela conduit à une erreur sur la masse de $2,32\%$ et une erreur d'estimation du balourd de $1,76\%$ pour des paramètres du maillage dont les valeurs admissibles sont $S_m = 1\text{ mm}$ et $S_f = 0,06\text{ mm}$ avec un temps de calcul de 74 secondes sur un PC classique (processeur à double cœur 2,53 GHz et mémoire vive 2 Go).

Une fois les valeurs admissibles de taille de maillage, de flèche et taille de voxel fixées, nous nous intéressons à une deuxième étude de sensibilité de l'algorithme de calcul vis-à-vis des défauts associés au nuage de points numérisé. Ceci afin d'établir la qualité de numérisation admissible permettant d'assurer les calculs d'inertie sur données discrètes.

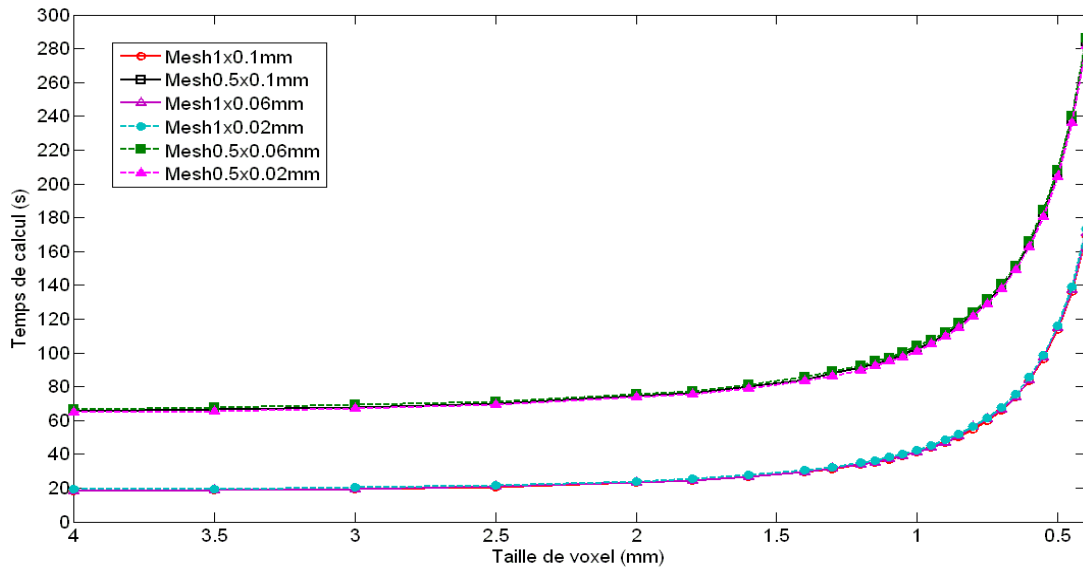


Figure 26 : Temps de calcul en fonction de la taille de voxel utilisée pour différents maillages.

5. Étude de sensibilité de l'algorithme aux défauts de numérisation

Nous détaillons dans ce paragraphe la série de tests que nous avons définie afin d'estimer la sensibilité de l'algorithme proposé vis-à-vis de la qualité des données numérisées acquises par numérisation 3D. Cette étude conduit à déterminer la qualité de numérisation admissible permettant de garantir le calcul des éléments d'inertie avec une erreur seuil admissible. La qualité de numérisation est définie au travers de différents indicateurs (bruit, justesse, etc.).

Pour cette étude, nous nous basons à nouveau sur le modèle CAO de la pièce. A partir de la discrétisation, nous insérons un bruit aléatoire sur chacun des points. Le bruit introduit (d'amplitude δ) varie entre $200 \mu m$ et $600 \mu m$ selon 5 niveaux, ce qui est cohérent avec la plupart des systèmes de numérisation par moyens optiques [BOU 05, CON 02a]. Afin d'estimer la variation des erreurs pour chaque niveau de bruit, nous analysons 10 maillages bruités pour chaque cas, soit 50 maillages au total qui représentent les variations des défauts de numérisation liés au bruit.

Il apparaît que le bruit a une très faible influence (inférieure à 1%) sur la détermination de la masse. Ceci est principalement dû aux dimensions des vilebrequins, très grandes devant les niveaux de bruit. En ce qui concerne l'estimation du balourd dans le plan de référence volant, nous obtenons

une erreur moyenne variant de 1,31% pour $\delta = 200 \mu m$ jusqu'à 3,25% pour $\delta = 600 \mu m$. Le bruit augmente l'incertitude sur la détermination des balourds mais pour les cas testés l'erreur reste en dessous du seuil admissible de $\pm 5 \%$. Au-delà de $\delta = 500 \mu m$ l'incertitude augmente fortement et l'erreur sur la détermination du balourd peut dépasser 6% (erreur maximale). Nous fixons donc le seuil du bruit admissible δ_{adm} à $500 \mu m$ afin de minimiser l'erreur d'estimation du balourd (Tableau 2).

| Niveau de Bruit (μm) | <i>200</i> | <i>300</i> | <i>400</i> | <i>500</i> | <i>600</i> |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Erreur moyenne (%) | <i>1,31</i> | <i>1,96</i> | <i>1,43</i> | <i>1,62</i> | <i>3,25</i> |
| Erreur maximale (%) | <i>3,01</i> | <i>4,25</i> | <i>3,17</i> | <i>3,34</i> | <i>5,97</i> |

Tableau 2 : Influence du bruit sur l'erreur de balourd dans le plan de référence volant.

La justesse est généralement exprimée par la différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence. Les points 3D obtenus ne constituent pas des valeurs mesurées car ils ne représentent pas une grandeur. Nous choisissons donc de modéliser une erreur de justesse sur les données numérisées comme une dilatation des données de la pièce nominale. Par conséquent, un facteur d'échelle peut être utilisé.

Différents niveaux de justesse sont testés grâce à une plage de facteurs d'échelle variant entre 0,97 et 1,03 (Tableau 3). Chaque facteur d'échelle est appliqué sur 10 maillages. Nous constatons un effet miroir dans les résultats des balourds en fonction du facteur d'échelle. L'erreur de balourd augmente dès que le facteur d'échelle s'éloigne de 1, dans le cas où le maillage de la pièce n'a pas été modifié. Les facteurs d'échelle entre 0,98 et 1,01 respectent la tolérance d'équilibrage. Cependant, pour des raisons de symétrie du facteur d'échelle, nous fixons notre tolérance concernant le facteur d'échelle à la plage entre 0,99 et 1,01, soit l'équivalent de $\pm 3\%$ du volume de la pièce.

| Facteur d'échelle | <i>0,97</i> | <i>0,98</i> | <i>0,99</i> | <i>1,00</i> | <i>1,01</i> | <i>1,02</i> | <i>1,03</i> |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Erreur des balourds (%) | <i>9,93</i> | <i>5,85</i> | <i>0,66</i> | <i>1,76</i> | <i>1,16</i> | <i>15,77</i> | <i>12,19</i> |

Tableau 3 : Erreur de balourd dans le plan de référence volant par rapport à facteur d'échelle.

En plus du bruit et de l'incertitude de mesure, les données numérisées présentent souvent des trous de numérisation. Comme expliqué précédemment, l'algorithme Voxel2inertia nécessite un maillage fermé en entrée. De ce fait, nous avons réalisé une étude sur l'influence des trous de numérisation sur la détermination des éléments d'inertie.

Nous présentons sur la Figure 27 les trous de numérisation pour des essais réalisés avec deux systèmes de numérisation détaillés en annexes, le capteur Gom Atos III monté sur un trépied et le capteur Kreon KZ25 sur MMT (voir les annexes A.1 et A.2). Nous pouvons constater deux typologies de zones critiques dont des trous de numérisation sont récurrents :

- Zone des « vallées » du vilebrequin dont les manetons M1, M2, M3 et M4 et le tourillon central T3 (pour le système Kreon) ;
- Zone autour de l'axe de rotation dont les tourillons T1, T2 et T4 (pour le système Gom).

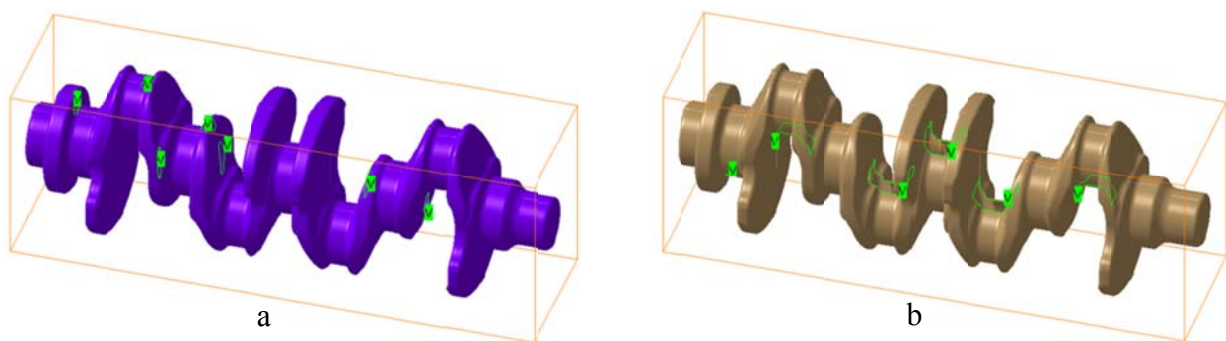


Figure 27 : Trous de numérisation pour les systèmes : (a) Gom et (b) Kreon.

Afin de mieux appréhender les effets des trous de numérisation sur le calcul des éléments d'inertie, nous avons créé des trous rectangulaires selon trois niveaux de tailles et selon les deux typologies des zones critiques. Les dimensions des trous ont été choisies de façon à représenter au mieux la typologie des trous rencontrés lors de la numérisation. Pour les zones des vallées du vilebrequin, les côtes des trous rectangulaires insérés sont :

- 10 mm par 30 mm;
- 10 mm par 50 mm;

- 15 mm par 50 mm;

Les trous insérés sont placés à 25 mm en haut de l'axe de rotation du vilebrequin de façon à ce que les trous soient sur les masses proches de l'axe des manetons M1 et M3, et à 25 mm en bas de l'axe de rotation du vilebrequin pour que les trous soient placés sur les zones voisines l'axe des manetons M2 et M4.

Pour les zones critiques autour de l'axe de rotation de la pièce, les trous rectangulaires insérés sont centrés sur l'axe de rotation et leurs côtes sont les suivantes :

- 10 mm par 30 mm;
- 10 mm par 40 mm;
- 15 mm par 40 mm.

Il faut noter que les dimensions et les positions des trous utilisées ont été choisies de façon à représenter au mieux les trous de numérisation réels rencontrés lors des numérisations pour les deux systèmes différents (Figure 27). Les trous générés artificiellement sont bouchés ensuite par un maillage simplifié avec *CATIA V5R20*[®] (Figure 28). Lors de cette opération les seuls paramètres contrôlés sont la taille de flèche et la taille du maillage inséré sur la zone trouée. L'objectif ici n'est pas de déterminer de façon exhaustive l'influence de la forme des trous ni du type de raccord réalisée entre le maillage inséré et le maillage de base. Les paramètres évalués vis-à-vis de l'impact sur le calcul d'inertie sont donc l'aire et la position des trous de numérisation.

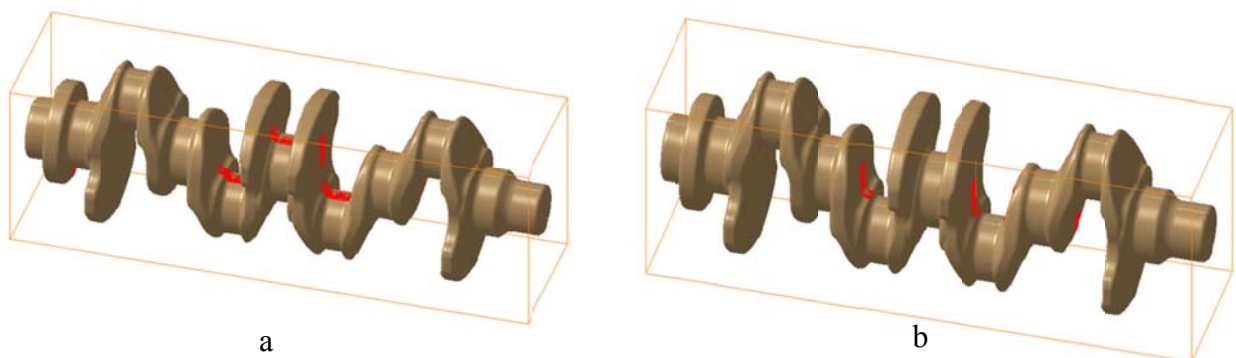


Figure 28 : Trous générés et bouchés sur (a) les vallées et (b) sur l'axe de rotation du vilebrequin.

Nous calculons enfin les éléments d'inertie au centre de masse G pour les nouveaux maillages. Les résultats sont comparés au maillage nominal sans défauts. Les erreurs relatives des maillages troués par rapport au maillage nominal sont présentées sur le Tableau 4.

| Maillage | Aire des trous (mm²) | Masse | I_{xx} | I_{yy} | I_{zz} |
|-----------------------------|--|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Trous sur les vallées 10x30 | 2000 | 0,08% | 0,05% | 0,03% | 0,04% |
| Trous sur les vallées 10x50 | 3056 | 0,11% | 0,06% | 0,05% | 0,06% |
| Trous sur les vallées 15x50 | 4947 | 0,20% | 0,12% | 0,10% | 0,11% |
| Trous sur l'axe 10x30 | 1508 | 0,05% | 0,03% | 0,00% | 0,03% |
| Trous sur l'axe 15x30 | 2304 | 0,05% | 0,03% | 0,00% | 0,03% |
| Trous sur l'axe 15x40 | 3184 | 0,11% | 0,07% | 0,01% | 0,07% |

Tableau 4 : Erreurs des éléments d'inertie en fonction des trous de numérisation.

De façon prévisible, les erreurs augmentent avec l'amplification de l'aire des trous générés. De plus les trous autour de l'axe de rotation génèrent moins d'erreur que ceux proches des axes de manetons ce qui est cohérent avec la formulation du calcul des éléments d'inertie. En effet, la valeur des balourds augmente avec le double de la distance entre la masse ponctuelle analysée par rapport à l'axe de rotation du vilebrequin. De ce fait, les erreurs sur l'estimation des éléments d'inertie induites par les trous situés sur les manetons sont plus importantes que ceux générés par les trous placés autour de l'axe de rotation du vilebrequin.

L'erreur maximale tolérée sur l'estimation du balourd pour respecter les exigences d'équilibrage de Renault est de 5 %. Considérant cette exigence, le bruit maximum toléré est de 500 μm et la densité minimale admissible, par rapport aux paramètres optimaux de maillage, est de 2 points par mm^2 . Outre, la justesse relative est limitée à plus ou moins 1% ce qui correspond à plus ou moins 3% par rapport au volume du vilebrequin pour que la détermination des éléments d'inertie soit dans les tolérances d'équilibrage. L'étude réalisée sur les trous de numérisation permet de conclure que la typologie (position et aire) des trous généralement issus de la numérisation 3D est

peu influente sur l'estimation des éléments d'inertie par rapport aux autres défauts de numérisation tels que l'incertitude et le bruit de mesure.

6. Conclusions

La mesure des défauts d'équilibrage par mesure de la géométrie externe au moyen de systèmes optiques est un enjeu important sur les lignes de production des vilebrequins. Cette technique permettrait une réduction des coûts de maintenance et une meilleure flexibilité. Nous proposons une méthode, implémentée sous *MATLAB*[®], permettant le calcul des vecteurs balourds dans les plans de référence à partir de données discrètes. La démarche proposée s'appuie sur la donnée d'un maillage STL 3D défini à partir d'un nuage de points numérisés et la construction d'une *voxelmap*.

A chaque voxel est associée une masse ponctuelle, définissant ainsi une structure 3D de masses élémentaires centrées sur le barycentre de chaque voxel. Les éléments d'inertie (masse, balourds, etc.) sont calculés sur cette structure 3D avec une erreur inférieure à 2% lorsque les paramètres de discrétisation sont suffisamment bien choisis. Le temps de calcul des éléments d'inertie pour un vilebrequin discrétisé selon les paramètres optimaux est d'environ 74 secondes sur un PC classique. Ce temps de calcul peut être facilement réduit grâce à la parallélisation de la méthode de voxélisation par *raytracing* avec l'utilisation de cartes graphiques par exemple.

Avec la méthode de calcul des éléments d'inertie *Voxel2inertia*, mise en place et développée sous *MATLAB*[®], il est possible d'évaluer l'influence d'un bruit, de la justesse et des trous de numérisation sur la détermination des balourds. Cela permet d'orienter le choix des systèmes de numérisation adaptés à l'équilibrage de vilebrequin à partir de données discrètes. L'erreur maximale tolérée pour respecter les exigences d'équilibrage est de $\pm 5\%$ sur l'estimation du balourd. Considérant cette exigence, l'amplitude de bruit admissible est de $500 \mu\text{m}$ et la densité minimale admissible est de 2 points par mm^2 de la surface de la pièce. La justesse relative est quant à elle

limitée à plus ou moins 1%. Enfin, l'étude réalisée sur les trous de numérisation permet de conclure que la typologie des trous issus de numérisation 3D est peu influente sur l'estimation des éléments d'inertie vis-à-vis des autres défauts de numérisation.

Notons cependant, que la démarche de validation a été réalisée à partir de la discrétisation d'un modèle CAO pour lequel il est simple de maîtriser la tolérance de flèche et la taille de maille (Figure 29). Cependant, la méthode devra s'appliquer sur des données réelles issues de numérisation 3D à partir desquelles le maillage STL sera réalisé. Nous verrons au chapitre 5 quelles sont les difficultés qui peuvent apparaître relativement à la mise en œuvre de l'algorithme Voxel2inertia sur données réelles.

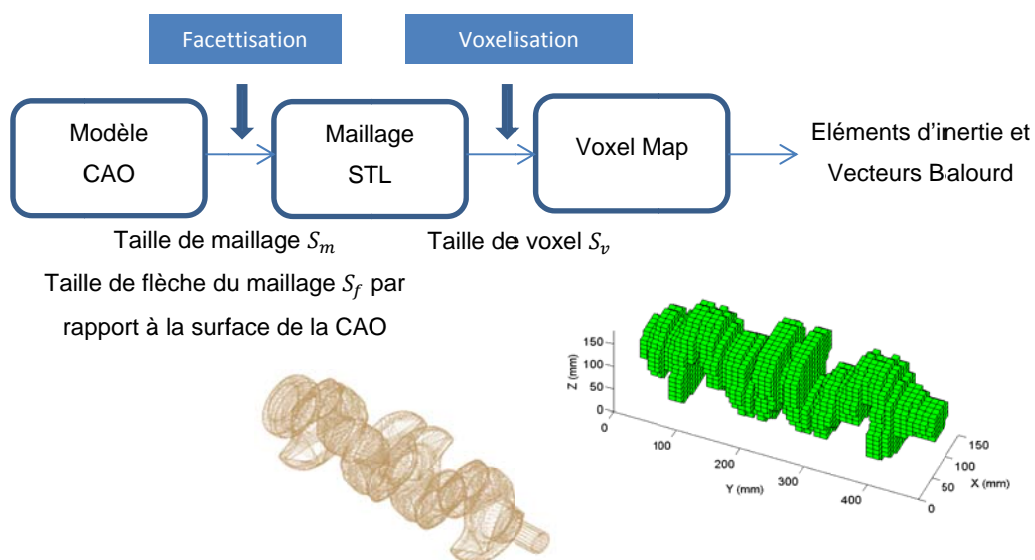


Figure 29 : Démarche de validation du calcul de balourds par numérisation 3D.

Chapitre 3

Evaluation des systèmes de numérisation pour l'opération d'équilibrage

1. Introduction

Comme nous l'avons largement souligné dans les chapitres précédents, nous proposons pour l'opération d'équilibrage des vilebrequins le remplacement des moyens de mesure mécanique par un système de numérisation sans contact permettant l'acquisition de la géométrie externe couplé à un algorithme de calcul des balourds sur données discrètes présenté au Chapitre 2. Il existe de nombreux systèmes de numérisation sur le marché, chacun d'entre eux de caractéristiques et technologies différentes influant à la fois sur la qualité et le temps de mesure. Les systèmes de numérisation 3D délivrent en général un ensemble de données discrètes bruit, incomplet et dont la justesse de mesure dépend à la fois des caractéristiques du système de numérisation et de la stratégie de mesure employée. Dans le chapitre 2, nous avons étudié la sensibilité de l'algorithme de calcul des balourds aux défauts de numérisation que sont le bruit, la justesse et la complétude. Nous avons en particulier mis en avant les valeurs admissibles de ces différents paramètres permettant de répondre aux exigences de performance définies par Renault, soit obtenir la même justesse de mesure des balourds ($\pm 5\%$) et rendre flexible l'opération d'équilibrage de vilebrequins tout en réduisant les coûts d'investissement initial et de maintenance par rapport au procédé actuel.

L'objectif de ce chapitre est d'identifier les systèmes de numérisation aptes vis-à-vis de l'opération d'équilibrage. Pour ce faire, nous avons choisi d'évaluer trois systèmes de numérisation différents, s'appuyant sur 3 technologies de capteur différentes. L'évaluation est menée au travers du protocole QualiPSO, développé dans le cadre de la thèse de Nicolas Audfray [AUD 12b], et qui définit les procédures d'évaluation d'indicateurs de qualité intrinsèques tels le bruit et la justesse. Cette première évaluation qui conduit à une pré-sélection des systèmes admissibles et complétée par l'ajout d'indicateurs spécifiques liés à la complexité géométrique de la pièce. En effet, la géométrie des vilebrequins, fortement complexe, peut entraîner des problèmes d'accessibilité de certaines parties de la pièce lors de la phase de numérisation. Il est donc important d'avoir une information associée à l'accessibilité qui pourra conditionner le nombre de positionnements capteur/pièce et donc

les temps de numérisation. De plus, le manque d'informations locales sur les données (trous de numérisation, faible densité, ...) peut induire des erreurs au niveau de la méthode de calcul Voxel2inertia.

Après avoir succinctement présenté les systèmes de numérisation (plus largement décrits en annexe) que nous avons choisis de tester, nous présentons les résultats associés à la pré-sélection des systèmes admissibles. Nous détaillons ensuite les indicateurs de complexité géométrique que nous avons mis en place afin de compléter l'étape de pré-sélection des systèmes de numérisation aptes à la mesure de géométrie pour l'équilibrage.

2. Caractéristiques des systèmes de numérisation 3D retenus

Dans le cadre de nos travaux, nous avons retenu des systèmes de numérisation sans contact dits actifs qui apportent des avantages à la problématique d'équilibrage de vilebrequins tels que : la flexibilité de mesure, la robustesse et la réduction des coûts.

A partir d'études qualitatives proposées dans la littérature [TON 01, SAV 07, WEC 09, LOR 09], nous avons choisi trois technologies différentes de capteurs : la triangulation à laser plan, la stéréovision active et la projection de franges. Ces trois technologies sont très largement utilisées pour des applications d'inspection de pièces, de mesure ou de rétro-conception [MAR 10]. Les trois capteurs fonctionnent sur le principe de la triangulation [MEH 06b].

2.1. Description des systèmes

Le premier capteur étudié, Kreon Zephyr KZ25, est un capteur à laser-plan (Figure 30a). Les capteurs à triangulation laser-plan sont utilisés pour de multiples applications : dans l'industrie pour le contrôle de pièces, l'archéologie pour la conservation ou l'analyse d'objets anciens, pour le design et l'anthropologie [LOR 09]. Ces capteurs laser sont utilisés sur des bras poly-articulés, sur des MMT et depuis peu sur des bras robotisés.



Figure 30 : (a) Kreon Zéphyr Z25, (b) Noomeo Optinum RE, et (c) Gom Atos.

Pour le système que nous utilisons, le capteur laser est monté sur la tête indexée PH10 Renishaw d'une MMT. Le balayage de la surface est réalisé par déplacement du capteur dans l'espace de la machine, selon les axes X, Y ou Z. La tête indexée permet l'orientation du capteur selon deux angles et permet une meilleure accessibilité vis-à-vis de l'objet à mesurer. Un plan laser est projeté sur la surface de la pièce à numériser et une caméra CCD observe la ligne d'intersection (appelée ligne de numérisation) entre le faisceau laser et la surface de l'objet. Les points 3D de la surface de la pièce sont exprimés directement dans le repère machine de la MMT grâce à la calibration du système (Figure 31).

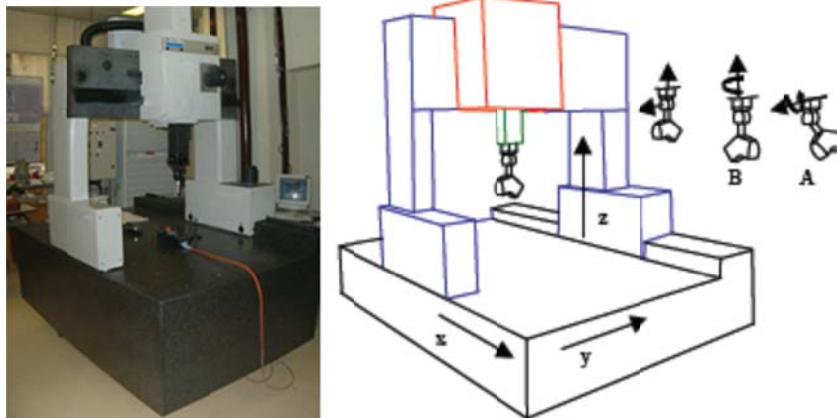


Figure 31 : Capteur Kreon monté sur MMT [MEH 06b].

Les systèmes de numérisation à base de laser plan peuvent mesurer plusieurs types de surfaces à conditions qu'elles ne soient pas trop brillantes, trop opaques ou transparentes. De manière générale, il y a une interaction entre la source de lumière et la matière qui compose la surface de

l'objet à numériser. Certains systèmes récents réalisent le réglage de la puissance du laser projeté en automatique, permettant ainsi d'être moins affectés par les variations de lumière réfléchie par la surface de l'objet. Selon les données issues du constructeur Kreon, la « précision » de mesure du capteur KZ25 est de l'ordre de 15 μm et la longueur de la ligne laser est de 25 mm [KREON]. Il faut noter que le constructeur n'informe pas à quoi correspond le terme précision ni comment ce paramètre est évalué.

Le deuxième capteur, Noomeo OptiNum RE, est un capteur à stéréovision active, (Figure 30b). Le balayage de la surface est réalisé ici en déplaçant manuellement le capteur sur la surface. Le repérage de la position relative capteur / pièce est réalisé par une analyse de la courbure de la surface acquise. Le motif lumineux projeté sous forme de mouchetis noirs sur fond blanc fait 297 mm de hauteur et 210 mm de largeur, soit l'aire d'une feuille A4. Le calcul des coordonnées 3D est réalisé par une triangulation entre les deux caméras CCD et les mouchetis (pixel par pixel), ceci une fois la calibration effectuée.

Comme pour tout système de stéréovision, il est nécessaire d'avoir une zone commune visualisée par les deux caméras permettant ainsi la détermination des points 3D. Ce type de capteur est sensible aux variations de lumière ambiante et sa capacité de numérisation de surfaces absorbantes de lumière est réduite car le contraste des mouchetis est pénalisé. Selon les données du constructeur [NOOMEO], la justesse de mesure pour ce capteur est de l'ordre de $\pm 100 \mu\text{m}$ pour un volume de mesure allant de 10 cm^3 à 1 m^3 .

Le dernier capteur, Gom Atos III, est un capteur à lumière structurée (Figure 30c). Il projette des franges créées par une source de lumière bleue afin de diminuer les interférences de la lumière d'ambiance. Le volume de mesure de ce capteur correspond à une pyramide tronquée de dimensions ajustables (de 130 mm de largeur, 130 mm de profondeur et 170 mm de hauteur à 1130 mm de largeur, 1130 mm de profondeur et 1500 de hauteur) au détriment de la résolution de mesure. Selon la configuration, la « précision » de mesure peut varier entre 40 μm et 100 μm d'après les données

constructeur. Encore une fois, les constructeur ne précise pas à quoi correspond la « précision » ni comment elle est évaluée [GOM]. Des franges d'épaisseurs différentes sont projetées sur la pièce afin de délimiter une zone à numériser. Cela permet de faire la correspondance des images entre les caméras et de calculer ensuite les points 3D par triangulation.

Pour ce système il est nécessaire d'utiliser des références (cibles) qui peuvent être placées sur et/ou autour de l'objet, afin de créer un repère global. Toutes les numérisations sont automatiquement assemblées, en utilisant ces références. Le processus d'acquisition et le recalage des nuages de points sont achevés en quelques secondes sur le logiciel de traitement du système de numérisation.

