

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie électrique

CONCEPTION ET FABRICATION D'UN TOMOGRAPHE OPTIQUE ET
CARACTÉRISATION D'UN PORTE ÉCHANTILLON À RÉPÉTABILITÉ DE
POSITIONNEMENT SUBMICRONIQUE.

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Dominique LANGLOIS DEMERS

Sherbrooke (Québec) Canada

Avril 2018

MEMBRES DU JURY

Julien SYLVESTRE
(directeur)

David DANOVITCH
(évaluateur)

Jean-Sébastien PLANTE
(évaluateur)

Résumé

Ce mémoire de maîtrise présente le travail de conception du volet mécanique d'un équipement automatisé pour caractériser en trois dimensions la microstructure des interconnexions d'alliage étain-argent-cuivre, utilisé dans les procédés d'assemblage de puces électroniques par puce renversée. La technique de tomographie consiste à faire plusieurs cycles d'enlèvement de fine couche de matière par polissage et photographier cette surface ainsi obtenue, à l'aide d'un éclairage polarisé croisé. La lumière polarisée croisée permet la mise en évidence des différents domaines cristallographiques présent dans les interconnexions.

Le processus de développement de produit enseigné à l'Université de Sherbrooke a été employé pour définir les différents besoins, fonctions et critères de conception. Les concepts retenus sont présentés dans l'optique de bien comprendre la stratégie globale de l'équipement ainsi que le rôle spécifique de chaque sous-système. On peut diviser le tomographe en plusieurs sous-systèmes : Structure, manipulation, préparation de surface, nettoyage, caractérisation et contrôle. Une présentation générale des concepts retenus pour chaque sous-système est réalisée et une étude approfondie d'un système de positionnement isostatique, utilisé pour localiser le porte échantillon lorsqu'il est à la station de caractérisation, est présenté via un article scientifique.

Tous les essais réalisés dans le cadre du travail de cette maîtrise démontrent la viabilité de l'équipement proposé pour réaliser une reconstruction tridimensionnelle d'interconnexions avec une précision meilleure que 1 micron dans toutes les directions. La qualité des images obtenues permet aussi de bien distinguer les différents domaines cristallographiques présents dans les alliages étain-argent-cuivre.

Mots clés : Tomographie optique, métallographie, automatisation, précision, lumière polarisée.

Remerciement

Je tiens en remercier en premier lieu ma conjointe Caroline, pour sa patience avec moi durant les différentes épreuves rencontrées au cours de ce projet de maîtrise, pour avoir cru en moi et pour m'avoir supporté sans relâche. Sans ma douce moitié, je n'aurais pu mener ce projet en gardant l'équilibre sur la mince ligne de la santé psychologique, vacillant entre l'épuisement et le découragement. Merci d'être mon phare.

Je remercie mes enfants Ludovic, Jasmine et Elliott pour m'avoir fait rire, pleurer, jouer. Autrement dit, pour m'avoir gardé les deux pieds sur terre, bien connecté à l'essentiel de la vie alors qu'on peut facilement s'oublier dans le travail acharné.

Je remercie mon professeurs Julien Sylvestre, pour avoir cru en moi, pour m'avoir offert l'opportunité d'atteindre un objectif académique personnel, pour avoir été patient durant des périodes où j'avais peu de temps et pour m'avoir apporté un support exceptionnel sur tous les aspects de ce projet.

Je remercie le C2MI pour m'avoir donné la chance de réaliser une maîtrise en parallèle de mon travail et pour avoir fourni l'espace nécessaire afin d'accueillir ce projet volumineux.

Je remercie IBM Bromont pour permettre la réalisation de projets de maîtrise ambitieux via la chaire de recherche CRSNG-IBM Canada sur l'encapsulation innovante de puces microélectroniques et pour tout le support technique qu'ils ont apporté tout au long du projet.

Finalement, je remercie GE Aviation Bromont pour la donation d'un bras robotisé, qui a permis une économie considérable et le respect du budget alloué.

Table des matières

Résumé	III
Remerciement.....	IV
1. Introduction	1
2. État de l'art des techniques de caractérisation.....	4
2.1. Polissage séquentiel et inspection optique.....	5
2.1.1. Technique de coupe séquentielle manuelle	5
2.1.2. Technique de coupe séquentielle automatisée.....	9
2.2. Tomographie par rayon X.....	13
2.3. Tomographie par MEB / FIB.....	16
3. Solution retenue.....	18
3.1. Besoins.....	18
3.2. Fonctions.....	21
3.3. Cahier des charges fonctionnelles.....	25
3.4. Concept retenu	30
3.4.1. Présentation générale.....	31
3.4.2. Sous-système de caractérisation	33
3.4.3. Sous-système de préparation de surface.....	36
3.4.4. Sous-système de manipulation	41
3.4.5. Sous-système structure	44
3.4.6. Sous-système de nettoyage.....	48
3.4.7. Sous-système de contrôle	50
3.5. Conception détaillée	52
3.5.1. Conception détaillée du sous-système de caractérisation.....	52
3.5.2. Conception détaillée du porte-échantillon.....	66
4. Caractérisation du comportement du système isostatique.....	69

3. Experimental Results Without Lubrication	80
4. Experimental Results With Lubrication.....	82
5. Fabrication de l'équipement	99
6. Conclusion	104
Annexe A.....	111
Annexe B	113

FIGURE 1: SCHÉMA D'ASSEMBLAGE D'UNE PUCE ÉLECTRONIQUE SUR SON SUBSTRAT PAR PROCÉDÉ DE PUCE RENVERSÉE (ARNOLD, 2013).	2
FIGURE 2: ANISOTROPIE DU MODULE D'YOUNG , E (ROUGE), ET DU COEFFICIENT D'EXPANSION THERMIQUE, CTE (NOIR), DE L'ÉTAIN (BIELER <i>ET AL.</i> , 2006). LA LONGUEUR DES VECTEURS À PARTIR DE L'ORIGINE INDIQUE LA VALEUR DE LA PROPRIÉTÉ POINTÉE. LA COORDONNÉE [ABC] INDIQUE L'ORIENTATION DE LA MESURE SELON LE RÉSEAU CRISTALLIN MONTRÉ EN HAUT À DROITE DE LA FIGURE.	3
FIGURE 3: SOMMAIRE DE DIFFÉRENTES TECHNIQUES UTILISÉES POUR CARACTÉRISER LA MICROSTRUCTURE DE JOINTS DE BRASURE DE COMPOSANT ÉLECTRONIQUE (YAZZIE <i>ET AL.</i> , 2012)	5
FIGURE 4 : EXEMPLE D'ÉQUIPEMENT DE SABLAGE MANUEL (METLAB, 2015).	6
FIGURE 5: EXEMPLE D'ÉQUIPEMENT DE POLISSAGE D'ÉCHANTILLON POUR INSPECTION MÉTALLOGRAPHIQUE(METLAB, 2015).....	7
FIGURE 6: PRINCIPE DE MICROSCOPIE PAR LUMIÈRE POLARISÉE CROISÉE.	8
FIGURE 7 : MONTAGE POUR RÉALISER DES COUPES SÉQUENTIELLES AVEC PRISE D'IMAGES AUTOMATISÉES, EN UTILISANT UNE MICRO FRAISEUSE POUR L'ENLÈVEMENT DE MATIÈRE (ALKEMPER ET VOORHEES, 2001).	10
FIGURE 8: VOLUME RECONSTRUIT D'UN ALLIAGE AL-SI. LES ZONES CLAIRES SONT LES PHASES ALUMINIUM (AL) ET LES ZONES FONCÉES LES PHASES DE SILICIUM (SI) (ALKEMPER ET VOORHEES, 2001).	11
FIGURE 9: OUTIL DE COUPE SÉQUENTIEL AUTOMATISÉ, DÉVELOPPÉ PAR LE CENTRE DE RECHERCHE UES (HILTON, 2013).	12
FIGURE 10: VOLUME RECONSTRUCTION SUR UN ÉCHANTILLON DE MOUSSE MÉTALLIQUE (HAUT GAUCHE), UNE MATRICE DE POLYMÈRE AVEC FIBRE D'ALUMINE (HAUT DROIT) ET UN ALLIAGE FE-CU OBTENU PAR FRITTAGE (BAS GAUCHE) (HILTON, 2013; SPOWART, 2006).	12
FIGURE 11: SCHÉMA DU PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN ÉQUIPEMENT DE TOMOGRAPHIE PAR RAYON X (VOGLER, 2011).	13
FIGURE 12 : EXEMPLE DE RECONSTRUCTION 3D D'UN COMPOSANT ÉLECTRONIQUE À L'AIDE DE RAYON X (XRADIA, 2013).	14
FIGURE 13: RECONSTRUCTION 3D D'ÉCHANTILLON ANALYSÉ PAR TOMOGRAPHIE PAR DIFFRACTION DE RAYON X (TSURITANI <i>ET AL.</i> , 2011).	15
FIGURE 14: COMPARAISON D'UNE COUPE VIRTUELLE OBTENUE PAR TOMOGRAPHIE PAR DIFFRACTION DE RAYON X (GAUCHE) ET D'UNE COUPE RÉELLE DU MÊME ÉCHANTILLON ET OBSERVATION À L'AIDE D'UN MEB (DROITE).	15

FIGURE 15: ROUTINE DE BALANCEMENT-POLISSAGE EXPLIQUÉE À L'AIDE D'UNE VUE SCHÉMATIQUE DE L'INTÉRIEUR D'UNE CHAMBRE FIB-MEB OÙ (A) MONTRE L'ÉCHANTILLON EN POSITION D'IMAGERIE AVEC UNE ROTATION DE 0 DEGRÉ ET UNE INCLINAISON DE 52 DEGRÉS. (B) MONTRE L'ÉCHANTILLON Tourné à 90 DEGRÉS, EN POSITION DE BALANCEMENT-POLISSAGE AVE UNE INCLINAISON DE 47 DEGRÉS ET (C) MONTRE L'ÉCHANTILLON Tourné à 90 DEGRÉS, EN POSITION DE BALANCEMENT-POLISSAGE AVE UNE INCLINAISON DE 57 DEGRÉS. (BURNETT <i>ET AL.</i> , 2016).....	16
FIGURE 16: RECONSTRUCTION 3D D'UN ÉCHANTILLON D'ACIER INOXYDABLE EN UTILISANT UN FIB OU UN PFIB AVEC UN TEMPS D'ANALYSE SIMILAIRE. (BURNETT <i>ET AL.</i> , 2016).....	17
FIGURE 17: REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE D'UN ÉQUIPEMENT DE TOMOGRAPHIE OPTIQUE MICRO-STRUCTURELLE AVEC DIVERSES STATIONS POUR PRÉPARER UN ÉCHANTILLON, TEL QUE RÉALISÉ PAR UN TECHNICIEN, DANS LE BUT D'ACQUÉRIR UNE SÉRIE D'IMAGES.	19
FIGURE 18: DIAGRAMME DES AFFINITÉS ENTRE LES BESOINS.	20
FIGURE 19: ARBRE FONCTIONNEL DU TOMOGAPHE OPTIQUE MICRO-STRUCTUREL.	22
FIGURE 20:STRUCTURE FONCTIONNEL DES FONCTIONS RÉALISÉES PAR LE TOMOGAPHE OPTIQUE MICRO-STRUCTUREL (1/2).	23
FIGURE 21: STRUCTURE FONCTIONNEL DES FONCTIONS RÉALISÉES PAR LE TOMOGAPHE OPTIQUE MICRO-STRUCTUREL (2/2).	24
FIGURE 22: CONCEPT D'AUTOMATISATION UTILISANT UN BRAS ARTICULÉ 6 AXES.	31
FIGURE 23: SÉQUENCE DE FONCTIONNEMENT DU TOMOGAPHE OPTIQUE. UNE RÉPÉTITION DU CYCLE 1-2-3-4-5 EST REQUISE POUR GÉNÉRER PLUSIEURS IMAGES, CHACUNE DISTANCÉE DE QUELQUES DIZIÈMES DE MICRON ET RÉALISÉ UNE RECONSTRUCTION TRIDIMENSIONNELLE.	32
FIGURE 24: CONCEPT RETENU POUR LE SOUS-SYSTÈME DE CARACTÉRISATION.	34
FIGURE 25: VUE DE HAUT DU SOUS-SYSTÈME DE CARACTÉRISATION.	34
FIGURE 26: SCHÉMA DE LA TECHNIQUE DE CARACTÉRISATION DE LA SURFACE DE L'ÉCHANTILLON PAR LE SOUS-SYSTÈME DE CARACTÉRISATION.	35
FIGURE 27: CONCEPT RETENU POUR LE SOUS-SYSTÈME DE PRÉPARATION DE SURFACE.	37
FIGURE 28: DIAGRAMME DU CORPS LIBRE DU PORTE ÉCHANTILLON.....	38
FIGURE 29: DIFFÉRENTIEL DE FORCE POUR PRÉCONTRAINdre LE BRAS ARTICULÉ ET AMÉLIORER LA STABILITÉ DU SYSTÈME.	40

FIGURE 30: IDENTIFICATION DES AXES DE ROTATION DU BRAS ROBOTISÉ LR-MATE 200i.	41
FIGURE 31: REPRÉSENTATION DE LA ZONE DE TRAVAIL DU BRAS ROBOTISÉ LR MATE 200i. A) VUE DU DESSUS. B) VUE DE CÔTÉ (FANUC ROBOTICS, 1999).	42
FIGURE 32: CONCEPT DE STRUCTURE RETENU. A) VUE DE FACE ET CÔTÉ GAUCHE. B) VUE DE DOS ET CÔTÉ DROIT.	44
FIGURE 33: STRATÉGIES DE LIMITATION DES VIBRATIONS. A) PIED DE ROBOT INDÉPENDANT DE LA SA STRUCTURE. B) SOUS-SYSTÈME DE CARACTÉRISATION ISOLÉ PAR DES PIEDS EN SORBOTHANE	45
FIGURE 34: DIAGRAM D'ABSORPTION DES VIBRATIONS POUR DES PATTES EN SORBOTHANE DE 18 MM DE DIAMÈTRE. NUMÉRO DE PIÈCE AV3 LORSQU'ACHETÉ AUPRÈS DE LA COMPAGNIE THORLAB (THORLABS, INC., 1999).	46
FIGURE 35: VU DE L'INTÉRIEUR DES COMPOSANTS DE SÉCURITÉ POUR LES PORTES.	47
FIGURE 36: STATION DE SAVONNAGE.	48
FIGURE 37: CONCEPT RETENU POUR LE SOUS-SYSTÈME DE NETTOYAGE.	49
FIGURE 38: ORDINATEUR INDUSTRIEL EMBARQUÉ DE LA COMPAGNIE BECKHOFF.	50
FIGURE 39: VU EN COUPE DU MICROSCOPE DU SOUS-SYSTÈME DE CARACTÉRISATION.	54
FIGURE 40: EXEMPLE D'IMAGE OBTENUE À L'AIDE DU MICROSCOPE NUMÉRIQUE FABRIQUÉ.	57
FIGURE 41: POSITIONNEMENT DU PALPEUR NUMÉRIQUE.	58
FIGURE 42: CONCEPT DE MOTORISATION DES AXES DE DÉPLACEMENT X ET Z DU MICROSCOPE.	60
FIGURE 43: CONCEPT DE POSITIONNEMENT MANUEL SELON L'AXE DES Y.	65
FIGURE 44: VUE DU DESSOUS DU PORTE ÉCHANTILLON.	66
FIGURE 45: À GAUCHE, TOPOGRAPHIE D'UN ÉCHANTILLON POLI PAR LA TECHNIQUE DE MAINTIEN CONVENTIONNELLE. À DROITE, TOPOGRAPHIE D'UN ÉCHANTILLON POLI PAR UNE TECHNIQUE DE MAINTIEN RIGIDE.	67
FIGURE 46: VUE DE CÔTÉ DU PORTE ÉCHANTILLON.	68
FIGURE 47: A) MODÈLE NUMÉRIQUE DU TOMOGAPHE OPTIQUE. B) TOMOGAPHE OPTIQUE RÉEL.	99

FIGURE 48: A) MODÈLE 3D DE LA STATION DE PRÉPARATION DE SURFACE. B) VU DU DESSUS DE LA STATION DE PRÉPARATION DE SURFACE. C) VUE DE FACE DE LA STATION DE PRÉPARATION DE SURFACE, AVEC ÉCHANTILLON.	100
FIGURE 49 A) MODÈLE 3D DU SOUS-SYSTÈME DE NETTOYAGE. B) VUE DU DESSUS DU SOUS-SYSTÈME DE NETTOYAGE FABRIQUÉ.	101
FIGURE 50: A) MODÈLE 3D DU SOUS-SYSTÈME DE CARACTÉRISATION. B) SYSTÈME DE CARACTÉRISATION FABRIQUÉ. C) VUE RAPPROCHÉ DE L'OBJECTIF DU MICROSCOPE EN POSITION D'IMAGERIE.	102
FIGURE 51: A) MODÈLE 3D DU PORTE ÉCHANTILLON. B) PORTE ÉCHANTILLON RÉEL.	102
FIGURE 52: A) VU DU PANNEAU ÉLECTRIQUE DE CONTRÔLE DE PUISSANCE, EN COURS DE FABRICATION. B) VU DU PANNEAU DE CONTRÔLE, EN COURS DE FABRICATION.	103
FIGURE 53: DIAGRAMME EN RADAR DE L'AVANCEMENT DE FABRICATION DE CHAQUE SOUS-SYSTÈME.	104

1. Introduction

Depuis quelques décennies, la microélectronique est devenue de plus en plus présente dans notre quotidien. Le nombre d'applications est sans cesse grandissant et pour répondre à cette demande, les microprocesseurs évoluent de façon à toujours offrir de meilleure performance à moindre coût. En fait, depuis les années '60, le domaine de l'électronique tente de suivre la prédiction de Moore (Moore E., 1998), qui spécifie que tous les 2 ans, le nombre de composants par circuit intégré devrait doubler pour maintenir le coût de fabrication par transistor à son minimum. Pour arriver à suivre cette cadence, les transistors en surface de la puce sont de plus en plus petits et les puces de plus en plus grosses. Par conséquent, lors de l'encapsulation de ces puces, le nombre d'interconnexions entre celle-ci et leur substrat ne cesse d'augmenter et leur taille de diminuer afin d'augmenter la densité des canaux de communication.

Afin de bien comprendre le fondement de ce projet, il est essentiel de comprendre quelques notions concernant l'assemblage de puces électroniques sur leur substrat. La connexion électrique et mécanique d'une puce électronique sur un substrat est actuellement réalisée de plusieurs façons, mais seulement celle qui est en lien avec le projet de maîtrise est présentée, c'est-à-dire l'assemblage par puce renversée.

En surface de la puce électronique, des traces de cuivre relient les composants actifs à des plots de cuivre de plusieurs dizaines de microns de diamètre. Sur ces surfaces, plusieurs couches de métaux additionnelles sont déposées pour ensuite former des petites billes d'un alliage d'étain-argent-cuivre. Cet alliage a les propriétés d'avoir un point de fusion relativement bas et une bonne conductivité électrique.

Sur le substrat qui reçoit la puce, des plots sont disposés avec un motif miroir à celui de la puce. À l'aide d'outil de placement les billes de la puce sont alignées avec les plots du substrat et amenées en contact.

Cet assemblage est ensuite chauffé à une température au-dessus du point de fusion pour que la bille et son plot correspondant mouillent pour ne former qu'une seule entité. Comme les alliages étain-argent-cuivre s'oxyde en présence d'oxygène et que cela empêche la fusion entre la bille et son

plot correspondant, différentes techniques sont utilisées pour les désoxyder. Une fois solidifiées, ces billes relient la circuiterie de la puce et du substrat par brasure afin de former un lien mécanique et électrique, connu sous le nom d'interconnexion ou joint de brasure. La Figure 1 présente un schéma de ce procédé d'assemblage.

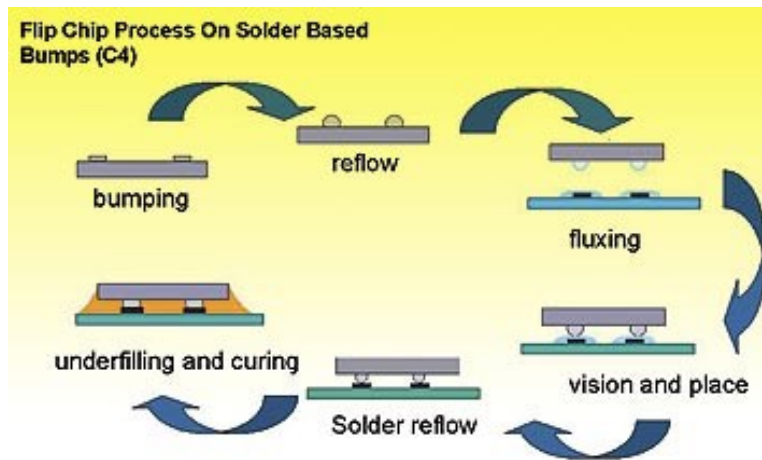


Figure 1: Schéma d'assemblage d'une puce électronique sur son substrat par procédé de puce renversée (Arnold, 2013).

Un des défis de ce procédé d'assemblage vient de la différence de coefficient d'expansion thermique entre la puce et le substrat. En effet, après que les connexions par brasure sont établies, on refroidit la pièce pour la ramener à la température ambiante. Le substrat, ayant un coefficient d'expansion thermique beaucoup plus élevé que la puce, se contracte beaucoup plus rapidement que la puce et force la cambrure de l'assemblage. Le lien mécanique étant initialement fait par les joints de brasure, ces derniers subissent donc un niveau de contrainte élevé, particulièrement dans les coins de la puce. La dernière étape du procédé montré à la Figure 1 est d'introduire un époxy entre la puce et le substrat afin de rendre l'assemblage plus robuste mécaniquement, mais cette étape survient après que les contraintes causées par la dilatation thermique soient apparues.

Ces contraintes causées par le procédé d'assemblage sont à l'origine de plusieurs défaillances des joints de brasure et les pièces doivent être rejetées.

Avant d'utiliser des alliages de Sn-Ag-Cu, les alliages Sn-Pb étaient utilisés pour réaliser les interconnexions entre la puce et son substrat. Avec les alliages Sn-Pb, il était connu que les risques de rupture étaient fortement reliés à la position de la connexion sous la puce. Les connexions de

coin sont plus à risque. Cependant, il a été montré qu'avec la venue des alliages Sn-Ag-Cu, les caractéristiques cristallographiques jouent un rôle majeur dans les modes de défaillance puisque des fissures sont aussi observées vers l'intérieur de la puce (Bieler *et al.*, 2006; Lehman *et al.*, 2005).

Il a aussi été montré que dans les alliages Sn-Ag-Cu, il y a une tendance au développement de fissure à l'interface des joints de grain (Matin *et al.*, 2005). Les propriétés anisotropiques de l'étain sont vues comme étant favorables au glissement des grains les uns par rapport aux autres et donc à la création de contraintes de cisaillement aux interfaces (Subramanian et Lee, 2004; Sylvestre et Blander, 2008). La Figure 2 montre la variation du module d'Young et du coefficient d'expansion thermique en fonction de l'orientation du réseau cristallin.