2.2. Configuration des systèmes de numérisation

Quelle que soit la technologie utilisée dans notre étude, le capteur peut être paramétré par (Figure 32) :

- d distance de numérisation : distance entre la source lumineuse du capteur et le point numérisé.
- γ angle de numérisation principal : angle entre la normale à la surface au point considéré et le plan laser.
- β angle de numérisation secondaire : angle entre rayon du plan laser passant par le point considéré et la normale à la surface projetée dans le plan laser.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons les résultats associés à l'évaluation des systèmes présentés ci-dessus. Cette évaluation est effectuée en deux temps : évaluation des indicateurs intrinsèques de bruit et de justesse selon la procédure Qualipso [AUD 12b], et évaluation d'indicateurs spécifiques que nous avons introduits, liés à la complexité géométrique de la surface à numériser.

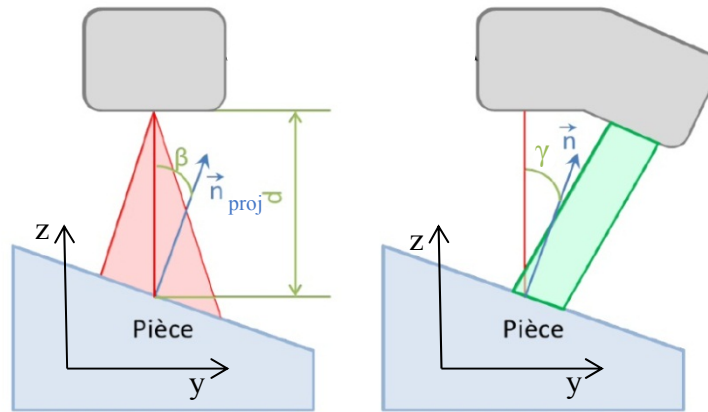


Figure 32 : Paramétrisation des capteurs à triangulation [AUD 12b].

3. Evaluation des systèmes de numérisation

Les constructeurs expriment en général la qualité de numérisation de leurs systèmes en termes d'erreur globale ou de « précision » mais ne détaillent pas les méthodes utilisées. De plus, il n'existe pas à ce jour de méthodologie normalisée pour l'évaluation de la qualité des systèmes de numérisation sans contact [AUD 12b]. Ainsi, reprenant les travaux sur les indicateurs de qualité (bruit, exactitude, densité et complétude) introduits par Contri [CON 02] puis repris par Mehdi-Souzani [MEH 06b], Nicolas Audfray a mis en place au laboratoire un protocole générique de qualification des systèmes de numérisations, QUALIPSO [AUD 12b]. Nous proposons d'évaluer les systèmes de numérisation retenus au travers des indicateurs de bruit et de justesse dans un premier temps. Rappelons que l'évaluation doit être faite en relation avec l'étude de sensibilité aux défauts de numérisation de l'algorithme de calcul des balourds voxel2interia, et doit nous conduire à identifier les systèmes admissibles vis-à-vis de l'opération d'équilibrage.

3.1. Indicateurs de qualité selon le protocole QUALIPSO

Toutes les expérimentations sont effectuées dans le laboratoire de métrologie (température et hygrométrie contrôlée) du LURPA afin de s'affranchir des influences de l'environnement. Les

artefacts sont positionnés sur le marbre métrologique de la MMT (Figure 31). Pour chaque indicateur, le protocole proposé définit les conditions de mesure.

3.1.1. Bruit

L'indicateur bruit permet d'évaluer la dispersion des points mesurés par un rapport à un nuage de points théoriques [AUD 12b]. Il est en général évalué par la mesure d'une surface de référence qui peut être représentée par un modèle théorique. Considérant un point M_i obtenu après numérisation, et P_i le point théorique correspondant, nous définissons l'erreur de position e_i par $M_i = P_i + e_i$. Sur l'ensemble d'un nuage de points, il est possible de calculer l'écart-type σ de la répartition des e_i et le bruit est calculé en utilisant l'Equation 21 d'après [CON 02] :

$$\delta = k \cdot \sigma = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2} \quad (21)$$

Où k représente le facteur d'élargissement (k est généralement fixé à 1 en numérisation 3D sans contact), σ est l'écart-type, et \bar{e} est la moyenne des écarts, soit $\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i$.

Pour l'expérimentation proposée, le bruit est évalué en mesurant une partie d'une règle en marbre qui présente un défaut de forme inférieur à $2 \mu\text{m}$ (Figure 33). Quel que soit le système utilisé, le plan est positionné sur le marbre aligné selon la direction Y (Figure 31) afin de mieux utiliser l'espace de la MMT.

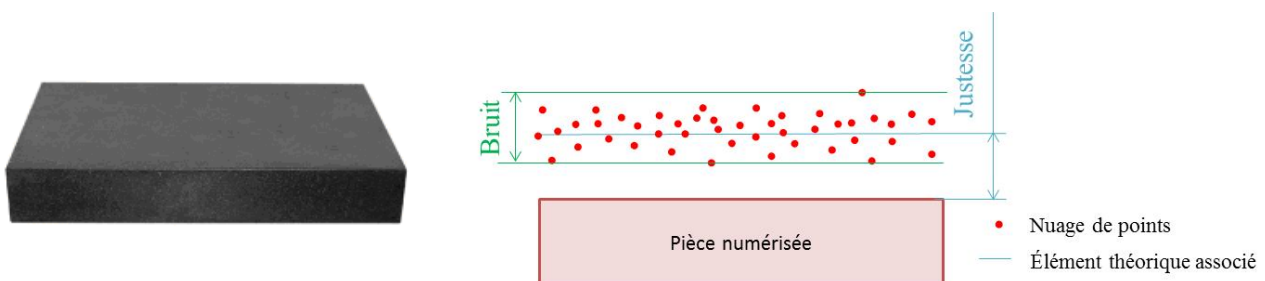


Figure 33 : Plan en marbre et représentation graphique du bruit [AUD 12b].

Par ailleurs, tous les capteurs sont positionnés verticalement au-dessus de l'artefact, définissant ainsi l'angle de numérisation $\gamma = 0$. La distance de numérisation est la distance optimale recommandée par le fabricant :

- 145 mm pour le système de Kreon ;
- 490 mm pour le système de Gom ;
- 400 mm pour le système de Noomeo.

Bien que la valeur du bruit varie en fonction de la distance de numérisation et de l'angle de numérisation, nous nous sommes placés dans des conditions favorables pour évaluer le capteur, afin de réaliser la sélection des capteurs admissibles vis-à-vis de l'opération d'équilibrage. Ces conditions de numérisation pourraient contraindre la stratégie de numérisation à mettre en place.

Pour les systèmes Gom et Noomeo, l'artefact est numérisé entièrement en une seule prise de vue. Le capteur Kreon est déplacé suivant la direction Y de la MMT pour que la trace laser balaye l'ensemble de la pièce. Les nuages de points numérisés sont présentés sur la Figure 34.

Le marbre est un matériau difficile à numériser. Cela entraîne des nombreux trous de numérisation, en particulier lors de l'utilisation du système Noomeo en raison de problèmes de réflexion. En revanche, sur les zones bien numérisées, la densité de points est plus importante avec le système Noomeo par rapport aux autres systèmes (presque deux fois plus importante par rapport au système Kreon et quatre fois plus importante par rapport au système Gom). Le niveau de bruit le meilleur est celui obtenu avec le système Gom (Tableau 5).

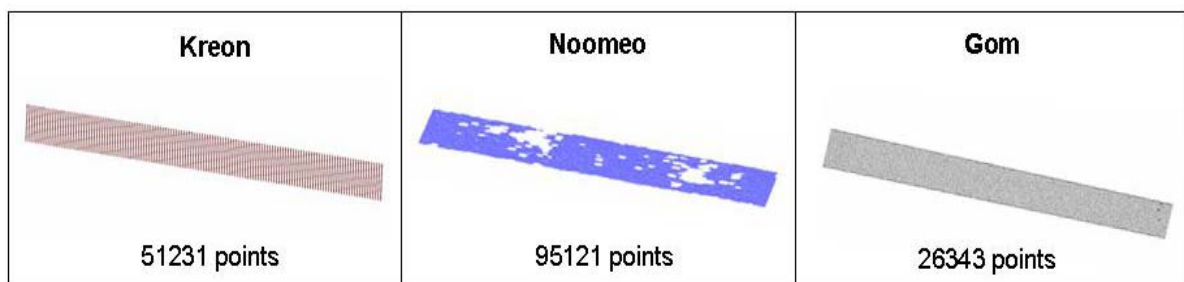


Figure 34 : Nuages de points du plan en marbre pour les trois systèmes.

Nous avons étudié au chapitre 2, la sensibilité de l’algorithme Voxel2inertia aux défauts de numérisation. Cette étude nous a permis de déterminer la qualité de numérisation nécessaire permettant le calcul des éléments d’inertie avec une erreur seuil de $\pm 5\%$. Le bruit admissible δ_{adm} déterminé au chapitre précédant est $\delta_{adm} = 500 \mu m$, où $\delta = 6\sigma$, ce qui conduit à un bruit admissible de $83 \mu m$ comme calculé à l’équation 21. Nous concluons que les trois systèmes évalués sont admissibles vis-à-vis de leur niveau de bruit.

| Systemes | Bruit δ (μm) |
|-----------------|---|
| Kreon | 15,17 |
| Noomeo | 60,41 |
| Gom | 2,39 |

Tableau 5 : Niveaux de bruit selon le système de numérisation

3.1.2. Justesse de mesure

La justesse d’une mesure est définie comme « *l’étroitesse de l’accord entre la moyenne d’un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence* » [VIM]. Elle est en général évaluée par la mesure d’une distance connue entre deux éléments, l’erreur de justesse correspondant alors à la différence entre la valeur mesurée et la valeur considérée comme vraie [BOU 05, MEH 08, AUD 12a, AUD 12b]. Cette valeur considérée comme vraie peut être obtenue par la certification de l’artefact à numériser ou à l’aide d’un système de mesure considéré comme plus juste.

Pour évaluer la justesse, nous devons disposer d’un artefact de référence comportant une distance ou grandeur identifiable. Reprenant les travaux d’Audfray [AUD 12b], nous choisissons de définir la distance de référence par une hauteur de marche calibrée (Figure 35), la distance de référence étant donnée par la distance entre deux plans.



Figure 35 : Hauteur de marche calibrée (en rouge) et représentation graphique.

Lors de la numérisation les deux plans de la marche sont numérisés en même temps et sans variation de la distance de numérisation : la position du capteur est ajustée par rapport au plan supérieur de la marche.

L'étape de numérisation conduit à un nuage de points comprenant les deux plans de la marche qui est divisé en deux sous nuages. Un plan théorique est associé à chaque sous-nuage selon le critère des moindres carrés. Chaque plan (P1 pour le plan supérieur et P2 pour le plan inférieur) peut être caractérisé par son barycentre (A et H respectivement), et sa normale (respectivement \vec{n}_1 et \vec{n}_2) (Figure 36). La hauteur est calculée en utilisant l'équation 22, et la justesse est donnée par l'équation 23.

$$h = \frac{1}{2} (\vec{AH} \cdot \vec{n}_1 + \vec{HA} \cdot \vec{n}_2) \quad (22)$$

$$J = h - h_r \quad (23)$$

Où h_r est la hauteur de référence.

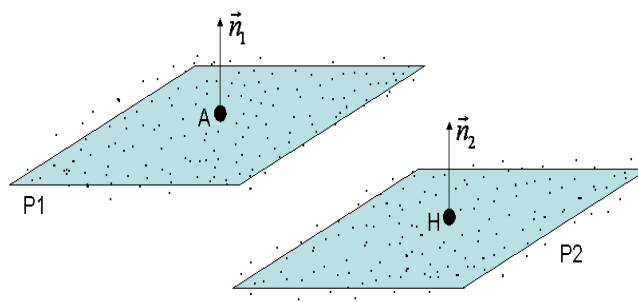


Figure 36 : Calcul de l'hauteur de marche.

La procédure est mise en œuvre considérant une marche calibrée de 1 mm de hauteur en acier. Comme précédemment, la distance de numérisation est choisie en considérant la valeur préconisée par le fabricant. De même, l'angle de numérisation est choisi égal à 0. L'échantillon est dégauchi selon l'axe Y. Dans le cas du Kreon, un balayage selon l'axe Y est nécessaire, alors que pour les systèmes GOM et Noomeo, une seule prise de vue est suffisante. Les nuages de points obtenus avec chaque système sont présentés sur la Figure 37.

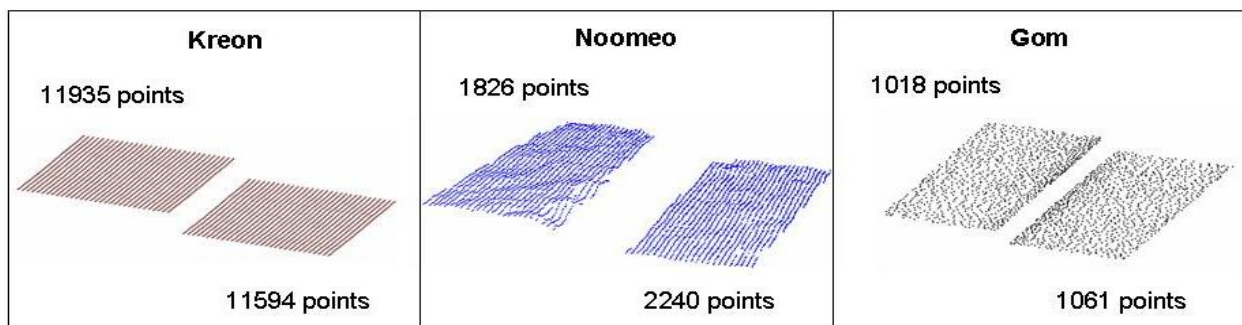


Figure 37 : Nuages de points de la marche pour les trois systèmes.

Les équations 21 et 22 sont utilisées pour le calcul de chaque valeur de justesse. Le Tableau 6 présente la moyenne de 5 mesures effectuées pour chaque capteur. Les résultats font ressortir que la justesse est assez similaire entre les systèmes Kreon et Gom, autour de 3,40 μm . La valeur obtenue du système Noomeo est cinq fois plus grande par rapport aux deux autres mesures. Cette grande différence pourrait s'expliquer par le fait que le capteur Noomeo est tenu manuellement durant l'acquisition, ce qui le rend moins stable lors des numérisations.

| Système | Justesse J (μm) | Justesse relative (%) |
|----------------|--|------------------------------|
| Kreon | 3,40 | 0,34 |
| Noomeo | 17,42 | 1,74 |
| Gom | 3,39 | 0,34 |

Tableau 6 : Evaluation de la justesse.

En analysant les justesses obtenues par numérisation relativement à la justesse relative admissible obtenue au chapitre 2, soit $\pm 1\%$, nous concluons que les systèmes Kreon et Gom sont acceptables par rapport aux besoins en équilibrage de vilebrequins par mesure sans contact.

3.2. Indicateurs spécifiques à la complexité géométrique

Les indicateurs précédents sont intrinsèques au système de numérisation utilisé et donnent une information sur la qualité. Cependant, ces indicateurs ne rendent pas compte de la complexité de numérisation, en termes d'accessibilité par exemple ou de temps de numérisation. Cette complexité de numérisation est souvent liée à la complexité de la géométrie à mesurer et influe directement sur les temps de cycle.

Dans ses travaux, Lorient reprend la notion de complétude introduite par Contri [CON 02] et propose un indicateur associé à l'accessibilité de la surface, ou au pourcentage de la surface qui a été numérisé par rapport à la surface totale (dans un temps donné, ou un nombre donné de points de vue). Lorient propose une méthode pour calculer les orientations minimales nécessaires pour numériser l'ensemble de la pièce en analysant le maillage décimé théorique de l'objet [LOR 09]. En ce sens, l'accessibilité de surface semble pertinente lorsque les surfaces présentent une certaine complexité, ce qui est le cas avec les vilebrequins. Nous proposons ainsi de considérer des indicateurs en relation avec la complexité géométrique de la surface : l'indicateur angle d'étendue mesurée associé à la densité surfacique et l'indicateur fraction d'aire mesurée qui reprend l'accessibilité de surface introduite par Lorient.

3.2.1. Angle d'étendue mesurée et densité surfacique

La mesure d'un cylindre dont les dimensions sont connues peut nous apporter deux informations : l'angle d'étendue et la densité surfacique. Le diamètre D du cylindre vaut 33,2 mm et la hauteur totale vaut 64 mm dont 24,3 mm de hauteur utile présentée en rouge sur la Figure 38.

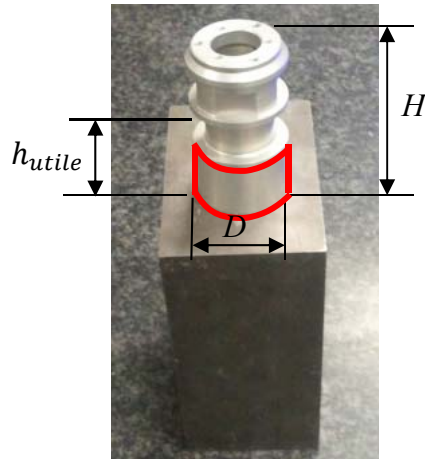


Figure 38 : Cylindre et la zone utile pour la numérisation en rouge.

En effet, la hauteur utile comprend la surface du cylindre dont le diamètre est invariable et exempte de trous. L'angle d'étendue évalue la capacité du système de numérisation à mesurer une surface courbée en une seule vue. Ce paramètre peut donner une indication de la couverture de numérisation, utile pour estimer le nombre de positions relatives du capteur / objet nécessaire pour avoir l'acquisition complète de l'objet.

A partir du nuage de points obtenu, un cylindre idéal est associé aux points selon le critère des moindres carrés. Le nuage de points n'a pas le même angle d'étendue suivant la longueur L à cause de la lumière projetée qui n'est pas parfaitement perpendiculaire à l'axe du cylindre pour tous les systèmes de numérisation (capteur 2 sur la Figure 39).

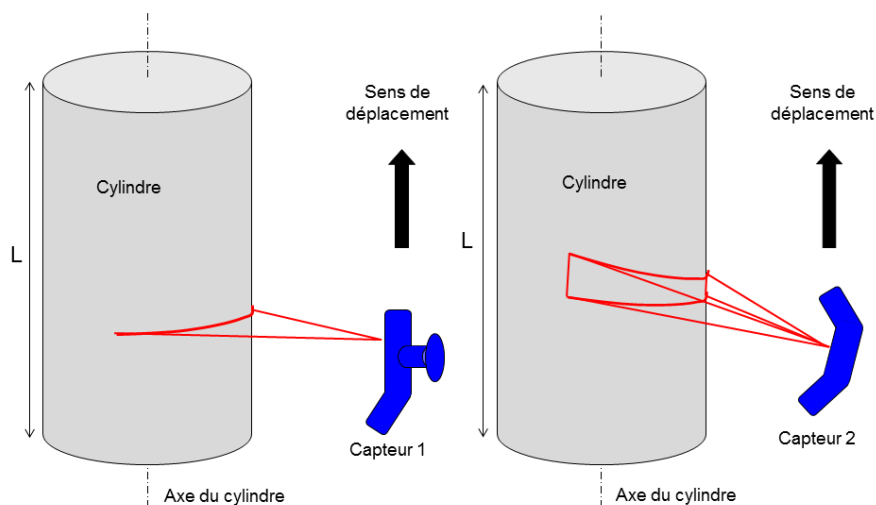


Figure 39 : Direction de vue du capteur vis-à-vis du cylindre.

Afin de palier à ce problème, le nuage de points est divisé en plusieurs sections selon l'axe du cylindre. L'estimation de l'angle est donnée par le calcul de l'angle lié à la section numérisée du cylindre (Figure 40). L'angle d'étendue φ_i est ainsi calculé pour chaque section et l'angle d'étendue pour un capteur est défini par la moyenne des angles d'étendue de chaque section (Equation 24).

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{n} \quad (24)$$

Où n est le nombre total de tranches. Une valeur élevée de l'angle d'étendue signifie que le système de numérisation peut acquérir une quantité élevée d'informations avec une position relative donnée entre le capteur et l'objet.

Le paramètre densité surfacique est déterminé ici par le calcul du nombre de points par millimètre carré de la surface numérisée. Le calcul est réalisé en comptabilisant le nombre de points dans chaque secteur angulaires $Rd\theta dz$ en fonction de la position angulaire θ et la position verticale z (Figure 40).

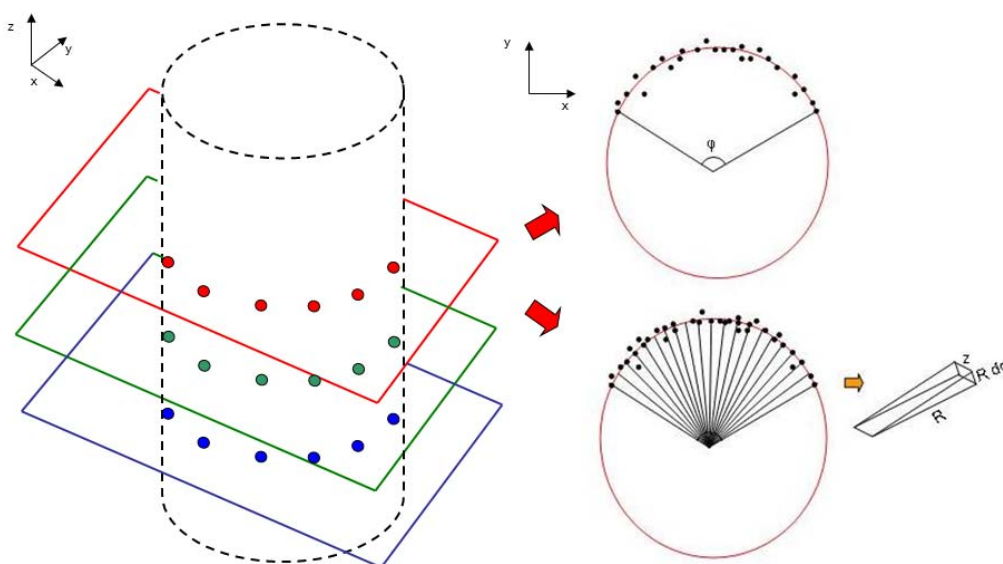


Figure 40 : Découpage du nuage de points en tranches et calcul de l'angle d'étendue et de la densité surfacique.

Concernant la procédure de numérisation, l'axe du cylindre est aligné avec l'axe Z de la MMT (Figure 31). Les capteurs sont orientés dans une position perpendiculaire à l'axe du cylindre, selon l'axe Y de la MMT (pour le Kreon, l'orientation est $A = 90^\circ$ (Annexe A.1). En raison du positionnement relatif capteur / pièce, l'angle de numérisation n'est pas constant pour tous les points acquis. La distance est choisie comme précédemment selon les recommandations du constructeur (Figure 39).

Le cylindre doit être numérisé avec une seule orientation du capteur. Les dimensions du cylindre sont telles que seule une prise est nécessaire pour les systèmes Gom et Noomeo. Le système Kreon est déplacé selon une translation suivant l'axe X de la MMT. Au moins deux déplacements sont nécessaires avec un changement de la position en Z du capteur afin d'acquérir l'ensemble de la surface du cylindre. Les trois nuages de points acquis sont proposés sur la Figure 41.

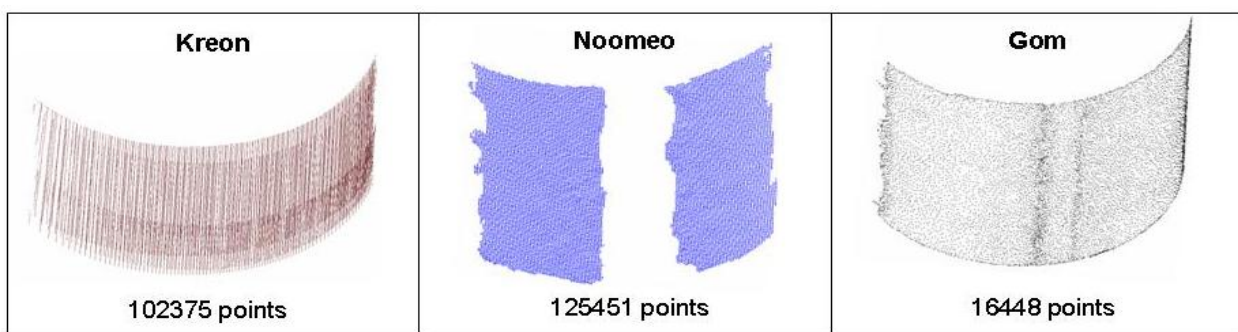


Figure 41 : Nuages de points du cylindre pour les trois systèmes.

Les résultats de l'angle d'étendue mesurée sont fournis dans le Tableau 7.

| Système | Angle d'étendue mesurée (°) |
|----------------|------------------------------------|
| Kreon | 130,52 |
| Noomeo | 106,97 |
| Gom | 137,32 |

Tableau 7 : Angle d'étendue mesurée pour les trois systèmes.

Le système Gom a le plus grand angle d'étendue mesurée suivie par Kreon et Noomeo. Cependant, la différence est moins significative pour cet indicateur, probablement en raison de la

faible valeur du rayon du cylindre. Nous pouvons noter que le nuage de points obtenu par le système Noomeo présente un manque d'informations visibles dans la zone centrale. Nous pouvons supposer que la lumière réfléchie peut provoquer un effet aveuglant sur la caméra CCD, ce qui rend impossible l'acquisition sur la zone centrale.

La densité surfacique est présentée sur le Tableau 8. La densité surfacique pour le système Kreon est largement supérieure à celle des autres systèmes. En effet, ce système ne réalise pas de filtrage en interne avant de délivrer le nuage de points acquis. Le système Gom réalise un filtrage des données plus important par rapport au système Noomeo. De ce fait, la densité surfacique pour le système Gom est la plus petite parmi les trois systèmes évalués. En conclusion, bien que le système Gom fournisse le nuage de points le moins dense, son nuage de points représente une plus grande surface mesurée du cylindre. En outre, tous les systèmes évalués sont admissibles vis-à-vis de la construction d'un maillage respectant les spécifications définies au chapitre 2.

| Système | Densité surfacique (points / mm²) |
|----------------|---|
| Kreon | 2497 |
| Noomeo | 287 |
| Gom | 186 |

Tableau 8 : Densité surfacique pour les trois systèmes.

3.2.2. Fraction d'aire mesurée

Les vilebrequins (Figure 42) sont des pièces dont la courbure varie de façon significative. Certaines zones sont très difficiles d'accès, en particulier celles entre les contrepoids. En effet, sur ces zones d'accès difficile les trous de numérisation sont récurrents (paragraphe 5 du chapitre 2). L'indicateur de fraction d'aire mesurée permet de tester les systèmes de numérisation par rapport à leur capacité à acquérir des points dans ces zones critiques (Equation 25).

$$SM = \left(\frac{\sum A_{numérisée}}{\sum A_{théorique}} \right) \cdot 100\% \quad (25)$$

L'aire mesurée est calculée par un rapport entre l'aire du maillage $A_{numérisée}$ construit à partir de données numérisées et l'aire de la surface théorique $A_{théorique}$. Il faut noter que même dans le cas où le vilebrequin est complètement mesuré, la surface mesurée $A_{numérisée}$ ne peut jamais être égale à la surface théorique $A_{théorique}$ car la première est calculée sur des éléments du maillage (triangles) et la deuxième, sur la surface continue de la maquette numérique.



Figure 42 : Le vilebrequin brut.

Les mesures sont effectuées selon trois orientations différentes entre le capteur et le vilebrequin. L'objectif est ici de comparer la capacité de chaque capteur à mesurer des formes complexes pour des orientations données. Cela permet d'obtenir des informations permettant une estimation du temps de numérisation.

Le vilebrequin est situé sur deux supports en V à chacune de ses extrémités (Figure 42). L'axe du vilebrequin est orienté en parallèle à l'axe Y de la MMT. Les configurations capteur sont définies entre le plan de numérisation et la normale à la surface de support cylindrique du vilebrequin. Pour cette expérience, 3 angles sont utilisés: 0° , $+22.5^\circ$, -22.5° (Figure 43). Ces angles ont été choisis de façon à ce que tous les capteurs analysés puissent être placés dans les mêmes configurations.

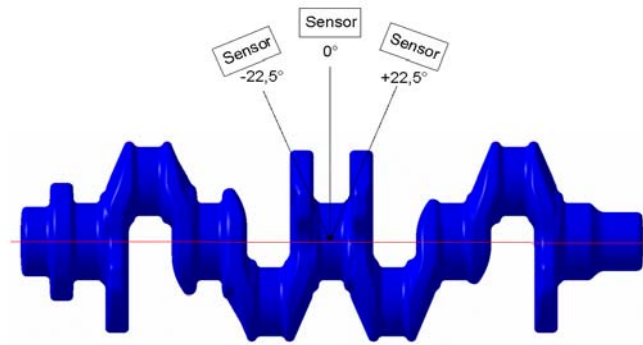


Figure 43 : Points de vue utilisés pour la mesure des contrepoids centraux du vilebrequin.

La distance choisie correspond à la distance optimale de numérisation recommandée par le constructeur. Il faut noter qu'en raison de la forme complexe du vilebrequin, la distance n'est pas la même pour tous les points acquis.