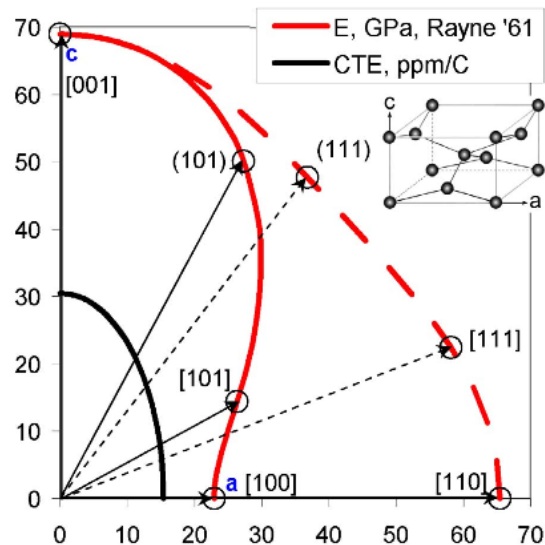


Figure 2: Anisotropie du module d'Young , E (rouge), et du coefficient d'expansion thermique, CTE (noir), de l'étain (Bieler *et al.*, 2006). La longueur des vecteurs à partir de l'origine indique la valeur de la propriété pointée. La coordonnée [abc] indique l'orientation de la mesure selon le réseau cristallin montré en haut à droite de la figure.

Il y a donc plusieurs études en cours pour comprendre les modes de défaillance des joints de brasure et ces études doivent inévitablement passer par la compréhension de l'impact des caractéristiques cristallographiques sur les modes de défaillance (Matin *et al.*, 2005, 2007; Subramanian et Lee, 2004; Sylvestre et Blander, 2008; Vianco *et al.*, 2004a, 2004b). Un outil très répandu pour aider à la compréhension de la répartition des contraintes et des déformations est la simulation numérique.

Cependant, pour obtenir des résultats représentatifs de la réalité, il est essentiel de connaître les propriétés mécaniques des alliages, dans le cas qui nous intéresse, l'orientation et la géométrie de chaque domaine cristallographique présent puisqu'ils affectent grandement les propriétés des joints de brasure.

Le projet présenté dans ce mémoire est relié à ce besoin de caractérisation des domaines cristallographiques. Comme la quantité de paramètres qui impactent le nombre, la géométrie et l'orientation des domaines cristallographiques est inconnue, il est intéressant de pouvoir étudier un grand nombre d'échantillons. Le projet de maîtrise s'articule donc autour de la question suivante :

Comment caractériser rapidement et sur un grand nombre d'échantillons, l'orientation et la géométrie dans l'espace, de grains de brasure sans plomb, dans un composant électronique complexe, en utilisant une approche de coupe séquentielle et photographie?

Ce mémoire présente la solution retenue découlant du processus de conception d'un équipement qui permettra la réalisation d'une reconstruction 3D d'une pièce analysée, à partir d'une série d'images prises sous lumière polarisée croisée. L'échantillon typique à inspecter est une puce microélectronique de 4-10 mm de côté, assemblée sur son substrat avec des interconnexions de diamètre approximatif de 75 μ m et des tailles de domaines cristallographiques variables.

2. État de l'art des techniques de caractérisation

Pour obtenir de l'information sur la microstructure d'un alliage, plusieurs techniques peuvent être utilisées. La Figure 3 présente un sommaire de ces techniques.

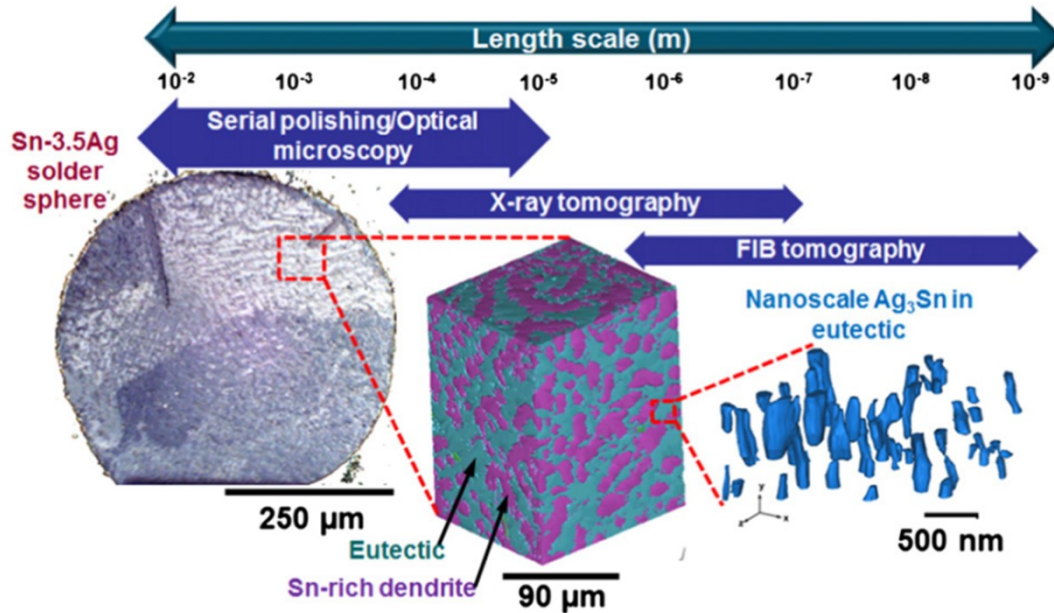


Figure 3: Sommaire de différentes techniques utilisées pour caractériser la microstructure de joints de brasure de composant électronique (Yazzie *et al.*, 2012)

La tomographie 3D par rayon X en contraste de phase (Bertheau *et al.*, 2014; Tsuritani *et al.*, 2011, 2013) et par faisceau d'ions focalisé (FIB) (Bhandari *et al.*, 2007) sont des techniques qui offrent une bonne résolution et permettent de voir la microstructure, mais en contrepartie le volume inspecté est plutôt petit. Les approches par série de coupes et inspection à l'aide de microscope permettent d'inspecter de plus grandes surfaces et sont beaucoup plus abordables, bien que l'information fournie soit un peu moins quantitative. Les sections suivantes présentent les trois techniques avec un peu plus de détails.

2.1. Polissage séquentiel et inspection optique

En ce qui concerne les approches de polissage séquentiel et inspection optique, il est possible de faire la distinction entre une approche manuelle et une approche automatisée.

2.1.1. Technique de coupe séquentielle manuelle

Les techniques classiques de préparation d'échantillon pour l'inspection de la microstructure de pièces métalliques sont réalisées manuellement par des techniciens spécialement formés pour le

besoin. Après avoir mis l'échantillon à inspecter dans un support d'époxy, la pièce est dégrossie sur une table de sablage. Une rondelle de papier abrasif est en rotation et le technicien vient manuellement enlever de la matière de façon à rapprocher et corriger l'angle du plan à inspecter. Des papiers abrasifs de plus en plus fins sont utilisés pour éliminer au maximum toutes rayures causées par le procédé. La Figure 4 présente une table de sablage conventionnelle.



Figure 4 : Exemple d'équipement de sablage manuel (MetLab, 2015).

Par la suite, l'échantillon est placé dans une machine de polissage. Il s'agit d'un disque de tissu en rotation sur lequel une solution de polissage est déposée. L'échantillon est appuyé contre le tapis de polissage à l'aide d'un petit cylindre pneumatique positionné au centre de l'échantillon. La force d'appui, le temps de polissage, le débit d'agent lubrifiant et d'agent abrasif sont des paramètres clé de ce processus. Un exemple d'équipement utilisé pour le polissage d'échantillon est présenté à la Figure 5.



Figure 5: Exemple d'équipement de polissage d'échantillon pour inspection métallographique(MetLab, 2015).

Afin d'obtenir une surface adéquate pour mettre en évidence la microstructure (plane, sans rayures ou autres défauts provenant du procédé de préparation de l'échantillon) une étape de polissage avec des agents abrasifs de $3\mu\text{m}$ est suivie d'une étape avec des agents de polissage de $0.25\mu\text{m}$. Entre les étapes de polissage et avant l'inspection, un nettoyage est requis afin de retirer le lubrifiant et les particules abrasives utilisées. Ce nettoyage est accompli de façon manuelle à l'aide d'un coton-tige, de savon doux, d'eau désionisée et le séchage est ensuite fait à l'aide d'un jet d'air propre pressurisé.

Après que le technicien(ne) ait validé que la surface à inspecter est exempte de saletés ou d'artéfacts de préparation de surface, une inspection à l'aide de microscope optique est réalisée. En cas de besoin de distinguer les différents domaines cristallographiques, un éclairage polarisé croisé peut être utilisé. Ce type d'éclairage, tel que présenté à la Figure 6, permet la mise en évidence des différents domaines cristallographiques des alliages n'ayant pas une microstructure dite cubique (F. Vander Voort, 2004) , dont ceux à base d'étain.

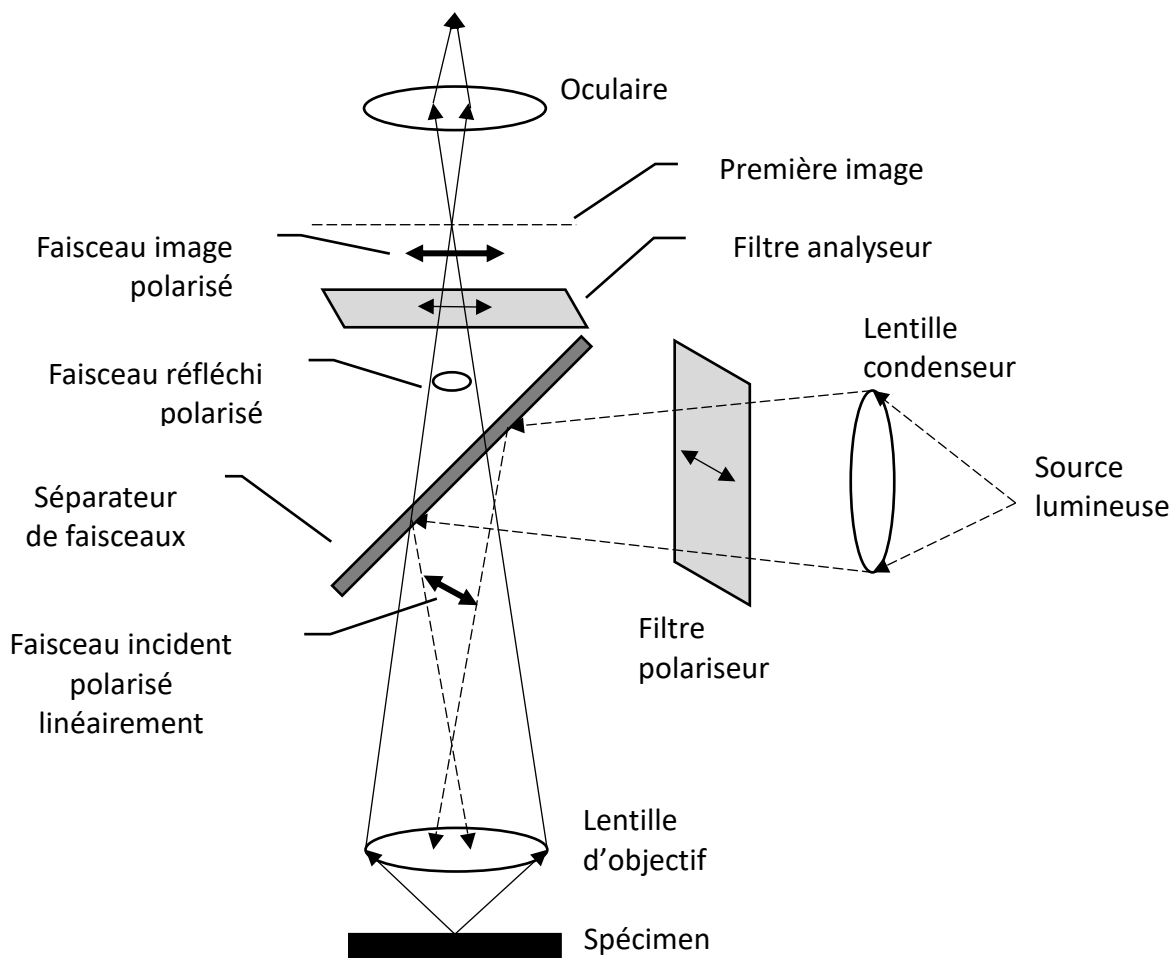


Figure 6: Principe de microscopie par lumière polarisée croisée.

Lorsque le faisceau incident polarisé linéairement est réfléchi par une surface polie d'un alliage à base d'étain, la microstructure induit une rotation à la lumière. Lorsque les faisceaux réfléchis polarisés traversent le filtre analyseur, l'intensité lumineuse est atténuée en fonction de l'orientation de la lumière. Les différents domaines cristallographiques apparaissent donc avec des niveaux de gris différents.

De plus, avec une approche manuelle il a été démontré qu'il est possible de créer des marques d'alignement sur la surface inspectée, par exemple avec des marques d'indentation d'un outil de mesure de dureté Vickers (Li *et al.*, 1998), pour localiser la position de la photographie. On peut ensuite répéter la séquence de polissage et inspection afin d'obtenir une série d'images 2D qui peuvent être utilisées pour reconstruire un volume de l'échantillon inspecté.

Cette technique a permis, entre autres, de caractériser le nombre et la géométrie d'intermétallique Ag_3Sn , ayant un diamètre moyen de $2\mu\text{m}$, présents dans les joints de brasure utilisée en microélectronique, dans un volume de $170 \times 127 \times 17\mu\text{m}^3$, en générant une séquence d'images distancées d'environ $0.5\mu\text{m}$ chacune (Sidhu et Chawla, 2004). Dans un autre cas, des particules de renforcement de matrice métallique ayant un diamètre moyen de $4\mu\text{m}$ ont été caractérisées par une telle approche en 20 images distancées d'environ $1.5\mu\text{m}$ (Li *et al.*, 1998).

2.1.2. Technique de coupe séquentielle automatisée

Les techniques manuelles de coupe séquentielle demandent beaucoup de temps de technicien et par conséquent le nombre d'images prises est souvent limité. Des approches plus automatisées ont donc été développées. Une première consiste à utiliser une microfraiseuse modifiée en ayant ajouté une caméra à une extrémité d'un de ses axes de déplacement (Alkemper et Voorhees, 2001). Le couteau de la microfraiseuse enlève des épaisseurs de matière entre 1 et $20\mu\text{m}$, puis l'échantillon est nettoyé à l'aide de jets d'alcool et finalement une photographie de la surface à caractériser est prise. Le montage est présenté à la Figure 7.

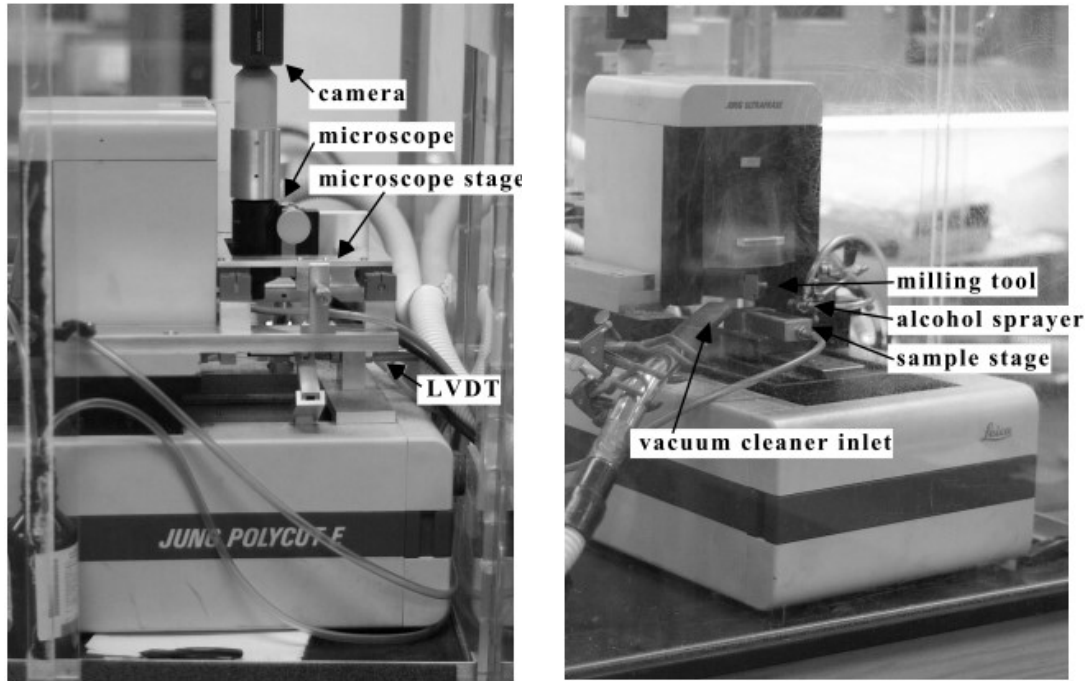


Figure 7 : montage pour réaliser des coupes séquentielles avec prise d'images automatisées, en utilisant une micro fraiseuse pour l'enlèvement de matière (Alkemper et Voorhees, 2001).

Cette technique a été démontrée sur des pièces en alliage d'aluminium, bien qu'elle pourrait probablement être appliquée à des puces électroniques contenant du silicium puisque qu'il existe un régime plastique avec des paramètres de coupe particuliers (Yan *et al.*, 2001). Un exemple de volume reconstruit d'un alliage Al-Si est présenté à la Figure 8.



Figure 8: Volume reconstruit d'un alliage Al-Si. Les zones claires sont les phases aluminium (Al) et les zones foncées les phases de silicium (Si) (Alkemper et Voorhees, 2001).

Une deuxième approche de coupe séquentielle automatisée est proposée par le centre de recherche UES. L'outil de coupes séquentielles automatisées, baptisé Robo-Met.3D, breveté en 2105 (P.A. Adiga *et al.*, 2015), est présenté à la Figure 9.



Figure 9: Outil de coupe séquentiel automatisé, développé par le centre de recherche UES (Hilton, 2013).

L'outil consiste en un bras robotisé rigide qui permet de manipuler l'échantillon entre les stations de préparation de surface, de nettoyage et d'inspection. Un deuxième bras permet de changer les meules de polissage pour optimiser la qualité de la surface inspectée ou la vitesse d'enlèvement de matière. Plusieurs chimiques peuvent être utilisés dans la recette de préparation de surface pour réaliser certains types de gravure communs à la métallographie. Le nettoyage de l'échantillon peut être réalisé par un simple jet d'eau ou à l'aide d'un bain ultrasonique qui peut contenir des savons, de l'alcool ou simplement de l'eau désionisée. Des démonstrations de la capacité de cet équipement ont été réalisées sur des mousses métalliques, des matrices de polymère avec fibre d'alumine ou des alliages Fe-Cu créés par frittage (Hilton, 2013; Spowart, 2006) et les reconstructions obtenues sont présentées à la Figure 10..

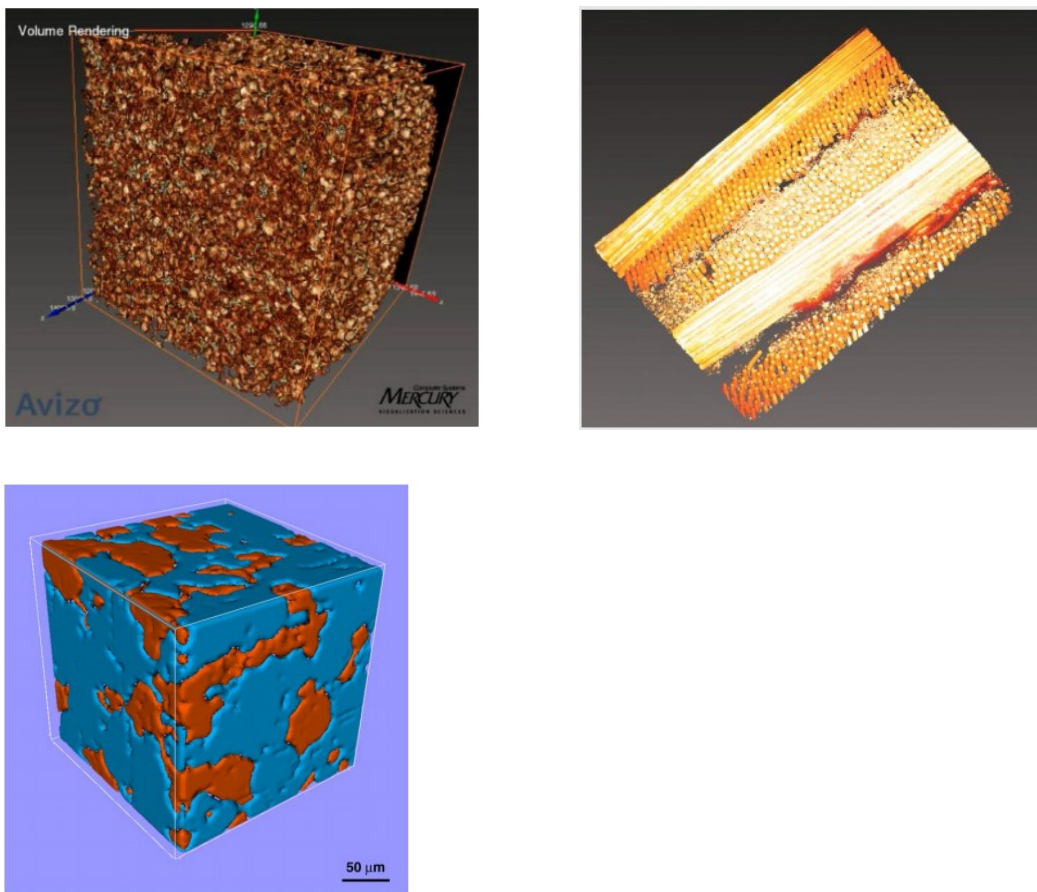


Figure 10: Volume reconstruction sur un échantillon de mousse métallique (haut gauche), une matrice de polymère avec fibre d'alumine (haut droit) et un alliage Fe-Cu obtenu par frittage (bas gauche) (Hilton, 2013; Spowart, 2006).

Les techniques de coupe séquentielle automatisée présentées obtiennent de bons résultats pour divers matériaux, même des composites, mais n'ont pas été testées pour la caractérisation de composant électronique complexe. Parmi les équipements présentés, seulement Robot-Met.3D utilise une technique de préparation de surface similaire à celle réalisée manuellement pour les composants électroniques complexes. Cependant, l'appareil semble faire appel à un bras robotisé spécialement conçu pour le besoin, qui engendre des coûts de fabrication supplémentaire. Aussi, à première vue, le procédé de préparation de surface semble utiliser la précision de positionnement du bras robotisé pour contrôler le taux d'enlèvement de matière et l'orientation du plan de coupe à inspecter. Une grande précision ainsi qu'une bonne rigidité seraient nécessaire pour préparer la surface d'un composant électronique.

2.2. Tomographie par rayon X

La tomographie rayon x est une technique d'inspection qui a l'avantage d'être non-destructive. En effet, il n'y a nul besoin de couper l'échantillon pour atteindre la zone d'inspection puisque les rayons X traversent la matière, avec différent degré d'atténuation, et permettent l'inspection de composants internes. Le principe de fonctionnement est présenté à la Figure 11.

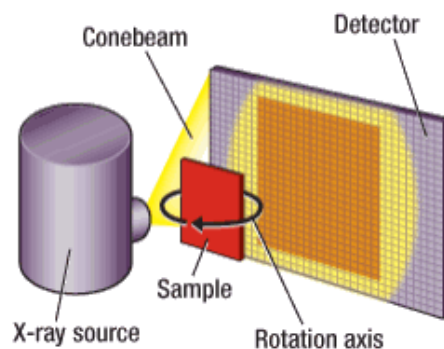


Figure 11: Schéma du principe de fonctionnement d'un équipement de tomographie par rayon X (Vogler, 2011).