Les mesures avec les systèmes Gom et Noomeo sont réalisées en statique. Pour le système Kreon, un déplacement suivant la direction Y de la MMT est nécessaire pour chaque angle de numérisation. Les nuages de points numérisés sont présentés sur la Figure 44.

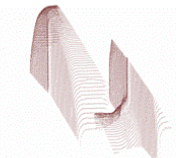
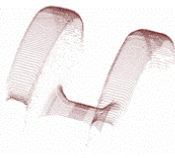
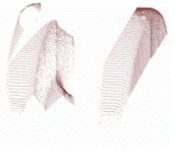






| | -22,5° | 0° | +22,5° |
|--------|--|--|--|
| Kreon |  113741 points |  86908 points |  61701 points |
| Noomeo |  292155 points |  336479 points |  125451 points |
| Gom |  476901 points |  382733 points |  447667 points |

Figure 44 : Nuages de points de la zone centrale du contrepoids pour les trois systèmes.

Une génération de maillage est nécessaire sur chaque nuage de points pour calculer l'aire numérisée. Pour chaque orientation, la zone mesurée est calculée, puis la surface totale est obtenue

par la somme des aires individuelles selon les trois angles d'orientation du capteur. L'aire totale théorique du contrepois centrale est égale à 510 cm². Les résultats sont présentés dans le Tableau 9. La fraction d'aire numérisée totale est calculée par la somme des aires numérisées selon chacune des directions de vue soustraite des zones de recouvrement.

Pour l'angle 0° de numérisation, le système Kreon mesure une surface plus grande. Les systèmes Noomeo et Gom sont plus efficaces pour la numérisation selon des angles inclinés (Tableau 9). En ce qui concerne le paramètre de l'aire totale numérisée, le système Gom présente la meilleure performance, avec 82,35% d'aire numérisée, suivie par les systèmes Noomeo (60,78%) et Kreon (50,98%).

| <i>Système</i> | Aire numérisée (cm²) | | | | <i>κ</i> Total (%) |
|----------------|--|-------------------------|-----------------------------|---|------------------------------|
| | <i>-22,5 °</i> A1 | <i>0 °</i> A2 | <i>+22,5 °</i> A3 | Surface totale A1 + A2 + A3 - Recouvrement | |
| Kreon | 85,00 | 112,00 | 90,00 | 260,00 cm ² | 50,98 |
| Noomeo | 130,00 | 50,00 | 140,00 | 310,00 cm ² | 60,78 |
| Gom | 180,00 | 80,00 | 180,00 | 420,00 cm ² | 82,35 |

Tableau 9 : Surface mesurée selon le système de numérisation.

Il faut noter qu'en raison de leurs technologies, les systèmes Gom et Noomeo numérisent les pièces en une prise de vue fixe alors que le système Kreon demande une translation car sa fenêtre de mesure est un plan. Ceci affecte le temps de numérisation du capteur Kreon. Dans le prochain paragraphe nous présentons une synthèse de notre protocole d'évaluation de systèmes de numérisation.

3.3. Synthèse sur l'évaluation des systèmes de numérisation

Nous proposons d'évaluer les systèmes de numérisation avec des indicateurs classiques tels que le bruit et la justesse de mesure et des indicateurs liés à la complexité géométrique des vilebrequins. Les nouveaux indicateurs proposés permettent de mieux choisir les systèmes de

numérisation par rapport aux besoins liés à l'équilibrage de vilebrequins. Une synthèse des résultats d'évaluation des systèmes de numérisation est présentée dans le Tableau 10. Les résultats sont comparés aux valeurs admissibles définis au chapitre 2.

En ce qui concerne la qualité de numérisation par rapport au niveau du bruit, tous les systèmes sont adaptés. Le besoin en termes de la densité surfacique est largement surpassé par tous les systèmes de numérisation. Seule la justesse de mesure relative discrimine le système Noomeo comme non acceptable. En effet, la justesse de mesure relative de ce système est près de 75% supérieure à la valeur seuil admissible. Par conséquent, seuls les systèmes Kreon et Gom sont retenus pour l'application d'équilibrage de vilebrequins par numérisation 3D.

| Critères de choix | Valeurs admissibles | Kreon | Noomeo | Gom |
|---|----------------------------|--------------|---------------|------------|
| Justesse de mesure relative (%) | < 1,000 | 0,340 | 1,740 | 0,339 |
| Bruit (μm) | < 83,00 | 15,17 | 60,41 | 2,39 |
| Densité surfacique (point / mm^2) | - | 2497 | 287 | 186 |
| Fraction d'aire numérisée (%) | - | 50,98 | 60,78 | 82,25 |

Tableau 10 : Synthèse pour le choix des systèmes de numérisation.

4. Conclusions

Un protocole de comparaison de systèmes de numérisation a été mis en place afin d'évaluer la performance des systèmes dans le contexte de l'équilibrage du vilebrequin. Ce protocole permet d'identifier les systèmes qui correspondent le mieux aux exigences de qualité exprimées en termes de bruit, de justesse, d'angle de l'étendue mesurée, de densité surfacique et de fraction d'aire numérisée.

A partir des paramètres admissibles définis par simulation et de l'évaluation des systèmes de numérisation, il est possible d'identifier les systèmes les mieux adaptés à la numérisation de vilebrequins dans le contexte de l'équilibrage. Les valeurs seuils les plus importantes à respecter sont : un bruit inférieur à $83\mu\text{m}$ et une justesse de mesure inférieure à $\pm 1\%$, ce qui correspond à \pm

3% par rapport au volume de la pièce. Les essais d'évaluation sur les trois systèmes de numérisation conduisent aux conclusions suivantes :

- Tous les systèmes analysés sont admissibles par rapport au seuil du bruit de numérisation.
- Seuls les systèmes Kreon et Gom sont admissibles par rapport à la valeur seuil de justesse de mesure relative.
- La densité minimale du nuage de points ne discrimine pas les systèmes.

Le système Gom présente la plus haute performance par rapport à la fraction d'aire numérisée. Le système de Noomeo présente le plus faible rendement parmi les systèmes analysés. Il se peut que les conditions de numérisation ne soient pas adaptées, en particulier par rapport au support manuel de ce système. Les systèmes Gom et Kreon sont admissibles vis-à-vis des indicateurs de qualité même s'ils possèdent de caractéristiques différentes. De ce fait, il nous semble pertinent d'étudier la stratégie de numérisation pour chacun des systèmes afin d'apporter des informations supplémentaires pour le choix ou la conception du système le plus adapté.

Chapitre 4

Elaboration d'une stratégie de numérisation

1. Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons mis en place une méthode de calcul des balourds à partir de la description sous forme de maillage de la pièce à équilibrer. Les conditions requises sur la qualité des points mesurés (bruit, justesse, etc.) ont été définies et ont permis de qualifier différents systèmes de numérisation commerciaux permettant de numériser les pièces en relation avec l'application d'équilibrage. La méthode d'équilibrage sur données discrètes que nous avons mise au point nécessite d'avoir une représentation de la pièce sous la forme d'un maillage fermé. Pour obtenir cette représentation, il est nécessaire de définir une stratégie de numérisation pour chaque système admissible, c'est-à-dire une trajectoire de numérisation et des conditions de numérisation, conduisant à la mesure des formes la plus complète possible. Une trajectoire de numérisation peut être définie comme un ensemble de points de vue ordonné assurant la numérisation de la pièce sans collision. Chaque point de vue ou positionnement capteur ou encore configuration (position et orientation) capteur/pièce permet la numérisation d'une portion de surface.

Compte tenu des contraintes de temps de cycle associé à l'opération d'équilibrage, la principale difficulté de la planification des trajectoires de numérisation est d'acquérir suffisamment d'informations dans un temps de cycle très court, sans affecter la qualité et la représentativité des données acquises. Ceci peut se traduire par la minimisation du nombre de points de vue tout en respectant des contraintes de qualité et de gestion des collisions. Dans la littérature, cette problématique a été largement traitée, considérant le plus souvent le point de vue de la pièce. La plupart des méthodes s'appuient sur la notion de visibilité pièce : nous cherchons à déterminer si un point de la pièce est visible depuis un point de l'espace ou si un point de l'espace peut voir un point de la pièce. Le point de vue capteur est également adopté, considérant souvent un capteur donné. Dans la problématique posée, nous devons définir la trajectoire de numérisation associée à chacun des capteurs admissibles définis au chapitre 3 afin de déterminer ceux aptes à numériser le

vilebrequin selon le temps de cycle imposé, et en respectant les critères de qualité et de complétude donnés.

Ainsi, nous proposons une approche originale et générique basée sur le point de vue capteur, conduisant à déterminer un nombre minimal de points de vue définis en relation avec la taille de la fenêtre de mesure du capteur. Il s'agit alors d'analyser pour chaque configuration capteur, la portion de surface visible par le capteur. La notion de points de vue est abordée et définie au paragraphe 2. Après avoir exposé une brève revue des méthodes proposées dans la littérature au paragraphe 3, la méthode basée sur la taille de fenêtre du capteur que nous proposons est détaillée au paragraphe 4.

2. Notion de point de vue capteur

Dans la littérature, on rencontre souvent la notion de points de vue, ou point de passage ou même point de contrôle. Les points de vue sont généralement des entités définies par un point et une orientation et ils représentent un positionnement (ou configuration) capteur vis-à-vis de la pièce [MAR 05]. Un point de vue $p(M, \vec{d})$ est défini par un point M , et une direction \vec{d} , et rend compte du positionnement (distance et orientation) relatif du capteur par rapport à la surface de la pièce (Figure 45).

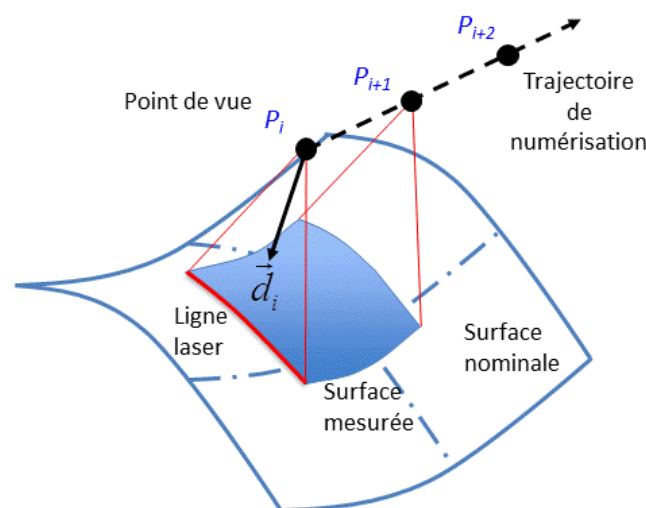


Figure 45 : Trajectoire de numérisation avec un capteur à laser plan.

L'ensemble des points de vue, une fois ordonné, définit la trajectoire de numérisation. Dans le cas des capteurs à balayage, c'est le déplacement entre deux points de vue successifs qui conduit à la numérisation de la portion de surface comprise entre les deux points de vue.

La planification de trajectoire consiste à définir les points de vue qui permettent la numérisation de la surface selon des critères donnés. La détermination des points de vue s'appuie généralement sur la notion de visibilité. Il s'agit de déterminer les portions de surface vues par un point de vue capteur ou plus généralement quel est le point de vue qui permet de numériser un point ou une portion de la surface (visibilité pièce). Les difficultés sont en général liées à la géométrie des pièces. Nous pouvons lister trois problèmes majeurs : qualité insuffisante, occultations de la source lumière ou de la caméra et collisions.

La qualité de numérisation dépend du système de numérisation mais également de la stratégie de numérisation. Afin de garantir la qualité de numérisation, certains positionnements capteur doivent être privilégiés. En effet des travaux précédents [PRI 99, MEH 06, AUD 12] ont montré que pour garantir une bonne qualité de numérisation le plan laser doit être perpendiculaire à la surface de la pièce. Or, dans certains cas, cette configuration n'est pas possible et il est alors nécessaire de quantifier l'impact de la configuration capteur / pièce afin de garantir la qualité des données numérisées.

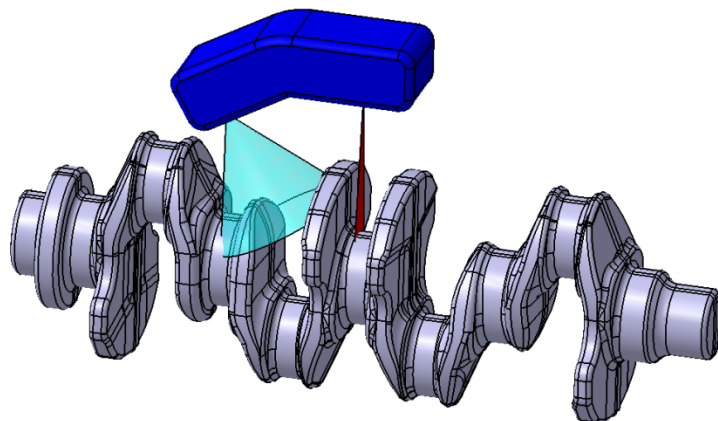


Figure 46 : Occultation de la caméra pour un capteur à laser plan.

Pour certains positionnements capteur / pièce, des parties de la pièce peuvent obstruer d'autres zones. De ce fait, il se peut que la source de lumière ou la caméra ne puisse pas atteindre la surface à numériser. Sur la Figure 46 le laser projeté par le capteur (en bleu) atteint la surface de la pièce mais la caméra CCD ne voit pas l'intersection du laser avec la surface. Le champ de vision de la caméra, modélisé par un cône, est bloqué par un contrepoids du vilebrequin, ce qui empêche la numérisation.

Un autre problème récurrent lors de la numérisation, en particulier pour des capteurs à petite distance de mesure, est la collision entre le corps du capteur et la pièce. En effet, le capteur doit suivre la géométrie de la pièce afin que la surface à numériser appartienne à la fenêtre de mesure. Sur la Figure 47, la trajectoire de numérisation mène le capteur vers un des manetons (M2) du vilebrequin et l'arrière du capteur, où se trouve la caméra CCD, vient en collision avec le maneton M1 (Figure 1).

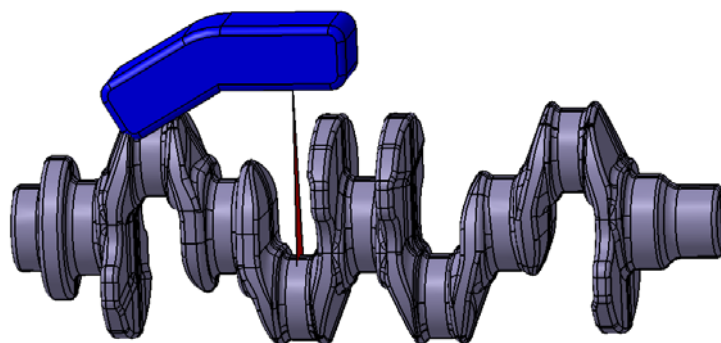


Figure 47 : Collision du capteur lors de la numérisation d'une surface profonde.

3. Méthodes de planification de trajectoires de numérisation

La littérature propose un certain nombre de méthodes de planification de trajectoires pour la numérisation de formes connues définies par un modèle CAO. La plupart de ces méthodes sont basées sur une modélisation de la surface des pièces soit sous forme de maillage, soit sous forme de voxels. Certaines s'attachent à ne définir que les points de vue, d'autres proposent des approches pour la génération de trajectoires en même temps que la recherche des points de vue. L'objectif est

en général de trouver la trajectoire qui minimise le temps de numérisation soit bien souvent le nombre de positionnements capteur, assurant la numérisation complète de la surface sans collision. Certaines méthodes proposent de plus le respect d'un critère de qualité donnée.

3.1. Recherche des points de vue

Tarbox et Gottschlich [TAR 95] proposent un algorithme de détermination des points de vues basé sur une matrice de mesurabilité pour des capteurs à plan laser. La matrice de mesurabilité est donnée par l'intersection de deux matrices correspondant respectivement à la visibilité liée à la caméra et à celle liée à la source laser. Ces matrices $C(i, j)$ définissent si un élément i à mesurer et visible d'une position j . La pièce à mesurer est modélisée par un nuage de points. L'étude de cette matrice et en particulier la somme de ses colonnes permet de définir un ensemble de positions capteur. Les auteurs proposent trois algorithmes différents pour la détermination d'un ensemble de poses capteur permettant la numérisation complète de la pièce. Le premier est réalisé en prenant les positions de vue permettant de mesurer la surface la plus importante et en réduisant le nombre de poses. Le deuxième fonctionne sur le même principe mais avec l'utilisation d'un critère plus élaboré qui prend en compte l'angle d'incidence entre le rayon laser et la surface locale de l'objet. Cet algorithme est plus performant que le premier mais il nécessite un temps de calcul plus grand. Le troisième algorithme débute avec des positions relatives définies aléatoirement. Le problème de la planification de vues n'est plus un problème d'optimisation mais un problème de décision restreint, c'est-à-dire, pour un nombre n donné de positions, il s'agit de trouver la planification de vues qui permette la numérisation complète de la zone analysée. Si cette solution n'est pas possible, n est incrémenté et le processus est répété jusqu'à ce qu'une solution soit trouvée. La séquence de vues est définie localement afin de réduire les trous de numérisation entre une vue et l'autre.

Loriot [LOR 08] propose une méthode de planification de vues pour la numérisation d'objets connus basée sur la matrice de mesurabilité introduite par Tarbox et Gottschlich [TAR 95] et reprise

par Scott [SCO 05]. Le modèle utilisé est maillé et il est décimé avant que les points de vue potentiels ne soient déterminés. Le point de vue est positionné à une distance fixe du centre de la facette du modèle décimé, et orienté en direction de celle-ci. Le nombre de positions potentielles pour le scanner est égal au nombre de facettes du modèle décimé. La matrice de mesurabilité est ensuite générée et permet de définir la visibilité de chaque surface en fonction d'un ensemble de points de vue. Un algorithme de résolution de problème de recouvrement d'ensemble (*Set Covering Problem*) est appliqué. Ce dernier permet de sélectionner dans plusieurs ensembles, le nombre minimum d'éléments qui couvre le nombre maximum d'éléments. Pour la planification de vues, il faut donc sélectionner le nombre minimum de points de vue permettant d'observer le maximum de facettes. La planification de vues se fait hors-ligne, dans un environnement simulé, ce qui permet de ne pas interrompre la chaîne de contrôle.

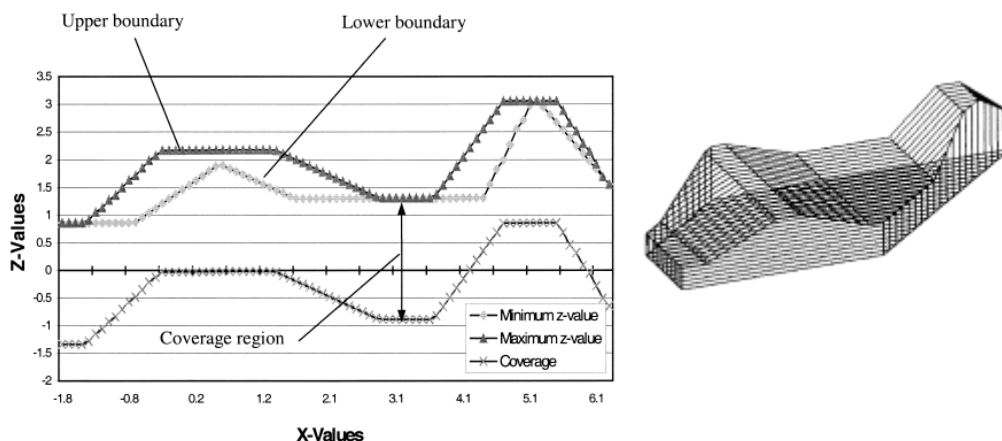


Figure 48 : Trajectoire (à gauche) associée à une section de la pièce (à droite) [XI 99].

Xi et Shu [XI 99] s'appuient sur le modèle CAO et s'attachent à chercher les paramètres optimaux de numérisation permettant de maximiser la surface numérisée. Ils introduisent le découpage du modèle CAO en sections, dont chacune peut être balayée par une trajectoire, afin de s'affranchir de la limitation de la largeur de ligne laser du capteur à laser-plan utilisé. Pour une section, le profil de la surface est obtenu par projection de la surface sur le plan de découpe. Pour trouver l'emplacement optimal du champ de vision par rapport au profil de la surface, la frontière

supérieure de la fenêtre de vue du capteur est alignée avec la limite supérieure du profil de surface. Si la limite inférieure du profil de la surface est incluse dans fenêtre de mesure (profondeur de mesure), la numérisation de toute la surface de la section est garantie. Les profils sont utilisés pour la génération de trajectoires sous forme de droites qui sont assemblées pour définir une trajectoire en zig-zag (Figure 48).

Son et al. [SON 02] proposent une méthode de détermination des points de vues pour un capteur laser-plan monté sur une MMT, basée la discrétisation du modèle CAO par des points et des normales. L'objectif est de balayer tous les points de l'échantillonnage en utilisant un nombre minimal de positionnements. Comme l'échantillonnage de points affecte la représentativité de la surface la distance entre deux points voisins de l'échantillonnage doit être inférieure à la largeur de la nappe laser. De plus, pour que deux points soient numérisés en même temps, l'angle entre les normales associées à ces deux points doit être inférieur à deux fois l'angle de vue du capteur. Les points ne satisfaisant pas cette contrainte sont considérés comme des points critiques. Les points ayant des normales similaires sont groupés et la quantité de groupes constitue une base pour la détermination du nombre de posages. La moyenne globale de tous les vecteurs normaux aux points de l'échantillonnage dans le groupe est définie en tant que direction de vue initiale. Pour la planification de trajectoires, les groupes de points sont projetés sur un plan perpendiculaire à la direction de balayage. Chaque balayage est représenté par un rectangle de largeur égale à la demi-largeur de la nappe laser. Pour des questions de simplicité, les auteurs choisissent de faire les balayages selon les directions X et Y de la MMT. Les trajectoires sont ainsi, orientées dans ces mêmes directions. Après avoir généré la trajectoire de balayage, une analyse des points de vue est réalisé afin d'éviter des positionnements non atteignables avec les degrés de liberté de la MMT et pour éliminer ou réduire les occultations. Quand un problème d'occultation se produit, il convient d'examiner si les points non numérisables peuvent être numérisés à l'aide d'une des directions de

balayage de la trajectoire. Si c'est le cas, le plan de balayage initial est toujours valable. Sinon, des nouvelles trajectoires doivent être ajoutées.

3.2. Détermination des points de vue avec prise en compte de la qualité

Dans le contexte d'inspection 3D des pièces par capteur-laser plan, Prieto et al. [PRI 03] se focalisent sur la définition d'une stratégie de numérisation optimisant la qualité du nuage de points. Leur objectif est d'acquérir un ensemble de points avec une qualité prédéfinie. Un point de vue optimal est défini par la situation relative capteur / surface dont l'angle de vue α et la distance de numérisation d sont inclus dans les plages admissibles. Les auteurs modélisent la pièce par des voxels afin de définir une trajectoire sans collision. La gestion de collision est gérée par une distance limite entre le centre du capteur et le bord du voxel. Si la distance limite est franchie, c'est-à-dire, une collision est détectée, une position de déplacement intermédiaire est proposée. La planification de la trajectoire est réalisée en 4 étapes : initialisation des données (extraction des données issues de la CAO et voxélisation), calcul des points de vue, estimation de l'incertitude des données acquises et distribution des points de vue par rapport à la surface. Pour l'acquisition, l'auteur optimise la séquence des points de vue de façon à ce qu'il ait le minimum de changements de configuration capteur et que la longueur de la trajectoire soit minimisée.

Rémy [REM 04] propose une méthode de recherche des points de vue adaptée aux capteurs à laser plan selon trois étapes : calcul de la visibilité locale, calcul de la visibilité globale et calcul de la visibilité réelle. Pour le calcul de la visibilité locale l'espace englobant chaque facette est modélisé par une sphère unitaire discrétisée sous forme d'un maillage STL et les directions de vues sont les normales \vec{n}_j des facettes, ce qui conduit à un nombre fini de directions de vue. La surface S de la pièce est également discrétisée par un modèle STL. Il y a visibilité locale entre un triangle i de S et un point de vue j si l'angle entre \vec{n}_i et \vec{n}_j est inférieur à 60° , valeur seuil déterminée afin de garantir la meilleure qualité de numérisation. Un tableau de visibilités locales est édité pour chaque face i de

S. Puis un calcul de visibilité globale est réalisé considérant que la face doit être visible par le laser (Figure 49). Le calcul de visibilité globale consiste à restreindre la carte de visibilité locale S_i en retirant de celle-ci les directions de visibilité \vec{n}_j pour lesquelles un triangle S_k de la pièce intersecte la direction \vec{n}_j . Les directions j retenues, sont définies dès lors comme les directions laser. Pour chaque direction de vue \vec{n}_j sélectionnée, la face doit être vue par au moins une des deux caméras du système. Pour ce faire, le calcul de visibilité réelle est réalisé, qui conduit à définir une table de visibilité avec 2 dimensions supplémentaires associées à chacune des caméras. Les directions sont alors modélisées par les normales \vec{n}_n des triangles de la sphère unitaire les contenant. La visibilité réelle est assurée si l'angle entre \vec{n}_i et \vec{n}_n est contenu dans l'intervalle correspondant au champ de vue de la caméra utilisée.

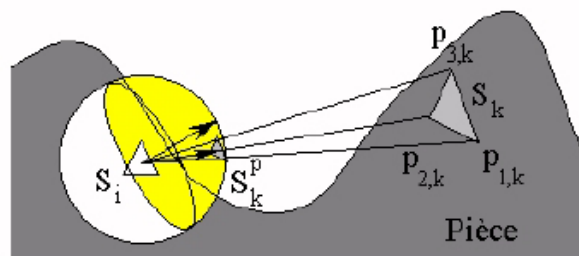


Figure 49 : Calcul de visibilité globale [REM 04].

Cependant, aucune planification de trajectoires n'est proposée. Il s'agit simplement de la détermination d'un ensemble discret des points de vue qui servent à définir les positions optimales de la pièce vis-à-vis du capteur.

Martins et al. [MAR 05] proposent une méthode en trois étapes pour la planification des trajectoires de numérisation pour un capteur laser-plan: définition des points de vue, génération de la trajectoire de numérisation sans collision et numérisation. La première étape consiste à déterminer les points de vue capables de numériser l'objet en prenant en compte certains critères : caractéristiques et limitations du système de numérisation, qualité des données numérisées et coût de numérisation (longueur de trajectoire). La qualité de mesure est déterminée en associant à chaque

point i à mesurer de la surface un « niveau de confiance de mesure ». Ce paramètre est une fonction de l'angle entre la direction d'incidence du laser (associée au point de vue), et le vecteur normal à la surface contenant le point i . Le point de vue est choisi de façon à toujours respecter une valeur minimale de niveau de confiance de mesure. Leur méthode est basée sur une voxélisation grossière du modèle CAO de la pièce permettant la détermination de l'occupation de l'espace nécessaire à la génération de trajectoires sans collisions et pour le calcul des normales locales des surfaces de la pièce. Les voxels sont classés comme *Surface* (surface), *Empty* (vide) ou *Unkown / Inside* (inconnu / intérieur). La génération de trajectoire est réalisée de façon à suivre les formes de l'objet. Cela réduit le coût de numérisation et permet que la surface à mesurer soit toujours comprise dans la zone optimale de la fenêtre de mesure du capteur, ce qui garantit la qualité des données acquises (Figure 50).

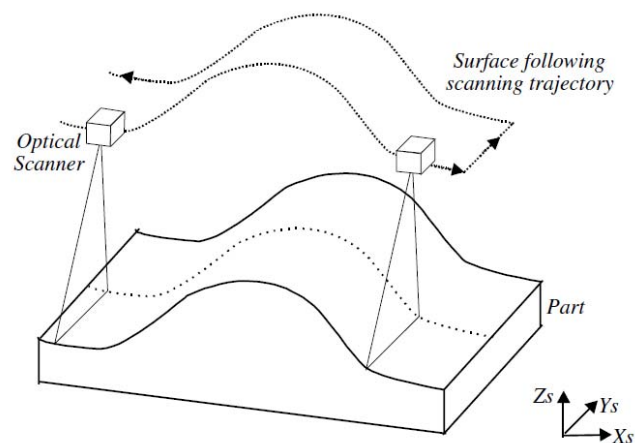


Figure 50 : Trajectoire de numérisation suivant la surface de l'objet [MAR 05].

La démarche adoptée est la suivante :

- un volume de mesure est défini prenant en compte les régions à numériser ;
- le volume de mesure est divisé en tranches selon la largeur du plan laser ;
- une trajectoire de numérisation qui suit les formes de l'objet est générée pour chacune des tranches ;

- les trajectoires consécutives sont reliées en zig-zag ;
- un test de vérification de collision est réalisé pour chaque position de numérisation.

Les trajectoires entre deux points de vue sur une zone dans laquelle il n'existe pas de voxels de surface à mesurer sont réalisées en ligne droite sauf en cas de possible collision. Dans ce cas, le capteur est déplacé vers le « haut » (direction positive selon l'axe Z de la MMT) dans une zone nommée position de sécurité. Tous les changements d'orientation de capteur sont également réalisés dans cette position de sécurité.

Raffaelli et al. [RAF 13] proposent une méthode automatique de détermination des points de vue destinée à l'inspection de pièces mécaniques. Différents types de contrôle peuvent être envisagés (tolérancement géométrique, contrôle industriel d'opérations de production tel que le découpage de tôles, évaluation de l'esthétique de pièces, mesure de la déformation et des déviations de points de mesure par rapport à un modèle CAO, etc.), qui imposent des contraintes différentes pour la numérisation. L'objet est modélisé par un échantillonnage de points afin d'évaluer la visibilité globale de la surface. Une surface NURBS est associée aux surfaces segmentées de l'objet afin de planifier les vues sur une paramétrisation simplifiée. Cette surface NURBS est découpée en sous-surfaces appelées *patches* auxquels un point moyen et une normale moyenne sont associés. Pour la détermination des points de vue, trois approches sont proposées selon le type de contrôle : le *positionnement normal* (normal positioning), le *positionnement de balayage* (sweep positioning) et l'ajout itératif de posages (*iterative pose adding*). Une carte de visibilité est calculée afin de déterminer les directions d'auto-occlusion. Pour ce faire, une sphère discrétisée est centrée sur chaque point moyen des carreaux de la surface NURBS associée. Des rayons partant du centre de la sphère sont projetés selon les facettes de cette sphère et les surfaces interceptées sont exprimées en niveau de gris en fonction de la distance sur la carte de visibilité (Figure 51).

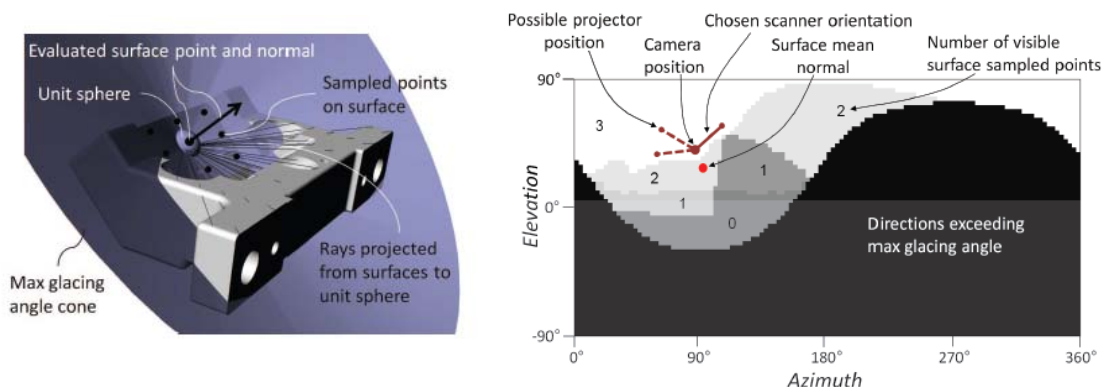


Figure 51 : Calcul de la visibilité (gauche) et représentation sur une carte (droite) [RAF 13].

Une fois la carte de visibilité calculée, l'étape suivante consiste à simuler les positionnements déterminés afin de vérifier la possibilité réelle de numérisation avec les points de vue proposés. Les paramètres à respecter pour que la numérisation soit possible sont : inclusion de la pièce dans le champ de vue de la caméra, valeur maximale d'angle de numérisation pour la caméra et pour le projecteur, visibilité à partir de la caméra et à partir du projecteur, et absence de réflexion directe de lumière sur la caméra.

La planification de vues est un processus itératif qui ne s'arrête que dans le cas où il n'est plus possible d'ajouter un nouveau point de vue. Afin d'éviter des itérations infinies, un point à numériser est exclu si l'on ne parvient pas à l'acquérir après avoir utilisé trois points de vue différents. La trajectoire la plus courte est générée en connectant les points de vue 3D à l'aide de l'algorithme Dijkstra. Celui-ci, issu de la théorie de graphes, est basé sur le calcul des distances entre les points de vue.

3.3. Synthèse sur les méthodes de détermination des points de vue

Les méthodes de planification de trajectoires de numérisation ou détermination des points de vue conduisant à la trajectoire à partir d'un modèle CAO s'appuient très généralement sur une représentation simplifiée de la pièce, soit sous forme de maillage STL, soit sous forme d'un échantillonnage (points + normales) ou encore sous forme de voxels. Plus rarement, une

modélisation par carreaux NURBS est utilisée. La connaissance des normales locales permet le calcul des visibilité capteur/pièce nécessaires à la détermination des points de vue. Les méthodes basées sur les maillages STL sont gourmandes en temps de calcul. Ainsi, afin de simplifier le modèle de la pièce et réduire l'effort de calcul, Xi et Shu [XI 99] proposent un découpage du modèle en sections qui sont ensuite projetées sur les plans de découpe, Son et al. [SON 02] proposent un échantillonnage de la surface, ce que font également Raffaelli et al. [RAF 13] qui assemblent les zones selon l'orientation des normales puis les représentent par des *patch NURBS*, tandis que Lorient propose de travailler sur un maillage décimé [LOR 08].

La plupart des méthodes de détermination des points de vues proposées dans la littérature sont bien souvent adaptées à un capteur donné. Or pour notre problématique de recherche de systèmes de numérisation adaptés à la méthode d'équilibrage de vilebrequin par mesure de la peau, il est nécessaire de pouvoir tester différents types de capteurs, voire différentes technologies. En effet, comme nous l'avons souligné, nous devons valider les capteurs admissibles définis au Chapitre 3 relativement à leur capacité à numériser la pièce selon des critères de qualité, de complétude et de temps de cycle.

La méthode que nous proposons présente l'avantage d'être générique et adaptable à tout type de capteur de numérisation 3D sans contact. Elle adopte le point de vue capteur, définissant une modélisation de la pièce à partir de la dimension de la fenêtre de mesure et de la taille de la pièce.

4. Détermination des points de vue à partir d'une *voxelmap* : Voxel2scan

4.1. Principe de la méthode

L'originalité de la méthode est sa généralité, c'est-à-dire qu'elle peut être mise en place pour tout type de capteur de numérisation 3D sans contact présentant une fenêtre de mesure ou champ de vue. Dans cette optique, nous proposons de modéliser chaque capteur par un cône en fonction de sa fenêtre de mesure comme illustré sur la Figure 52.

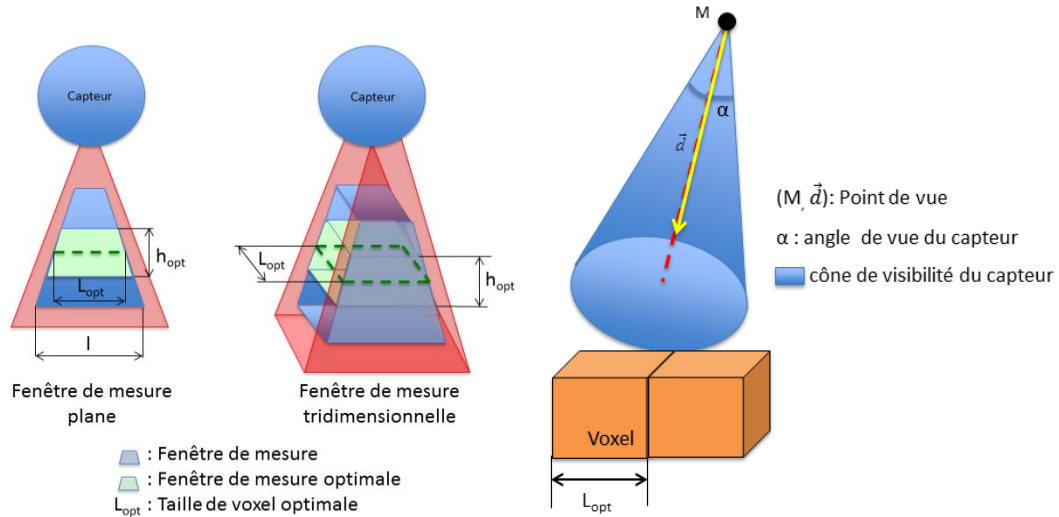


Figure 52 : Fenêtre de mesure optimale, plane (à gauche), et tridimensionnelle (au milieu) et modélisation du cône de visibilité du capteur.

L'angle du cône α représente l'angle de vue du capteur et il est fixé par rapport à la zone optimale de numérisation [AUD 12b]. \vec{d} est la direction de vue du capteur et définit la direction du point de vue. La base du cône correspond aux dimensions de la fenêtre de mesure, et sa hauteur est en général définie par la distance de numérisation optimale.

L'objectif principal de la planification de trajectoires étant d'optimiser la numérisation de la pièce en respectant des critères donnés, l'idée originale est d'initialiser le processus en considérant un nombre minimal de points de vue. Cet ensemble réduit est défini en relation avec la taille de la fenêtre de mesure du capteur en considérant les directions selon les orientations (X,Y,Z) de l'espace. Ceci revient à modéliser le volume englobant de la pièce par une structure de type *voxelmap*, pour laquelle la dimension des voxels est égale à la dimension de la taille de la fenêtre de mesure du capteur optimale L_{opt} (Figure 53). Cet ensemble minimal de points de vue est celui qui permet de numériser complètement le volume englobant la pièce à numériser. L'analyse de visibilité de la pièce est menée à partir de cette représentation par des voxels. Cependant, avant de décrire plus en détail

les différentes étapes de l'algorithme, il est nécessaire de présenter un certain nombre de définitions utilisées par la suite.

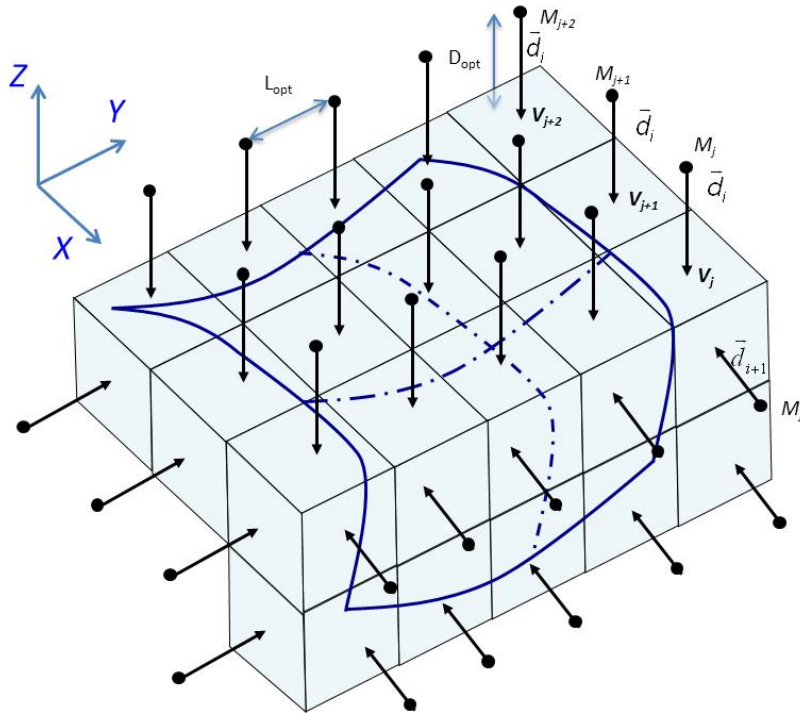


Figure 53 : Représentation des points de vue initiaux pour une surface quelconque.

4.2. Définitions

4.2.1. Normale au voxel

Un voxel est un pixel 3D en général en forme de cube. Nous reprenons ici la notion d'espace-voxel introduite dans [OST 02, CON 02] qui permet d'associer des attributs au voxel en fonction de son contenu. Nous considérons ici une voxélisation de la surface de l'objet à numériser. Chaque voxel est de dimension $L_{voxel} = L_{opt}$, où L_{opt} correspondant à la taille de la fenêtre de mesure optimale. Il faut noter que la construction de l'espace voxel proposée ici ainsi que les attributs liés aux voxels sont différents de ceux utilisés au chapitre 2. En effet, la construction des trajectoires de numérisation ne nécessite pas la connaissance des voxels intérieurs à la pièce mais uniquement des voxels contenant la peau de la pièce. La voxélisation est ainsi plus simple et consiste à ne rechercher

que les voxels contenant une portion de peau et ne nécessite plus un maillage fermé. Notons également que la peau de la pièce est décrite par un ensemble de facettes obtenu après discrétisation du modèle CAO sous forme d'un maillage STL. La tessellation du modèle CAO est réalisé en accord avec les exigences liées au maillage (taille de flèche et taille de maillage) déterminés au chapitre 2.

Nous pouvons donc attacher à chaque voxel considéré un attribut de *normale* en fonction de la portion de surface incluse dans le voxel. La normale est déterminée comme la normale moyenne aux facettes contenues dans le voxel (Figure 54) par la relation suivante (26) :

$$\vec{n}_v = \frac{\sum_{k=1}^N S_k \cdot \vec{n}_k}{\left\| \sum_{k=1}^N S_k \cdot \vec{n}_k \right\|} \quad (26)$$

Où \vec{n}_v est la normale moyenne associée au voxel considéré ; \vec{n}_k est la normale à la k -ème facette, S_k est l'aire de la k -ème facette et N est le nombre de facettes contenu dans le voxel.

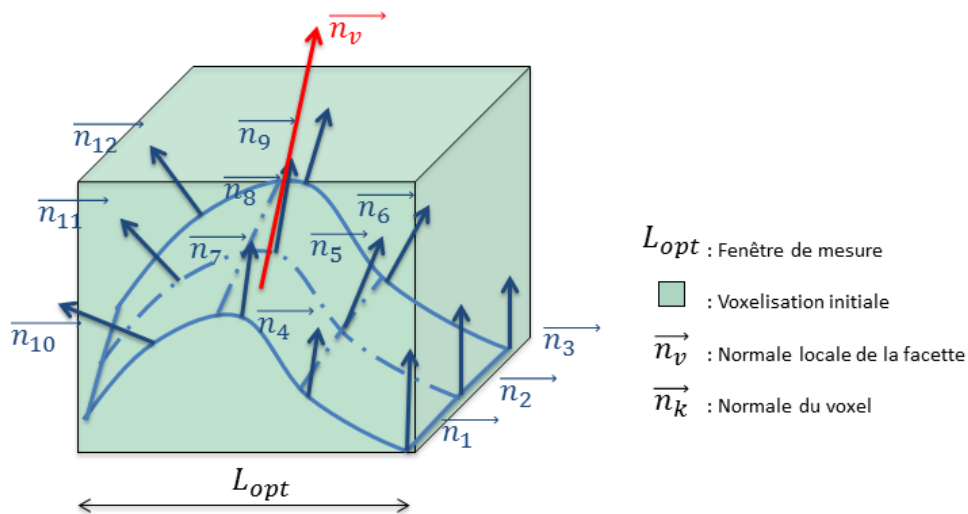


Figure 54 : Calcul de la normale des voxels à partir des normales locales.

Dans le cas où une facette traverse plus d'un voxel, son aire est comptabilisé autant de fois que le nombre de voxel qu'elle traverse. L'orientation de la normale est bien évidemment sensible au nombre de facettes contenues dans le voxel. Il est donc nécessaire de s'assurer de la représentativité

de la normale vis-à-vis de la portion de surface incluse dans le voxel. Cette analyse est effectuée au travers de l'analyse de la cohérence de la normale comme détaillé au paragraphe suivant.

4.2.2. Analyse de la cohérence

La normale calculée précédemment est utilisée par la suite comme élément de description de la surface contenue dans le voxel. Il est donc nécessaire de vérifier que cette normale est bien représentative de la portion de surface au regard de la visibilité. En effet, la portion de surface contenue dans le voxel peut présenter des courbures importantes ce qui entraîne des variations de normales locales. La cohérence de celles-ci par rapport à la normale du voxel est évaluée à travers de l'angle θ_k , angle entre la normale de chaque facette et la normale au voxel \vec{n}_v :

$$\theta_k = \arccos \left(\frac{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_v}{\|\vec{n}_k\| \|\vec{n}_v\|} \right) \quad (27)$$

La normale du voxel est cohérente si pour chaque facette k incluse dans le voxel :

$$\theta_k \leq \theta_{seuil} \quad (28)$$

La valeur de θ_{seuil} est définie à partir de l'angle α du cône définissant le capteur (voir Figure 52). En général la valeur seuil choisie vaut la moitié de l'angle qui définit le cône de visibilité du capteur. Cela permet que l'orientation des points de vue générés soit toujours dans le cône de visibilité dont la qualité de numérisation est optimale [MEH 06b, AUD 12b].

Sur la Figure 55 nous présentons un exemple de calcul de cohérence pour un voxel. Nous pouvons constater que les angles θ_1 et θ_4 dépassent la valeur seuil de 30° . Ainsi, même si les autres angles sont cohérents, la normale moyenne du voxel \vec{n}_v ne peut pas être considérée cohérente. Lorsque la normale n'est pas cohérente, une division du voxel est réalisée avec $L_{voxel} = L_{opt}/2$. Une analyse de la cohérence est à nouveau réalisée pour les sous voxels.

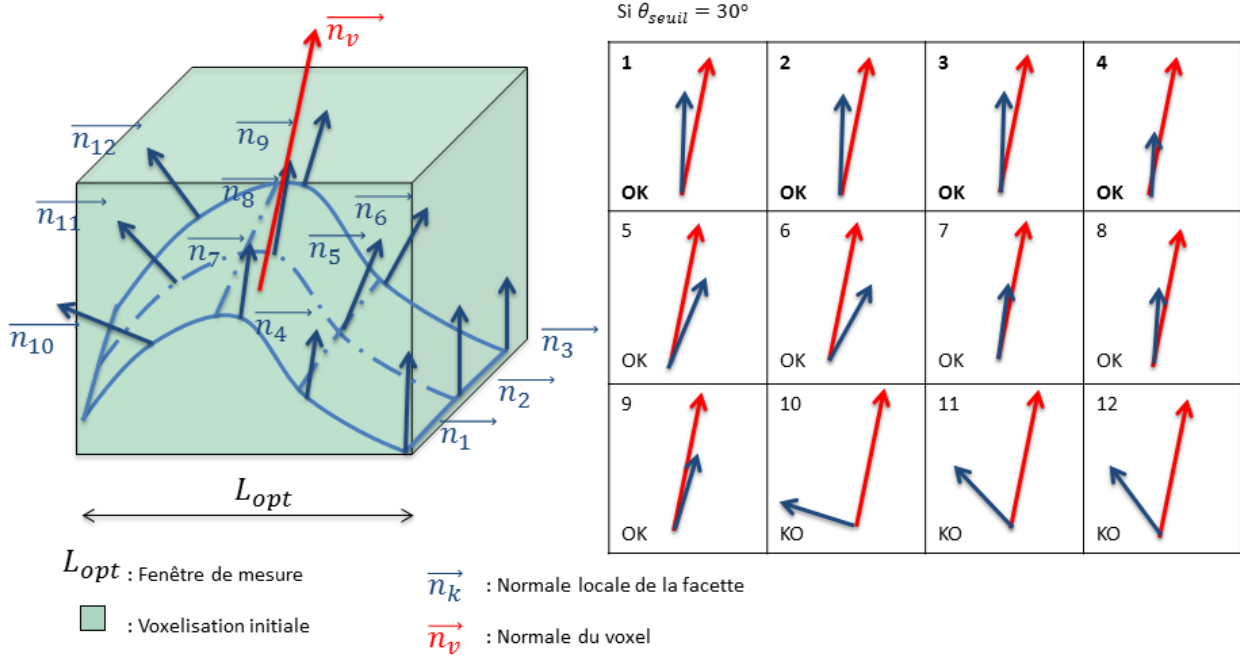


Figure 55 : Analyse de la cohérence d'un voxel.

4.2.3. Qualification des voxels

Un voxel de surface V est dit vu par un point de vue $P = (M, \vec{d})$ choisi, si et seulement si, ce voxel est le premier voxel intercepté par la demi droite commençant en M et de direction \vec{d} (Figure 56). Cependant même si un voxel est vu par un point de vue P , il est possible que la qualité de numérisation ne réponde pas à la qualité recherchée. En effet, de nombreuses études ont montré l'influence de la direction de numérisation sur la qualité des données numérisées, en particulier sur le bruit et sur la justesse des données acquises [MEH 06b, AUD 12b]. Nous proposons donc de qualifier les *voxels vus* selon des critères de qualité. Considérons, φ , l'angle entre la normale au voxel \vec{n}_v et la direction de vue \vec{d} :

$$\varphi = \arccos \left(\frac{-(\vec{d}) \cdot \vec{n}_v}{\|\vec{d}\| \|\vec{n}_v\|} \right) \quad (29)$$

Notons, α_{max} , l'angle de numérisation admissible selon les critères de qualité choisis [AUD 12d], nous qualifions les voxels de la façon suivante (Figure 56) :

- $0 \leq \varphi \leq \alpha_{max}/2$ le voxel V est qualifié de *bien vu*
- $\alpha_{max}/2 \leq \varphi \leq \alpha_{max}$ le voxel V est qualifié de *mal vu*
- $\varphi \geq \alpha_{max}$ le voxel V est qualifié de *non vu*

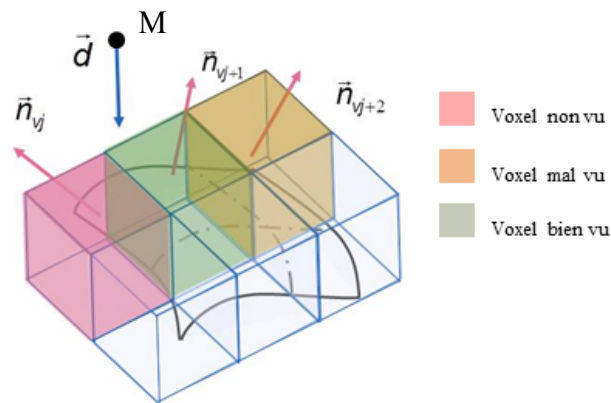


Figure 56 : Classification des voxels selon une direction de vue.

La qualification des voxels n'est effectuée que pour les voxels dont la normale est cohérente par rapport à la surface qu'elle représente. Lorsque la notion de qualité ne s'applique pas, la valeur de α_{max} est égale à la valeur de l'angle de vue du capteur α .

4.3. Description de la méthode Voxel2scan

Nous partons d'un ensemble initial de directions de vue suivant les axes orthogonaux du repère de la pièce avec pour objectif de numériser des grandes portions de surface de la pièce. Les voxels non vus par ces premières directions de vue sont analysés considérant de nouveaux points de vue après une analyse de la qualité des voxels. L'algorithme proposé se déroule en 4 étapes principales :

- Voxélisation et définition d'un ensemble de points de vue initial
- Analyse de la cohérence des normales
- Qualification des voxels par rapport aux points de vue initiaux

- Détermination de l'ensemble final des points de vue

4.3.1. Voxélisation et définition d'un ensemble de points de vue initial

Afin d'exploiter la géométrie de la pièce, modélisée généralement par une définition CAO, il est nécessaire de procéder à une transformation. Partant du modèle CAO de la pièce, un maillage STL est réalisé de façon à calculer simplement la normale locale. Pour ce faire, le modèle CAO de la pièce est facettisé sous *CATIA V5R20*[®] (Figure 57).

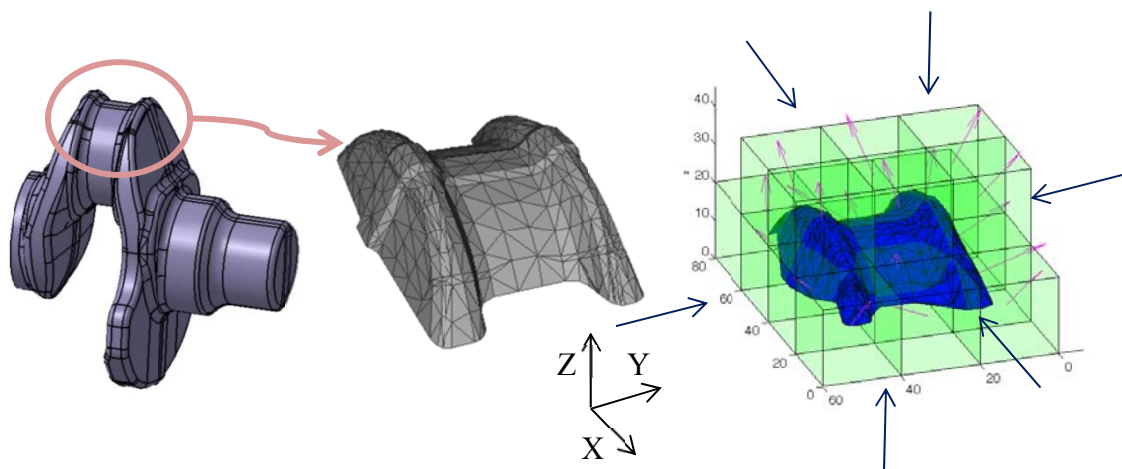


Figure 57 : Modélisation de la surface par *voxelmap* (voxels et normales locales).

Ce maillage est utilisé comme entrée dans l'algorithme de planification de vues *Voxel2Scan*. Ce dernier prend en compte la taille de voxel L_{voxel} qui est fonction de la taille de la fenêtre de mesure L_{opt} du capteur (paragraphe 4.1). La voxélisation initiale se déroule en deux étapes :

- Voxélisation de la pièce de la peau de la pièce considérant que la taille d'un voxel est égale à la largeur de la fenêtre de mesure du capteur L_{opt} (Figure 53). Chaque voxel de surface contient une portion de surface permettant le calcul de la normale comme défini au paragraphe 4.2.1.
- Définition des directions des points de vue initiales : elles sont choisies parallèles aux directions des axes (X, Y, Z) du repère défini lors de la voxélisation selon les sens positif et négatif. Ces 6 directions initiales sont choisies de façon à faciliter la première analyse de

visibilité.

4.3.2. Analyse de la cohérence des normales

Pour chaque voxel, une analyse de cohérence de la modélisation initiale est effectuée au travers de l'analyse de la cohérence de la normale locale au voxel (paragraphe 4.2.2). Si la normale n'est pas cohérente, la taille du voxel est divisée par deux. Cela veut dire que le voxel initial est divisé en 8 sous voxels. Cette division est réalisée itérativement jusqu'à ce que toutes les normales soient cohérentes avec la portion de surface incluse dans le voxel (Figure 58).

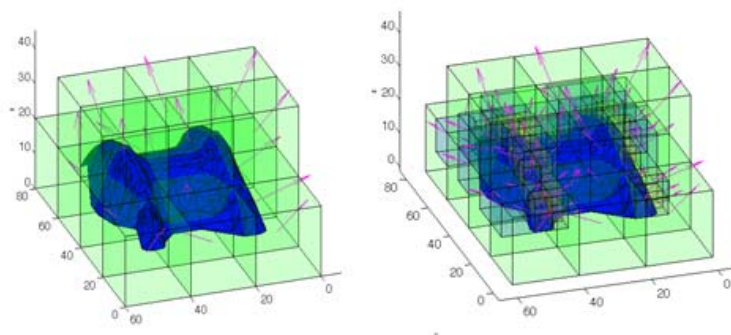


Figure 58 : Raffinement de la *voxelmap* en fonction des normales locales.

Cependant, un critère d'arrêt doit être défini afin d'éviter des voxels trop petits : le processus de division s'arrête lorsque la taille du voxel est égale à la taille moyenne d'une maille STL, même si la cohérence de toutes les normales n'est pas atteinte. Si la normale à un voxel reste non cohérente une fois le critère d'arrêt atteint, le voxel est identifié comme *non représentatif*. Il est important de noter que le raffinement est bien adapté aux surfaces présentant des variations de rayons de courbure.

4.3.3. Qualification des voxels par rapport aux points de vue initiaux

La qualification des voxels n'est effectuée que pour les voxels dont la normale est cohérente par rapport à la surface qu'elle représente. A partir de l'ensemble initial des directions de vue, deux listes de voxels sont créées en fonction de la qualification du voxel : une liste des *voxels vus* L_V et une liste de *voxels non vus* L_{NV} . A l'initialisation de l'algorithme, la première liste est vide est la

seconde liste inclut tous les voxels. Pour chaque direction de vue \vec{d}_i , où \vec{d}_i est une direction d l'ensemble $(\vec{X}, -\vec{X}, \vec{Y}, -\vec{Y}, \vec{Z}, -\vec{Z})$, l'approche est la suivante :

1. Détermination des voxels de L_{NV} qui sont visibles par \vec{d}_i ; ces voxels sont alors classés dans la liste L_V ; si le critère de qualité est adopté, les *voxels mal vus* restent classés dans L_{NV}
2. A chaque voxel V_j de L_V , le point de vue associé est $P_j(M_j, \vec{d}_i)$ où M_j est l'offset du centre du voxel de la distance D_{opt} , le long de \vec{d}_i
3. Une fois le point de vue déterminé, une analyse de collision est réalisée : il y a collision si la sphère centrée en M_j de rayon $R_{capteur}$ intercepte au moins un voxel voisin ; dans ce cas le voxel V_j est retiré de la liste L_V et il est mis sur la liste L_{NV}
4. Sélection d'une autre direction de vue \vec{d}_{i+1} et réitération du processus à partir de l'étape 1.