L'échantillon (*Sample*) est placé entre une source de rayon x (*X-ray source*) et un détecteur (*Detector*). La source émet des faisceaux de rayons X voyageant en ligne droite et formant un cône (*Conebeam*). Ceux-ci traversent l'échantillon à analyser et l'intensité du faisceau est atténuée par le type d'atome traversé. De façon générale, plus le numéro atomique est élevé, plus il y a de chance de collision entre une partie de l'atome et le faisceau de rayons X et plus il y a d'atténuation. Les faisceaux viennent ensuite réagir avec les pixels du détecteur pour générer une image 2D où chaque pixel est chargé proportionnellement à l'intensité du faisceau incident. L'échantillon est, par la suite, tourné de quelques degrés autour d'un axe passant par le centre du volume à inspecter (*Rotation axis*) et une nouvelle image est générée. La séquence est répétée jusqu'à ce qu'un angle d'inspection suffisamment grand soit analysé pour permettre une reconstruction 3D. Un exemple d'analyse en utilisant cette approche est présenté à la Figure 12.

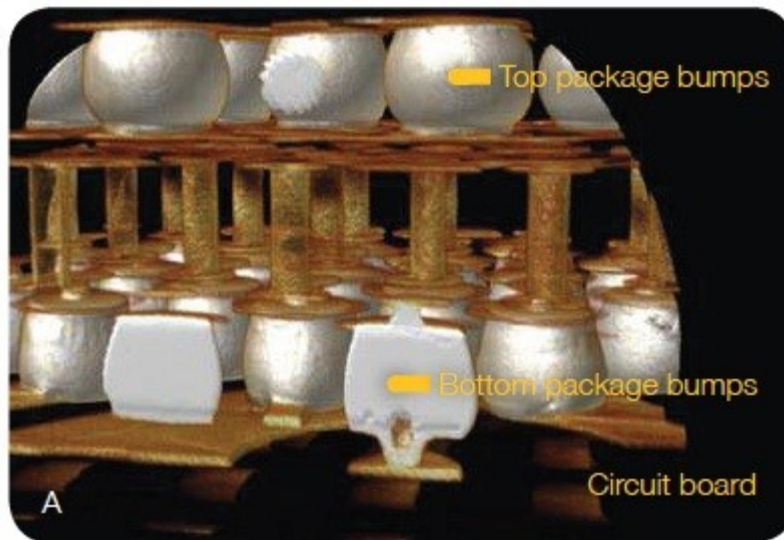


Figure 12 : Exemple de reconstruction 3D d'un composant électronique à l'aide de rayon x (Xradia, 2013).

Sur la Figure 12, on constate que les parties métalliques sont bien visibles, mais les matériaux organiques, qui absorbent peu les rayons X, ne sont pas visibles. Aussi, bien que la géométrie des interconnexions (billes grisâtres) soit bien définie, aucune information sur la microstructure n'est décelée. Pour identifier des domaines cristallographiques, il faut utiliser une technique de

tomographie par diffraction de rayons X. La description détaillée de la technique n'est pas traitée dans ce mémoire, mais un exemple de reconstruction est présenté à la Figure 13.

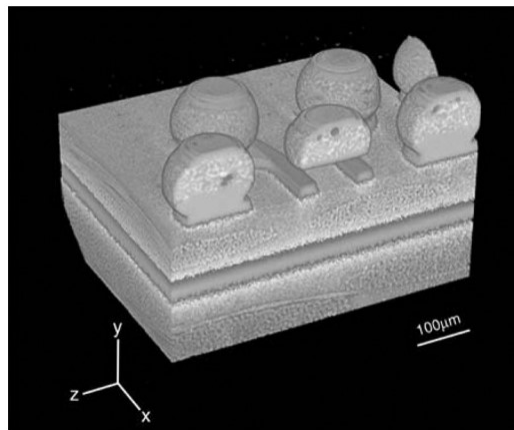


Figure 13: Reconstruction 3D d'échantillon analysé par tomographie par diffraction de rayon X (Tsuritani *et al.*, 2011).

Pour démontrer la capacité de différencier les domaines cristallographiques, la Figure 14 présente côte à côte les images obtenues sur la même interconnexion à l'aide d'imagerie par diffraction de rayon X et par inspection à l'aide d'un MEB.

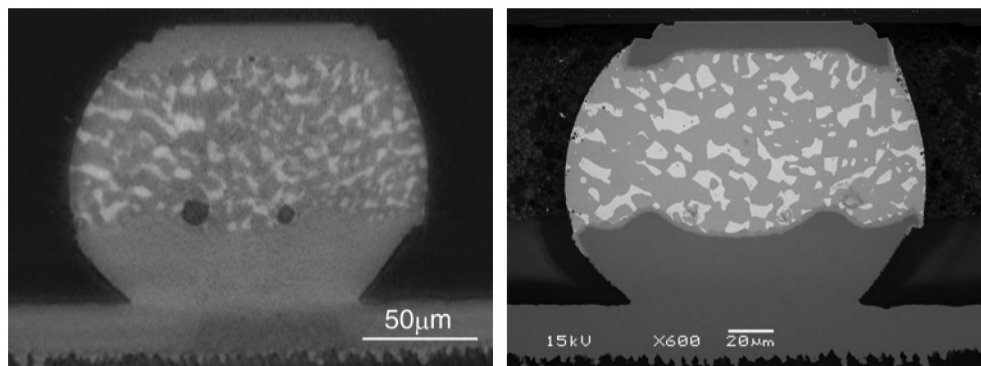


Figure 14: comparaison d'une coupe virtuelle obtenue par tomographie par diffraction de rayon X (gauche) et d'une coupe réelle du même échantillon et observation à l'aide d'un MEB (droite).

La similitude des deux techniques à identifier les domaines cristallographiques est éloquente. Cependant, on peut constater que sur l'image obtenue par rayon X, la netteté de l'image est inférieure et les matériaux entourant l'interconnexion ne sont pas visibles.

2.3. Tomographie par MEB / FIB

La tomographie par microscope électronique à balayage (MEB) et faisceau d'ions focalisé requiert une étape de préparation similaire à celle pour une inspection optique, c'est-à-dire, le moulage de l'échantillon dans une rondelle d'époxy, la découpe grossière, le sablage, le polissage et le nettoyage de l'échantillon pour obtenir une surface exempte de défauts. Par la suite, l'échantillon peut être introduit dans le microscope à balayage et faire l'acquisition d'une image. Pour générer une série d'images et reconstruire un volume, le processus de polissage et d'imagerie doit être répété. Avec un MEB, il est aussi possible d'obtenir de l'information quantitative sur l'orientation des domaines cristallographiques en utilisant l'option d'analyse par diffraction des électrons rétrodiffusés (*Electron Backscatter Diffraction*, EBSD).

Dans le cas d'un équipement muni d'un faisceau d'ions focalisé (FIB), l'enlèvement de matière peut être réalisé sur une petite section de l'échantillon à l'intérieur de l'équipement. Cette technique requiert un outil capable d'être programmé pour alterner la découpe par FIB et l'imagerie par MEB. Une séquence est proposée à la Figure 15 (Burnett *et al.*, 2016).

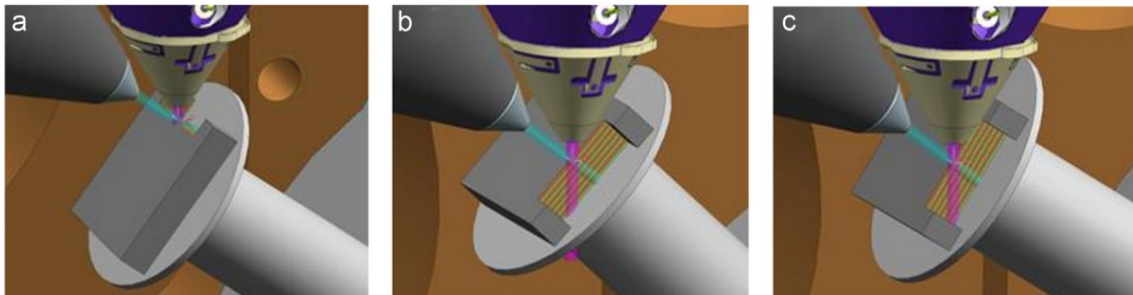


Figure 15: Routine de balancement-polissage expliquée à l'aide d'une vue schématique de l'intérieur d'une chambre FIB-MEB où (a) montre l'échantillon en position d'imagerie avec une rotation de 0 degré et une inclinaison de 52 degrés. (b) montre l'échantillon tourné à 90 degrés, en position de balancement-polissage avec une inclinaison de 47 degrés et (c) montre l'échantillon tourné à 90 degrés, en position de balancement-polissage avec une inclinaison de 57 degrés. (Burnett *et al.*, 2016)

L'échantillon est d'abord positionné pour faire l'imagerie par MEB de la surface (Figure 15 a)) de façon à ce que le FIB soit normal à la surface de l'échantillon : rotation 0 degré, inclinaison 52. Ensuite, l'échantillon est déplacé à une rotation de 90deg et une inclinaison de 47 deg pour enlever

une fine couche de matière (<100nm) avec le FIB (Figure 15 b)). L'échantillon est ensuite retourné à la position d'imagerie (a) pour une nouvelle image. Par la suite, l'échantillon est déplacé à une rotation de 90 deg et une inclinaison de 57 deg pour une nouvelle séance d'enlèvement de matière. La séquence a)b)a)c)a)b)... est répétée jusqu'à ce que la profondeur désirée soit analysée. Cette technique de balancement d'angle d'attaque pour le FIB a pour effet de diminuer les dommages induits à la surface qui pourraient affecter la microstructure. Un exemple de volume reconstruit par cette approche est présenté à la Figure 16.

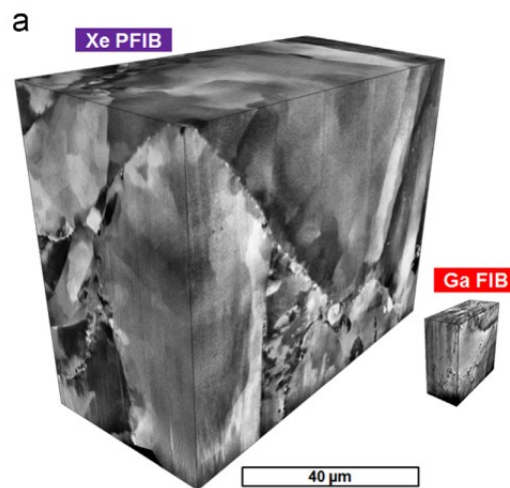


Figure 16: Reconstruction 3D d'un échantillon d'acier inoxydable en utilisant un FIB ou un PFIB avec un temps d'analyse similaire. (Burnett *et al.*, 2016)

Le PFIB est un faisceau d'ions focalisé utilisant un plasma et capable d'accélérer la vitesse de coupe et par le fait même, d'augmenter le volume de matière inspecté dans un temps raisonnable(<1jour). Cette technique permet d'imager avec une résolution nanométrique, mais permet un volume inspecté de quelques dizaines de micromètres seulement. L'analyse d'une grande quantité d'interconnexions prendrait plusieurs jours d'analyses.

3. Solution retenue

Afin de ne pas alourdir le contenu de ce mémoire, l'émergence de concepts et la convergence vers une solution ne sont pas présentées, mais seulement le concept retenu.

Pour arriver à caractériser l'orientation et la géométrie des domaines cristallographiques dans un composant électronique, une technique de coupe séquentielle par polissage et microscopie sous lumière polarisée croisée avec reconstruction d'une image tridimensionnelle est choisie pour les raisons suivantes:

- Le champ de vision plus grand permet de capturer plusieurs joints de brasure en même temps;
- L'imagerie optique permet de bien révéler la microstructure des alliages utilisés et les matériaux environnants, qui sont difficiles à bien distinguer à l'aide de rayon X;
- Des équipements similaires ont démontré une bonne rapidité de production d'images;
- Les stations nécessaires permettent la parallélisation de plusieurs étapes et augmenter la cadence d'analyse d'échantillon;
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser de rayons X, nocifs pour la santé et requérant des précautions particulières;
- Il n'est pas nécessaire d'avoir une chambre sous vide;
- Il est possible de bénéficier de l'expertise avancée des techniciens présents au C2MI pour la préparation des échantillons et l'inspection métallographique.

Après avoir choisi l'approche générale, le processus de développement de produit est suivi, soit : la recherche des besoins, la recherche des fonctions et finalement la recherche des critères de conception. Afin de faciliter la discussion l'équipement développé est baptisé : tomographe optique micro-structurel.

3.1. Besoins

Pour aider à mieux comprendre le concept de l'équipement proposé, une représentation schématique de l'équipement est présentée à la Figure 17, tel qu'il a été imaginé à la première phase de remue ménage. Les différentes stations présentes dans l'équipement sont fortement inspirées du travail réalisé par des techniciens en laboratoire lors de la préparation d'échantillons pour l'analyse de microstructure. Il faut tout d'abord prévoir un système de manipulation pour

déplacer l'échantillon entre les stations (Sous-système : manipulation). Ensuite, il faut préparer la surface à inspecter en sablant et polissant l'échantillon (Sous-système : Préparation de surface), puis en la nettoyant avec un savon doux, la rinçant et la séchant (Sous-système : Nettoyage). Par la suite, une station de microscopie prend les images nécessaires pour la reconstruction 3D et doit caractériser l'épaisseur de matière enlevée entre chaque séance de polissage (Sous-système : photographie et caractérisation). Finalement, la série d'images obtenues doit être traitée par un algorithme pour faire la reconstruction d'une représentation volumétrique de l'échantillon analysé.

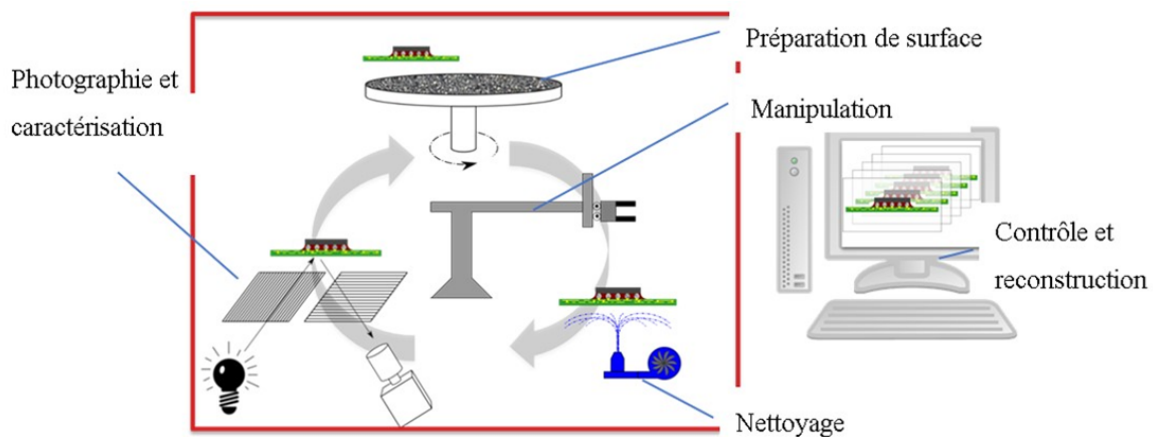


Figure 17: Représentation schématique d'un équipement de tomographie optique micro-structurale avec diverses stations pour préparer un échantillon, tel que réalisé par un technicien, dans le but d'acquérir une série d'images.

Afin d'identifier les besoins associés à l'appareil, des rencontres avec les utilisateurs et les clients potentiels de l'appareil ont été effectuées ainsi qu'une analyse d'équipements similaires. La liste des besoins est présentée dans le tableau de l'annexe A. Les besoins sont numérotés et une classe leur est attribuée, soit de base (B), de performance (P), d'innovation (I) ou de contrainte (C). Les besoins ainsi trouvés sont regroupés par affinité pour mieux visualiser leurs interactions. Ce diagramme des affinités est présenté à la Figure 18.

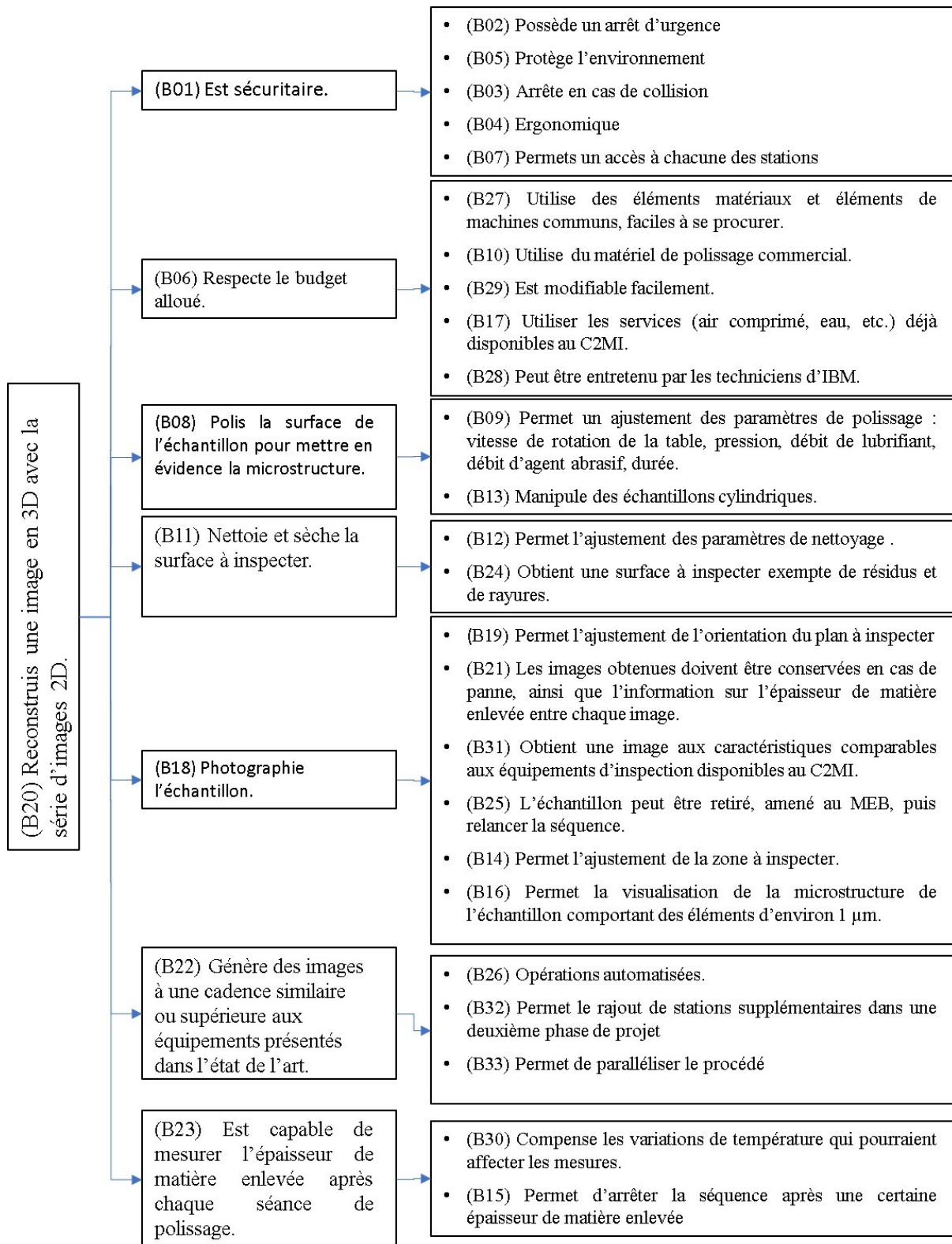


Figure 18: Diagramme des affinités entre les besoins.

Avec ce diagramme des affinités, on peut distinguer les besoins se rapportant aux différents sous-systèmes de l'équipement ainsi qu'à des considérations d'intégration dans un environnement industriel pour le futur. Grâce à l'identification des besoins et à l'organisation de ceux-ci, la vision du projet est clarifiée davantage et il est maintenant nécessaire d'identifier les fonctions que la pièce d'équipement doit réaliser.

3.2. Fonctions

L'Identification des fonctions s'effectue à l'aide de la technique RÉSEAU (Charron et Desbiens, 2005):

- R : Recherche intuitive des fonctions
- E : Examen de l'environnement (méthode des interacteurs)
- S : *Séquential analysis of functional element (SAFE)*
- E : Examen des efforts et des mouvements
- A : Analyse d'un produit de référence
- U : Utilisation des normes et des règlements

Les 3 premières techniques ont principalement été utilisées pour la recherche et les fonctions retenues sont présentées dans le tableau présenté en annexe B. Ces fonctions sont caractérisées par trois caractéristiques pour comprendre leur rôle et pour faciliter le tri :

1. Le type de fonction : service (usage ou estime), technique ou de contrainte;
2. L'échelle de Kano : Base (B), Performance (P), Innovation (I) ou contrainte (C);
3. Classement suggérée par l'AFNOR : Indispensable (IND), Important (IMP), Intéressant (INT), Accessoire (ACC).

Un arbre fonctionnel est créé en début de processus de recherche de fonctions et est présenté à la Figure 19. La création de cet arbre fonctionnel permet d'identifier la relation entre les fonctions principales, secondaires et tertiaires tout en identifiant certaines fonctions manquantes. Il permet aussi d'identifier les différents sous-systèmes nécessaires pour l'accomplissement de la fonction principale.

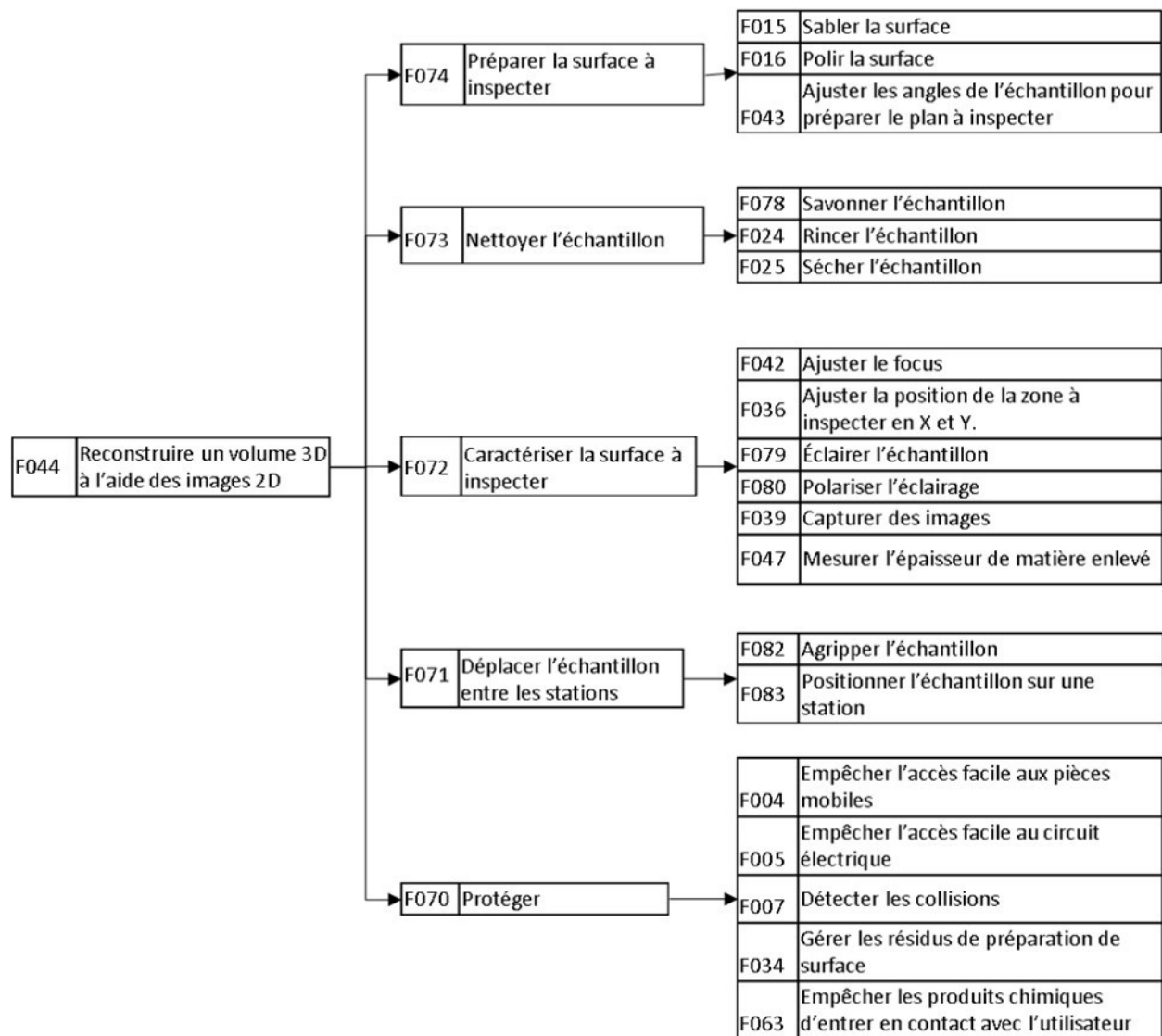


Figure 19: Arbre fonctionnel du tomographe optique micro-structurel.