Le rayon de la sphère, $R_{capteur}$ est en général défini par le rayon de la sphère qui englobe le capteur. Cette représentation simplifiée donne toutefois des résultats satisfaisants lorsqu'il s'agit simplement de valider l'aptitude du capteur à numériser la forme considérée (Figure 59).

A la fin de cette étape, un point de vue p_j est associé à chaque voxel V_j appartenant à L_V . Cependant, il se peut que la liste L_{NV} ne soit pas vide ; cela veut dire qu'il reste des voxels non vus ou mal vus. Il est nécessaire alors de trouver des nouvelles directions de vue.

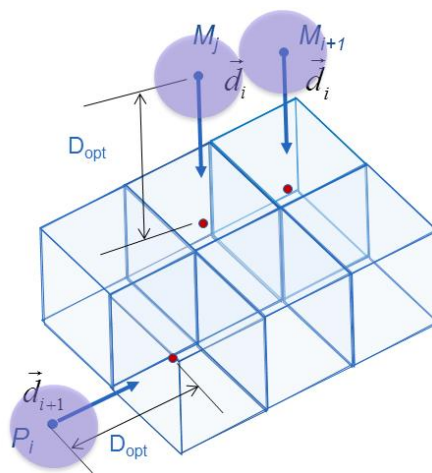


Figure 59 : Définition des points de vue et gestion des collisions.

4.3.4. Détermination de l'ensemble final des points de vue

Pour trouver de nouvelles directions de vue, plusieurs méthodes sont possibles. Par exemple, des directions de vue peuvent être ajoutées en considérant la normale du voxel et en cherchant la direction de vue la plus pertinente vis-à-vis de la normale. Cependant, cette méthode peut conduire à un grand nombre de points de vue additionnels. De façon à rester avec un nombre réduit de points de vue, nous considérons dans un premier temps des directions de vue supplémentaires résultantes de l'intersection des plans bissecteurs du système de coordonnées principal (Figure 60). En effet, cette solution est envisageable pour la plupart des capteurs car l'angle de vue est supérieur à 45° .

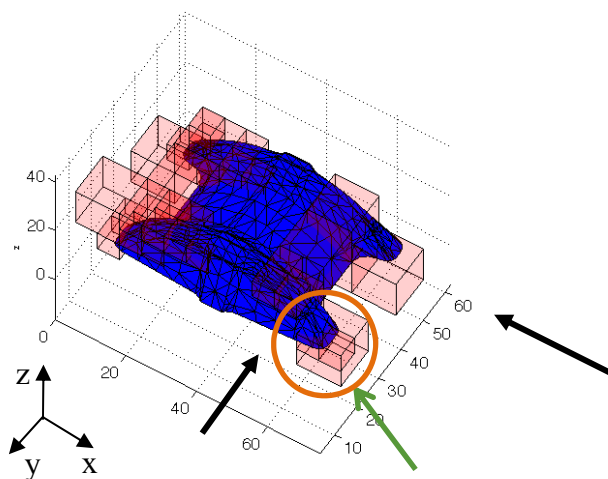


Figure 60 : Ajout de directions de vue supplémentaires.

Ces directions sont testées pour les voxels restants dans la liste L_{NV} jusqu'à ce la liste soit vide. Une fois les directions de vues déterminées, les points de vue sont obtenus en reprenant les étapes de 2 et 3 de l'algorithme détaillé au paragraphe précédent.

Dans le cas des surfaces contenant un important nombre de variations sur les normales locales, l'algorithme proposé peut conduire à un nombre important de petits voxels issus du raffinement. Cela entraîne une distance entre deux points de vue très inférieure à la largeur de la fenêtre de mesure, qui se traduit par des zones de la surface numérisée plusieurs fois. Afin d'éviter ce problème, les positions calculées à partir de la voxélisation initiale sont conservées pour déterminer

les points de vue réduits. Il s'agit de retrouver le voxel parent appartenant à la voxélisation initiale qui contient le petit voxel considéré. Le point de vue de ce dernier est ainsi créé à partir du centre de son voxel parent. Cela permet de limiter le problème de redondance au niveau de la numérisation sans pour autant perdre la direction de vue définie pour le voxel enfant.

Pour les voxels non représentatifs, le point de vue déterminé pourra ne pas être optimal et conduire à un défaut de numérisation. Ces voxels sont tagués de façon à les identifier lors de la numérisation. L'algorithme général de détermination des points de vue proposée est implémenté sous *MATLAB*[®] et il est présenté sur la Figure 61.

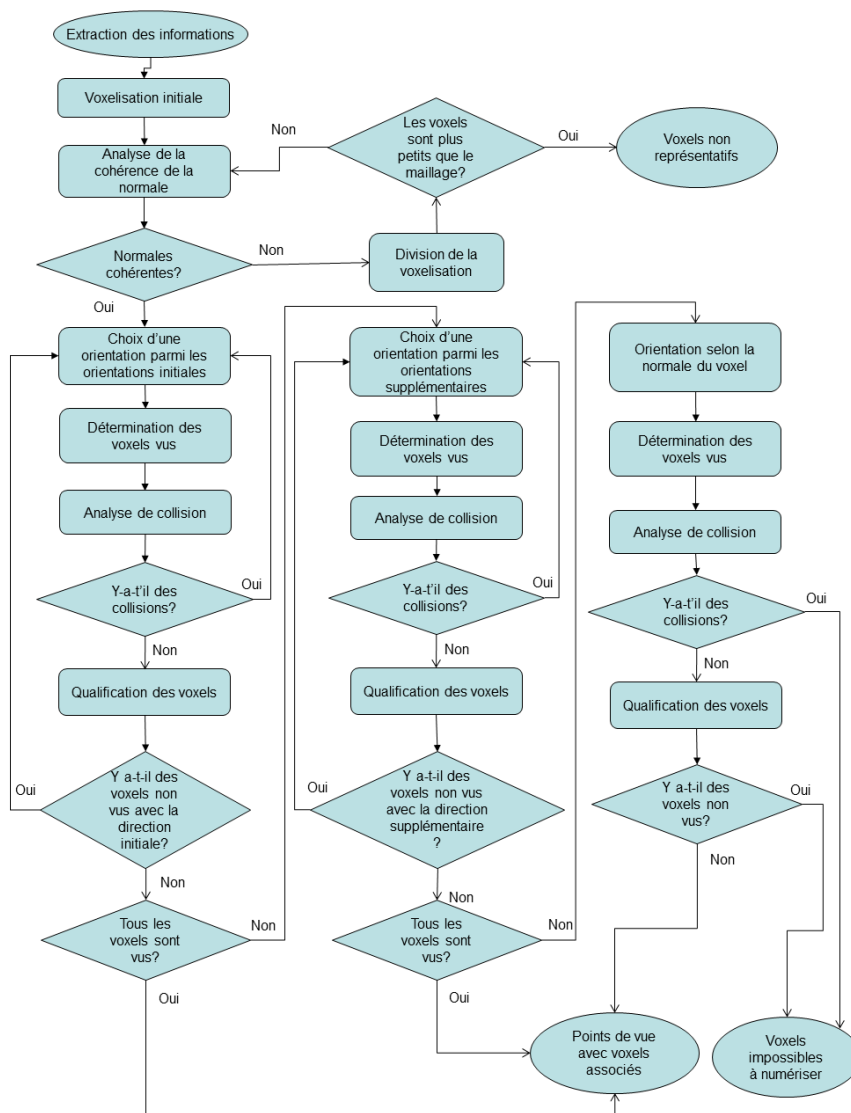


Figure 61 : Démarche de l'algorithme Voxel2Scan.

Les paramètres d'entrée de l'algorithme sont le modèle CAO de la pièce (incluant la dimension de la taille de maille correspondant à la taille du plus petit détail souhaitée) et les caractéristiques de chacun des capteurs (angle de vue, angle de vue admissible, dimensions de la fenêtre de vue optimale, distance de numérisation optimale, dimensions du capteur). En sortie, l'algorithme fournit les points de vue déterminés sous forme d'une liste. Une fois que tous les points de vue sont déterminés, la trajectoire du capteur peut être définie. Cette trajectoire ne dépend pas seulement du capteur mais également du système de numérisation complet. Cette partie qui concerne l'industrialisation de la méthode sera traitée au Chapitre 5.

5. Applications

Afin de valider la méthode Voxel2scan, l'algorithme est appliqué à un vilebrequin brut de type M9T. Il s'agit d'une pièce de formes complexes dont la numérisation n'est pas évidente. Compte tenu des résultats issus du chapitre 3, les systèmes testés sont le Kreon Zephyr KZ 25 monté sur MMT (annexe A.1) et le système Gom Atos III (annexe A.2) avec les paramètres de numérisation définis dans le Tableau 11.

| Capteur | L_{opt} | D_{opt} | θ_{seuil} | α_{adm} |
|----------------|-----------|-----------|------------------|----------------|
| KZ25 | 20mm | 145mm | 60° | 60° |
| ATOS | 250 mm | 490mm | 60° | 60° |

Tableau 11 : Paramètres de numérisation pour les deux capteurs.

Le modèle M9T sous format STL comprend 730090 facettes. La voxélisation initiale conduit à 2 voxels pour le capteur ATOS et 754 pour le Kreon. Le raffinement est appliqué dans la quasi-totalité de la pièce compte tenu de sa grande complexité. Nous obtenons 3564 voxels au total pour le capteur Kreon et 4495 pour le capteur Gom (Figure 62). Le nombre total de voxels pour le capteur Gom est plus important car la voxélisation initiale commence avec 2 voxels de plus grande taille, ainsi plusieurs divisions de voxels sont nécessaires (8 divisions contre 5 pour le capteur Kreon).

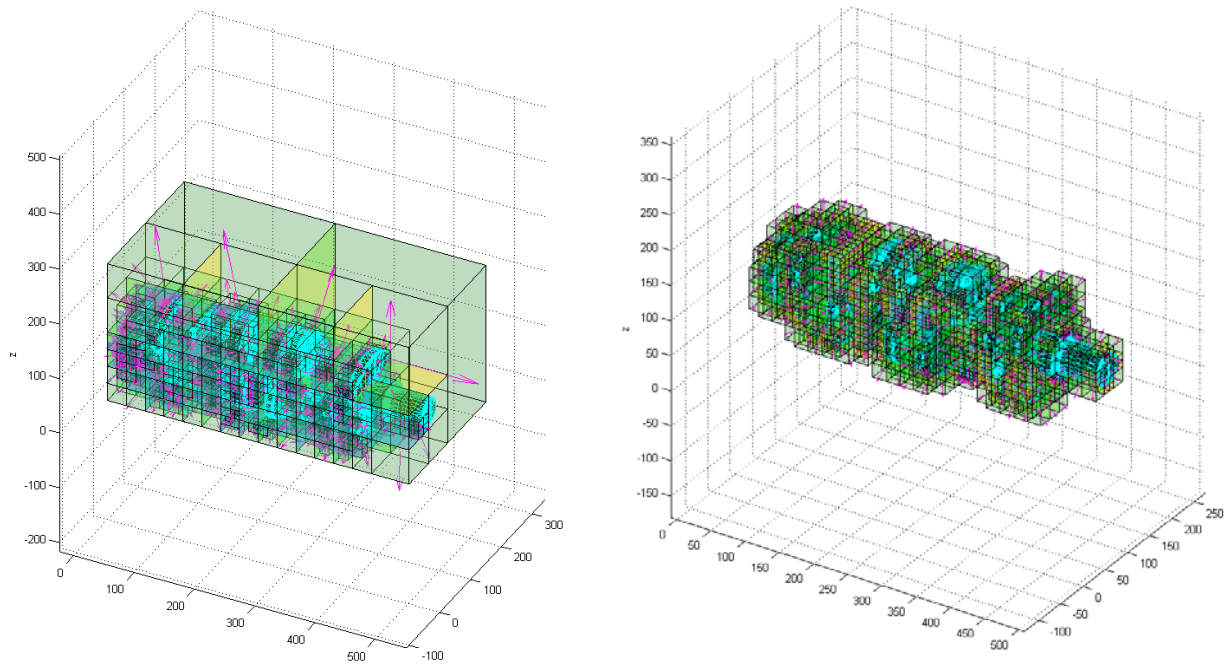


Figure 62 : Voxélisation divisée pour le capteur Gom (à gauche) et pour le capteur Kreon (à droite).

Rappelons qu'un point de vue est créé pour chaque voxel. Après division, la taille de la plupart des voxels est inférieure à la largeur de la fenêtre de mesure L_{opt} , cela conduit à des zones de recouvrement sur la pièce lors de la numérisation. Comme expliqué au paragraphe 4.3.4, les points de vue générés sont réduits de façon à minimiser les points de passage du capteur. Au final de cette réduction, nous obtenons 50 points de vue pour le capteur ATOS et 900 pour le KZ25. Les points de vue générés par l'algorithme Voxel2scan sont présentés sur la Figure 63. Comme attendu, le nombre de points de vue pour le capteur à large fenêtre de mesure (Gom) est réduit vis-à-vis de l'autre système (Kreon).

Pour les deux systèmes, l'angle admissible est 60° . Cela garantit un bruit inférieur à $3 \mu\text{m}$ pour le système Gom et environ $15 \mu\text{m}$ de bruit pour le système Kreon. Dans ces conditions, la justesse de mesure est évaluée à $3,5 \mu\text{m}$ pour les deux systèmes de numérisation (ZUQ 12b). Le calcul est fait hors ligne et il prend environ 20 minutes pour un vilebrequin entier sur un PC classique. Un récapitulatif des résultats obtenus pour les deux systèmes de numérisation est présenté dans le Tableau 12.

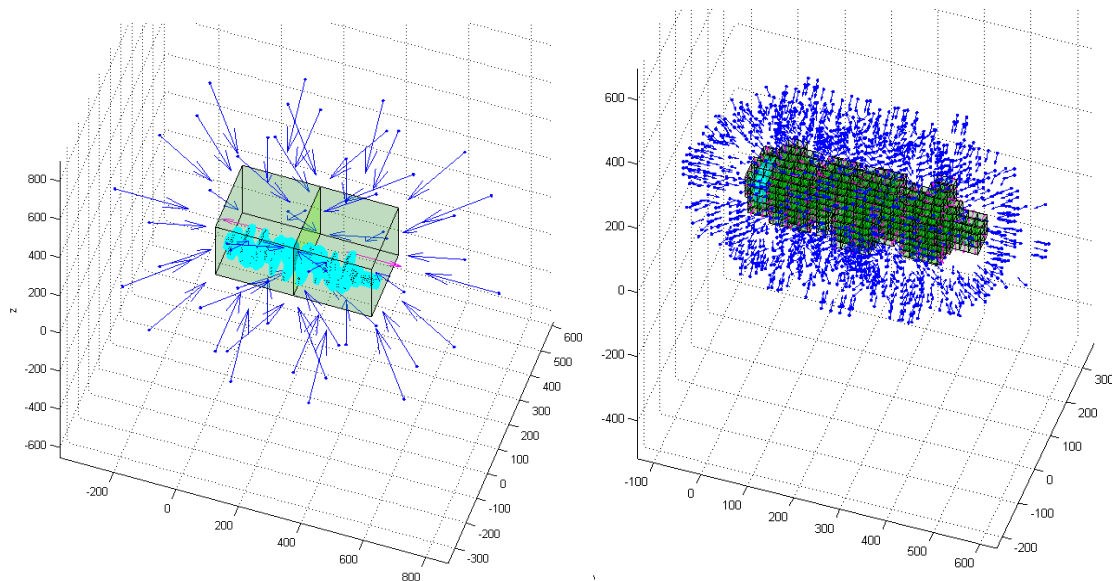


Figure 63 : Points de vue avec le capteur Gom Atos (à gauche) et avec le capteur Kreon KZ25 (à droite).

Le nombre de voxels après division dépend de la taille de voxel initiale et de la position du premier voxel. En effet, la voxélisation commence à partir du bord de la pièce et elle ne prend pas en compte les possibles symétries de la pièce.

| Paramètre | Gom | Kreon |
|-----------------------------------|--------|--------|
| Nombre de voxels initiaux | 2 | 754 |
| Nombre de voxels après division | 4922 | 3564 |
| Nombre de voxels non vus | 427 | 638 |
| Points de vue totaux | 4495 | 2926 |
| Points de vue réduits | 50 | 900 |
| Pourcentage de la surface non vue | 7,91 % | 26,05% |

Tableau 12 : Résultats de l'algorithme Voxel2scan pour les systèmes Gom et Kreon.

Les voxels non vus, représentés en rouge sur la Figure 64, correspondent aux zones difficilement accessibles et mesurables par le capteur. La difficulté d'accès est due à la complexité de

la pièce (§3.2.2 du chapitre 3) et aux collisions entre le capteur et la pièce. Les voxels non vus se situent principalement entre les contrepoids et les bras de liaison.

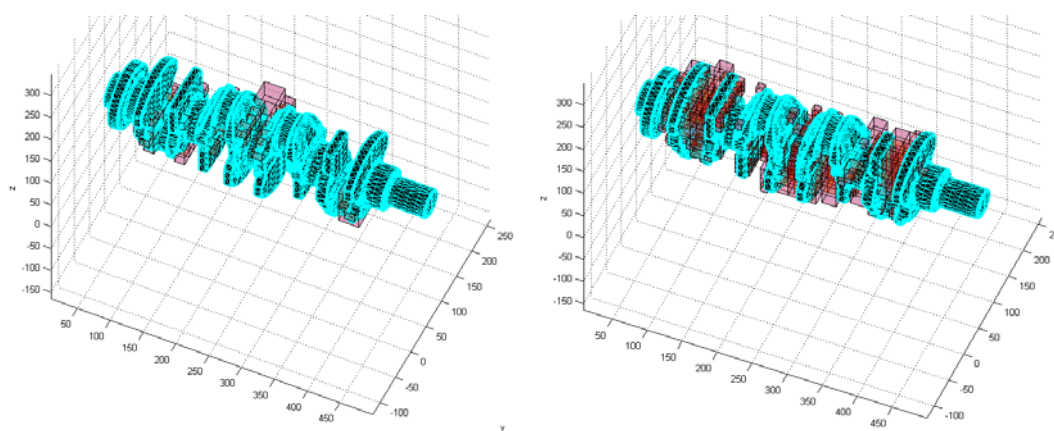


Figure 64 : Voxels non vus avec le système Gom (à gauche) et avec le système Kreon.

Le nombre de voxels non vus est plus important pour le système Kreon. Ceci est principalement dû aux collisions capteur/pièce. En effet la distance de numérisation de ce système est relativement faible vis-à-vis des dimensions du vilebrequin, et les points de vue calculés par l'algorithme générant une collision sont supprimés (§4.3.3). Ainsi les voxels associés à ces points de vue ne peuvent donc pas être numérisés (Figure 65).

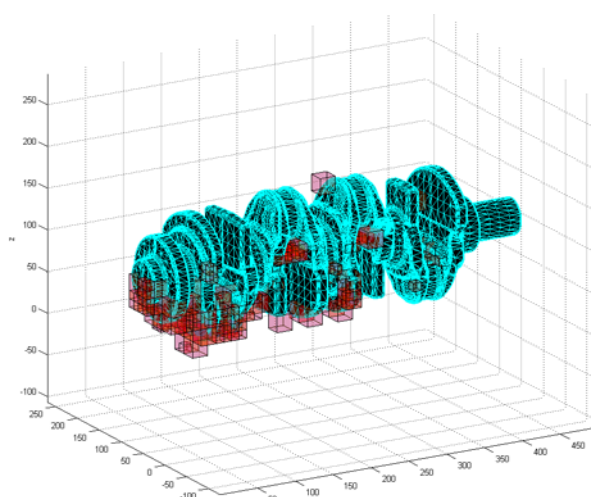


Figure 65 : Voxels non vus dus à la collision entre le système Kreon et le vilebrequin.

Le système Gom ne présente pas de voxel non vu associé aux collisions car sa distance optimale de numérisation permet une acquisition à distance du vilebrequin. Nous calculons la

proportion de surface non numérisée (Tableau 12), à partir du calcul de l'aire de l'ensemble des facettes contenues dans les voxels non vus. Le vilebrequin devrait donc en théorie être numérisé à plus de 90% avec le système GOM et aux alentours de 75% avec le système Kreon.

Il est à noter que des trous de numérisation supplémentaires pourront être observés sur le nuage de points numérisé, principalement dus à des occultations caméra lors de la numérisation. En effet, comme le capteur n'est modélisé que par un point et une direction, la prise en compte de la visibilité du capteur n'a donc pas été réalisée (visibilité de la source lumière et visibilité caméra). Ceci illustre une limite de la méthode due à la simplicité de la modélisation du capteur qui ne prend pas en compte la visibilité réelle du capteur.

Il est possible de modifier notre approche afin de prendre en compte les caractéristiques du capteur. En effet, en réalisant une rotation de valeur égale à l'angle entre la source lumière et la caméra du capteur il serait possible de prendre en compte les problèmes d'occultation caméra.

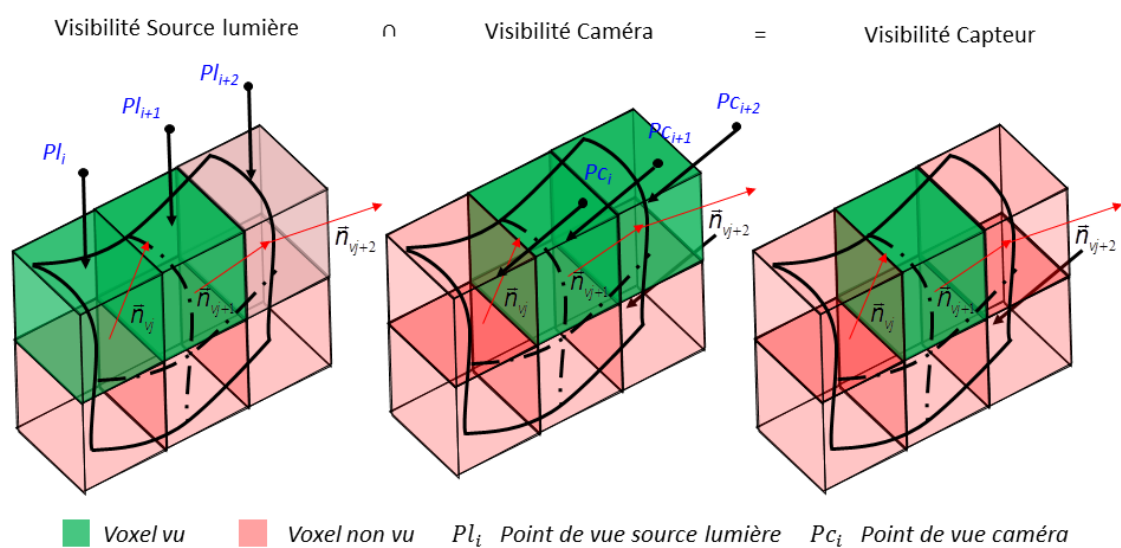


Figure 66 : Intersection de la visibilité source lumière et la visibilité caméra.

Le résultat de visibilité capteur serait ainsi l'intersection entre le résultat de visibilité de la source lumière et le résultat de visibilité de la caméra (ou des caméras). Les voxels vus ne seraient que ceux qui sont vus à la fois par la source lumière et par la caméra. Cette démarche est illustrée sur

la Figure 66 dans le cas d'un capteur avec une source lumière et une caméra. Elle est applicable également pour un capteur avec deux ou plusieurs caméras.

La mise en œuvre des essais de numérisation, les post-traitements ainsi que les résultats associés sont présentés au Chapitre 5 pour différentes typologies de vilebrequins.

6. Conclusions

Nous proposons une méthode originale de planification de trajectoires basée sur la fenêtre de vue du capteur. Cette méthode, implémentée sous *MATLAB*[®], est générique et applicable à tout type de capteur de numérisation 3D et de pièces. A partir d'un ensemble réduit de points de vue et s'appuyant sur une modélisation par voxels de la pièce, qui prend en compte la fenêtre de vue du capteur, l'algorithme analyse la validité des points de vue en fonction de la visibilité de la surface et de la qualité de numérisation. L'analyse de visibilité est basée sur une voxélisation adaptative de la surface qui limite sensiblement le temps de calcul. De plus, la voxélisation permet une gestion simple des collisions capteur-pièce. Comme illustré à l'aide de deux capteurs différents, la méthode s'applique quel que soit le type de capteur et délivre une liste de points de vue permettant la numérisation de la pièce. Il est également intéressant de souligner que la méthode fonctionne avec un nombre réduit de paramètres correspondant d'une part au modèle (taille minimale de la maille associée à la dimension du plus petit détail), et d'autre part à la modélisation du capteur (angle admissible de numérisation, dimensions de la fenêtre de mesure optimale, distance de numérisation optimale, encombrement du capteur).

La stratégie de numérisation est ensuite déterminée en fonction du système de numérisation utilisé. L'application sur un vilebrequin du type M9T prouve l'efficacité de l'algorithme. Celui-ci génère, avec un effort de calcul réduit, une liste avec un nombre de points de vue réduit permettant la numérisation de la surface de la pièce. La simplicité de la modélisation du capteur (cône simplifié de visibilité) montrant ses limites car ne prenant pas en compte la visibilité réelle du capteur, une piste

d'amélioration est proposée. Celle-ci consiste à faire subir une rotation d'un angle donné (lié à l'orientation relative laser/caméra) à l'ensemble de points de vue initialement déterminé.

La mise en œuvre des numérisations pour différentes typologies de vilebrequins à partir de la stratégie de numérisation que nous proposons est proposée dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Application Industrielle

1. Introduction

Nous avons présenté au Chapitre 2 la méthode de calcul de balourds sur données discrètes Voxel2inertia et au Chapitre 4 la méthode de planification de trajectoires de numérisation Voxel2scan. Ces deux méthodes sont essentielles pour la mise en place d'une démarche robuste d'équilibrage de vilebrequins par mesure de géométrie permettant de rendre flexible cette opération et de réduire les coûts d'investissement initial et de maintenance. Dans ce chapitre, nous présentons la méthodologie et les essais réalisés ainsi que les résultats obtenus afin de valider les algorithmes Voxel2inertia et Voxel2scan.

La validation est basée sur la numérisation de vilebrequins bruts dont les balourds ont été préalablement mesurés en berceau mécanique sur la ligne de fabrication de vilebrequins VI05 à l'usine Renault de Cléon [E41.36.419.R]. Pour ce faire, les vilebrequins sont prélevés de la ligne après le passage par la Station 1 de pré-usinage et par la Station 2 de mesure dynamique de balourds de l'opération OP10 (Figure 3). Ainsi la surface extérieure des vilebrequins est majoritairement brute de forge hormis les portées extérieures cylindriques (Figure 67).

Nous choisissons 4 modèles différents de vilebrequins issus de moteurs diesel (M9T, F9 et R9M) et essence (H5Bt) à quatre cylindres (Figure 67). Les essais sont réalisés sur 1 vilebrequin de typologie M9T, 2 vilebrequins de typologie F9, 2 vilebrequins de typologie R9M et 2 vilebrequins de typologie H5Bt. Ces vilebrequins ont été choisis avec l'objectif de valider l'efficacité et la généralité des deux algorithmes sur différentes typologies. Comme mentionné au Chapitre 3, deux systèmes sont choisis afin de réaliser la validation : le système Gom et système Kreon. Il s'agit de deux systèmes de numérisation identifiés comme admissibles pour l'opération d'équilibrage de vilebrequins.

La validation de notre démarche globale est réalisée en deux étapes. Dans une première partie nous présentons la mise en œuvre des essais ainsi que les résultats de numérisation obtenus par la

méthode Voxel2scan. Ensuite, dans une deuxième partie, la validation de la méthode Voxel2inertia est réalisée sur les résultats de numérisation précédents.