Avec les fonctions secondaires de l'arbre fonctionnel on reconnaît bien les différents sous-systèmes de l'appareil, tel que défini à la Figure 17. Un autre outil de recherche de fonction utilisé est la structure fonctionnelle. Elle permet de visualiser la séquence des fonctions pour réaliser la fonction principale tout en identifiant les intrants et extrants de matière, énergie et information de chaque fonction. De par la construction de cette structure fonctionnelle, certaines fonctions manquantes ont pu être identifiées. Les Figure 20 et Figure 21 présentent cette structure fonctionnelle.

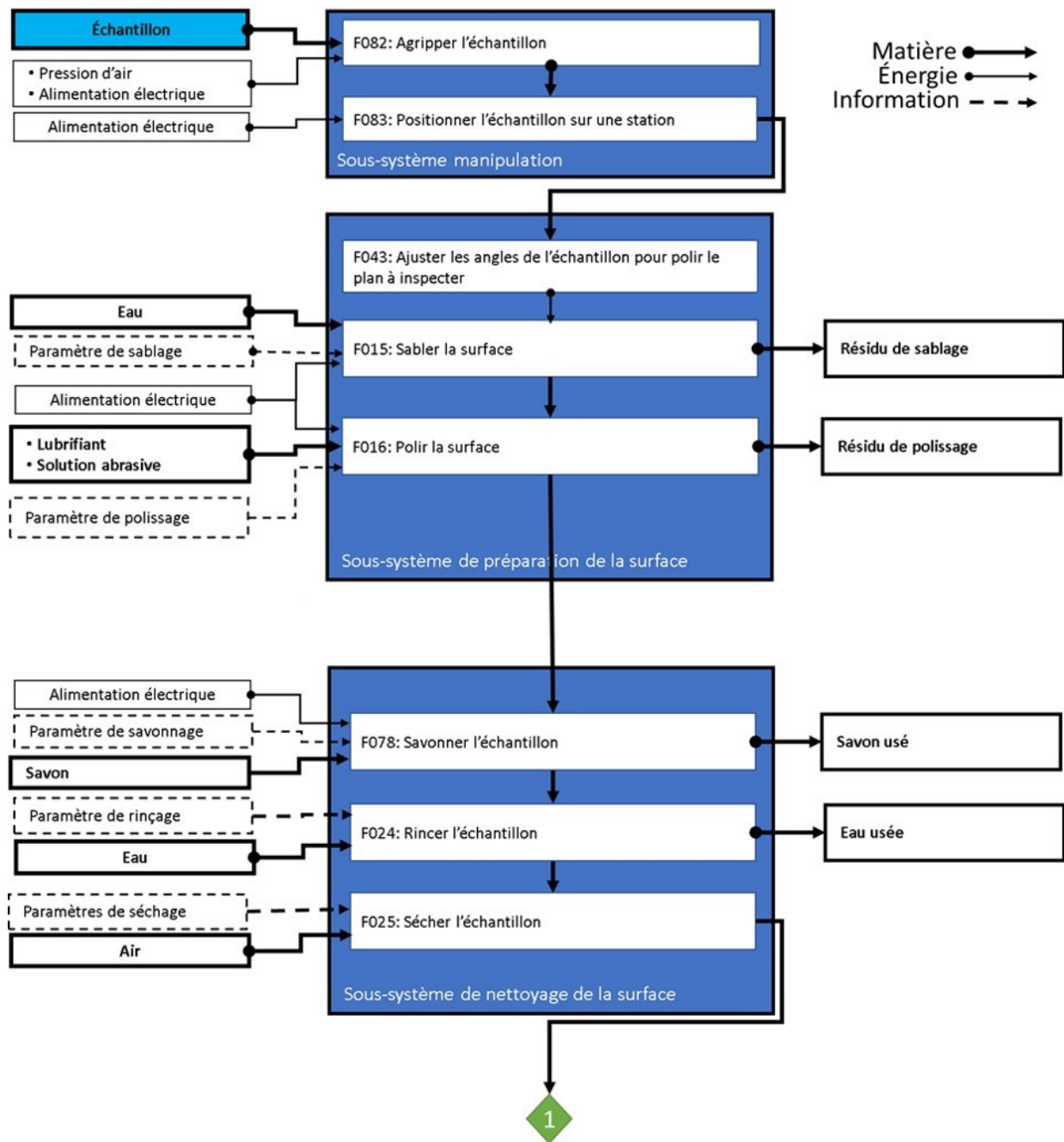


Figure 20: Structure fonctionnel des fonctions réalisées par le tomographe optique micro-structuré (1/2).

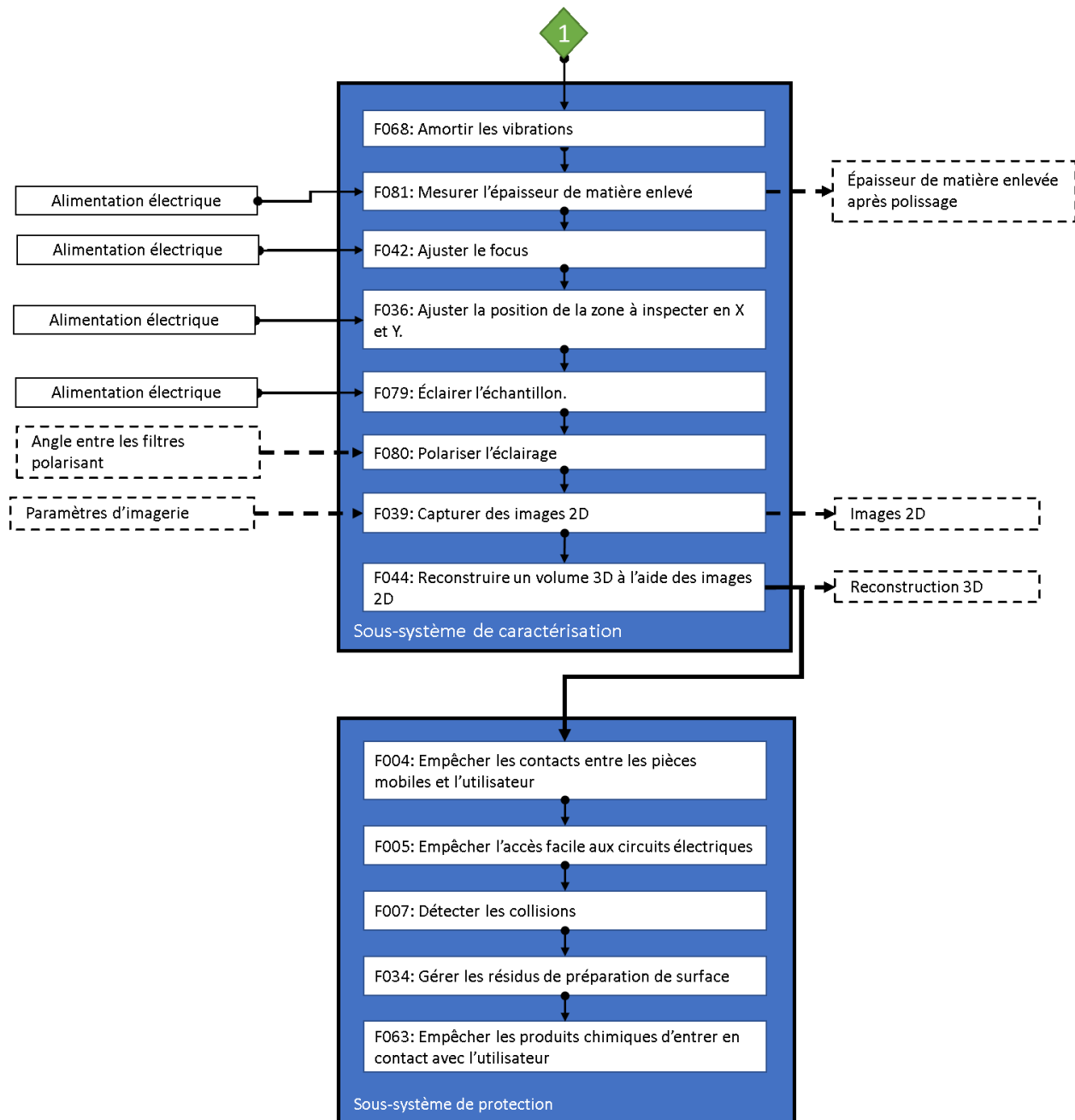


Figure 21: Structure fonctionnel des fonctions réalisées par le tomographe optique micro-structurel (2/2).

Grâce aux différents outils de recherche de fonctions, une meilleure compréhension du fonctionnement de l'appareil à concevoir est développée. Toutefois, pour la mesure de la qualité de l'appareil et pour permettre des décisions techniques et technologiques plus ciblées il est essentiel de produire, à l'aide de ces fonctions, un cahier des charges fonctionnelles, présentées dans la section suivante.

3.3.Cahier des charges fonctionnelles.

Un classement des fonctions est réalisé pour identifier les fonctions qui amènent des critères quantifiables et mesurables. Ces fonctions sont principalement de type « usage », bien qu'il y en ait quelques-unes de type « contrainte », « technique » et « estime ». Le cahier des charges ainsi obtenu est présenté dans le Tableau 1.

Tableau 1: Cahier des charges fonctionnelles.

No	Fonction	Type	Spécification d'ingénierie	Définition	Mesure	Niveau	Flexibilité
F044	Reconstruire un volume 3D à l'aide des images 2D	Usage	Volume	Volume de l'image reconstruction.	Calcul à l'aide d'une pièce de calibration	200x200x200 μm^3	Min
			Résolution	Résolution de l'image, en $\mu\text{m}/\text{pixel}$, pour distinguer des éléments de petites tailles	Calcul à l'aide d'une pièce de calibration	1 μm	Max
F046	Générer des images à une cadence similaire ou supérieur aux équipements présenté dans l'état de l'art.	Estime	Cadence d'imagerie	Nombre de cycle de préparation de surface et imagerie par heure	Décompte	6	Min
F074	Préparer les surfaces à inspecter						
F015	Sabler la surface	Usage	Vitesse de rotation du plateau	Vitesse de rotation du plateau de la table de préparation de surface avec papier sablé	Capteur de rotation	0 - 300 RPM	Min
			Débit d'eau	Débit d'eau pour le refroidissement de l'échantillon lors du polissage	Contenant gradué et montre	1L/min	Min
			Vitesse de rotation de l'échantillon	Vitesse de rotation de l'échantillon lors du sablage, pour diminuer les rayures	Capteur de rotation	5 tours/min	Min
F016	Polir la surface	Usage	Vitesse de rotation du plateau	Vitesse de rotation du plateau de la table de préparation de surface avec tapis de polissage	Capteur de rotation	0 - 300 RPM	Min

			Débit de lubrifiant	Débit de lubrifiant pour assurer un polissage tel que réalisé par les techniques manuelles	Contenant gradué et montre	6ml/min	Max
			Débit d'agent abrasif	Débit d'agent abrasif pour assurer un polissage tel que réalisé par les techniques manuelles	Contenant gradué et montre	6ml/min	Max
			Vitesse de rotation de l'échantillon	Vitesse de rotation du plateau de la table de préparation de surface avec tapis de polissage	Capteur de rotation	0 - 5 tours/min	Min
			Force	Force appliquée sur l'échantillon pour réaliser le polissage	Cellule de charge	100N	Max
F043	Ajuster les angles de l'échantillon pour polir le plan à inspecter	Usage	Correction angulaire	Correction angulaire réalisé par le porte échantillon pour ajuster l'orientation du plan à inspecter	Rapporteur d'angle	5 degrés	Min
F072	Caractériser la surface à inspecter						
F042	Ajuster le focus.	Usage	Résolution de déplacement	Résolution du déplacement parallèle à l'axe optique du microscope	Encodeur linéaire	0.25µm	Max
F036	Permettre l'ajustement de la position de la zone à inspecter en X et Y.	Usage	Précision de positionnement	Précision en X, Y que le sous-système de caractérisation peut positionner l'échantillon.	Pièce avec des caractéristiques dimensionnelles connues	20µm	Max
F047	Mesurer l'épaisseur de matière après chaque polissage	Technique	Résolution de la mesure	10% de la résolution de reconstruction	Palpeur numérique	0.1µm	Max

F071	Déplacer l'échantillon entre les stations						
F082	Agripper l'échantillon	Usage	Masse du porte-échantillon	Masse que le robot peut transporter, selon ces spécifications	Balance	3kg	Max
F035	Maintenir un échantillon cylindrique	Contrainte	Diamètre de l'échantillon	Diamètre de la poque de résine dans laquelle un place un composant électronique	Pied à coulisse	1.0, 1.25 et 1.5po	±0.01 po
F083	Positionner l'échantillon sur une station	Usage	Précision de positionnement	Précision en X, Y et Z que le système de manipulation peut positionner l'échantillon.	Cible graduée	±0.25 mm	Max
			Vitesse	Vitesse de déplacement entre les stations	Chronomètre et ruban à mesurer	100 mm/s	Min
F070	Protéger						
F009	Être ergonomique	Estime	Hauteur de travail	Hauteur des divers éléments qui nécessite un ajustement initial réalisé par un humain	Ruban à mesurer	110 cm	Max
			Poids des composants	Poids maximum à manipuler	Balance	20kg	Max
F008	Absorber l'énergie de collision	Technique	Énergie de collision du robot	Énergie cinétique générée par le robot lors de déplacement à vitesse et chargement maximaux	Calcul d'ingénierie	1320	Min

Les fonctions non quantifiables fixent tout de même des critères de conception importants et ne doivent pas être négligées. Celles-ci sont regroupées dans le Tableau 2.

Tableau 2: Fonctions non quantifiables considérées comme note à la conception.

F001	Avertir des sources de dangers	Estime
F002	Avertir du fonctionnement de l'appareil	Estime
F012	Utiliser des composants commerciaux	Contrainte
F013	Réutiliser des pièces d'équipements existants	Contrainte
F022	Être compatible avec le matériel de polissage commercial, disponible au C2MI.	Contrainte
F024	Rincer l'échantillon	Usage
F025	Sécher l'échantillon	Usage
F034	Gérer les résidus de préparation de surface	Usage
F037	Permettre l'arrêt de la séquence après un nombre défini d'images	Technique
F038	Utiliser les services disponibles aux C2MI.	Contrainte
F039	Capturer des images en couleur, dans le spectre visible	Usage
F045	Sauvegarder l'image et l'information pertinente après chaque cycle	Estime
F048	Ne pas endommager la zone à inspecter	Usage
F049	Ne pas être sensible aux matériaux transparents pour la mesure	Usage
F051	Utiliser des éléments matériaux et éléments de machines communs, faciles à se procurer.	Estime
F052	Posséder les plans de détail pour les composants fabriquer	Estime
F053	Posséder les plans électriques	Estime
F054	Posséder la documentation technique pour les éléments achetés	Estime
F055	Permettre l'ajout de nouveaux éléments de machine facilement	Estime
F056	Permettre l'ajustement de position des composants de la machine.	Estime
F057	Permettre l'ajout d'entrées/ sorties/ contrôleur/ carte d'acquisition au contrôleur.	Estime

F059	Appliquer un coefficient de correction aux mesures	Usage
F062	Identifier les produits chimiques utilisés	Usage
F063	Empêcher les produits chimiques d'entrer en contact avec l'utilisateur	Usage
F064	Permettre l'accès aux composants pouvant nécessiter de la maintenance ou des réparations	Estime
F065	Indiquer l'étape en cours	Estime
F066	Indiquer le temps restant	Estime
F073	Nettoyer l'échantillon	Usage
F078	Savonner l'échantillon	Usage
F079	Éclairer l'échantillon	Usage
F084	Empêcher les contacts entre les pièces mobiles et l'utilisateur	Usage

Avec le cahier des charges fonctionnelles défini, la recherche de concepts de solutions techniques a été réalisée à l'aide de plusieurs outils : séance de remue ménage, analyse d'équipement manuel disponible au C2MI, analyse d'équipements commerciaux réalisant des tâches similaires, analyse des ressources matérielles disponibles et pouvant être réutilisées, etc. Les concepts imaginés et évalués ne sont pas présentés dans le cadre de ce mémoire pour ne pas allonger le contenu inutilement et s'éloigner de l'objectif. Ainsi, seul le concept retenu est présenté dans la section suivante.

3.4. Concept retenu

Les différentes étapes du procédé de préparation de surface pour l'inspection de la microstructure des interconnexions sont des opérations connues et par conséquent, la solution doit s'inspirer fortement des équipements de laboratoires afin de permettre la transmission des connaissances entre le travail manuel réalisé par les techniciens et l'équipement automatisé.

Un des éléments clé à l'automatisation du procédé est la manipulation de l'échantillon, travail qui est normalement réalisé par un technicien. Le choix du concept utilisé a grandement été

influencé par le fait qu'un bras articulé de marque Fanuc a été rendu disponible par la compagnie GE Aviation de Bromont.

3.4.1. Présentation générale

L'échantillon analysé est une puce microélectronique de petite taille, de géométrie variable et constituée de matériaux fragile, ce qui rend sa manipulation difficile. Donc, tout comme pour les techniques de préparation manuelles, présentées à la section 2.1.1, la puce microélectronique doit être encapsulée dans un cylindre d'époxy de 1.5 pouces de diamètre. Pour le reste du document, lorsqu'il sera question de l'échantillon, c'est à ce cylindre d'époxy qu'il sera fait référence.

Une vue d'ensemble du concept réalisé est présentée à la Figure 22.

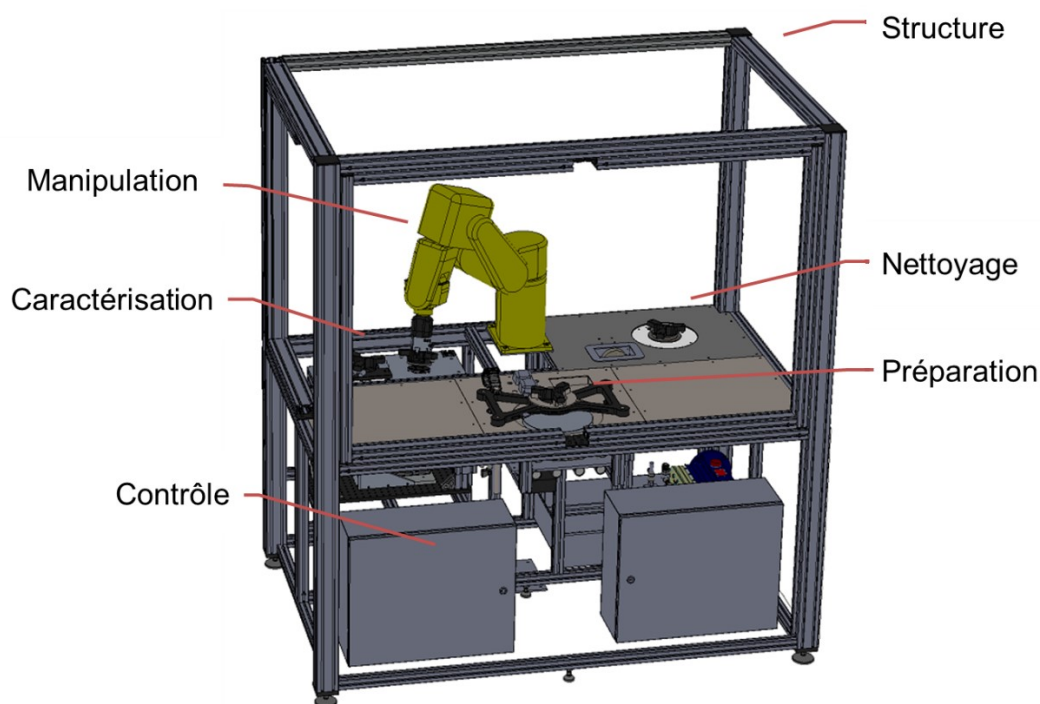


Figure 22: Concept d'automatisation utilisant un bras articulé 6 axes.

La Figure 22 présente les sous-systèmes préalablement identifiés par la recherche des fonctions, soit : Manipulation, Caractérisation de la surface, préparation de la surface, nettoyage de la

surface et le sous-système de protection, qui est divisé en contrôle et structure. Cachées sur la Figure 22, des portes à l'avant et sur le côté de la structure assurent la sécurité des usagers tout en permettant un accès aux différents sous-systèmes pour réaliser les ajustements nécessaires.

La séquence de fonctionnement du tomographe est présentée à la Figure 23.

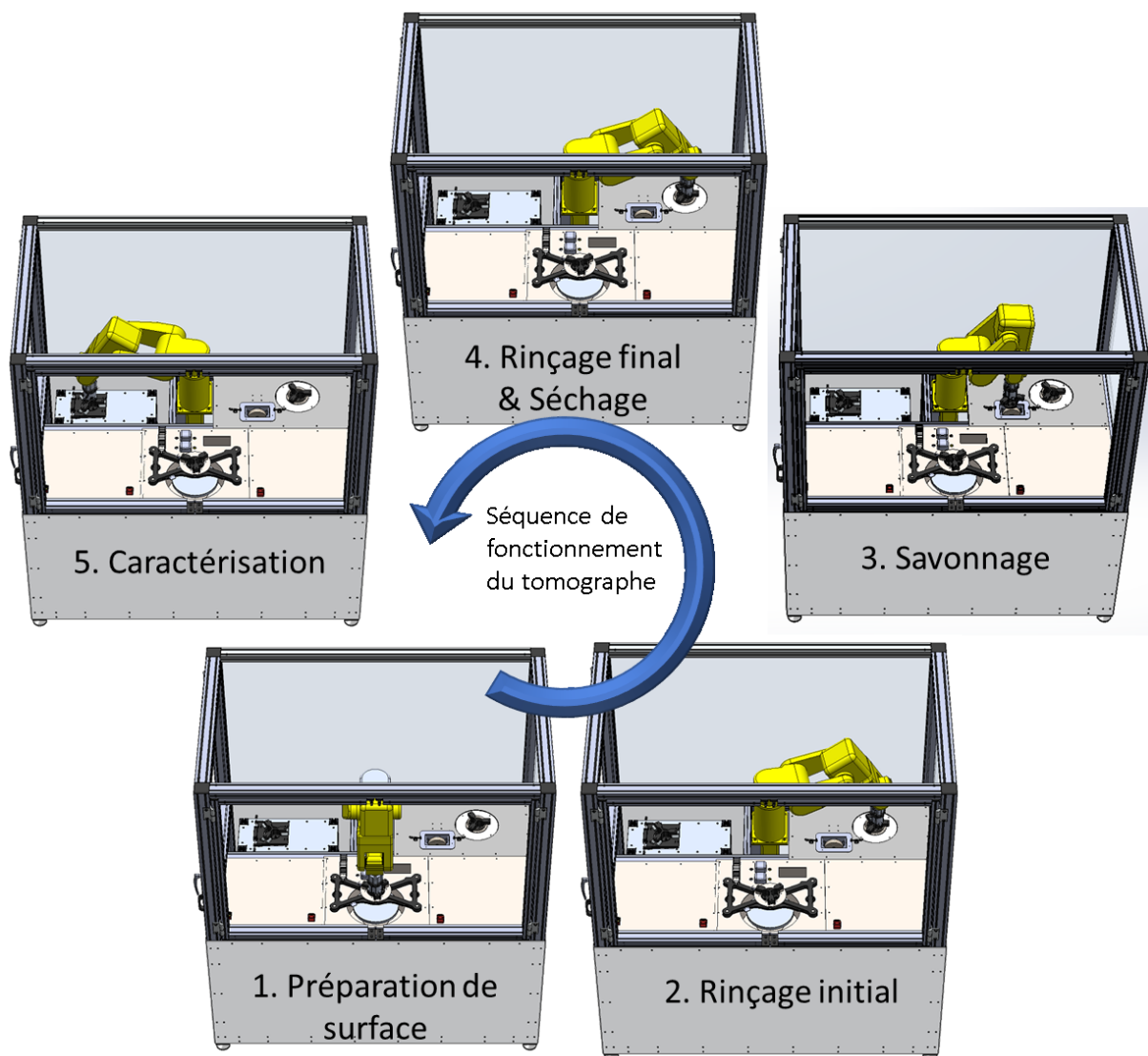


Figure 23: Séquence de fonctionnement du tomographe optique. Une répétition du cycle 1-2-3-4-5 est requise pour générer plusieurs images, chacune distancée de quelques dixièmes de micron et réaliser une reconstruction tridimensionnelle.