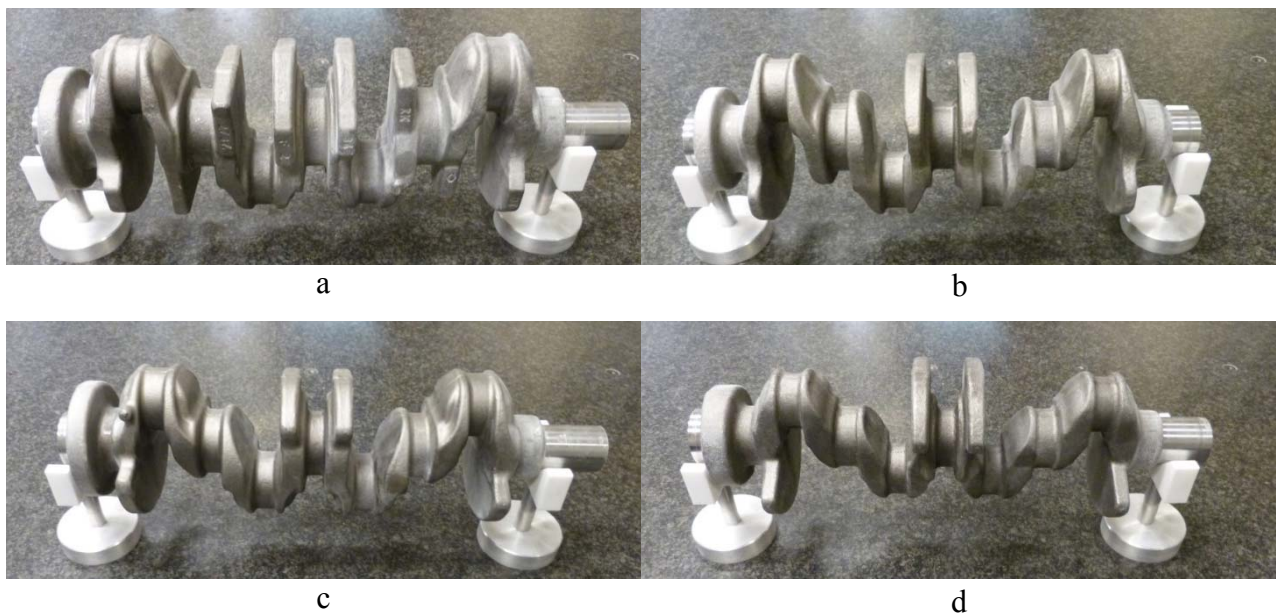


Figure 67 : Typologies étudiées (a) M9T, (b) F9, (c) R9M et (d) H5Bt.

2. Validation de la méthode Voxel2scan

A partir des points de vue obtenus au chapitre 4 avec la méthode Voxel2scan (Figure 63), nous mettons en œuvre les essais de numérisation des vilebrequins. Le problème est ici le passage des points de vue exprimés dans l'espace pièce à l'ensemble des configurations du capteur exprimées dans l'espace de mesure. Les caractéristiques des systèmes de numérisation étudiés telles que la fenêtre de mesure et le système de déplacement étant différentes, il est nécessaire de préparer et de réaliser des trajectoires de numérisation spécifiques à chaque système de numérisation. Nous présentons dans les paragraphes suivants la mise en œuvre des essais de numérisation avec les systèmes Gom et Kreon.

2.1. Mise en œuvre des essais de numérisation avec le système GOM

Le capteur Gom, dans la configuration utilisée n'est pas lié à un système de déplacement piloté et ne nécessite pas de déplacement pour numériser la partie visible de l'objet à mesurer. Les

numérisations pour chaque point de vue sont donc réalisées en statique à l'aide d'un trépied articulé. Le vilebrequin a été posé sur deux supports en V. L'ensemble supports plus vilebrequin est positionné en 8 configurations différentes par rapport au capteur Gom (Figure 68). Celles-ci permettent de reproduire les points de vue déterminés par l'algorithme Voxel2scan présentés sur la Figure 63.

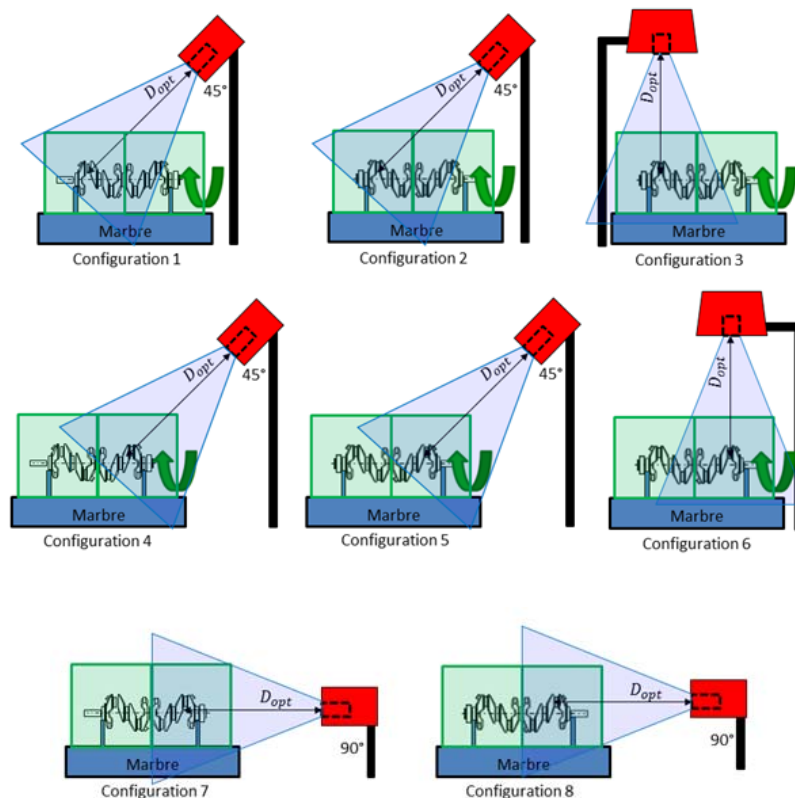


Figure 68 : Configurations du capteur Gom par rapport au vilebrequin lors des numérisations.

Pour les configurations 1 à 6, une prise de mesure est réalisée pour chacune des 8 positions angulaires du vilebrequin, totalisant 48 positionnements vilebrequin par rapport au capteur. Les mesures avec les configurations 7 et 8 sont réalisées avec une seule position angulaire du vilebrequin et elles permettent 2 prises de mesure supplémentaires. Au total, 50 positionnements relatifs entre le système Gom et le vilebrequin sont utilisés. Ceux-ci correspondent aux 50 points de vue obtenus avec l'algorithme Voxel2scan (Figure 63). Chaque mesure prend environ 20 secondes, le temps de

numérisation total pour un vilebrequin étant ainsi de 16 minutes et 40 secondes (hors temps de préparation et déplacement du vilebrequin et / ou capteur).

Pour chaque point de vue, le système délivre un maillage représentatif de la géométrie mesurée. Les maillages obtenus à l'aide des différents points de vue doivent être recalés et fusionnés dans un même repère avant d'être exploités. Ceci est réalisé grâce au système de repérage de cibles de positionnement et le traitement proposé par le logiciel Gom. Des cibles doivent être positionnées en nombre suffisant de façon à ce qu'au moins 4 cibles soient visibles entre deux configurations Capteur/Pièce. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser un montage avec deux cylindres sur les extrémités de la pièce sur lesquels des cibles de repérage sont collées (Figure 69). Ainsi, les différentes vues sont recalées avec une erreur globale de recalage de 23,5 μm (selon les données constructeur).

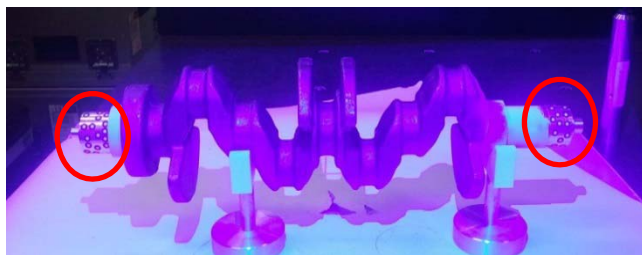


Figure 69 : Montage avec cibles utilisé avec le système GOM.

Une fois les nuages de points recalés, les points non représentatifs du vilebrequin qui ont été numérisés en même temps que le vilebrequin (supports, cylindres utilisés pour le recalage, marbre, etc.) sont supprimés manuellement.

2.2. Mise en œuvre des essais de numérisation avec le système Kreon

Le capteur Kreon est monté sur une MMT à l'aide d'une tête PH 10 Renishaw. Ce système de déplacement piloté permet 5 degrés de liberté. Afin de mieux utiliser le volume de mesure disponible, le vilebrequin est posé sur des supports en V rehaussés par des blocs métalliques permettant l'accès du capteur aux zones inférieures du vilebrequin. Les surfaces sont matifiées de

façon à faciliter la numérisation. Le vilebrequin est orienté selon l'axe X de la MMT afin de rendre possible l'accès du capteur aux côtés de la pièce (Figure 70).

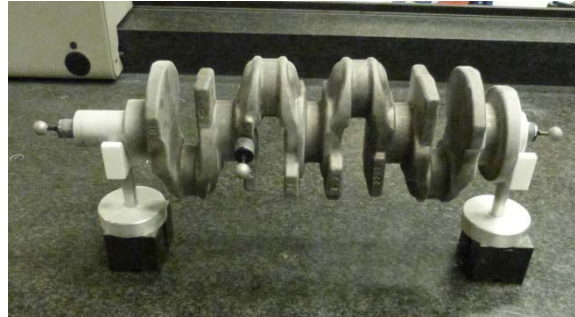


Figure 70 : Montage avec sphères calibrées utilisé avec le système Kreon

Compte tenu des caractéristiques du système utilisé (voir Annexe A.1), seul un demi-vilebrequin peut être numérisé. De ce fait, les vilebrequins doivent être mesurés selon deux posages dans l'espace machine. Nous numérisons d'abord avec la moitié des points de vue du haut. Le vilebrequin est ensuite retourné de 180° selon l'axe X et nous numérisons l'autre moitié du vilebrequin avec les points de vue inférieurs.

Comme nous l'avons expliqué au chapitre 4, les points de vue obtenus avec l'algorithme Voxel2scan sont définis par un point de coordonnées (X, Y, Z) et une direction (\vec{d}) . Pour une direction donnée, les points de vue sont organisés afin de définir une trajectoire ; l'orientation du plan laser du capteur est alors choisie perpendiculaire à la trajectoire. Rappelons que le positionnement du capteur Kreon est défini par 3 coordonnées de position $(X, Y$ et $Z)$ de la MMT et par deux angles de rotation $(A$ et $B)$ de la tête PH10 (Annexe A.1). Ainsi, le passage des points de vue à l'ensemble des configurations capteur dans l'espace de mesure est effectué grâce à un post-processeur développé au laboratoire.

Comme une trajectoire de numérisation est générée pour chaque direction de vue, 26 trajectoires doivent être définies au total soit 13 trajectoires par demi-vilebrequin. La numérisation

avec une seule trajectoire prend entre 1 minute et 3 minutes et demie. La numérisation d'un demi-vilebrequin prend en moyenne 45 minutes, soit 90 minutes environ pour la numérisation d'un vilebrequin entier (hors temps de préparation et de déplacement du vilebrequin).

Pour chaque demi-vilebrequin, la numérisation est faite en automatique. Les nuages de points obtenus pour chaque trajectoire sont recalés dans un même repère grâce à la méthode de calibration du constructeur. Celle-ci impose la mesure d'une sphère de référence pour chaque orientation capteur afin d'identifier les positionnements relatifs des repères associés. Cette procédure peut conduire à une source importante d'erreurs de recalage des nuages de points [AUD 12d].

A la fin de la numérisation du vilebrequin, deux nuages de points sont obtenus, un pour chaque demi-vilebrequin (partie supérieure et partie inférieure). Afin de recaler les nuages de points dans un même repère, il est nécessaire de fixer des éléments géométriques sur le vilebrequin qui permettent de créer un repère local sur la pièce. Pour ce faire, nous utilisons 3 sphères calibrées fixées sur le vilebrequin (Figure 70).

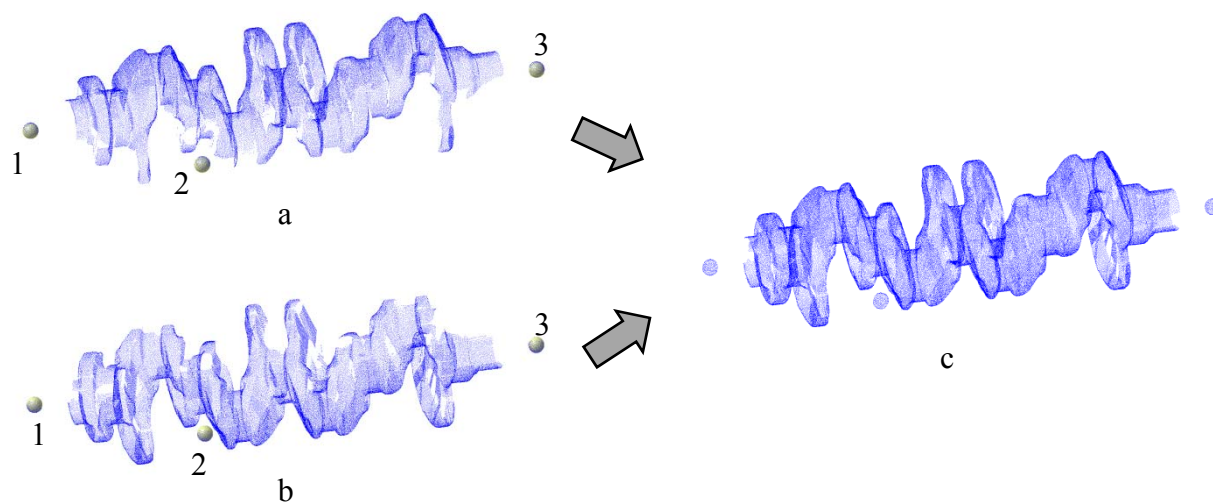


Figure 71 : Recalage du (a) nuage de points supérieur avec le (b) nuage de points inférieur et (c) nuage de points assemblé.

Une portion de chaque sphère doit être numérisée dans chacun des deux nuages de points (celui de la partie supérieure et celui de la partie inférieure du vilebrequin). Des sphères théoriques sont associées aux nuages de points des sphères de chaque moitié du vilebrequin. Le recalage des deux nuages de points est réalisé grâce à un alignement par contraintes entre les centres des sphères du nuage de points inférieur et ceux du nuage supérieur du vilebrequin sur *CATIA V5R20*[®] (Figure 71). Une fois les deux nuages de points assemblés, les paquets de points relatifs aux sphères sont supprimés et un maillage est associé à chaque nuage de points.

2.3. Synthèse sur la mise en œuvre des systèmes

Nous nous intéressons dans ce paragraphe aux sources d'incertitudes de chacune des mises en œuvre. Nous pouvons distinguer :

- Le porteur : absent pour le Gom et supposé parfait pour le Kreon (MMT de faible incertitude dans le volume), le porteur n'est pas ici une source d'incertitude ;
- La méthode de recalage des trajectoires : absente pour le Gom, elle est pénalisante pour le capteur Kreon car réalisée par une procédure de calibration sur sphère dont l'incertitude peut être très grande pour certaines orientations ;
- La méthode de recalage externe : sur cibles pour le Gom, et sur sphères pour le Kreon ; dans le cas du Gom, le constructeur annonce de recalage relativement faible ; dans le cas du Kreon, elle sera évaluée au paragraphe 3.1.

L'ensemble de ces incertitudes peut avoir une incidence sur les résultats de calcul des balourds comme nous le verrons au paragraphe 3.2.

2.4. Résultats de numérisation

Avant de présenter les résultats de numérisation, il est intéressant de mettre en avant les voxels non vus issus de l'algorithme Voxel2scan. Pour cela, nous appliquons l'algorithme sur données CAO. Ainsi, sur la Figure 72 les voxels non vus pour les systèmes Gom et Kreon sont affichés en rouge

pour les quatre typologies de vilebrequin. Nous constatons que le nombre de voxels non vus est supérieur avec le système de numérisation Kreon en raison des problèmes de collision rencontrés.

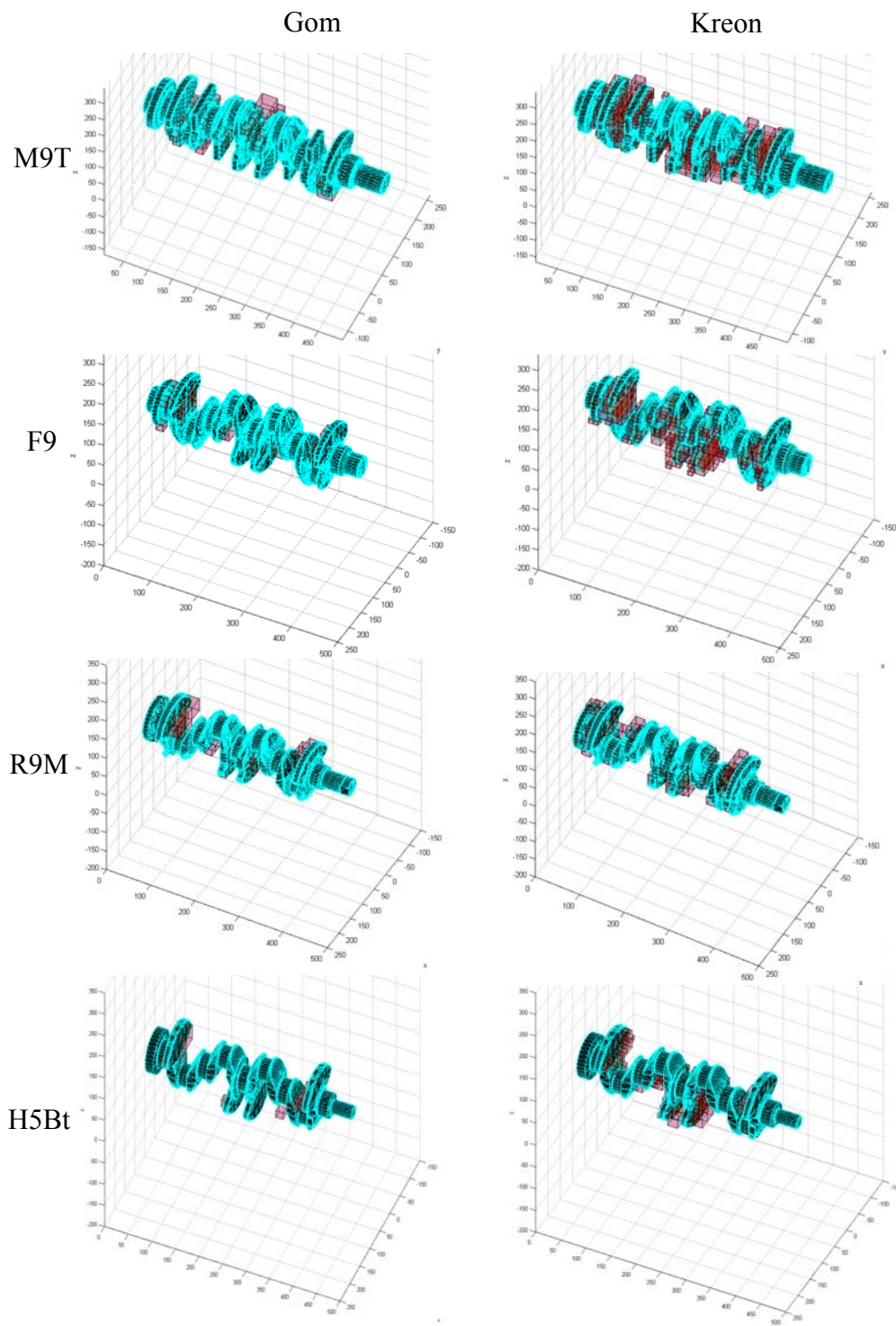


Figure 72 : Voxels non vus sur données CAO pour le système Gom (à gauche) et pour le système Kreon (à droite).

Afin de mieux comprendre l'effet des voxels non vus, nous calculons le pourcentage de surface non vue. Le calcul est effectué à partir du maillage inclus à l'intérieur des voxels non vus pour chaque vilebrequin. Le pourcentage de surface non vue pour les 4 typologies de vilebrequin est présenté sur le Tableau 13.

| Pourcentage de la surface non vue | | |
|--|------------|--------------|
| Vilebrequin | Gom | Kreon |
| M9T | 7,91 % | 26,05% |
| F9 | 4,74 % | 14,21 % |
| R9M | 6,90 % | 14,59 % |
| H5Bt | 3,98 % | 24,37 % |

Tableau 13 : Pourcentages de surface non vue sur données CAO pour les systèmes Gom et Kreon.

Nous notons que le pourcentage de surface non vue est plus important pour le vilebrequin M9T. En effet, celui-ci présente le plus grand nombre de surfaces d'accès difficile, surtout pour le système de numérisation Kreon.

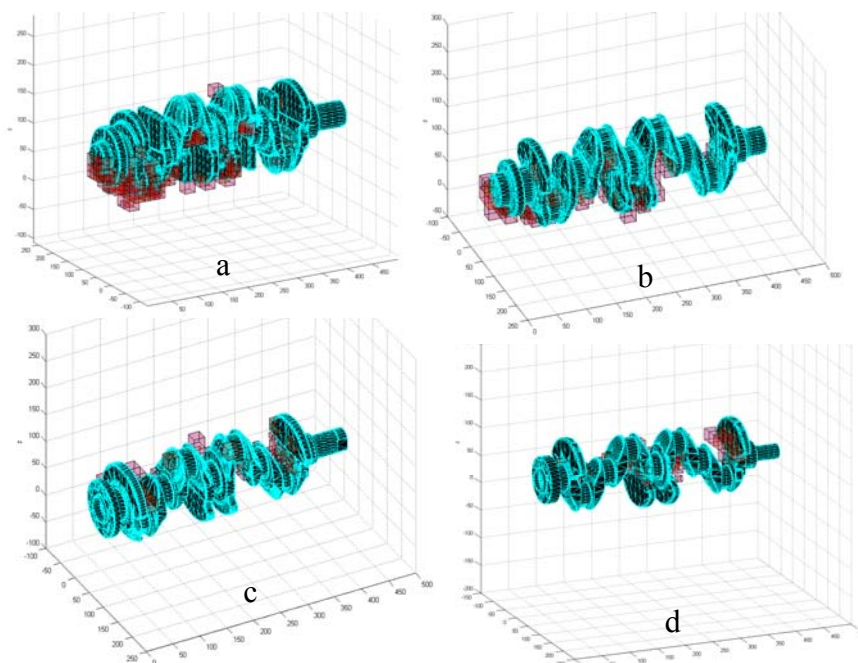


Figure 73 : Voxels non vus sur données CAO dû à la collision pour les vilebrequins (a) M9T, (b) F9 et (c) R9M avec le système Kreon.

Comme présenté au chapitre 4, une partie des voxels non vus est due aux collisions. Ceci n'est vérifié que pour le système de numérisation Kreon (Figure 73) car sa distance optimale de numérisation ($D_{opt} = 145 \text{ mm}$) est petite vis-à-vis des dimensions des vilebrequins.

Les maillages calculés sur les résultats de la numérisation d'un vilebrequin F9 sont présentés sur la Figure 74. Il est intéressant de noter que les trous de numérisation correspondent aux zones difficiles d'accès telles que les surfaces entre les contrepoids et les bras de liaison identifiés par l'algorithme Voxel2scan. D'autres trous de numérisation apparaissent également sur les extrémités et ponctuellement sur les côtés des vilebrequins au niveau de l'axe de rotation. Ceci est dû aux artefacts de repérage (des sphères pour les numérisations avec le Kreon et des cylindres dotés de cibles de positionnement pour les numérisations avec le Gom) fixés sur les vilebrequins permettant de recalibrer les nuages de points.

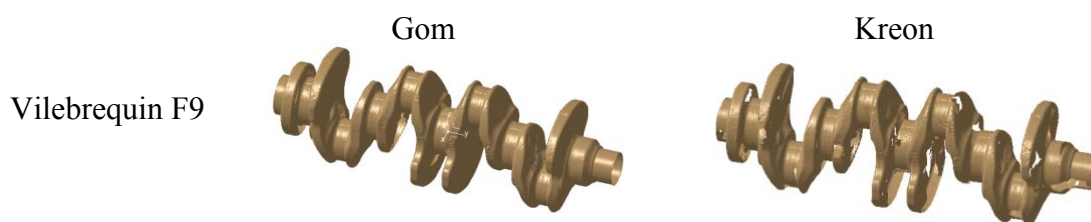


Figure 74 : Maillages issus de la numérisation d'un vilebrequin F9 avec le système Gom (à gauche) et avec le système Kreon (à droite).

Il est à noter que la numérisation avec le système Kreon nécessite de nombreux recalages (1 par orientation) imposés par le fonctionnement du système. Or, l'ensemble des incertitudes associées aux méthodes de recalage induisent des erreurs, c'est la raison pour laquelle les résultats d'une seule numérisation avec ce système sont présentés. Nous présentons en détail la méthode de recalage utilisée et son impact sur le calcul des éléments d'inertie dans le paragraphe 3.1.

Nous présentons dans le Tableau 14, les pourcentages de surface non numérisée pour les systèmes Gom et Kreon. D'une façon générale les prévisions de pourcentage de surface non numérisée sont cohérentes avec les résultats de mesure.

| N° du vilebrequin | Typologie du vilebrequin | Surface non vue | | Surface non numérisée | |
|-------------------|--------------------------|-----------------|---------|-----------------------|---------|
| | | Gom | Kreon | Gom | Kreon |
| 1 | M9T | 7,91 % | 26,05 % | 2,35 % | - |
| 2 | F9 | 4,74 % | 14,21 % | 1,42 % | - |
| 3 | F9 | 4,74 % | 14,21 % | 0,09 % | 19,05 % |
| 4 | R9M | 6,90 % | 14,59 % | 12,56 % | - |
| 5 | R9M | 6,90 % | 14,59 % | 12,09 % | - |
| 6 | H5Bt | 3,98 % | 24,37 % | 12,71 % | - |
| 7 | H5Bt | 3,98 % | 24,37 % | 12,70 % | - |

Tableau 14 : Pourcentages de surface non vue et non numérisée avec les systèmes Gom et Kreon.

Les résultats précédents mettent ainsi en avant l'efficacité de l'algorithme Voxel2scan pour la définition des points de vue assurant la numérisation des pièces avec un nombre restreint de points de vue. Dans le prochain paragraphe nous présentons la validation de la méthode Voxel2inertia de calcul de balourds sur données discrètes.

3. Validation de la méthode Voxel2inertia

Afin de valider notre méthode de calcul de balourds sur données discrètes Voxel2inertia, nous nous sommes basés sur la mesure des balourds issue de la ligne de production de Renault à Cléon. Les balourds des 7 vilebrequins mesurés en berceau mécanique sont présentés dans le Tableau 15. Ils sont normalisés par rapport aux valeurs maximales des balourds du groupe de vilebrequins analysé. Ces mesures constituent la référence pour la validation de l'équilibrage par mesure sans contact. Il est important de rappeler que la fidélité de mesure du berceau mécanique est de ± 5 g.cm et que l'erreur maximale admissible est 5 % sur le calcul des balourds.

Avant de procéder au calcul des éléments d'inertie sur les données numérisées, certains post-traitements des nuages de points sont nécessaires. Ceux-ci sont présentés dans le paragraphe suivant.

| Numéro du vilebrequin | Modèle | Balourd | Balourd |
|-----------------------|--------|-----------------------|-----------------------|
| | | Volant (g.cm/g.cm) | Pignon (g.cm/g.cm) |
| 1 | M9T | 1,00 | 1,00 |
| 2 | F9 | 0,67 | 0,67 |
| 3 | F9 | 0,63 | 0,56 |
| 4 | R9M | 0,84 | 0,47 |
| 5 | R9M | 0,92 | 0,57 |
| 6 | H5Bt | 0,61 | 0,22 |
| 7 | H6Bt | 0,87 | 0,48 |

Tableau 15 : Balourds normalisés des vilebrequins bruts mesurés en berceau mécanique.

3.1. Post-traitements des nuages de points pour le calcul des éléments d'inertie

L'algorithme Voxel2inertia nécessite un maillage triangulaire fermé. Or, lors de la numérisation, il existe souvent des zones non numérisées qui génèrent des trous de numérisation. De plus, le nuage de points obtenu est souvent inhomogène. De ce fait, les données doivent être traitées afin qu'elles soient exploitables dans l'algorithme Voxel2inertia.

Le premier post-traitement pour le calcul des éléments d'inertie consiste à recalculer les données numérisées afin qu'elles soient exprimées dans un même repère. Comme expliqué dans le paragraphe 2.1, le recalage du système Gom est réalisé en automatique grâce au repérage des cibles de positionnement. Lors de la numérisation avec le système Kreon, deux nuages de points sont obtenus : un correspondant à la partie supérieure et un relatif à la partie inférieure du vilebrequin. Le recalage des données numérisées avec le système Kreon est réalisé grâce aux 3 sphères calibrées collées sur la pièce. Pour ce faire, des sphères théoriques sont associées aux nuages de points inférieur et supérieur

du vilebrequin (paragraphe 2.2). Nous présentons dans le Tableau 16 la moyenne et l'écart-type de la distance entre les points nuage analysé et la sphère associée pour le vilebrequin F9.

| Nuage de points | N° de sphère associée | Distance | |
|-----------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| | | Moyenne (mm) | Ecart-type (mm) |
| Inférieur | 1 | 0,0129 | 0,0107 |
| Inférieur | 2 | 0,0144 | 0,0124 |
| Inférieur | 3 | 0,0129 | 0,0098 |
| Supérieur | 1 | 0,0095 | 0,0083 |
| Supérieur | 2 | 0,0129 | 0,0103 |
| Supérieur | 3 | 0,0096 | 0,0083 |

Tableau 16 : Moyenne et écart-type de la distance entre les sphères associées et les nuages de points pour le vilebrequin 3.