Sur la Figure 23, on peut observer le bras robotisé aux différentes stations de l'équipement. On peut remarquer que pour le sous-système de nettoyage deux positions du bras robotisé sont nécessaires : une pour le rinçage et le séchage et une pour le savonnage.

Le concept proposé s'inspire grandement de l'équipement Robot Med.3D présenté préalablement, mais se distingue par 2 éléments significatifs :

1. Le bras robotisé ne présente pas le besoin d'avoir une grande rigidité et une très bonne précision de positionnement, puisque des systèmes passifs remplissent ces fonctions.
2. Puisque des systèmes passifs de positionnement et rigidité sont utilisés, il est sera possible, après quelques modifications mineures de l'équipement, de réaliser la tomographie de plusieurs échantillons en parallèle et ainsi augmenter la cadence d'analyse pour un grand nombre d'échantillon.

Le fonctionnement et la fabrication de chaque sous-système, à l'exception du sous-système de contrôle, sont présentés dans les sections suivantes. Le sous-système de contrôle, qui comprend aussi la portion de reconstruction 3D, sera présenté dans le cadre d'un mémoire relié aux travaux de maîtrise d'un étudiant en génie électrique.

3.4.2. Sous-système de caractérisation

Le sous-système clé de l'équipement est sans aucun doute celui de caractérisation, dont le concept retenu est présenté à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** En effet, les 3 fonctions clé pour la reconstruction 3D de l'échantillon sont contenues dans ce sous-système : capturer des images, polariser la lumière et mesurer l'épaisseur de matière enlevée.

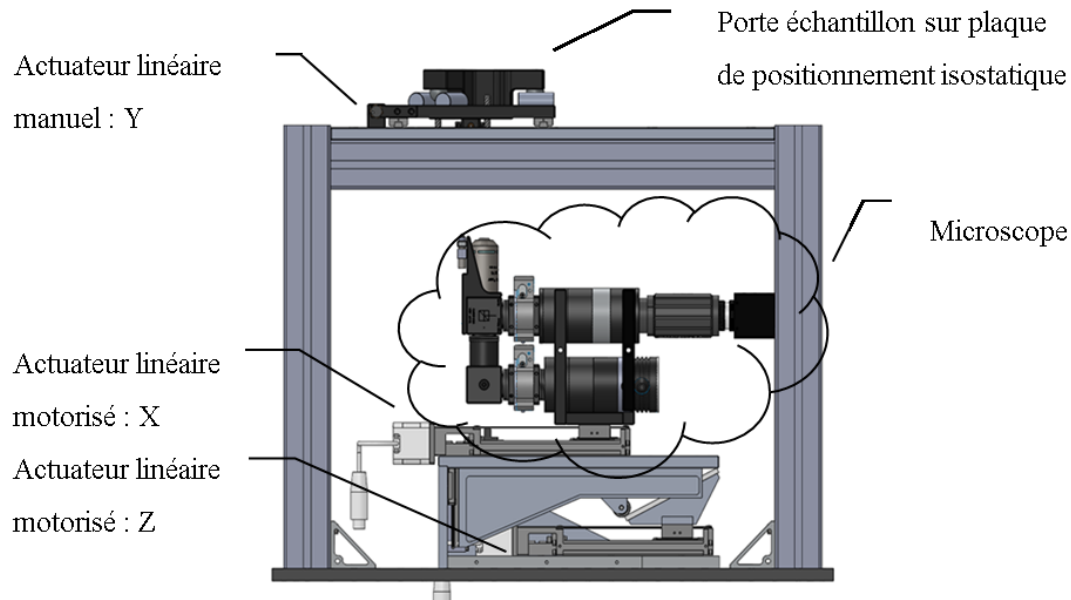


Figure 24: concept retenu pour le sous-système de caractérisation.

Après le nettoyage de l'échantillon, le sous-système de manipulation déplace le porte échantillon, qui est muni de 3 demi-sphères, jusqu'à la plaque de positionnement isostatique. Cette plaque est constituée de 3 paires de demi-cylindres positionnées à 120 degrés, tel que montré à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** La combinaison des 3 demi-sphères et des 6 demi-cylindres constitue un système de positionnement isostatique.

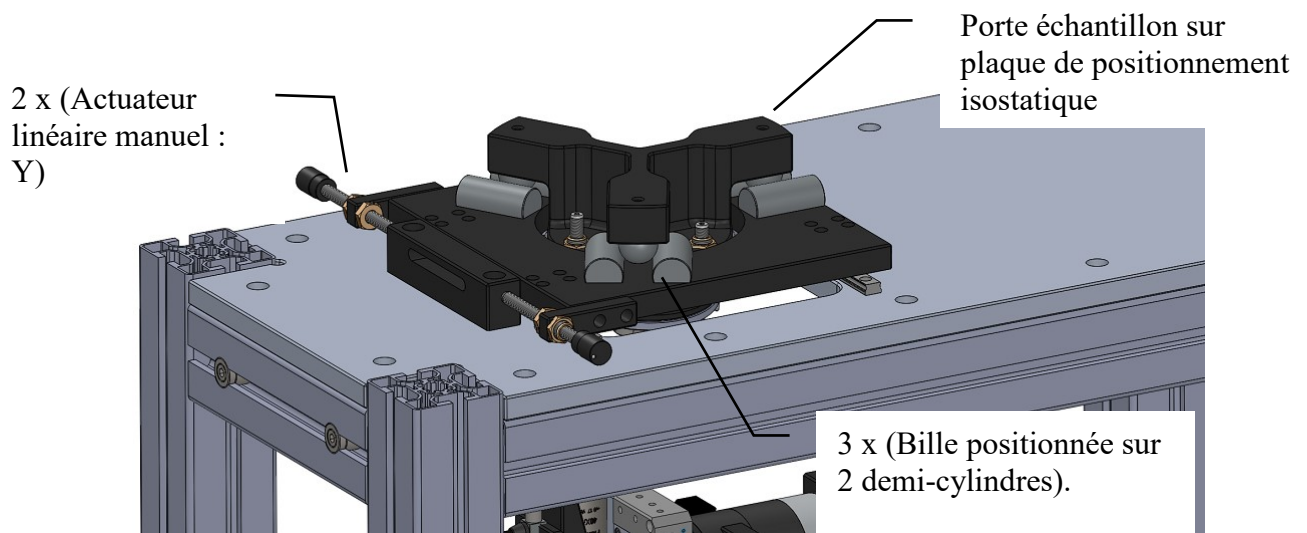


Figure 25: Vue de haut du sous-système de caractérisation.

Ce mécanisme passif assure une répétabilité de position selon l'axe vertical autour de 41 nm et le détail de la caractérisation de cette capacité de positionnement fait l'objet d'un article scientifique présenté à la section 4. Cette capacité à se repositionner est nécessaire pour la caractérisation de l'épaisseur de matière enlevée entre chaque cycle de préparation de surface. Avant un cycle de polissage, une mesure de la position de la surface de l'échantillon à inspecter est prise. Lorsque l'échantillon revient au sous-système de caractérisation, à une position quasi identique, une nouvelle mesure de la position de cette surface est prise. La différence de mesure est l'épaisseur de matière enlevée additionnée de quelques sources d'erreur : erreur de mesure du palpeur, erreur de repositionnement, variation de température du montage, présence de particules indésirables, etc. Pour arriver à mesurer des épaisseurs d'enlèvement de matière de l'ordre du micron, il est nécessaire de contenir les sources d'erreur bien en dessous d'un micron. L'approche décrite pour la mesure de l'épaisseur de matière est montrée à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

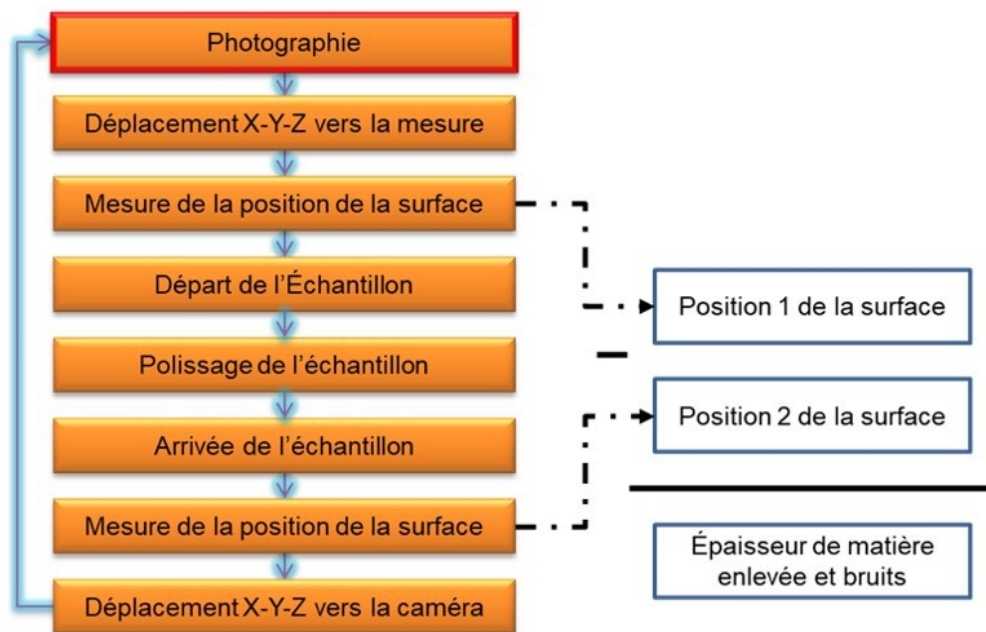


Figure 26: Schéma de la technique de caractérisation de la surface de l'échantillon par le sous-système de caractérisation.

Entre l'arrivée et le départ de l'échantillon au sous-système de caractérisation, une série d'images est enregistrée. Le palpeur de mesure de position étant fixé en parallèle de l'objectif du microscope, il est nécessaire d'amener la zone à inspecter de l'échantillon au plan focal et

dans l'axe optique. Pour ce faire, il a été choisi d'installer le microscope sur des axes X et Z motorisés afin de permettre l'automatisation du procédé. Aussi, durant la séance de photographie, deux filtres linéaires installés dans des actionneurs rotatifs motorisés servent à mettre en évidence les domaines cristallographiques, tel que décrit préalablement (F. Vander Voort, 2004). Grâce à la motorisation des actionneurs linéaires, il est possible d'étudier la surface de l'échantillon en variant l'angle relatif entre les filtres et en valeur absolue. Différentes variations de ton de gris sont obtenues par des angles relatifs différents. Une présentation plus détaillée du sous-système de caractérisation est réalisée à la section 3.5.1.

Dans tous les sous-systèmes présentés jusqu'à présent, il y a plusieurs actionneurs et capteurs pour mettre en place l'automatisation du procédé. La section suivante présente donc brièvement le système de contrôle de l'équipement.

3.4.3. Sous-système de préparation de surface

Le sous-système de préparation de surface doit pouvoir réaliser trois fonctions importantes, soit : sabler l'échantillon, polir l'échantillon et ajuster les angles de l'échantillon pour préparer le plan à inspecter. Pour réaliser les deux premières fonctions, tel que sur les outils manuels, un plateau est mis en rotation et on y fixe soit un papier abrasif, soit un tapis de polissage. L'étape du papier abrasif sert à dégrossir rapidement l'échantillon pour amener la surface visible proche de la zone d'intérêt en même temps que faire la correction d'angle de la face à observer, puisque la position de l'échantillon dans la rondelle d'époxy est arbitraire. La rotation de l'échantillon dans l'espace pour réaliser la correction de plan est effectuée à l'aide du porte échantillon présenté plus en détail dans la section 3.5.2.

Le sous-système de préparation de surface est non seulement inspiré d'équipements manuels de sablage et polissage, mais utilise la mécanique (moteur d'entraînement, poulie, courroie, arbre, roulements et support de plateau) d'une table de polissage désuète afin de réduire les coûts de l'équipement (voir **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour le concept retenu du sous-système de préparation de surface).

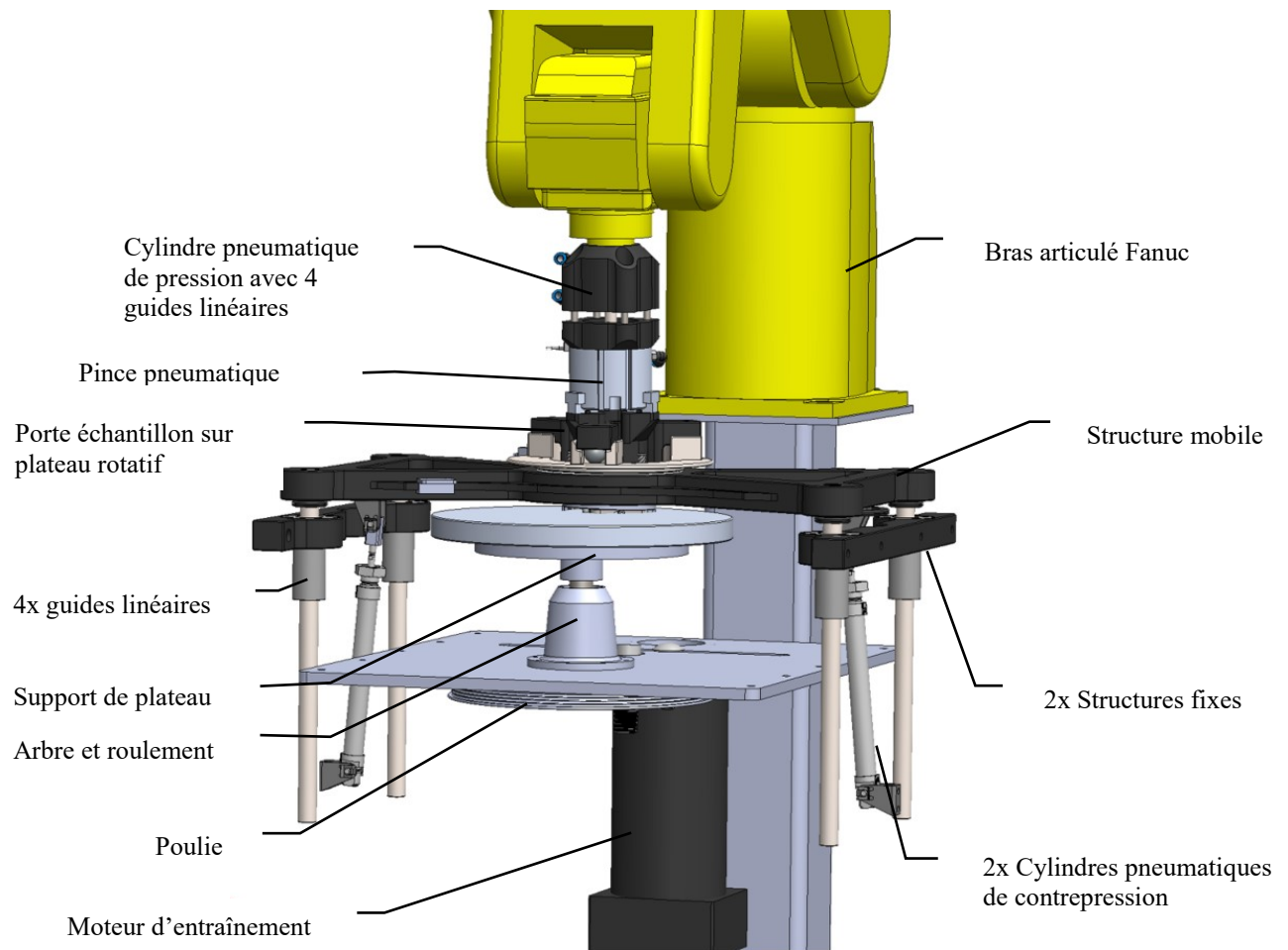


Figure 27: concept retenu pour le sous-système de préparation de surface.

Sur le schéma montré à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, une cuve de récupération des résidus de préparation de surface ainsi que des pompes péristaltiques pour l'apport de lubrifiant et d'agent abrasif sont cachées afin de mieux identifier les éléments internes.

Pour simplifier le premier prototype de cet équipement, il a été décidé d'utiliser le sixième joint motorisé du bras articulé pour faire la rotation de l'échantillon durant la préparation de surface, tel que réalisé par les tables de polissage manuel. Lors de la préparation de surface, l'échantillon n'est pas positionné sur l'axe de rotation du sixième joint du bras articulé pour favoriser un déplacement radial de l'échantillon par rapport au tapis de polissage et ainsi minimiser les probabilités de créer des rayures par des imperfections localisées sur le plateau de polissage. Cependant, ce désaxement de l'échantillon par rapport à l'axe de rotation du robot, tel que

montré sur la Figure 28, crée un moment tournant qui pourrait nuire à la planéité de la surface de l'échantillon poli à cause des jeux mécaniques existant dans les différents axes.

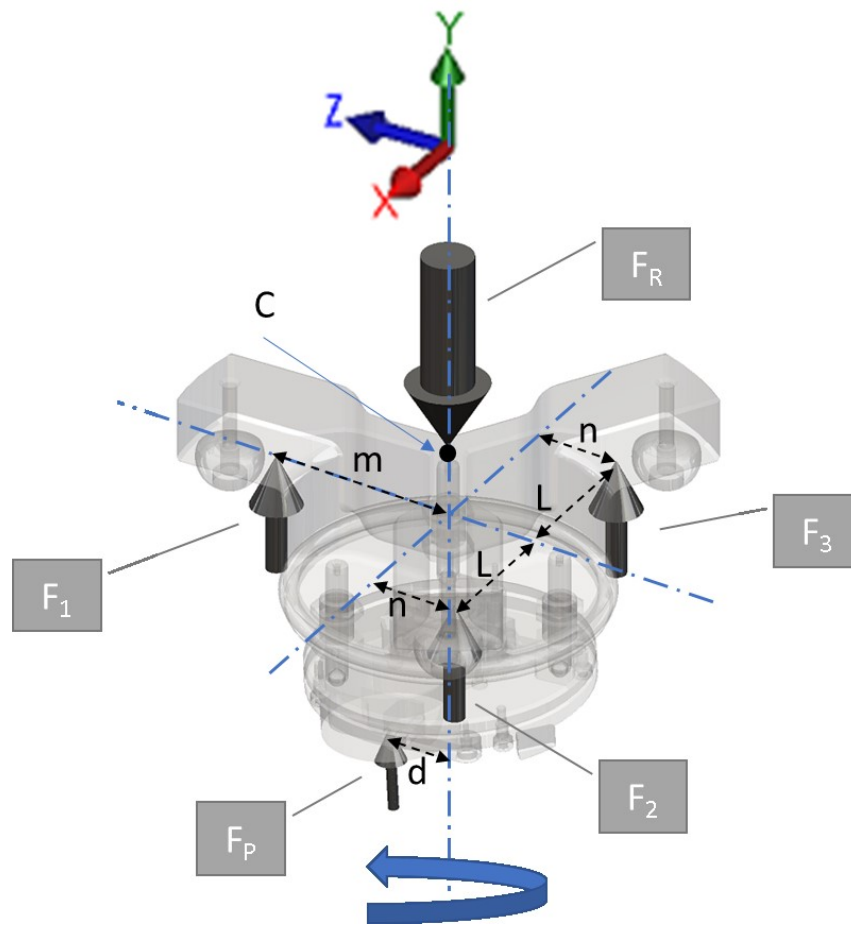


Figure 28: Diagramme du corps libre du porte échantillon.

Sur la Figure 28, F_r est les forces du robot, F_1 , F_2 et F_3 sont les forces de contact du porte échantillon et F_p est la force de polissage. Le décalage, d , de la force F_p produit un moment tournant qui doit être annulé pour éviter de créer une surface polie conique. Le robot pourrait en théorie bloquer ce moment, mais comme le robot a été construit en 2001, les jeux mécaniques, la précision de déplacement ainsi que le contrôle de force ne sont pas adéquats pour réaliser directement le procédé de préparation de surface. C'est par l'ajout d'une structure mobile de référence, montré sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, que les réactions F_1 , F_2 et F_3 apparaissent et annulent le moment tournant. Les caractéristiques du robots, extraites de la fiche technique de ce dernier, sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3: Caractéristique du bras robotisé LR-Mate 200i utilisé pour la manipulation de l'échantillon dans le tomographe optique (FANUC Robotics, 1999).

Caractéristique	Valeur
Nombre d'axes de déplacement	6
Charge maximale	3 kg
Répétabilité	± 0.04 mm
Vitesse angulaire	Jusqu'à 480 °/s

On peut constater dans le Tableau 3 une répétabilité de positionnement de ± 0.04 mm, pour un robot dans son état original. Comme le robot utilisé est une donation et qu'il date de plusieurs années, un jeu mécanique significatif dégrade cette répétabilité de positionnement. De plus, aucune mention n'est faite quant à la capacité à gérer une force de contact. Une option de programmation du contrôleur permet de détecter une collision, mais cette capacité est seulement basée sur l'augmentation du courant électrique dans les moteurs des différents axes.

Pour améliorer ces caractéristiques de contrôle de force et de répétabilité de positionnement, un système passif a été développé. Un boîtier en deux sections reliées par des guides linéaires est installé entre la pince pneumatique et le bras articulé. À l'intérieur de ce boîtier un cylindre pneumatique exerce une pression pour éloigner les deux sections du boîtier. De cette façon, le robot peut se déplacer à une position prédéterminer sans se soucier de la force exercée et c'est la pression d'air dans le cylindre pneumatique qui contrôle la force d'appuie de l'échantillon contre le plateau de préparation de surface.

La structure mobile, montrée à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, est montée sur 4 guides linéaires. Deux cylindres pneumatiques de contrepression reliés à des structures fixes poussent cette structure mobile vers le haut et un plateau tournant est placé au centre de celle-ci. Lorsqu'un échantillon est prêt pour la préparation de surface, le robot se positionne à une hauteur fixe prédéterminée qui permet l'appui du porte échantillon contre le plateau tournant, la compression des cylindres pneumatiques et le contact de l'échantillon avec le plateau. C'est

donc le différentiel de force entre les cylindres pneumatiques, tel que présenté à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, qui donne la force de polissage et améliore la stabilité de l'axe de rotation du porte échantillon par une précontrainte et un guidage du bras articulé à l'aide de la structure mobile qui agit comme plan de référence.

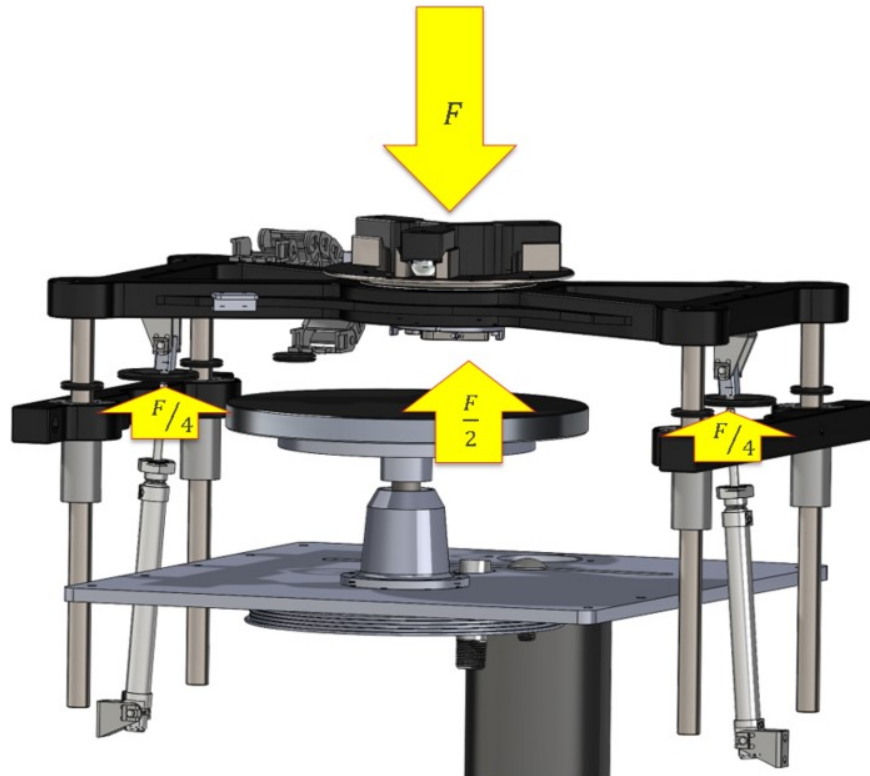


Figure 29: Différentiel de force pour précontraindre le bras articulé et améliorer la stabilité du système.

Ce système de structure de référence est aussi un concept intermédiaire dans l'éventualité où l'on voudrait faire évoluer l'équipement avec plusieurs stations de préparation de surface. Il serait alors possible d'ajouter au plateau mobile un mécanisme de retenu du porte échantillon et de rotation de celui-ci pour rendre la station autonome. Le bras articulé pourrait ainsi être dédié au déplacement de plusieurs portes échantillons en parallèle et ne pas être utilisé dans le procédé de préparation de surface.

Une fois le cycle de préparation de surface complété, le porte échantillon est apporté au système de nettoyage.

3.4.4. Sous-système de manipulation

Le sous-système de manipulation a pour but de remplacer le travail normalement fait par un humain, c'est-à-dire de déplacer l'échantillon entre les différents sous-systèmes. Pour le déplacement de l'échantillon entre les différentes stations, il a été choisi d'utiliser un porte-échantillon (une description détaillée de celui-ci est réalisée à la section 3.5.2), et un bras articulé de marque Fanuc, modèle LR mate 200i. L'utilisation d'un tel système de manipulation a été très fortement guidée par le fait que le robot a été donné par GE Aviation Bromont. Une économie substantielle a ainsi été réalisée, mais impliquant des défis d'intégration puisque la technologie est vieille d'une quinzaine d'années. Ce bras robotisé possède 6 axes de rotation, tel qu'identifié sur la Figure 30, une capacité de charge de 3 kg et une répétabilité de positionnement de ± 0.04 mm (FANUC Robotics, 1999).

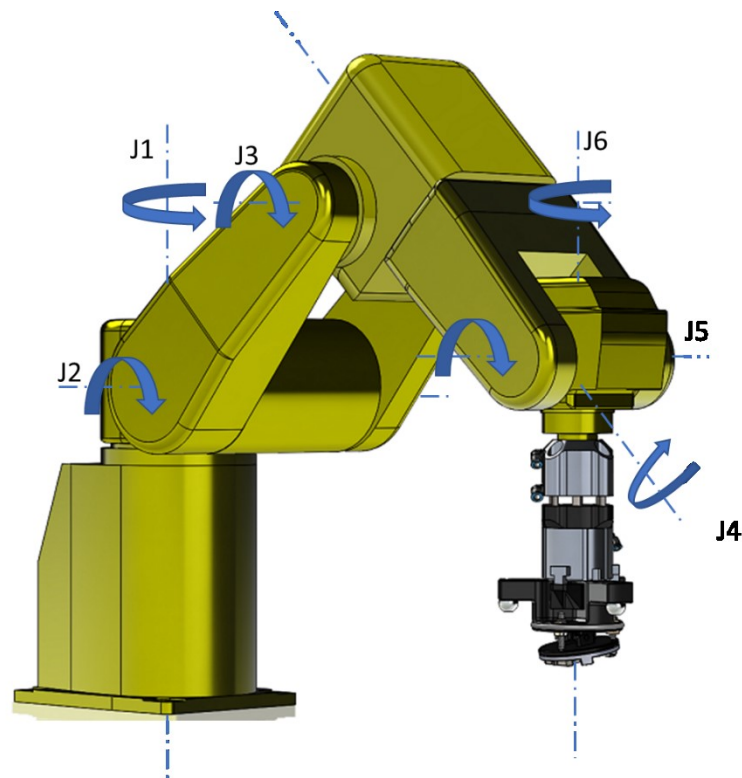


Figure 30: Identification des axes de rotation du bras robotisé LR-Mate 200i.

Ces six degrés de liberté permettent de couvrir une zone de travail se ressemblant à une coquille sphérique, avec un diamètre de 700 mm, tel que montré à la Figure 31. La conception de l'équipement doit donc tenir compte de cette limitation en plus de la précision de positionnement du robot qui est dégrénerée par une usure des composants mécaniques (principalement les engrenages).

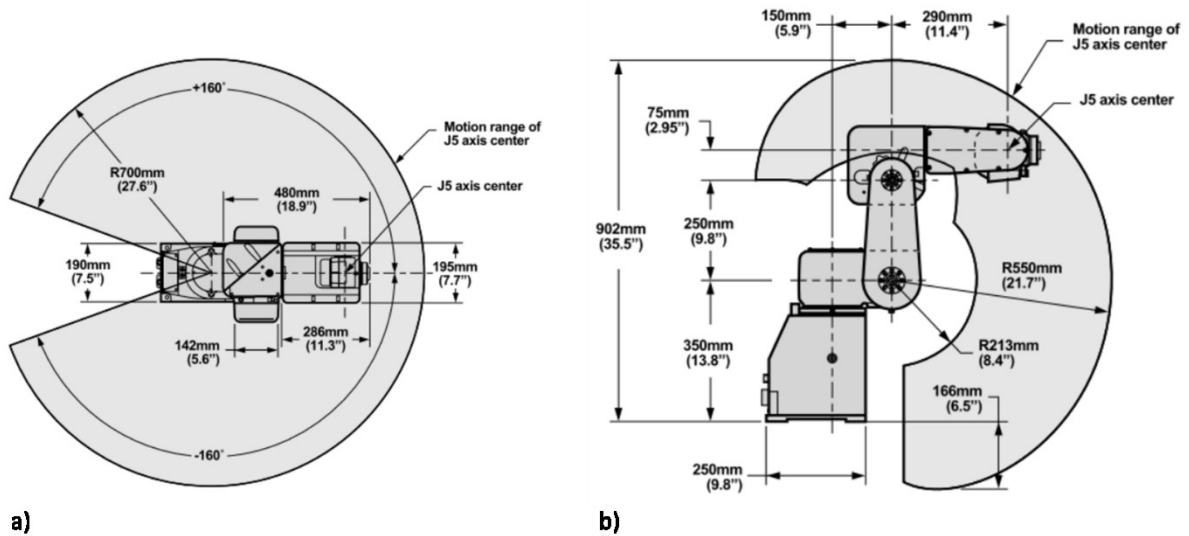


Figure 31: Représentation de la zone de travail du bras robotisé LR Mate 200i. a) vue du dessus. b) vue de côté (FANUC Robotics, 1999).

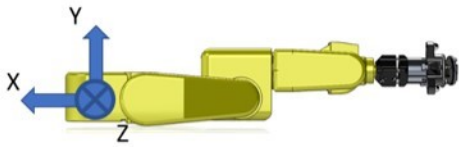
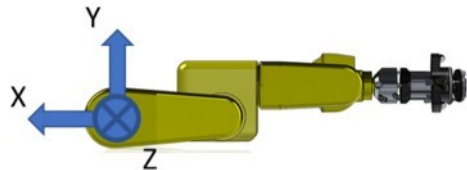
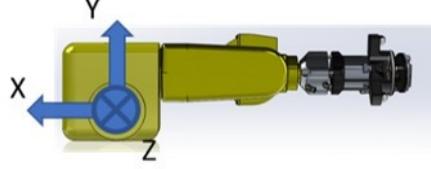
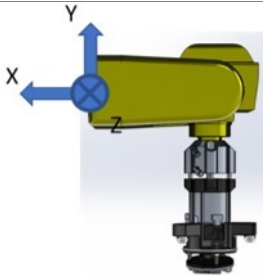
Puisqu'un bras robotisé est utilisé, il faut évaluer adéquatement le risque pour les usagers et l'éliminer à la source. Pour cela, il est essentiel de connaître l'énergie cinétique déployée pour mettre en place les protections adéquates. L'énergie cinétique d'une pièce en rotation, T , est donnée par l'équation (1),

$$T = \frac{1}{2} I_z \omega^2, \quad (1)$$

où I_z est le moment d'inertie de masse et ω^2 la vitesse angulaire. Pour calculer l'énergie cinétique du robot, n'ayant pas accès à l'inertie de masse de chacune des sections, le modèle numérique le représentant est utilisé. Cependant, le dessin est représentatif de la géométrie externe seulement et chaque élément est dessiné plein et constitué d'aluminium, alors que le

robot réel à des éléments coques pour y insérer les moteurs, engrenages, câblages et autre. La masse du modèle numérique ainsi obtenue est d'environ 90 kg, alors que la masse réelle est d'environ 40 kg. De cette façon, le calcul d'inertie et d'énergie surestime la valeur réelle et fournit un facteur de sécurité supplémentaire. Le Tableau 4 présente l'énergie cinétique lorsque chacun des joints est mis en rotation, avec le bras en position créant le plus d'inertie possible.

Tableau 4: Énergie cinétique, moment d'inertie et vitesse angulaire pour chacune des sections du robot.

Joint en rotation	Schéma	Vitesse angulaire	Moment d'inertie	Énergie
J1		180 °/s [3.142 rad/s]	$I_{yy} = 11.29166$ Kgm ²	55.724 J
J2		180 °/s [3.142 rad/s]	$I_{zz} = 5.79685$ Kgm ²	28.607 J
J3		225 °/s [3.927 rad/s]	$I_{zz} = 1.48900$ Kgm ²	11.481 J
J4		400 °/s [6.981 rad/s]	$I_{xx} = 0.15789$ Kgm ²	3.850 J

J5		330 °/s [5.760 rad/s]	$I_{zz} =$ 0.11214 Kg m^2	1.858 J
J6		480 °/s [8.378 rad/s]	$I_{xx} =$ 0.00247 Kg m^2	0.087 j

L'énergie cinétique totale estimée est la combinaison linéaire de l'énergie cinétique de chacun des joints mis en mouvement à charge et vitesse maximales, pour un total de 101.6 joules. Puisque la structure de l'équipement est dans la zone de travail du robot, cette dernière doit être en mesure de résister à un impact. D'ailleurs, la structure en question est présentée dans la prochaine section.

3.4.5. Sous-système structure

La structure conçue sert à contenir les différents sous-systèmes et à protéger les personnes environnantes. Il a été choisi d'utiliser des extrusions d'aluminium de la compagnie MayTec pour sa facilité d'assemblage et sa capacité à apporter des modifications aisément au fil du temps, sans avoir recours à des procédés de fabrication complexes, telle la soudure. La Figure 32 présente la structure conçue.

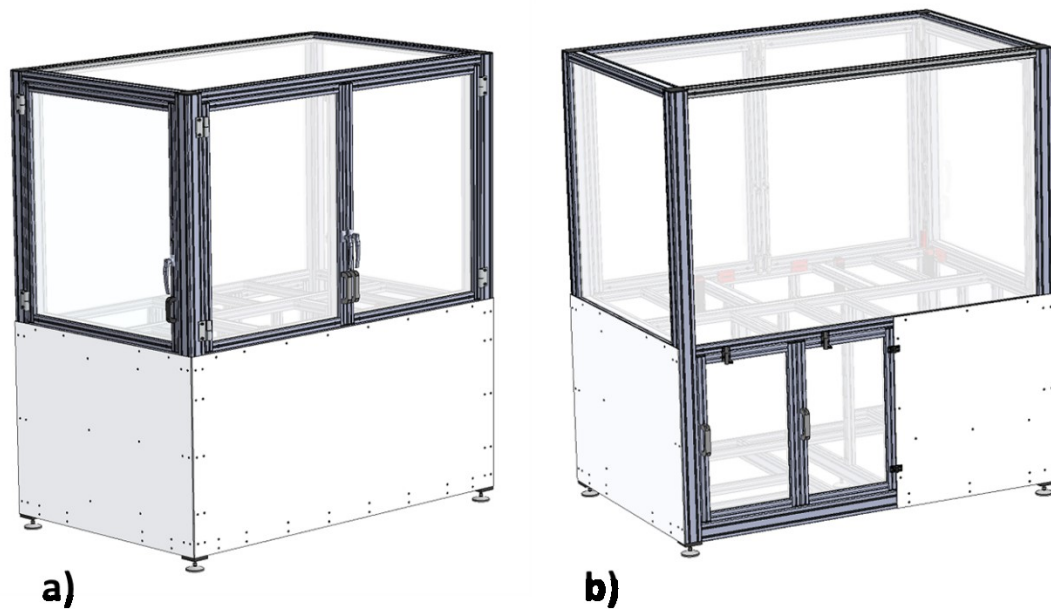


Figure 32: Concept de structure retenu. a) vue de face et côté gauche. b) vue de dos et côté droit.

On note sur la Figure 32 a) la présence d'une porte double à l'avant pour accéder au sous-système de préparation de surface et de nettoyage. Une seconde porte sur le côté permet d'accéder au microscope. Une troisième et dernière porte, visible sur la Figure 32 b) est située à l'arrière, dans la partie inférieure, pour accéder sous le sous-système de nettoyage. Il est prévu d'avoir les différentes entrées de service (eau et air comprimé) à cet endroit et des régulateurs permettrons certains ajustements.

Dans le but de limiter la propagation de vibration en provenance du déplacement du bras articulé utilisé dans le sous-système de manipulation, le support de ce dernier est installé sur un pied en acier vissé directement dans le plancher et ainsi découplé de la structure d'aluminium. Dans ce même ordre d'idée, le sous-système de caractérisation est simplement déposé sur la structure d'aluminium en utiliser des pieds en sorbothane. Les deux stratégies implémentées sont présentées à la Figure 33.

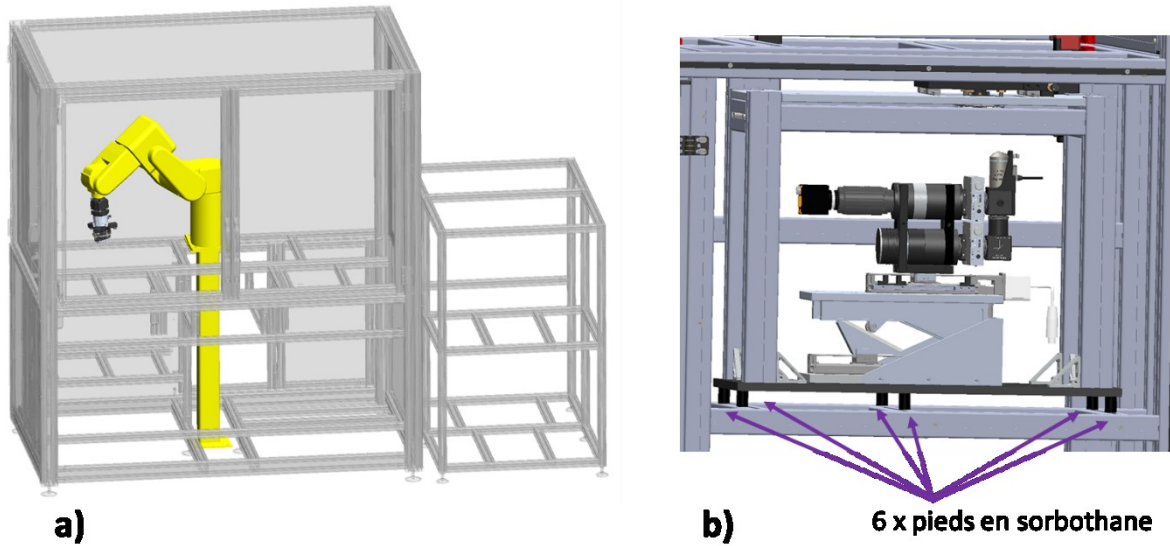


Figure 33: Stratégies de limitation des vibrations. a) pied de robot indépendant de la sa structure. b) sous-système de caractérisation isolé par des pieds en sorbothane

Les pieds en sorbothane proviennent de la compagnie Thorlabs (Thorlabs, Inc., 1999). Ils ont une dureté de 70, mesuré par la technique de duromètre A, et présente un pourcentage d'absorption de l'énergie en fonction de la fréquence et du chargement des pattes tel que présenté à la Figure 34.

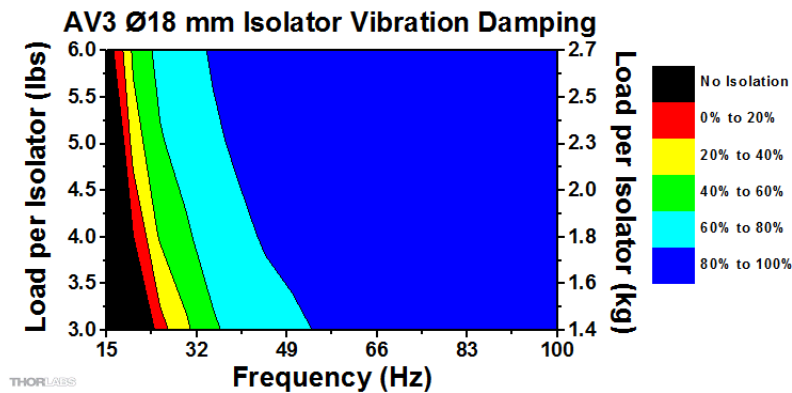


Figure 34: Diagram d'absorption des vibrations pour des pattes en sorbothane de 18 mm de diamètre. Numéro de pièce AV3 lorsqu'acheté auprès de la compagnie Thorlab (Thorlabs, Inc., 1999).

Le poids total du sous-système de caractérisation, avec un porte-échantillon en place, est de 13.5 kg. La masse est distribuée entre 6 pieds de sorbothane, pour une charge de 2.25 kg par pied, ce

qui optimise leur rendement d'amortissement des vibrations, sans être trop proche de la limite de poids, qui une fois franchi dégenère leur comportement et pourrait même amplifier les vibrations.

Un des rôles importants de la structure est de contribuer à la sécurité des usagers. La présence d'un bras robotique crée la possibilité d'accident grave. La première protection en place est la structure elle-même qui est conçue pour absorber l'énergie du robot, lorsqu'employé à vitesse et charge maximales. Dans la documentation technique de Maytec (MayTec Aluminium Systemtechnik GmbH, 2015), il est rapporté une capacité d'absorption de 1 600 J sans dommage permanent, générée par une masse de 100 kg accélérée à 20 km/h, pour une structure constituée d'un panneau de 4 mm et d'extrudés de 40x40 mm². La structure conçue utilise des panneaux de 6 mm et des extrudés de 40 x 80 mm² et 80 x 80 mm². Donc, pour une énergie estimée de façon conservatrice de 100 J, un facteur de sécurité d'au moins 16 est anticipé. Pour assurer pleinement la sécurité des usagers, il est également nécessaire de connaître l'état des portes (ouvertes ou fermées) en tout temps, d'empêcher les usagers d'ouvrir la porte lorsqu'il y a du danger et encore une fois d'absorber l'énergie d'un impact potentiel. Les éléments mis en place pour ces aspects sont présentés à Figure 35.

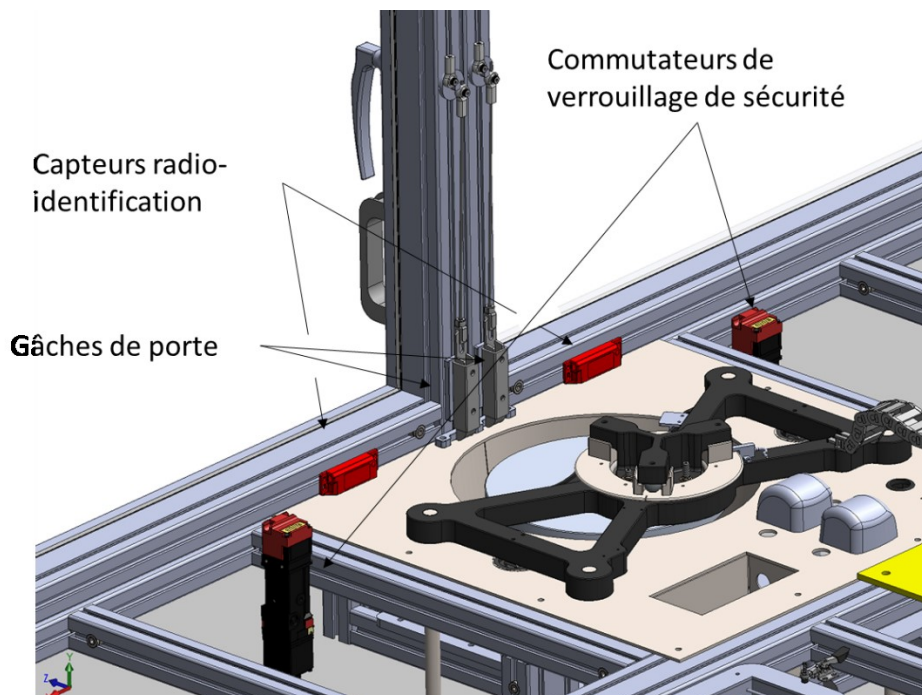


Figure 35: Vu de l'intérieur des composants de sécurité pour les portes.

On note sur la Figure 35 la présence de gâches pouvant supporter 10 000 N de charge (Hülsmann, 2009) chacune, ainsi qu'un capteur de radio-identification ayant un niveau de sécurité 4 selon la norme ISO13849-1 pour détecter l'état de la porte et un commutateur de verrouillage de sécurité pour bloquer l'ouverture de porte lorsque requis. Pour éviter une torsion de la porte lors d'un impact, une gâche a été installée en haut et en bas de la porte. Pour gérer les signaux des capteurs de radio-identification et contrôler les commutateurs de verrouillage de sécurité le système de contrôle est mis à contribution et présenté brièvement à la section 3.4.7

Les éléments présentés de la structure conçue permettent d'assurer la sécurité des usagers et du procédé tout en offrant une certaine flexibilité de modification puisqu'il s'agit d'un équipement prototype. Aussi, tous les systèmes présentés dans les prochaines sections sont fixés à la structure et intégrés à différents degrés.