Le recalage est ensuite réalisé grâce à un alignement entre les paires de sphères (par exemple, sphère 1 du nuage de points inférieur et sphère 1 du nuage de points supérieur). Lors du recalage la priorité est donnée à l'une des sphères positionnées sur l'axe du cylindre, ainsi la distance entre les sphères est nulle pour cette dernière (Tableau 17).

| N° de sphère | Distance entre les sphères (mm) | | | |
|--------------|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Distance | Composante en X | Composante en Y | Composante en Z |
| 1 | 0,035 | 0,032 | -0,015 | 0 |
| 2 | 0,034 | 0,032 | 0,009 | -0,006 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tableau 17 : Distance entre les sphères du nuage inférieur et le nuage supérieur après recalage.

Les composantes non nulles sur les axes X et Z peuvent être pénalisantes sur le calcul des éléments d'inertie car elles génèrent un décalage de la répartition des masses du vilebrequin. Les

effets sur le calcul des éléments d'inertie de cette erreur, cumulée aux erreurs de calibration du Kreon, sont présentés dans le paragraphe 3.2.2.

Une fois le recalage réalisé, il est nécessaire d'associer un maillage (ou remailler dans le cas des données obtenues avec le système Gom) selon les conditions optimales définies au Chapitre 2, soit taille de maillage de taille $S_m = 1mm$ et de flèche $S_f = 0,06mm$. Les maillages obtenus conservent des trous de numérisation qui sont bouchés avec l'outil de bouchage de trous (*Fill holes*) de l'Atelier DSE (*Digitized Shape Editor*) de *CATIA V5R20*[®]. Sur la Figure 75 nous présentons un exemple de maillage initial avec des trous de numérisation (en marron) et le maillage après traitements (en bleu) pour le vilebrequin M9T.

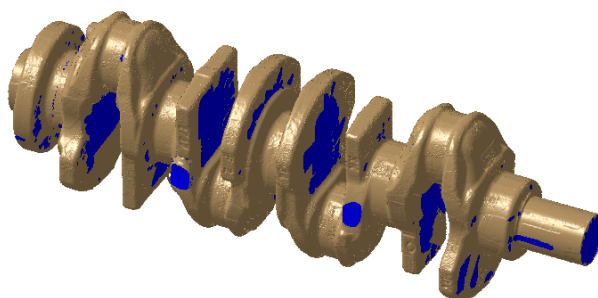


Figure 75 : Vilebrequin M9T initial (en marron) et après bouchage des trous (en bleu).

Afin de calculer les balourds, il est nécessaire de faire correspondre le repère du maillage obtenu avec le repère de calcul utilisé dans la méthode *Voxel2Inertia*. Nous repositionnons le vilebrequin grâce à des entités associées sur le maillage par le critère des moindres carrées. Nous associons deux plans (XZ et YZ) sur la zone symétrique du vilebrequin et deux cylindres sur les extrémités du vilebrequin permettant de recréer l'axe géométrique du vilebrequin et de le positionner par rapport au repère de calcul (Figure 76). Les opérations d'association d'entités sont réalisées dans l'atelier *Quick Surface Reconstruction* et l'opération de recalage est réalisée dans l'atelier *Digitized Shape Editor* avec l'outil « Aligner par contraintes » de *CATIA V5R20*[®]. Cette opération est réalisée

sur tous les maillages bouchés afin d'obtenir le même repère de calcul que le repère de mesure des balourds en berceau mécanique.

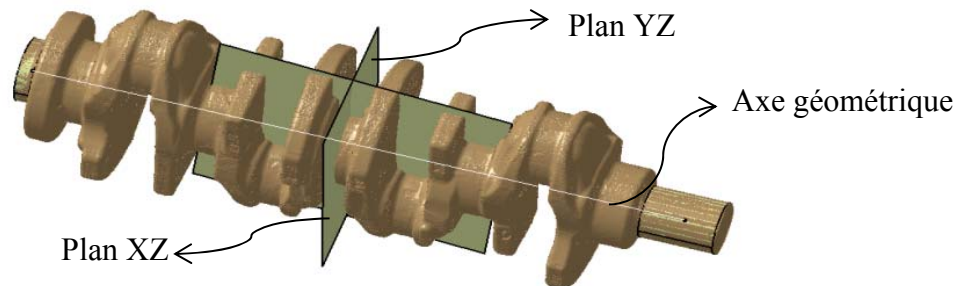


Figure 76 : Recalage du maillage grâce à des associations d'entités.

3.2. Calcul des balourds sur donnés numérisées

3.2.1. Résultats avec le système Gom

Dans le Tableau 18 nous présentons les résultats de calcul des balourds avec l'algorithme Voxel2inertia pour les 7 vilebrequins. Ces résultats sont normalisés par rapport aux valeurs maximales des balourds du groupe de vilebrequins analysé.

Les paramètres de maillage utilisés sont égaux pour les 4 typologies de vilebrequin (M9T, F9, R9M et H5Bt), soit $S_m = 1 \text{ mm}$ et $S_f = 0,06 \text{ mm}$. Cependant, la taille du voxel est proportionnelle au volume du vilebrequin. Ainsi, les tailles de voxel utilisées sont : $S_V = 0,70 \text{ mm}$, $S_V = 0,65 \text{ mm}$, $S_V = 0,60 \text{ mm}$ et $S_V = 0,55 \text{ mm}$ pour les typologies M9T, F9, R9M et H5Bt respectivement. Les résultats sont comparés aux balourds mesurés en berceau mécanique à l'usine de Cléon.

Les résultats montrent que les balourds obtenus avec le système Gom sont similaires à ceux mesurés en berceau mécanique avec une erreur maximale proche de 10% et une erreur moyenne inférieure à 5%, ce qui est compatible avec les objectifs attendus. De plus ils permettent de valider la méthode simplifiée de repositionnement du repère de mesure sur le repère de calcul. D'une façon générale, ces résultats sont prometteurs vis-à-vis de l'utilisation du système GOM couplé à la

méthode Voxel2Inertia pour l'opération d'équilibrage de vilebrequin par mesure de géométrie externe.

| N° de pièce | Modèle | Méthode de calcul | Balourd Volant (g.cm/g.cm) | Balourd pignon (g.cm/g.cm) |
|-------------|--------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | M9T | Berceau mécanique | 1,00 | 1,00 |
| 1 | M9T | Vox2inertia | 0,96 | 0,97 |
| 1 | M9T | Erreur (%) | 4,24 | 2,84 |
| 2 | F9 | Berceau mécanique | 0,67 | 0,67 |
| 2 | F9 | Vox2inertia | 0,74 | 0,63 |
| 2 | F9 | Erreur (%) | 10,41 | 5,26 |
| 3 | F9 | Berceau mécanique | 0,63 | 0,56 |
| 3 | F9 | Vox2inertia | 0,66 | 0,52 |
| 3 | F9 | Erreur (%) | 5,47 | 6,36 |
| 4 | R9M | Berceau mécanique | 0,84 | 0,47 |
| 4 | R9M | Vox2inertia | 0,85 | 0,49 |
| 4 | R9M | Erreur (%) | 1,81 | 3,56 |
| 5 | R9M | Berceau mécanique | 0,92 | 0,57 |
| 5 | R9M | Vox2inertia | 0,97 | 0,62 |
| 5 | R9M | Erreur (%) | 6,16 | 8,76 |
| 6 | H5Bt | Berceau mécanique | 0,61 | 0,22 |
| 6 | H5Bt | Vox2inertia | 0,63 | 0,22 |
| 6 | H5Bt | Erreur (%) | 3,87 | 1,44 |
| 7 | H5Bt | Berceau mécanique | 0,87 | 0,48 |
| 7 | H5Bt | Vox2inertia | 0,87 | 0,51 |
| 7 | H5Bt | Erreur (%) | 0,70 | 6,16 |

Tableau 18 : Comparaison entre les balourds normalisés mesurés en berceau mécanique et ceux calculés avec Voxel2inertia pour le système Gom.

3.2.2. Résultats avec le système Kreon

Les résultats mettent en avant un écart important sur la détermination des balourds pour le système Kreon (Tableau 19) vis-à-vis de la méthode classique. Cet écart est principalement dû aux

erreurs de recalage de trajectoires cumulées aux erreurs de recalage externe. En effet, comme nous l'avons détaillé au chapitre 2, des trous de numérisation comparables à ceux observés sur les pièces numérisées induisent une erreur sur le calcul des éléments d'inertie inférieure à 1 % (cf. § 3.2.1).

| N° de pièce | Modèle | Méthode de calcul | Balourd Volant (g.cm) | Balourd pignon (g.cm) |
|--------------------|---------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 3 | F9 | Berceau mécanique | 0,63 | 0,56 |
| 3 | F9 | Voxel2inertia | 0,38 | 0,29 |
| 3 | F9 | Erreur (%) | 39,95 | 47,53 |

Tableau 19 : Comparaison entre les balourds mesurés en berceau mécanique et calculés avec Voxel2inertia pour le système Kreon.

Afin d'améliorer la procédure, il serait nécessaire d'évaluer la part de chaque erreur de recalage sur la détermination des éléments d'inertie. Celle-ci pourrait être déterminée à partir d'une étude de sensibilité sur un modèle CAO comme effectuée au chapitre 2. Cela constitue une perspective aux travaux présentés.

Une autre approche consisterait à mettre en place un système de déplacement adapté permettant de réaliser toutes les prises de mesure dans un seul repère afin de s'affranchir des différentes étapes de recalage. Dans le prochain paragraphe nous présentons une synthèse sur les résultats obtenus avec les systèmes Gom et Kreon, ainsi que des propositions d'amélioration dans le processus de numérisation.

4. Synthèse sur les systèmes de numérisation

Les capteurs Gom et Kreon ont été préalablement validés à l'aide du protocole d'évaluation de capteurs au chapitre 3. La validation présentée dans ce chapitre prend en compte également le système de déplacement associé aux capteurs (MMT pour le système Kreon et trépied pour le système Gom).

Par rapport aux calculs des éléments d'inertie, la plupart des balourds obtenus avec le système Gom sont similaires à ceux mesurés en berceau mécanique. Néanmoins, les balourds obtenus sur les données numérisées avec le système Kreon présentent un décalage important par rapport aux balourds mesurés en ligne de production. Ce décalage peut être expliqué par les processus de recalage.

Le temps de cycle actuel pour la mesure des balourds en ligne est très restreint (42 secondes) vis-à-vis des temps de numérisation 3D constatés (plusieurs minutes voire même des heures selon la pièce). Il est donc nécessaire d'optimiser l'utilisation de la stratégie de numérisation issue de Voxel2scan afin d'atteindre un temps de numérisation cohérent avec le temps de cycle actuel.

Les systèmes de numérisation sont composés d'un capteur et d'un système de déplacement. Ce dernier influe significativement sur le temps de numérisation et parfois sur les erreurs de recalage. Les systèmes de déplacement utilisés dans nos travaux ne sont pas forcément adaptés à la numérisation de vilebrequins. Le trépied du système Gom n'est pas pilotable; la mesure n'est donc pas continue. La MMT du système Kreon est un système de déplacement piloté permettant une mesure continue pour chaque direction de vue. Néanmoins, la vitesse de déplacement de cette MMT reste faible et le volume mesurable est réduit. Le temps de numérisation d'un vilebrequin avec le système Gom est d'environ 16 minutes et celui avec le système Kreon est d'environ de 90 minutes. Ces temps de numérisation sont très élevés vis-à-vis du temps de cycle de 42 secondes imposé par la ligne de production. De ce constat, les systèmes de déplacement associés aux systèmes de numérisation Gom et Kreon utilisés ne sont pas adaptés à la numérisation des vilebrequins selon les exigences de Renault. La mise en place d'un système de déplacement adapté aux pièces de révolution est donc nécessaire afin d'atteindre le temps de cycle et la qualité souhaités.

Une des avantages de la méthode Voxel2Scan, est de fournir un ensemble réduit de points de vue capable de numériser la pièce. A partir de cet ensemble, il est possible de construire et/ou de

valider l'architecture du mécanisme permettant de réaliser au mieux la trajectoire minimale parcourant les points de vue. La construction et/ou validation de cette architecture peut être menée par des logiciels de simulation de processus robotisés tels que Robcad [ROBCAD] (Figure 77).

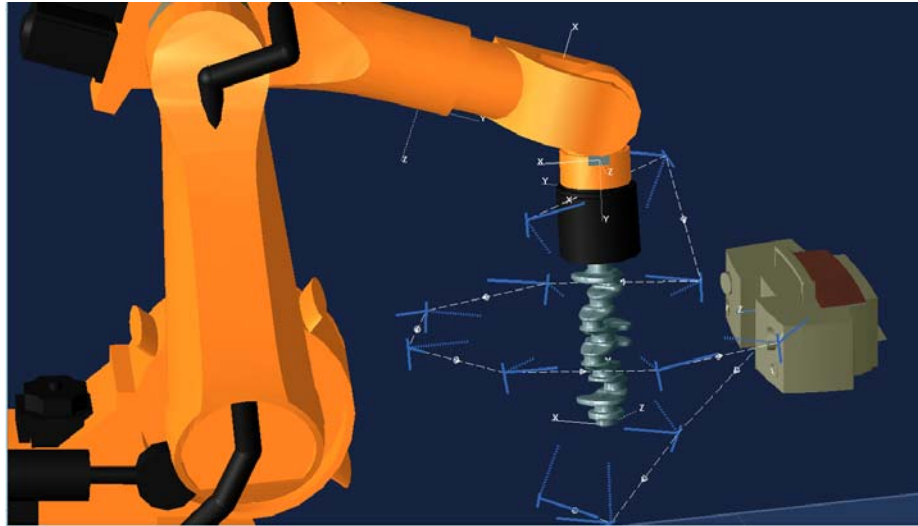


Figure 77 : Validation d'une cellule robotisée pour la numérisation avec le capteur GOM.

5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la mise en œuvre des essais sur un ensemble de vilebrequins de différents types avec deux systèmes de numérisation, Gom et Kreon. Les résultats permettent de valider l'algorithme de planification des points de vue Voxel2scan. En effet, la surface mesurée par les systèmes de numérisation est similaire à la surface prévue par l'algorithme Voxel2scan. Au final du processus de numérisation, entre 80% et 90% de la surface des vilebrequins est numérisée en moyenne, ce qui permet par la suite un calcul des balourds malgré les trous de numérisation.

Le pourcentage de surface vue pourrait être augmenté. En effet, dans notre modélisation actuelle le capteur est représenté par un point et une direction de vue. L'algorithme considère que si la source de lumière atteint le voxel, la surface incluse dans le voxel est numérisée. Or, en réalité, la numérisation ne peut s'effectuer que lorsque la surface est visible à la fois par la source lumière et

par la caméra. Le calcul pourrait être mené en considérant la visibilité source lumière et la visibilité caméra. Pour ce faire, une matrice de rotation est appliquée à tous les points de vue déterminés en tenant compte de l'angle de positionnement entre la source émettrice et la caméra. Une intersection entre les résultats issus de la visibilité source émettrice et visibilité caméras est faite pour qualifier les voxels vus (Figure 66). Cette méthode en cours de validation a pu être développée dans les travaux de Master de Zhenya Terzieva [TER 13].

Lors des calculs de balourds avec la méthode Voxel2inertia, nous constatons que les résultats sont cohérents avec le système Gom. Cependant, avec le système Kreon, il existe un écart non négligeable entre les balourds calculés par l'algorithme Voxel2inertia et les balourds mesurés en berceau mécanique. L'écart est vraisemblablement lié aux méthodes de recalage qui influencent fortement la qualité du calcul des balourds. Une étude devrait être menée afin d'évaluer l'influence respective de chacune des méthodes de recalage sur le résultat final, avec pour objectif de proposer des pistes d'amélioration.

Nous avons montré l'efficacité de notre démarche de calcul de balourds sur données discrètes avec le système de numérisation Gom. Les résultats issus de ce système couplé à la méthode Voxel2inertia sont prometteurs vis-à-vis de l'opération d'équilibrage par numérisation 3D. Cependant, les temps de numérisation sont très supérieurs au temps de cycle admissible par Renault principalement par manque d'un système de déplacement adapté. Un système de déplacement adéquat pourrait être mis en place à partir de la méthode Voxel2scan de façon à réduire le temps de mesure. En ce qui concerne le système Kreon, la mise en œuvre d'un système de déplacement dédié pourrait non seulement réduire le temps de numérisation mais en plus, nous permettrait de nous affranchir des nombreuses calibrations aujourd'hui nécessaires. Il serait ainsi possible de ne plus subir les incertitudes liées à la calibration et les erreurs induites sur la numérisation.

Un dernier point concerne l'automatisation du traitement des nuages de points avant leur exploitation par l'algorithme Voxel2inertia. Il s'agira en particulier d'améliorer les méthodes de maillage et de rebouchage de trous de numérisation.

Conclusions et perspectives

Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur la numérisation 3D d'objets de pièces mécaniques en vue de leur équilibrage. L'objectif industriel associé est de rendre flexible l'opération d'équilibrage de vilebrequins et de réduire les coûts récurrents à la fois aux moyens de contrôle et à leur maintenance. Actuellement la mesure des balourds est réalisée dans des berceaux mécaniques de mesure dynamique qui sont des instruments de mesure complexes et onéreux, nécessitant une maintenance régulière. De plus, ces machines de mesure sont dédiées à une typologie et à une géométrie unique de vilebrequin. Ainsi nous proposons une méthode générique permettant de calculer les éléments d'inertie et les balourds des pièces quelle que soit leur géométrie. L'idée originale proposée est le calcul des balourds directement à partir d'une représentation 3D de la géométrie de la surface des vilebrequins et non plus par la mesure des effets des masses non équilibrées. Pour ce faire, nous utilisons des moyens de mesure optiques permettant la numérisation 3D de différentes typologies et géométries de vilebrequin.

Au travers de ces travaux, nous avons mis en évidence que la détermination de grandeurs volumiques à partir d'une représentation discrète de la géométrie externe du vilebrequin met en avant deux problématiques distinctes, l'une relative au calcul des grandeurs volumiques et l'autre en relation avec la sélection du système et de la stratégie de numérisation 3D délivrant des données dont la qualité est suffisante.

La première problématique liée à l'utilisation de la numérisation 3D dans le cadre de l'équilibrage de vilebrequins consiste en un calcul d'éléments d'inertie sur données discrètes représentatives de la surface de l'objet. Nous proposons une méthode de calcul des éléments d'inertie, appelée *Voxel2inertia*, basée sur une représentation sous forme d'une *voxelmap* des données. L'algorithme, implémenté sous *MATLAB*[®], permet de structurer les données numérisées afin de recréer une pseudo-continuité du volume nécessaire pour le calcul des éléments d'inertie. Une étude de sensibilité de l'algorithme aux défauts de numérisation est également proposée conduisant à déterminer le niveau de qualité admissible des données d'entrée vis-à-vis des exigences

d'équilibrage. Cette qualité est exprimée en termes de paramètres admissibles (bruit, justesse relative) qui servent de support à la sélection des systèmes de numérisation adaptés à l'opération d'équilibrage.

Le choix d'un système de numérisation 3D cohérent vis-à-vis des paramètres admissibles constitue un verrou vis-à-vis de l'équilibrage par numérisation 3D. Nous avons proposé de tester différentes technologies de numérisation au travers d'un protocole de qualification basé sur les indicateurs de qualité issus du protocole QualiPSO proposé par Audfray [AUD 12b] (bruit et justesse de mesure). De nouveaux indicateurs associés à la complexité géométrique des vilebrequins (angle d'étendue mesurée, densité surfacique et fraction d'aire mesurée) ont été définis afin d'améliorer l'identification des systèmes admissibles vis-à-vis de l'opération d'équilibrage. Le protocole a ainsi permis de sélectionner les systèmes adaptés parmi les différents systèmes testés.

En plus des aspects liés à la qualité des données numérisées, un aspect important à prendre également en compte concerne le temps total de numérisation qui doit être en dessous du temps de cycle de la ligne de production. De ce fait, il est nécessaire d'élaborer une stratégie de numérisation permettant d'optimiser le temps de mesure.

Nous proposons une méthode originale de planification de trajectoires générique et applicable à tout type de capteur de numérisation 3D sans contact et de pièce. Cette méthode, *Voxel2scan*, est basée sur une modélisation de la surface par voxels dont la taille est définie en fonction de la taille de la fenêtre de vue du capteur. A chaque voxel, une direction de vue est associée, selon des critères de visibilité et de qualité. La distance de numérisation optimale définit la position du point de vue. L'algorithme *Voxel2scan*, implémenté sous *MATLAB*[®], conduit alors à déterminer un nombre réduit de points de vue permettant la numérisation de la pièce avec une qualité donnée afin d'optimiser le temps de mesure. La stratégie de numérisation permet d'apporter des informations pour le choix ou la conception d'un système de déplacement. La définition d'un système de numérisation complet

(capteur et système de déplacement) répondant aux exigences d'équilibrage de vilebrequins peut être ainsi proposée.

Nous avons validé les algorithmes *Voxel2scan* et *Voxel2inertia* à l'aide de la numérisation de 3 typologies de vilebrequins (M9T, F9 et R9M) avec deux systèmes différents (Gom et Kreon). La surface mesurée des vilebrequins est similaire à la surface vue par l'algorithme *Voxel2scan*. Concernant l'algorithme *Voxel2inertia*, les balourds calculés à partir des données issues du système Gom sont proches des balourds mesurés en ligne de production. Il existe un écart important entre les balourds calculés à partir des données issues du système Kreon par rapport aux balourds mesurés en ligne de production probablement en relation avec les méthodes de recalage non optimales utilisées dans nos travaux. Cependant, nous pouvons conclure que la démarche de calcul de balourds proposée sur données discrètes est robuste et que le système Gom est acceptable par rapport au niveau de qualité souhaitée. Néanmoins, chacun des systèmes de déplacement associés aux capteurs testés ne semblent pas optimaux vis-à-vis de l'opération d'équilibrage de vilebrequins. En effet, ils ne permettent pas la numérisation complète des vilebrequins dans le temps de cycle contraint de la ligne de production.

Nous pouvons finalement faire le bilan des principales contributions de cette thèse :

- La proposition d'une démarche d'équilibrage de vilebrequins basée sur la mesure de géométrie par numérisation 3D ;
- La définition d'une méthode de calcul des éléments d'inertie d'un solide à partir de données discrètes issues de numérisation et représentative de la géométrie de la surface des pièces ;
- La définition d'un protocole d'évaluation de systèmes de numérisation 3D sans contact en lien avec les besoins industriels de l'équilibrage de vilebrequins ;
- La définition d'une méthode générique (pour tout type de capteur de numérisation 3D sans contact) de détermination d'un ensemble de points de vue réduit pour la numérisation de pièces ;

- La définition des trajectoires de numérisation adaptées au système de numérisation à partir des points de vue.

Si la validation scientifique des méthodes proposées est effective, il reste cependant un ensemble d'améliorations à apporter à nos travaux, en particulier concernant la partie industrialisation de la démarche. Un des premiers axes d'amélioration pourrait être la conception d'un système de déplacement assurant le temps de cycle donné et permettant l'expression directe des données dans un même repère. Ceci réduirait fortement les erreurs induites par le recalage des données numérisées. Cette conception d'architecture de mécanisme serait facilitée par la méthode *Voxel2scan* mise en place, cette dernière permettant d'exprimer l'ensemble des points de vue nécessaire à la numérisation complète de la pièce.

Un deuxième axe pourrait concerner le traitement des données numérisées, essentiellement le bouchage des trous de numérisation qui est réalisé manuellement à ce jour. Une voie d'amélioration serait donc de rendre automatique cette opération. Elle pourrait être réalisée grâce des algorithmes de *morphing* basés sur un maillage issu de la maquette numérique du vilebrequin. Les trous de numérisation pourraient ainsi être éliminés et la qualité du maillage obtenu serait la même que celle du maillage de base utilisé.

Enfin, il nous semble pertinent pour une application en ligne de production, d'assembler les algorithmes de traitements des données à l'algorithme *Voxel2inertia*. Ceux-ci doivent en plus communiquer avec le centre d'usinage permettant de matérialiser les trous de centrage par rapport aux balourds calculés.

Références

Bibliographie

- [AME 01] N. Amenta, S. Choi & R. K. Kolluri, *The power crust, unions of balls, and the medial axis transform*, Computational Geometry19, pp.127-153, 2001.
- [AUD 12a] N. Audfray, C. Mehdi-Souzani, C. Lartigue, *Assistance to automatic digitizing system selection for 3d part inspection*, ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design And Analysis, ESDA2012, Nantes (France), CDRom paper N°82319, 10 p., July 2012.
- [AUD 12b] Nicolas Audfray, Charyar Mehdi-Souzani, Claire Lartigue, *Qualification et Performances des Systèmes de mesure Optiques QualiPSO*, Journée 3DSC 2012, Cachan.
- [AUD 12c] N. Audfray, C. Mehdi-Souzani, C. Lartigue, *Qualification et Performances des Systèmes de mesure Optiques QualiPSO*, Journée 3DSC 2012, Cachan.
- [AUD 12d] Nicolas Audfray, *Métrieologie 3D automatique multi-systèmes basée sur l'utilisation de systèmes de mesure sans contact*, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 17 décembre 2012.
- [AZE 04] S. Azernikov, *Efficient surface reconstruction method for distributed CAD*, 2003, Computer-Aided Design 36 (2004) 799–808.
- [BAR11] Basilio Ramos Barbero, Elena Santos Ureta, *Comparative study of different digitization techniques and their accuracy*, Computer-Aided Design, Volume 43(2), pp. 188- 206, 2011.
- [BEC 00] E. Béchet, J.-C. Cuilliere, F. Trochu, *Generation of a finite element mesh from stereolithography files*, Computer Aided Desing, Volume 34, 1-17, 2002.
- [BER 99] A. Bernard, M. Michel, *Analysis and Validation of 3D Laser Sensor Scanning Process*, Annales du CIRP, Volume 48(1), 1999.

- [BIG 79] R. Bigret, *Réduction des forces et des amplitudes de vibration des machines tournantes par balourds correcteurs Equilibrage par calculs automatiques*, Techniques de l'ingénieur (B808), 1979.
- [BIS 05a] S. Bischoff, L. Kobbelt, *Structure preserving CAD model repair*, Computer Graphics Forum, Volume 24(3), pp. 527–36, 2005.
- [BIS 05b] S. Bischoff, D. Pavic, L. Kobbelt, *Automatic restoration of polygon models*, ACM Trans Graph, Volume 24(4), pp. 1332–52, 2005.
- [BOU 05a] P. Bourdet, F. Thiébaud, C. Lartigue, P. Breteau, *Evaluation des performances la mesure par capteur optique sur machine à mesurer tridimensionnelle*, Actes de : 12ème Congrès International de Métrologie, pp. 183-189, Lyon, France, 20-23 juin 2005.
- [BOU 06] P. Boujon, *Procédé d'équilibrage dynamique de vilebrequins*, Brevet EP06300854.4, 3 août 2006.
- [BRA 95] G. Barequet, M. Sharir, *Filling gaps in the boundary of a polyhedron*, Computer Aided Geometric Design, Volume 12(2), pp. 207–29, 1995.
- [CAR 01] J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum, *Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions*, SIGGRAPH'01 Proceedings of the 28th annual conference on computer graphics and interactive techniques, pp. 67–76, 2001.
- [CHA 04a] J.L. Charron, *Mesure sans Contact : Méthodes Optiques (partie 1)*, Techniques de l'ingénieur : Mesures et Contrôle, (R1335) :16, 2004.
- [CHA 04b] J.L. Charron, *Mesure sans Contact : Méthodes Optiques (partie 2)*, Techniques de l'ingénieur : Mesures et Contrôle, (R1333) :19, 2004.
- [CHA 08] M. Chang, S. C. Park, *Reverse engineering of a symmetric object*, Computers & Industrial Engineering, Vol. 55, 2008, pp. 311–320.

- [CHE 05] C.-Y. Chen, K.-Y. Cheng, H. Y. M. Liao, *A sharpness dependent approach to 3d polygon mesh hole filling*, Proceedings of the Eurographics 05', Volume 29, pp. 13–6, 2005.
- [CHE 08] C.-Y. Chen, K.-Y. Cheng, *A sharpness-dependent filter for recovering sharp features in repaired 3D mesh models*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Volume 14(1), pp. 200–212, 2008.
- [CON 01] A. Contri, C. Lartigue, *Une méthode d'évaluation des incertitudes de mesure de surfaces complexes par moyens optiques*, Colloque national Primeca, La plagne (France), 2001.
- [CON 02a] A. Contri, P. Bourdet, C. Lartigue, *Quality of 3D digitised points obtained with non-contact optical sensors*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 51(1), 2002, pp. 443 – 446.
- [CON 02b] A. Contri, *Qualité géométrique de la mesure de surfaces complexes par moyens optiques*, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 28 novembre 2002.
- [COS 10] P. B. Costa, F. R. Leta, *Measurement of the aperture area: an edge enhancement algorithms comparison*, IWSSIP 2010 - 17th International Conference on Systems, Signals and Image Processing, 2010.
- [CRI 98] J. J. Crisco, R.D McGovern, *Efficient calculation of mass moments of inertia for segmented homogenous three-dimensional objects*, Journal of Biomechanics, Vol. 31, 1998, pp. 97-101.
- [CUI 98] J. C. Cuillière, *An adaptive method for the automatic triangulation of 3D parametric surfaces*, Computer-Aided Design, Volume 30(2), pp. 130-149, 1998.
- [DAO 10] L. Daoud, *Etude de la capacité de la photogrammétrie sans cibles pour la mesure de tuyauteries*, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2010.