3.4.6. Sous-système de nettoyage

En ce qui concerne la station de savonnage, rinçage et séchage aucun équipement existant connu ne permet de réaliser la tâche pour l'application présente. Lors de préparation de surface pour

inspection métallographique en utilisant les techniques manuelles conventionnelles, le savonnage s'effectue à l'aide d'un coton tige manipulé par un technicien. Ce procédé, à première vue fort simple, est remplacé par une brosse cylindrique très douce, trempant dans une cuve de savon et mise en rotation par un moteur électrique. Le bras robotisé amène la surface de l'échantillon en contact avec la brosse en rotation et peut effectuer des déplacements en simultané afin de bien savonner. Ce concept de station de savonnage est présenté à la Figure 36.

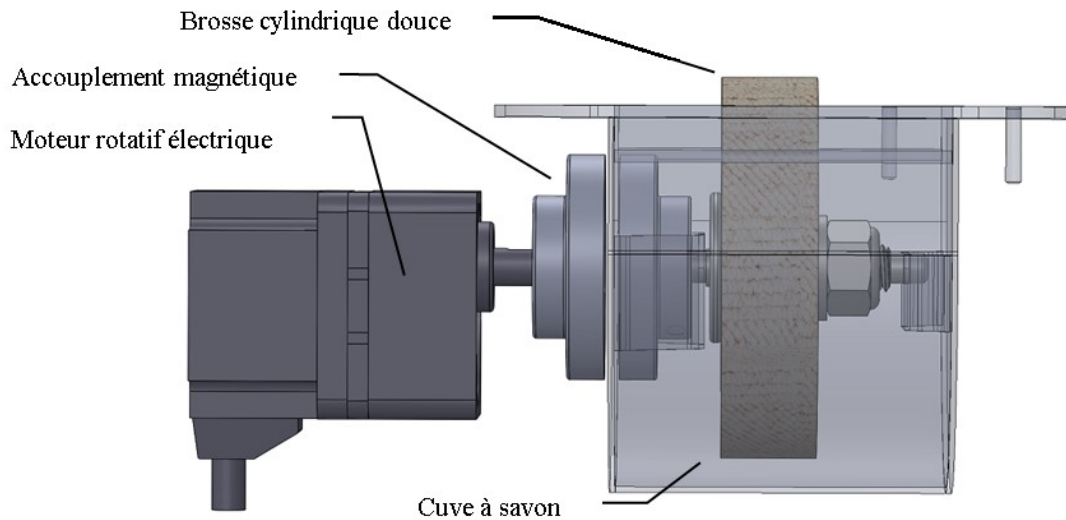


Figure 36: Station de savonnage.

Comme l'équipement réalise plusieurs préparations successives, une accumulation de résidu de sablage et polissage pourrait survenir au fond de la cuve et l'exposition à l'air ambiant sur de longue période risque d'affecter les propriétés du savon. Un entretien de la cuve à savon est nécessaire périodiquement et pour faciliter cette étape, un embrayage magnétique a été utilisé entre le moteur et l'arbre de la brosse. L'opérateur peut ainsi retirer et remettre en place la cuve

à savon en place, sans outil et sans refaire d'ajustement. De plus, cet embrayage permet d'éviter de percer la paroi de la cuve et de risquer d'avoir des fuites de savon. Tel que montré à la Figure 37, cette station de savonnage est montée sur la surface du sous-système de nettoyage. Pour assurer une répétabilité de positionnement, un système de localisation avec 2 tiges de guidage est utilisé et deux sauterelles mécaniques verrouillent le tout en place.

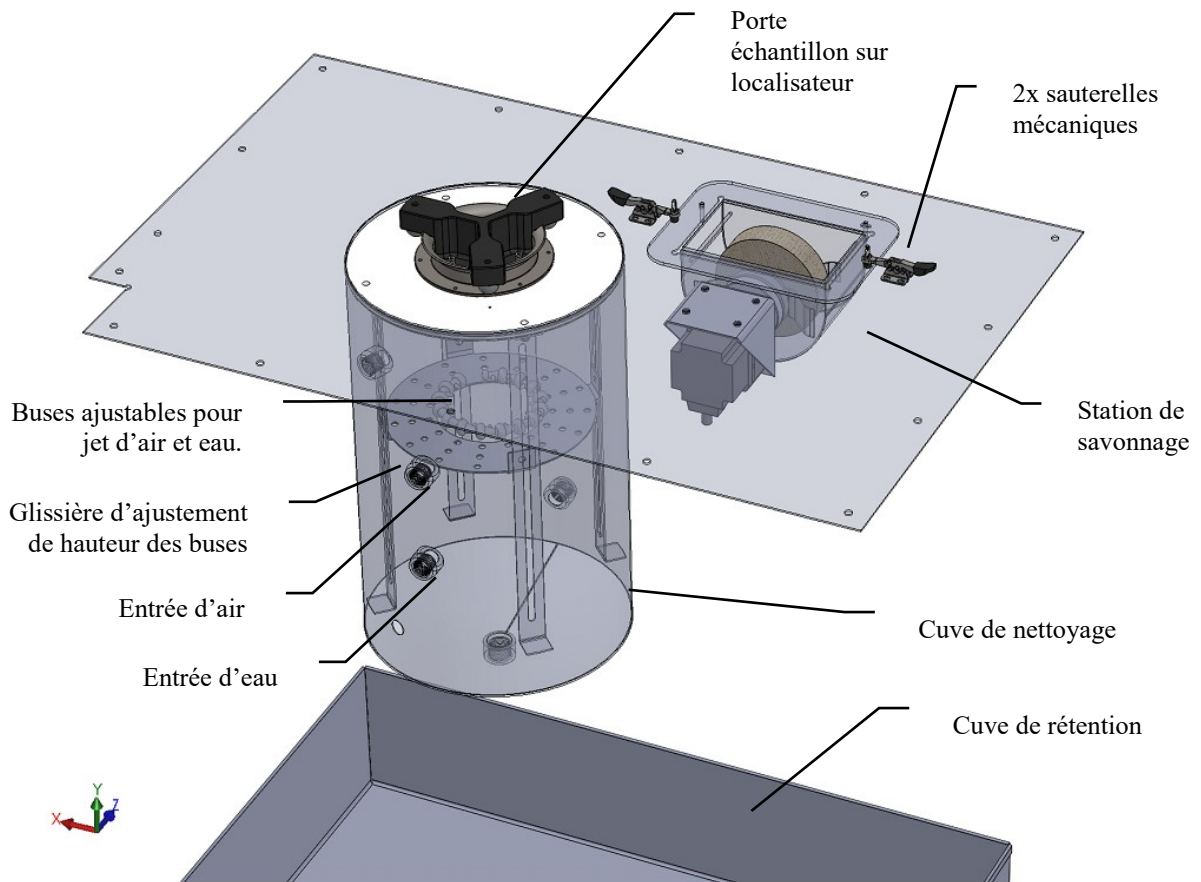


Figure 37: concept retenu pour le sous-système de nettoyage.

Sous la surface du sous-système, une cuve de nettoyage avec une entrée d'eau et une entrée d'air est installée. À l'intérieur de celle-ci, un système de buses ajustables montées sur des glissières permet l'optimisation de l'orientation et de la distance des jets d'air et d'eau pour réaliser le rinçage et le savonnage. En ajoutant le temps d'exposition et le débit des fluides comme paramètres ajustables, ce sous-système imite ce qu'un technicien réalise à l'aide d'un robinet d'eau propre déionisé et d'un jet d'air. En dessous, une cuve de rétention pouvant contenir 150% du volume de la cuve de nettoyage est installée pour limiter les déversements en cas de bris.

Une fois le cycle de nettoyage complété, le porte échantillon est apporté au sous-système de caractérisation, présenté dans la prochaine section.

3.4.7. Sous-système de contrôle

La description de ce sous-système dans ce mémoire se veut très brève puisqu'elle fera l'objet de travaux d'un autre étudiant à la maîtrise ayant des compétences en génie électrique.

Quatre grands types d'opérations informatiques doivent être réalisées afin d'obtenir une reconstruction 3D de l'échantillon : la gestion d'entrées et sorties pour le contrôle de l'équipement, le traitement d'information, principalement des images, pour effectuer la reconstruction, la gestion du contrôleur robot pour les déplacements et la gestion de la sécurité de l'équipement. Au lieu de gérer ces types d'opérations dans des systèmes indépendants, un ordinateur industriel embarqué, modèle CX2030 de la compagnie Beckhoff (BECKHOFF Automation GmbH, 2017), tel que présenté à la Figure 38 est utilisé.



Figure 38: Ordinateur industriel embarqué de la compagnie Beckhoff.

Sur cet ordinateur, le logiciel TwinCAT 3 (BECKHOFF Automation GmbH, 2012) est installé et permet l'utilisation du processeur de l'ordinateur pour du contrôle en temps réel, du type automate industriel, ainsi que la gestion de plusieurs langages de communication informatique courants: C, C++, Matlab, etc. L'ordinateur peut aussi être installé sur un rail DIN et possède un système de connexion directe pour une vaste gamme de cartes d'entrée / sortie et de contrôle d'axes motorisés, tel que présenté dans le Tableau 5. La liste des capteurs et actionneurs reliés

aux différentes cartes n'est pas complète vu l'état incomplet de la machine lors de la rédaction de ce mémoire.

Tableau 5: Liste des cartes d'entrées et sortie utilisées avec l'ordinateur industriel.

No de carte	Type de carte	Capteurs/Actionneurs
CX2500-0070	4 ports USB	Communication avec le palpeur et les stages rotatifs du microscope
EL5021	Lecture de signal sinusoïdale 1 v crête à crête (vpp).	Lecture du signal de l'encodeur optique linéaire pour l'axe vertical motorisé du microscope
EL1809	16 entrées numériques, 24V.	Détection de signaux de plusieurs capteurs reliés fonctionnement : position zéro des axes, présence de pièce à une station déterminée, Niveau haut d'eau, etc.
EL2809	16 sorties numériques, 24V.	Actionnement de valve d'eau et d'air, alimentation de lumière, etc.
EL4034	4 sorties analogues ±10V, 12 bits	Contrôle de la vitesse de rotation de la table de polissage et de la brosse de savonnage
EL7332	2 sorties analogiques 24V.	Contrôleur des moteurs DC des pompes péristaltiques.
KL3312	2 entrées analogiques pour thermocouple	Lecture de la température de la station de caractérisation
EL6900	Unité d'application de la logique TwinSAFE	Appliquer la logique de sécurité en utilisant les entrées et sorties TwinSAFE.
EL1904	4 entrées numériques TwinSAFE, 24V.	Lecture des capteurs RFID utilisés pour la détection de fermeture des portes, des boutons d'urgence, de démarrage, de mode de fonctionnement du bras articulé
EL2904	4 sorties numériques TwinSAFE, 24V	Actionnement des commutateurs de sécurité installé sur chaque porte.
EK1110	Extension Ethercat	Relier les contrôleurs des moteurs pas-à-pas.
EP7041-3002	Contrôleur de moteur pas-à-pas.	Contrôler les moteurs des axes X et Z du microscope.

La fonction la plus importante du système de contrôle est sans doute d'assurer la sécurité des usagers. Une analyse de risque a été réalisée avec l'aide d'IBM Bromont (Document fourni en version numérique avec le mémoire) et il a été identifié qu'à cause de la présence d'un bras robotique un système de sécurité de catégorie 4 est requis, tel que spécifié dans la norme ISO

13849-1:2015. Tel que noté dans le Tableau 6, des cartes de sécurité sont installées sur l'ordinateur industriel et une extension de programmation, TwinSAFE, permet de programmer la logique de sécurité. L'application de la logique de sécurité ne s'exécute pas par l'ordinateur industriel, mais par la carte indépendante EL6900.

La combinaison des sous-systèmes décrits dans les sections précédentes permet de générer une série d'images, distancées dans l'espace d'une valeur connue, de qualité comparable à celles obtenues par les techniciens en métallurgie et de façon automatisée. La combinaison entre un système de manipulation basse précision avec un système de positionnement passif de haute précision permet de réduire les coûts de l'équipement et paralléliser le procédé pour augmenter la cadence de préparation d'échantillon. La section suivante décrit de façon plus détaillée le porte échantillon et le sous-système de préparation de surface.

3.5. Conception détaillée

Pour éviter de surcharger le contenu de ce mémoire, la conception détaillée est présentée pour le sous-système de caractérisation et pour le porte-échantillon seulement. De plus, les forces en jeu étant très faibles et aucun requis d'optimisation de géométrie ou de masse étant nécessaire, une approche de conception par excès est utilisée et aucun calcul détaillé de contrainte dans les diverses pièces n'est présenté.

3.5.1. Conception détaillée du sous-système de caractérisation.

La caractérisation de la surface à inspecter se résume à 2 choses : sauvegarder des images en mettant les domaines cristallographiques en évidence et mesurer l'épaisseur de matière enlevée entre chaque séance de polissage. La première est réalisée à l'aide d'un microscope numérique et la seconde à l'aide d'un palpeur numérique, chacun présenté dans les sections suivantes.

Microscope numérique

La fonction primaire de l'équipement conçu et fabriqué est de reconstruire une image 3D de l'échantillon et pour ce faire, il faut nécessairement avoir une série d'images 2D espacées

chacune entre elles de quelques microns. Pour en faire l'acquisition, une caméra numérique est installée sur un microscope de conception unique, tel que présenté à la Figure 39. À moins d'avis contraire, tous les éléments du microscope proviennent de la compagnie Thorlabs (Thorlabs, inc., 1999).

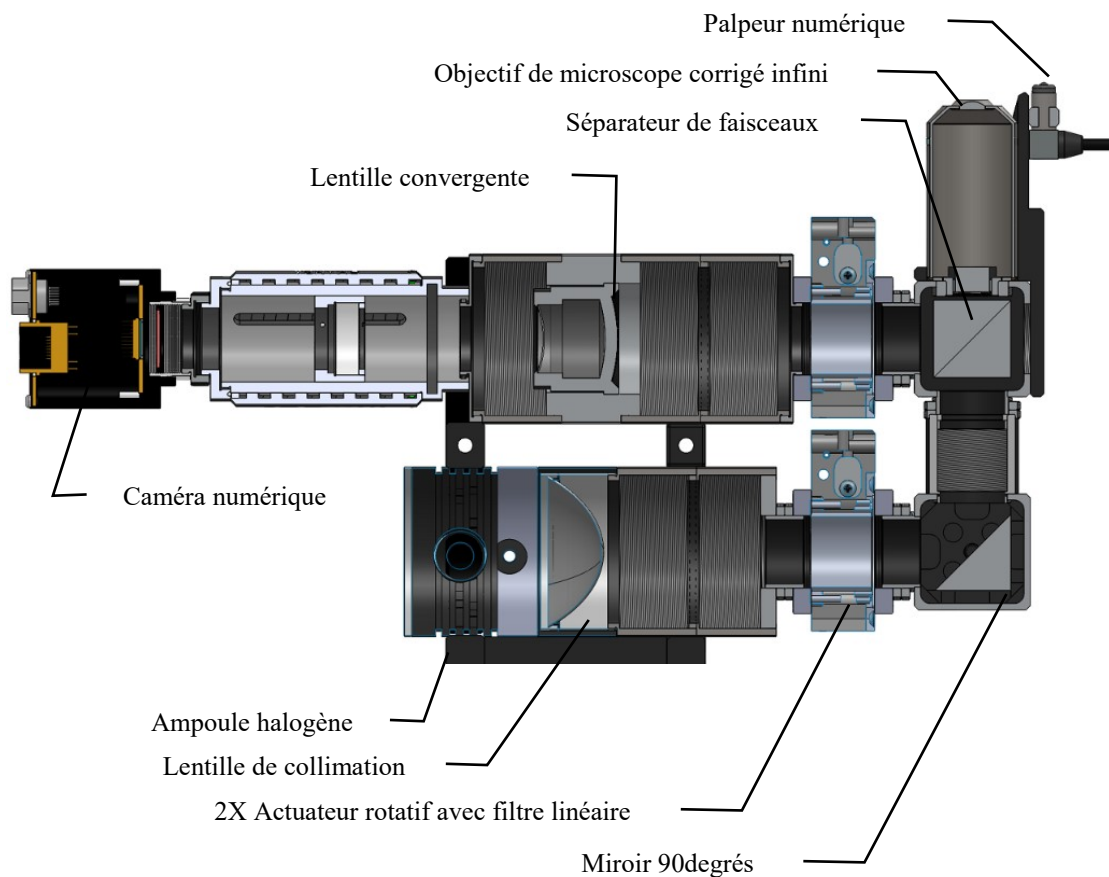


Figure 39: Vu en coupe du microscope du sous-système de caractérisation.

Une ampoule halogène agit en tant que source lumineuse et une lentille de collimation ramène les faisceaux lumineux quasi parallèles entre eux. Par la suite, le faisceau lumineux traverse un premier filtre linéaire pour polariser la lumière, frappe un miroir de renvoi à 90 degrés, traverse

un séparateur de faisceaux pour finalement sortir par l'objectif du microscope et illuminer la surface à inspecter. La lumière étant réfléchiée par la microstructure non cubique de l'étain subit une rotation de l'angle de polarisation en fonction de l'orientation du domaine cristallographique et est recaptée par l'objectif du microscope, ce dernier étant corrigé pour une image à l'infini. L'utilisation d'un objectif de microscope corrigé à l'infini permet d'obtenir des faisceaux de lumière parallèles entre eux et ainsi de facilement intégrer les filtres linéaires sans affecter la position de l'image finale. Le séparateur de faisceaux renvoie la lumière vers le second filtre linéaire, dit le filtre analyseur, et l'intensité des faisceaux lumineux est atténuée en fonction de leur orientation. Par la suite, une lentille convergente focalise les faisceaux lumineux vers un capteur CCD d'une caméra numérique qui capture les images de l'échantillon. L'objectif utilisé possède les caractéristiques présentées dans le Tableau 7.

Tableau 7: Caractéristiques de l'objectif de microscope (Nikon Instruments Inc., 2016).

Fabricant	Nikon
Type	CFI Achro LWD P 20X
Grossissement	20X
Ouverture numérique (NA)	0.4
Distance de travail (mm)	3.90

Le type CFI (Chromatic aberration Free Infinity) Achro LWD P 20X offre une image sans aberration chromatique, avec une distance de travail plus longue que la normale, optimisée pour l'éclairage avec lumière polarisée et générant des faisceaux lumineux parallèles à la sortie. La profondeur de champ focal (P_F) est donnée par,

$$P_F = \frac{n\lambda}{2NA^2} \quad (2),$$

où λ est la longueur d'onde, n est l'indice de réfraction du fluide entre l'objectif et le spécimen à observer et NA l'ouverture numérique de l'objectif. En considérant une longueur d'onde de $0.55\mu\text{m}$ pour la couleur verte au centre du spectre visible, l'ouverture numérique de 0.4 de

l'objectif et de l'air comme fluide avec un indice de réfraction de 1.000, on obtient une profondeur focale de $1.7\mu\text{m}$. Le système de déplacement doit donc être en mesure de repositionner le microscope avec une erreur inférieure à cette profondeur focale pour assurer la netteté de l'image.

La capacité de résolution (R) de l'objectif est donnée par,

$$R = \frac{0.61\lambda}{NA} \quad (3).$$

En considérant une longueur d'onde de $0.55\mu\text{m}$ pour la couleur verte au centre du spectre visible et l'ouverture numérique de 0.4 de l'objectif on obtient une résolution de $0.84\mu\text{m}$. Cette résolution est suffisante pour la caractérisation de la microstructure d'alliage à base d'étain puisqu'il a été rapporté des diamètres de domaines cristallographiques de l'ordre de $1.43\mu\text{m}$ (Sidhu et Chawla, 2004). Afin de bien capturer l'image avec une caméra numérique, il est nécessaire d'avoir 2 à 3 pixels par unité de résolution. Donc, chaque pixel doit être capable de capturer un détail entre $0.42\mu\text{m}$ et $0.28\mu\text{m}$ de dimension. Avec un facteur de grossissement de 20X, les pixels doivent avoir une dimension maximale de $8.4\mu\text{m}$ à $5.6\mu\text{m}$. La caméra choisie avec cette information possède les caractéristiques présentées dans le Tableau 8.

Tableau 8: Caractéristiques de la caméra numérique pour l'acquisition des images 2D (IDS-Imaging, 2013).

Fabricant	IDS Imaging Development Systems GmbH
Modèle	UI-6280SE
Technologie de capteur	CCD
Resolution (pixel)	2448x2048
Taille de capteur	2/3''
Vitesse d'acquisition (image/s)	8.5
Taille des pixels	3.45 μm

Avec le grossissement de 20X, la taille des pixels de $3.45 \mu\text{m}$ permet théoriquement la discrétisation d'élément de $0.17\mu\text{m}$. La qualité de l'image est donc limitée par les capacités optiques de l'objectif et non par la caméra. La dimension du capteur permet un champ de vision de $422\mu\text{m} \times 353\mu\text{m}$ qui permet de visualiser quelques interconnexions typiques, d'environ $75 \mu\text{m}$ de diamètre avec un pas autour de $150\mu\text{m}$. Un exemple d'image obtenue à l'aide du microscope fabriqué est présenté à la Figure 40.

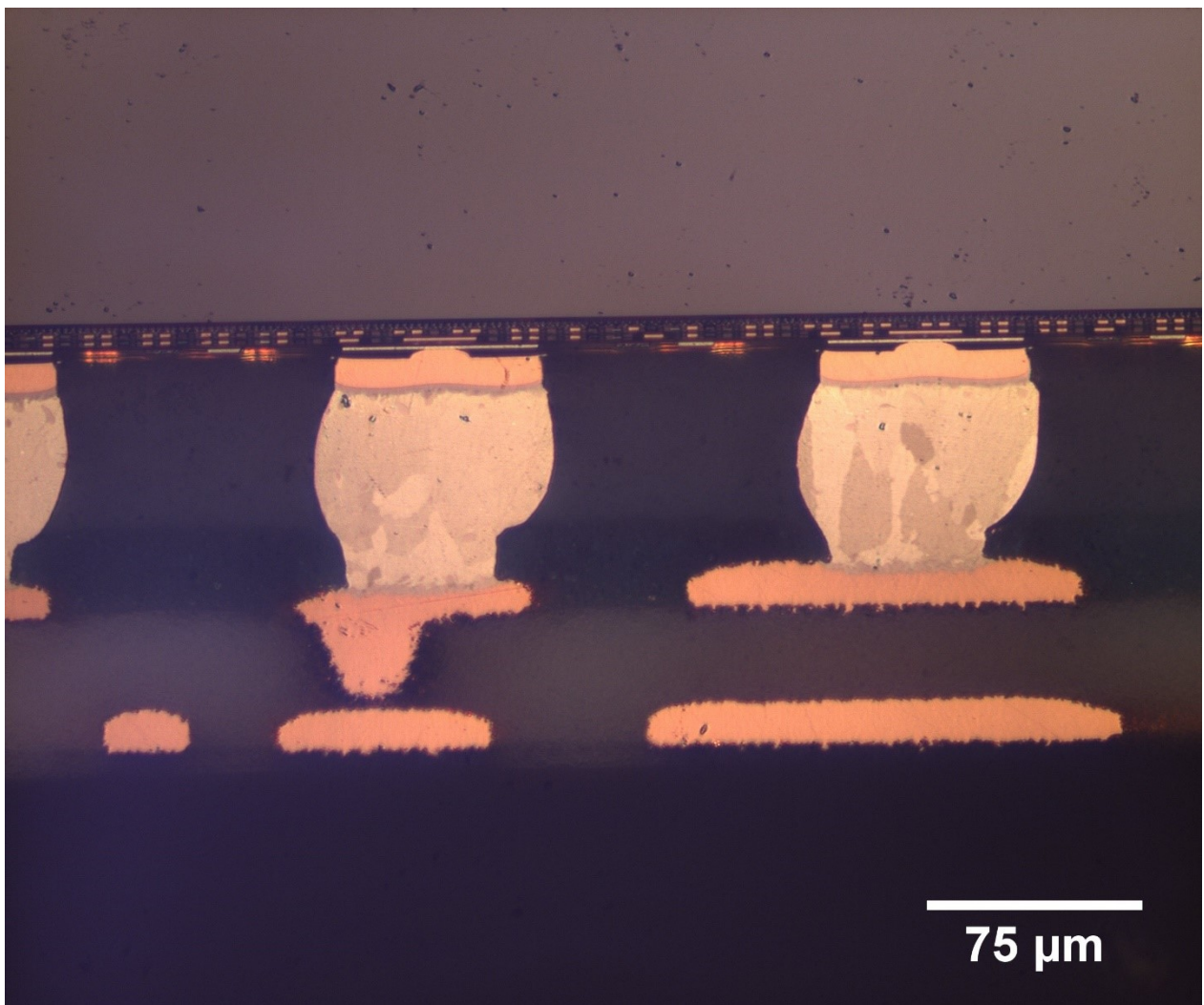


Figure 40: Exemple d'image obtenue à l'aide du microscope numérique fabriqué.