- [DAP 07] N. D'Apuzzo, *3D body scanning technology for fashion and apparel industry*, Proceedings of SPIE IS&T Electronic Imaging, Volume 6491, page 64910, San José, CA, USA. SPIE, 2007.
- [DAV 02] J. Davis, S. Marschner, M. Carr, M. Levoy, *Filling-holes in complex surfaces using volumetric diffusion*, First International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, pp. 428–38, 2002
- [DER 07] W. Derigent, E. Chapotot, G. Ris, S. Remy, A. Bernard, *3D digitizing strategy planning approach based on a CAD model*, Journal of Comput. Inf. Sci. Eng., Volume 7, pp. 10-20, 2007
- [FOU 06] M. Fournier, J.-M. Dischler, D. Bechmann, *Filtrage adaptatif des données acquises par un scanner 3d et représentées par une transformée en distance volumétrique*, Gonzato, J.-C. and Jessel, J.-P., editors, Journées AFIG, Bordeaux, 2006.
- [FRA 00] V. François, J. C. Cuilliere, *Automatic mesh pre-optimisation based on the geometric discretization error*, Advances in Engineering Software, Volume 31, pp. 763-774, 2000.
- [FRE 03] P. J. Frey, *Génération et adaptation de maillages de surfaces à partir de données anatomiques discrètes*, Rapport de Recherche INRIA n° 4764 thème 4, 11 mars 2003.
- [GOM] GOM - Société de Mesures par Méthodes Optiques : www.Gom.com.
- [HET 11] F. Hétroy, S. Rey, C. Andujar, P. Brunet, Vinacua, *Mesh repair with user-friendly topology control*, Computer Aided Design, Volume 43(1), pp.101–13, 2011.
- [HOP 92] H. Hoppe, H. De Rose, T. Duchamp, T. Mc Donald, W. Stuetzle, *Surface reconstruction from unorganized points*, Computer Graphics, vol. 26(2) : 71-78, 1992.
- [HUA 08] Q. Huang, B. Adams, M. Wicke, L.J. Guibas, *Non-Rigid Registration Under Isometric Deformations*, Eurographics Symposium on Geometry Processing, Volume 27 (2008), Number 5, 2008.

- [JON 96] M. W. Jones. *The Production of Volume Data from Triangular Meshes using Voxelisation*, Computer Graphics Forum, Vol. 15(5), 1996, pp. 311–318.
- [JU 04] T. Ju, *Robust repair of polygonal models*, ACM Trans Graph, Volume 23(3), pp. 888–95, 2004.
- [JUN 05] Y. Jun, *A piecewise hole filling algorithm in reverse engineering*, Computer-Aided Design, Volume 37(2), pp. 263–70, 2005.
- [KAZ 10] M. Kazhdan, M. Bolitho, H. Hoppe, *Poisson Surface Reconstruction*, Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2006.
- [KOE 79] J. J. Koenderink and A. J. van, *The internal representation of solid shape with respect to vision*, Biol. Cybern, volume 32, pp. 151-158, 1979.
- [KREON] Kreon : www.kreon.fr.
- [LAR 02] C. Lartigue, A. Contri, P. Bourdet, *Digitised point quality in relation with point exploitation*, Measurement, Vol. 32(3), 2002, pp. 193-203.
- [LAR 04] C. Lartigue, P. Bourdet, *Qualité des données issues de numérisation 3D : sources d'imprécision et qualification*, 10èmes Assises Européennes de Prototypage Rapide, 14 & 15 septembre 2004.
- [LAR 08] S. Larsson, J. A. P. Kjellander, *Path planning for laser scanning with an industrial robot*, Robotics and Autonomous Systems, Volume 56, pp. 615–624, 2008.
- [LAR 13] C. Lartigue, Y. Quinsat, C. Mehdi-Souzani, A. Zuquete-Guarato, S. Tabibian, *Voxel-based path planning for 3D scanning of mechanical parts*, International Conference CAD'13, Bergame, Italie, 17-20 juin 2013.
- [LAT 08] J.-P. Latham, A. Munjiza, X. Garcia, J. Xiang, R. Guises, *Three-dimensional particle shape acquisition and use of shape library for DEM and FEM/DEM simulation*, Minerals Engineering, Vol. 21, 2008, pp. 797–805.

- [LIC 03] M. D. Lichter, S. Dubowsky, *Estimation of state, shape, and inertial parameters of space objects from sequences of range images*, Actes de Intelligent Robots and Computer Vision XXI: Algorithms, Techniques, and Active Vision, Vol. 5267, 2003.
- [LIU 09a] Y.-S. Liu, K. Ramanian, *Robust principal axes determination for point-based shapes using least median of squares*, Computer-Aided Design, Vol. 41(1), 2009, pp. 293-305.
- [LIU 09b] B. Liu, N. Shangguan, K. Jiang, J. Lin, *Triangular mesh model reconstruction from scan point clouds based on template*, Tsinghua Science and Technology ISSN 1007-0214 09/38 p. 56-61 Volume 14 Number S1, 2009.
- [LOR 87] W. E. Lorensen, H. E. Cline, *Marching cubes : a high resolution 3D surface construction algorithm*, Computer Graphics, Volume 21(4), pp. 163-169, 1987.
- [LOR 08] B. Loriot, R. Seulin, P. Gorria, *Non-Model Based Method for an Automation of 3D Acquisition and Post-Processing*, Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis, Volume 7(3), pp. 67-82, 2008.
- [LOR 09] B. Loriot, *Automatisation de l'Acquisition et des Post-traitements en Numérisation 3D*, Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 2009.
- [MAH 11] M. Mahmud, D. Joannic, M. Roy, A. Isheil, J.-F. Fontaine, *3D part inspection path planning of laser scanner control on the uncertainty*, Computer-Aided Design, Volume 43, pp. 245-355, 2011.
- [MAR 03] C. Marchessoux, *Système d'acquisition 3D pour le pied humain*, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 12 décembre 2003.
- [MAR 05] F. A. R. Martins, J.G. Garcia- Bermejo, E. Z Casanova, J. R. Peran-Gonzalez, *Automated 3D surface scanning based on CAD model*, Mechatronics, Volume 15, pp. 837-857, 2005.

- [MAR 10] S. Martinez, E. Cuesta, J. Barreiro, B. Alvarez, *Methodology for comparison of laser digitizing versus contact systems in dimensional control*, Optics and Lasers in Engineering, Volume 48, pp. 1238-1246, 2010.
- [MAS 98] N. Massios, R. Fisher, *A best next view selection algorithm incorporating a quality criterion*, Proceedings of British Machine Vision conference, Southampton (England), pp. 780-789, 1998.
- [MEH 06a] C. Mehdi-Souzani, F. Thiebaut, C. Lartigue, *Scan planning strategy for a general digitized surface*, Journal of Computing & Information Science in Engineering, ASME International, Vol. 6, Issue 4, pp. 331-339, 2006.
- [MEH 06b] C. Mehdi-Souzani, *Numérisation 3D intelligente d'objets de formes inconnues basée sur des critères de qualité*, Thèse de Doctorat, ENS Cachan, 30 juin 2006.
- [NOO 03] F. S. Nooruddin, G. Turk, *Simplification and repair of polygonal models using volumetric techniques*, Computer Graphics, Volume 9(2), pp. 191–205, 2003.
- [NOOME0] Noomeo - 3D made easy : www.noomeo.eu.
- [OST 98] G. Osty, C. Lartigue, *Partition of 3D digitised data for CAD modelling*, International Journal of CAD/CAM and Computers Graphics, Vol. 13(4-6), 1998, pp 263-272.
- [OST 02] G. Osty, *Extraction de particularités géométrique sur données discrètes issues de la numérisation : partitionnement de grand nuage de points*, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieur de Cachan, 10 janvier 2002.
- [PAN 10] M. Panchetti, J.-P. Pernot, P. Véron, *Towards recovery of complex shapes in meshes using digital images for reverse engineering applications*, Computer-Aided Design, Volume 42(8), pp. 693–707, 2010.
- [PAP 97] D. Papadopoulos, *Numérisation géométrique automatique à l'aide d'un capteur 3D de précision à profondeur de champ réduite*, thèse de doctorat, ENST, 14 février 1997.

- [PAT 05] S. Patil, B. Ravi, *Voxel-based representation, display and thickness analysis of intricate shapes*, Actes de: Ninth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics, 2005.
- [PER 06] J.-P. Pernot, G. Moraru, P. Véron, *Filling holes in meshes using a mechanical model to simulate the curvature variation minimization*, Computer Graphics, Volume 30(6), pp. 892–902, 2006.
- [PRI 99] F. Prieto, *Métrie assistée par ordinateur : Apport des capteurs 3D sans contact*, Thèse de doctorat, INSA, Lyon, 13 décembre 1999.
- [PRI 00] F. Prieto, T. Redarce, P. Boulanger, R. Lepage, *Accuracy Improvement of contactless sensor for dimensional inspection of industrial parts*, International Journal of CAD/CAM - Rapid Production, Volume 15, pp. 345-366, 2000.
- [PUE 96] C. Puech, R. Reischuk, *A characterization of the quadrilateral meshes of a surface which admit a compatible hexahedral mesh of the enclosed volume*, STACS 96, Springer Berlin / Heidelberg, 1046, 465-476, 1996.
- [PUG 97] J.-M. Pugnet, *Equilibrage des rotors rigides et flexibles*, Techniques de l'ingénieur (BM5130), 1997.
- [RAF 13] R. Raffaelli, M. Mengoni, M. Germani, *Context dependent automatic view planning: the inspection of mechanical components*, Computer-Aided Design & Applications, Volume 10(1), pp. 111-127, 2013.
- [REM 04] S. Rémy, *Contribution à l'automatisation du processus d'acquisition de formes complexes à l'aide d'un capteur laser plan en vue de leur contrôle géométrique*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Nancy, 25 juin 2004.
- [ROBCAD] www.plm.automation.com/fr_fr/products/tecnomatix/robotics_automation/rocad
- [SAV 07] E. Savio, L. De Chiffre et R. Schmitt, *Metrology of freeform shaped parts*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 56(2), pp. 810-835, 2007.

- [SCH 99] R. Schwarte, *Principle of 3D imaging techniques*, Jähne B, Haussecker H, Geissler P, editors. Handbook of computer vision and applications. Academic Press, 1999.
- [SCO 05] W. Scott, *Model-based view planning*, Technical report, National Research Council of Canada, 2005.
- [SHA98] Craig M. Shakarji, *Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system*, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 103(6), pp. 633-641, novembre 1998.
- [SOL 02] O. Soldea, G. Elber, E. Rivlin, *Exact and efficient computation of moments of free-form surface and trivariate based geometry*, Computer-Aided Design, Vol. 34, 529-539, 2002.
- [SON 02] S. Son, H. Park, K. H Lee, *Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 42, pp. 889-897, 2002.
- [STE 87] Steinbichler (1987). <http://www.steinbichler.com>, Neubeuern, Germany.
- [SUB 06] K. Subburaj, S. Patil, B. Ravi, *Voxel-based thickness analysis of intricate objects*, International Journal of CAD/CAM, Volume 6, Numéro 1, 2006.
- [SUL 97] J. M. Sullivan, G. Charron, K. D. Paulsen, *A three-dimensional mesh generator for arbitrary multiple material domains*, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 25, pp. 219-241, 1997.
- [TER 13] Z. Terzieva, *Stratégie de numérisation 3D dans le contexte d'automatisation de la mesure de pièce mécanique automobile*, Mémoire de master de sciences et technologies, Université Pierre et Marie Curie, 13 septembre 2013.
- [TON 01] Hans Kurt Tönshoff et Ichiro Inasaki, *Sensors in Applications : Volume One ; Sensors in Manufacturing*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2001.

- [TUZ 03] A. V. Tuzikov, O. Colliot, I. Bloch, *Computation of volume and surface body moments*, Pattern Recognition Letters, Volume 36, pp. 2521-2529, 2003.
- [VER 98] J. S. M. Vergeest, J. W. H Tangelder, I. Horváth, Z. Zovács, G. Kuczogi, *Machining large complex shapes using a 7 DOF tool*, IFIP SSM, Chrysler Technical Center, 9-11 November 1998
- [VOW 98] V. Wowk, *Machinery vibration: balancing*, McGraw-Hill Professional, USA, 1998.
- [XI 99] F. Xi, C. Shu, *CAD-based path planning for 3-D line laser scanning*, Computer-Aided Design, Volume 31, pp. 473-479, 1999.
- [WAN 12] X. Wang, X. Liu, L. Lu, B. Li, J. Cao, B. Yin, X. Shi, *Automatic hole-filling of CAD models with feature-preserving*, Computers & Graphics, Volume 36, pp. 101–110, 2012.
- [WEC 09] A. Weckenmann, X. Jiang, K.-D. Sommer, U. Neuschaefer-Rube, J. Seewig, L. Shaw, T. Estler, *Multisensor data fusion in dimensional metrology*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 58, pp. 701–721, 2009.
- [ZHA 10] H. Zhao, *Multisensor Integration and Discrete Geometry Processing For Coordinate Metrology*, Thèse de Doctorat, ENS Cachan, 18 Janvier 2010.
- [ZUQ 12a] A. Zuquete-Guarato, Y. Quinsat, C. Mehdi-Souzani, C. Lartigue, *Détermination de la qualité de numérisation pour l'équilibrage de vilebrequins*, 13^{ème} Colloque National AIP PRIMECA, Mars 2012.
- [ZUQ 12b] A. Zuquete-Guarato, C. Mehdi-Souzani, Quinsat, C. Lartigue, L. Sabri, *Towards a new concept of in-line crankshaft balancing by contact less measurement: process for selecting the best digitizing system*, 11th Biennial Conference on Engineering Systems and Design Analysis, ESDA2012, Nantes (France), CD Rom paper N°82166, 9 p., Juillet 2012.

Normes

- [E41.36.419.R] Moyens de production. Agrément capabilité des moyens de mesure. Equilibrage dynamique de vilebrequins, PEGI - Renault, 1998.
- [NFE90-600] AFNOR. Vibrations et chocs mécaniques. Critères d'équilibrage des rotors en état rigide. NF E90-600. Paris : AFNOR 1985.
- [NFE90-601] AFNOR. Vibrations et chocs mécaniques. Machines à équilibrer. Description, caractéristiques et possibilités. NF E90-601. Paris : AFNOR 1986.
- [NFE90-602] Vibrations et chocs mécaniques. Vocabulaire de l'équilibrage. NF E90-602. Paris : AFNOR 1984.
- [VIM] Vocabulaire International de Métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés, JCGM 200:2008 (E/F), 2008.

Annexes

A. Capteurs de numérisation 3D

Dans cet annexe nous présentons deux technologies de système de numérisation basées sur le principe de la triangulation afin d'extraire les données 3D d'un objet. La détermination des coordonnées 3D est faite grâce à l'intersection de deux droites : la première entre le point mesuré et la source de lumière et la deuxième qui est définie entre le point mesuré et le détecteur (Figure 78a). L'incertitude du système de mesure est améliorée par l'ajout d'une deuxième caméra (Figure 78b). La triangulation se fait alors entre les deux caméras et la source de lumière. Au lieu d'une ligne, la source de lumière de certains systèmes peut projeter un plan laser ou bien une lumière structurée.

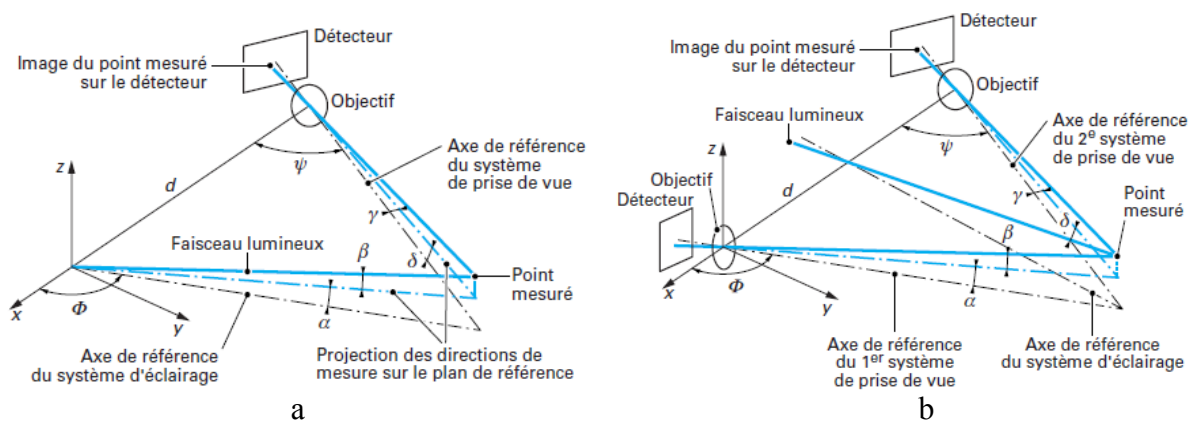


Figure 78 : Triangulation pour (a) un système à un détecteur et (b) un système à deux détecteurs [CHA 04a]

La mesure de la position des points éclairés est réalisée à l'aide d'un objectif et d'un détecteur optique qui peut être une cellule à effet latéral (PSD) linéaire ou surfacique ou un détecteur CCD linéaire ou surfacique. Les caméras CCD, de l'anglais *charge-coupled device*, sont des détecteurs qui assurent la conversion d'un signal lumineux en un signal électrique. Chaque pixel de leur matrice correspond à un élément semi-conducteur en sandwich dans un

condensateur électrique. Un photon incident crée un photoélectron, lorsqu'il apporte à un électron du matériau semi-conducteur l'énergie nécessaire pour franchir le seuil énergétique (gap). Les informations sont stockées dans le puits de potentiel qu'est le pixel convenablement polarisé.

A partir de la géométrie du système de mesure, de la position et de l'orientation de l'émetteur et de(s) détecteur(s), les coordonnées du point mesuré sont calculées avec les équations suivantes :

$$x = \frac{d \tan(\gamma + \psi)}{\tan(\alpha + \phi) - \tan(\gamma + \psi)} \quad (30)$$

$$y = \frac{d}{\tan(\alpha + \phi + \pi/2) - \tan(\gamma + \psi + \pi/2)} \quad (31)$$

$$z = \tan\beta \sqrt{x^2 + y^2} \quad (32)$$

Avec :

d : distance entre le dispositif de projection de faisceaux lumineux et le système de prise de vue,

Φ : direction de l'axe de référence du système d'éclairage,

Ψ : direction de l'axe du système de prise de vue,

α , β et γ : angles qui varient en fonction de la position du point mesuré.

Dans les prochains paragraphes nous présentons deux systèmes de numérisation basés sur la triangulation. Le premier est un système à laser plan avec une caméra CCD et le deuxième est un système à lumière structurée et deux caméras CCD.

1. Système de numérisation Kreon Zephyr KZ25

Le système de numérisation de la société Kreon est composé d'un capteur Zephyr KZ25 monté sur un système de déplacement du type machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). Afin d'augmenter les possibilités de positionnement relative entre le capteur et l'objet à numériser, la liaison entre le capteur et la MMT est réalisé grâce à une tête pivotante PH10 Renishaw. Cette dernière permet l'orientation du capteur selon deux angles (A et B). Le système de déplacement, composé de la MMT et de la tête PH10, a ainsi 5 degrés de liberté.

Le capteur Zephyr KZ25 numérise grâce à un plan laser et une caméra CCD. L'émetteur projette un faisceau laser qui passe par une série de lentilles cylindriques permettant de modifier le faisceau en plan laser. L'intersection entre ce plan et la surface de l'objet à numériser résulte en une ligne, appelée ligne de numérisation, qui est composée d'une multitude de points. La triangulation est réalisée entre ces points sur la surface de l'objet, l'émetteur (laser) et le détecteur (caméra CCD). Dans le cas du capteur KZ25 la largeur de cette ligne vaut 25 mm au maximum par rapport à la distance de numérisation autorisée. La numérisation nécessite un travail préalable de calibration du capteur. Chaque orientation envisagée lors de la numérisation appelle une calibration dédiée à réaliser. La calibration consiste en la mesure d'un artefact (sphère de calibration certifiée) dont la géométrie et les dimensions sont connus. Cette calibration permet de définir les paramètres externes liés à la position et l'orientation du capteur par rapport au repère de la MMT nécessaires pour pouvoir exprimer chaque nuage de points dans un seul et même repère. Les points 3D de l'objet sont exprimés dans un repère centré sur la sphère de calibration.

Le système de numérisation KZ25 peut mesurer plusieurs types de surfaces à conditions qu'elles ne soient pas trop brillantes, trop opaques ou transparentes car, de manière

générale, il y a une interaction entre la source de lumière et la matière qui compose la surface de l'objet à numériser.

Selon les données constructeur, la « précision » du KZ25 est de $15 \mu\text{m}$ et la largeur L_{opt} de la ligne laser est de 25 mm [KREON]. La profondeur optimale de mesure P_{opt} est de 50 mm, la distance morte d_{morte} , dans laquelle le capteur ne peut pas mesurer, vaut 90 mm et la vitesse de mesure, 30000 points par seconde (Figure 79). Il faut noter que le constructeur n'informe pas à quoi correspond le terme « précision » ni comment ce paramètre est évalué.

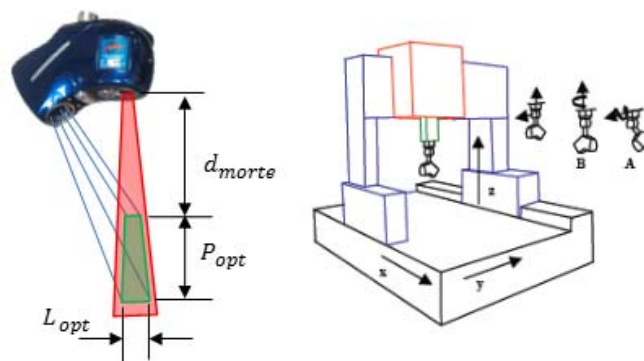


Figure 79 : Capteur Kreon avec fenêtre de mesure (à gauche) et la MMT sur laquelle il est monté [MEH 06b].

La calibration du système Kreon est réalisée grâce à la mesure de sphères calibrées dont la position est connue dans la MMT. Chacune des orientations nécessite une calibration. Une portion suffisamment grande de la sphère doit être numérisée afin que son centre puisse être déterminé et que la calibration soit réalisée.

Les dimensions du capteur KZ25 sont 150 mm de largeur, 70 mm de hauteur et 55 mm de profondeur et le poids vaut 360 g. Cela rend le déplacement de ce capteur très facile permettant l'approche du capteur sur des zones d'accès difficile de la pièce.

2. Système de numérisation Gom Atos III

Le système de numérisation Gom Atos III est composé d'une source émettrice de lumière bleue et deux caméras CCD (Figure 80). Le deuxième détecteur permet de compenser les variations des propriétés optiques de la surface mesurée et d'améliorer la qualité de la mesure [CHA 04a]. La distance et l'angle entre les caméras peuvent être modifiés selon la taille de l'objet à numériser.

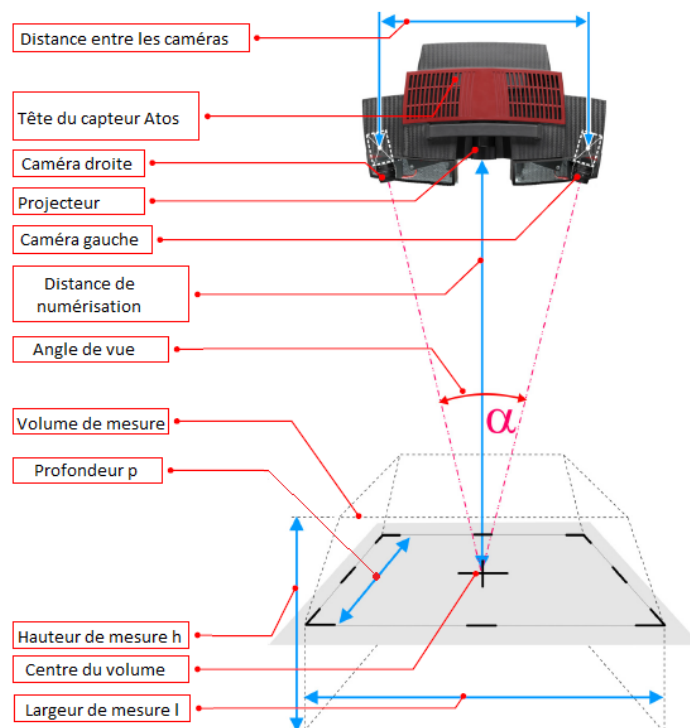


Figure 80 : Système de numérisation Gom et la fenêtre de mesure.

Le principe de la mesure est similaire à celui du Kreon, par triangulation. Cependant, l'intersection du motif projeté sur la pièce est 2D et non plus linéaire. La lumière projetée est porteuse d'informations géométriques en forme de franges de différentes épaisseurs. Ce système de mesure projette une lumière bleue (longueur d'onde entre 446 et 520 nm) au lieu d'une lumière blanche (comme couramment rencontré sur d'autres systèmes à lumière

structurée), permettant une réduction de l'interférence de la lumière ambiante lors de la numérisation.

Le relief de la surface de l'objet modifie les caractéristiques de la lumière projetée. Durant chaque prise, des franges de différente épaisseur sont projetées sur la surface. L'image de la réflexion recueillie est alors composée d'un ensemble de pixels dont le niveau de gris est fonction des franges projetés et de la distance entre le point mesuré et chacun des récepteurs. L'analyse de ces niveaux de gris couplé à la triangulation (sur chaque point mesuré) permet de déduire les coordonnées des points de la surface. Il est possible de mesurer quelques millions de points en simultanée sur une étendue de surface important par rapport aux capteurs à laser plan.

Le recalage des prises de mesure est fait grâce à des cibles de positionnement qui doivent être collées sur la pièce et / ou sur l'environnement autour de la pièce (à condition que la position entre les cibles et la pièce reste inchangeable pendant la mesure). Au moins 4 cibles de positionnement doivent être vues par les caméras afin que le recalage soit réalisé (Figure 81).

La fenêtre de mesure du capteur Gom présente une forme de pyramide tronquée. Le volume de mesure peut varier de $0,0029 m^3 (h \times l \times p; 0,17 \times 0,13 \times 0,13)$ à $1,92 m^3 (h \times l \times p; 1,5 \times 1,13 \times 1,13)$ (Figure 80). Pour la première configuration la distance entre les points mesurés est 0,62 mm et dans la dernière configuration, cette distance est 0,07 mm. Selon la configuration, la « précision » de mesure peut varier entre 40 μm et 100 μm d'après les données constructeur. La grande fenêtre de mesure de ce capteur lui permet de numériser des petits objets en une seule prise.

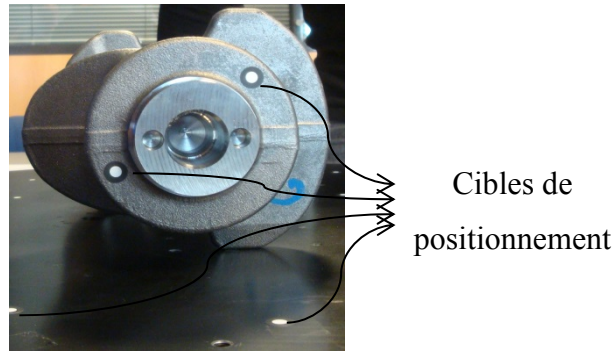


Figure 81 : Cibles de positionnement collées sur le vilebrequin et sur la surface de posage.

Le capteur Gom est monté sur un support (ou trépied) non pilotable mais avec lequel la position et l'orientation peuvent être modifiés. La calibration du système est faite grâce à la mesure d'un panneau doté de cibles et permet d'obtenir les paramètres nécessaires pour la triangulation qui sont susceptibles de changer en fonction de la variation de l'angle des caméras et / ou de la distance entre caméras (Figure 82).



Figure 82 : Calibration du système Gom à l'aide d'un panneau doté de cibles.

Le grand avantage de ce système est le grand champ de mesure qu'il possède. Les motifs projetés en 2D permettent une mesure simultanée de quelques millions de points dans certains cas. Les grandes dimensions et le poids du capteur Gom sont cependant gênants pour la mesure de zones d'accès difficile : 491 mm de largeur, 300 mm de profondeur, 170 mm de hauteur et 7,4 Kg.