La partie supérieure de l'image, de couleur uniforme, est le silicium de la puce électronique. Au centre, deux interconnexions sont complètement visibles ainsi qu'une partiellement, reliant le plot de la puce à celui du substrat. Deux couches de cuivre du substrat sont visibles dans la partie inférieure de l'image. À l'intérieur des interconnexions, on distingue différents tons de gris qui sont reliés à différentes orientations des domaines cristallographiques présents. Ces tons de gris sont obtenus par l'utilisation de la polarisation croisée du faisceau lumineux du microscope, tel que décrit préalablement. L'exemple d'image montrée à la Figure 40 valide la première caractérisation nécessaire à la reconstruction 3D.

Palpeur numérique

La seconde caractérisation essentielle pour la validité de la reconstruction 3D est l'épaisseur de matière enlevée entre chaque séance de polissage et photographie. Pour arriver à prendre cette mesure, un palpeur numérique est installé en parallèle de l'objectif du microscope, tel que présenté à la Figure 41.

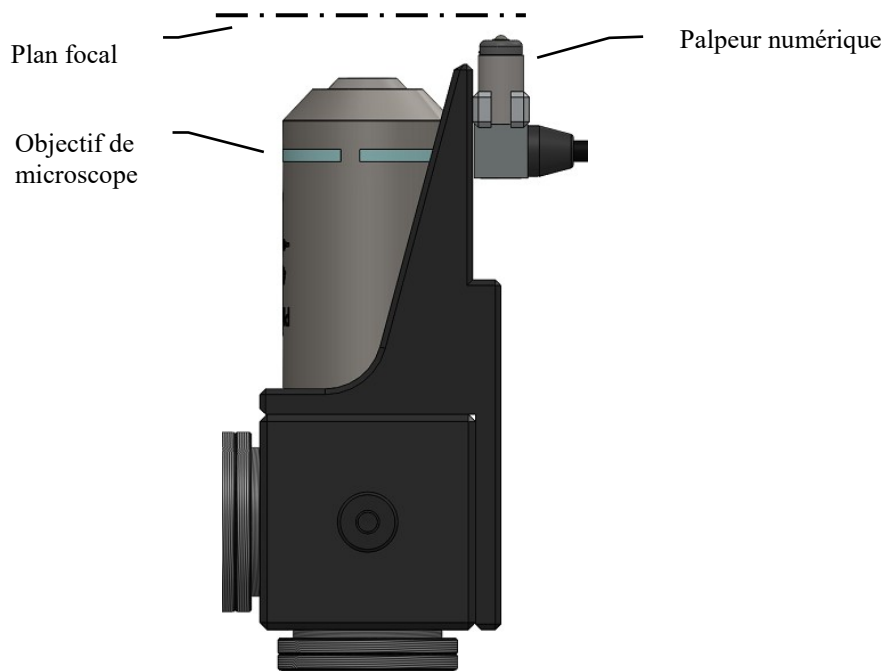


Figure 41: Positionnement du palpeur numérique.

La hauteur d'ajustement du point de contact du palpeur est positionnée entre l'objectif et le plan focal de celui-ci de façon à permettre la prise de mesure et la prise de photo avec le même système. Le palpeur choisi possède les caractéristiques présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9: Caractéristiques du palpeur numérique (Solartron Metrology, 2014).

Fabricant	Solartron Metrology
Modèle	DP05s
Étendu de mesure (μm)	500
Justesse (% de lecture) Note 1	0.05
Répétabilité garantie (μm) Note 2	0.1
Répétabilité typique (μm) Note 3	0.05
Résolution (μm)	0.01
Force de contact (N)	0.7

Note 1 : Justesse de $0.1\mu\text{m}$ ou un % de la mesure, plus grande valeur

Note 2 : Opération répétée contre une surface de carbure avec une précharge sur les roulements de max-min

Note 3 : 1 écart-type de déviation durant une opération répétée contre une surface de carbure

Ce palpeur est choisi pour sa très bonne répétabilité de mesure et résolution puisque, comme présentée dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, la mesure de l'épaisseur de matière repose sur deux mesures relatives alors que le palpeur n'a pas bougé. La plage de mesure réduite ne pose pas problème, même si l'on souhaite réaliser des analyses sur de grandes épaisseurs de matière, car à l'aide du positionneur motorisé en Z on peut compenser la position du palpeur au fur et à mesure que l'échantillon s'amincit.

Tout le traitement du signal est réalisé par un boîtier de commande fourni avec le capteur et un connecteur USB permet la communication avec ce boîtier.

Axes X et Z motorisés

Pour la stratégie de caractérisation présentée à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, il est essentiel d'automatiser le déplacement entre l'objectif du microscope et le palpeur numérique. Le concept de déplacement du microscope selon les axes X et Z, pour alterner entre la prise de mesure et la mesure d'épaisseur de matière enlevée est présenté à la Figure 42.

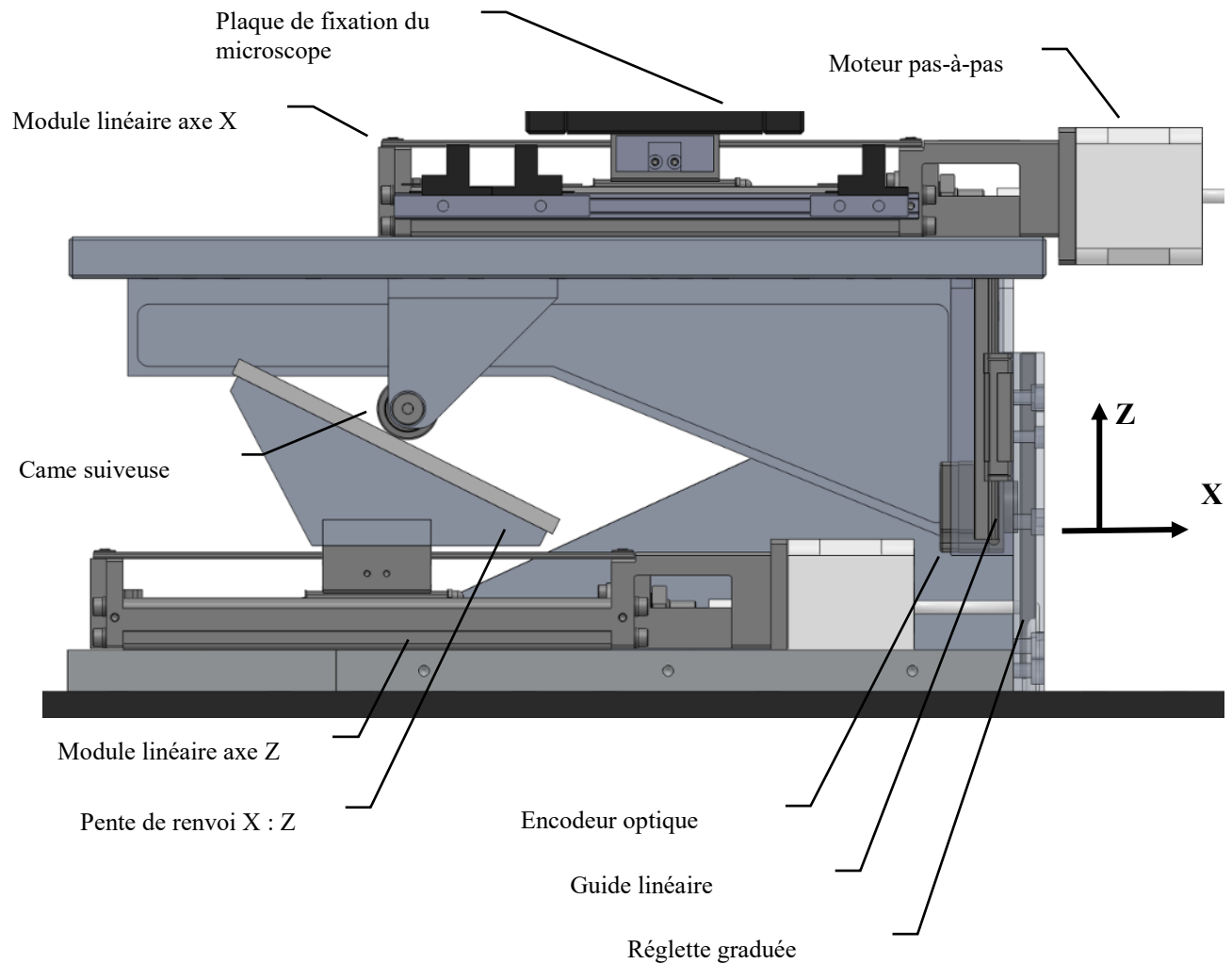


Figure 42: Concept de motorisation des axes de déplacement X et Z du microscope.

Pour créer les mouvements, des moteurs électriques, de type pas-à-pas, sont utilisés avec des modules linéaires pour faire la conversion de rotation à translation. Les modules linéaires, modèle KR20A-0080 de la compagnie THK (THK CO. LTD, 2015), possèdent des guides linéaires intégrés et une vis à bille avec un filet (F) de 1mm par tour et les moteurs pas-à-pas, possédant 200 pôles (p), sont alimentés par des contrôleurs ayant la capacité de faire jusqu'à 256 micropas (μp) entre chaque pôle. La résolution linéaire de déplacement (R_D) d'une telle combinaison est donnée par,

$$R_D = \frac{F}{p * \mu p} = \frac{1mm}{200 * 256\mu p} = 19.5nm/\mu p \quad (4).$$

La résolution de déplacement théorique est largement suffisante pour repositionner l'objectif de microscope ou le palpeur à un endroit quasi identique à chaque image, pour minimiser le traitement d'image ou les variations de mesure. Pour le déplacement en X, des essais seront réalisés pour déterminer la nécessité ou non de recourir à un encodeur pour mettre le système en boucle fermé.

Pour le déplacement selon l'axe Z, un plan incliné possédant une pente avec un ratio vertical/horizontal de 1 :2 et une came suiveuse sont utilisés pour transformer le mouvement horizontal en mouvement vertical. La résolution de déplacement est ainsi réduite d'un facteur deux selon l'axe des Z pour obtenir une résolution linéaire de déplacement maximal de 9.75 nm/μp. La profondeur focale de l'objectif de microscope, obtenue à l'aide de l'équation (2), est d'environ 1.7μm et il ne sera probablement pas nécessaire d'utiliser la résolution de déplacement linéaire maximale pour alterner la position Z entre le plan focal du microscope et la position de mesure du palpeur numérique. Toutefois, pour valider l'exactitude du positionnement il est nécessaire d'utiliser un encodeur optique linéaire et afin de minimiser l'erreur de mesure, l'encodeur est positionné selon l'axe des Z pour faire abstraction des erreurs provenant du module linéaire et du plan incliné. Les caractéristiques de l'encodeur utilisé sont présentées dans le Tableau 10.

Tableau 10: Caractéristiques de l'encodeur optique pour le positionnement en Z (Heidenhain, 2016).

Fabricant	Heidenhain
Modèle	LIP481A
Étendu de mesure (mm)	70
Erreur de base	<±0.175μm/5mm
Période du signal (l)	2μm
Signal de sortie (Note1)	1vpp
Erreur d'interpolation	±7nm

Vitesse de déplacement ≤ 36 m/min

Note 1 : 1 volt crête à crête avec une moyenne de 2.5V.

Il a été choisi d'utiliser une réglette graduée sans marques de positionnement absolues puisque c'est toujours une position relative qui nous intéresse. Le système de contrôle doit donc établir une référence de position 0 à l'aide d'un capteur optique externe, puis se fier au décompte des périodes pour se localiser. Une dérive de la mesure dans le temps et une variation de la position 0 à chaque initialisation sont envisageables, mais puisque le temps entre 2 mesures est relativement court (quelques minutes) et que c'est une différence entre 2 positions qui nous intéresse, aucune mesure particulière n'est requise. Dans le cas où la séquence serait interrompue (ex : une panne électrique) il pourrait y avoir une perte de précision de la mesure d'épaisseur de matière enlevé, mais une valeur moyenne basée sur les cycles suivants pourra être utilisée. En effet, il est attendu que la quantité de matière enlevée après chaque cycle de polissage soit très répétable (Sidhu et Chawla, 2004). La carte d'acquisition utilisée pour capter le signal 1vpp possède, entre autres, les caractéristiques présentées dans le Tableau 11.

Tableau 11: Caractéristiques de la carte d'acquisition pour traiter le signal de l'encodeur optique (Beckhoff, 2017).

Fabricant	Beckhoff
Modèle	E15021
Connexion d'encodeur	A+/Sin+, A-/Sin- B+/Cos+, B-/Cos- C+, C-
Résolution de position (Note1)	32 bits
Compteur de période	19 à 24 bits
Résolution de période (Note2)	8 à 13 bits
Fréquence d'acquisition max	250 kHz @ ≤ 10 bits

Note 1 : Résolution de position = compteur de période + résolution de période

Note 2 : Réduction automatique en fonction de la fréquence du signal

Pour maximiser le positionnement, la résolution de la mesure doit être inférieure à la résolution de déplacement du module linéaire. La résolution de mesure linéaire (R_m) est donnée par,

$$R_m = \frac{l}{2^n} \quad (5),$$

où n est le nombre de bits utilisés pour la résolution du signal acquis et l la période du signal analogique généré par l'encodeur optique linéaire. De plus, comme la carte d'acquisition ne peut dépasser certaines fréquences d'acquisition, la vitesse linéaire doit être limitée pour optimiser son positionnement. La vitesse maximale (V_m) est donnée par,

$$V_m = R_m \times f(n) \quad (6),$$

où $f(n)$ est la fréquence d'acquisition en fonction de la résolution de période. Le Tableau 12 présente un sommaire de la relation entre la résolution de période, la résolution de mesure linéaire, la fréquence d'acquisition et la vitesse maximale de déplacement linéaire.

Tableau 12: Résolution de mesure et limitation de la vitesse de déplacement en fonction de la résolution de périodes (Beckhoff, 2017).

Résolution de période (n) [bit]	Résolution linéaire (R_m) [$\mu\text{m/bit}$]	Fréquence d'acquisition max (f) [kHz]	Vitesse maximale de déplacement (V_m) [$\mu\text{m/s}$]
8	0.00781	250	1 952.5
9	0.00391	250	977.5
10	0.00195	250	487.5
11	0.00098	170	166.6
12	0.00049	80	39.2

13	0.00024	40	9.6
----	---------	----	-----

Lorsque la fréquence du signal est trop élevée pour la résolution de période demandée, la carte possède une fonction de réduction automatique de la résolution pour continuer à suivre la position, mais aux dépens de la précision. Donc, pour arriver à faire une position précise il est préférable de limiter la vitesse maximale de déplacement à $\leq 1\ 952.5\ \mu\text{m/s}$ et il reste possible d'utiliser la carte d'acquisition avec une résolution de 8 bits et d'obtenir une résolution de mesure linéaire de $7.8\ \mu\text{m/bit}$. Suivant ce raisonnement, l'utilisation du moteur pas-à-pas avec 256 micropas n'est pas nécessaire, mais une utilisation de 64 micropas offrant une résolution de déplacement vertical, en considérant le ratio du plan incliné, de $39.1\ \text{nm}/\mu\text{p}$ est largement suffisant pour permettre le repositionnement de l'objectif du microscope à la bonne distance de l'échantillon et obtenir une image nette.

Au moment de l'écriture de ce mémoire, aucune validation expérimentale de la résolution et précision de position n'a été effectuée, mais toutes les données montrent que le sous-système de caractérisation possède les caractéristiques nécessaires pour générer des images de façon automatisée en vue d'une reconstruction 3D.

Axe Y manuel

Le troisième axe linéaire, selon Y, nécessaire au positionnement de l'échantillon pour inspecter la zone désirée est actionné manuellement. Vu les contraintes de temps et de budget liés à ce projet, il a été choisi de commencer les analyses en ne traitant qu'un échantillon à la fois. Il s'avère donc inutile d'automatiser le déplacement de l'échantillon ou du microscope selon l'axe Y. Dans le cas où plusieurs échantillons seraient préparés en parallèle, il faudrait ajouter un système de motorisation et d'encodeur afin d'ajuster la position de la zone à inspecter en fonction de l'échantillon puisque chaque échantillon est positionné arbitrairement dans la rondelle d'époxy. Le concept de positionnement de la zone à inspecter selon l'axe Y est présenté à la Figure 43.

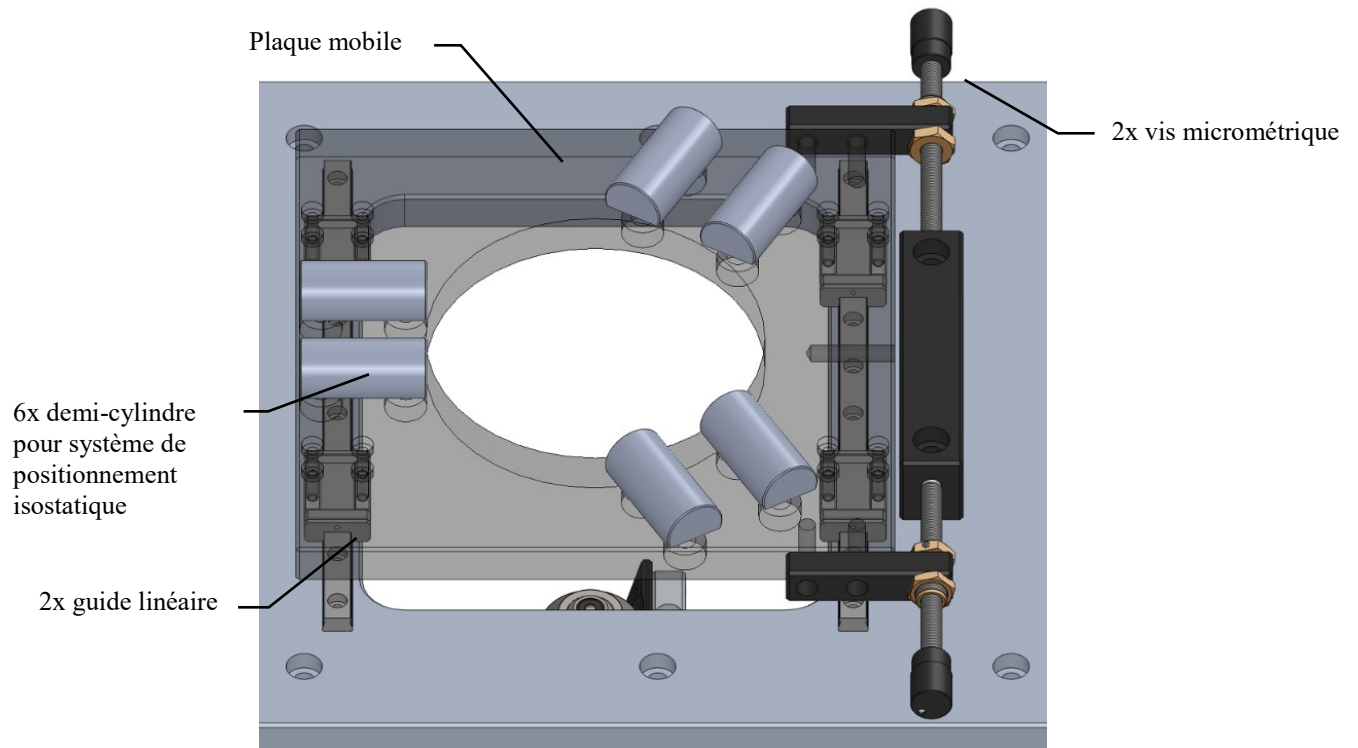


Figure 43: Concept de positionnement manuel selon l'axe des Y.

Une plaque mobile est montée sur 2 guides linéaires orientés selon l'axe Y. À une des extrémités des vis micrométriques sont installées en opposition et appuyées contre une butée fixe. En actionnant les vis, on peut ainsi déplacer le plateau mobile et le verrouiller en place lorsque la position est adéquate. C'est en installant un échantillon et en regardant l'image du microscope en temps réel que l'on peut manuellement localiser la zone à inspecter. Sur la plaque mobile, 6 demi-cylindres sont installés en paire parallèle, répartie à 120 degrés autour d'une ouverture circulaire. Ces demi-cylindres sont utilisés conjointement avec les demi-sphères du porte-échantillon pour former un système de positionnement isostatique. Le porte échantillon mentionné est la clé de tout le concept d'automatisation et sa conception est présentée dans la section suivante.

3.5.2. Conception détaillée du porte-échantillon.

Comme son nom l'indique, le porte échantillon a comme fonction principale de transporter l'échantillon de station en station. La Figure 44 présente une vue du dessous avec en pointillé une représentation d'un échantillon maintenu.

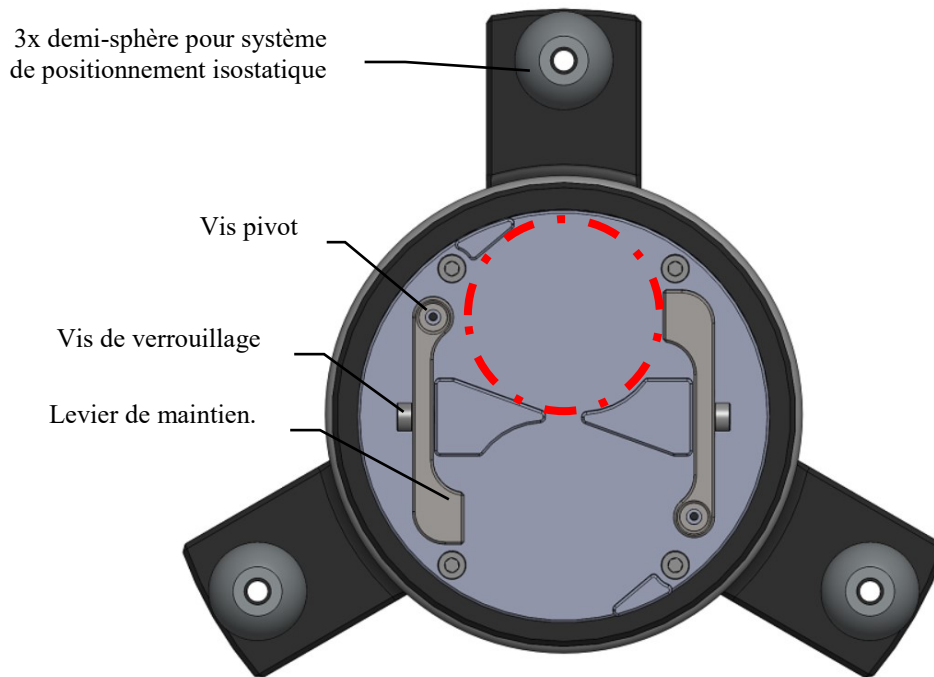


Figure 44: Vue du dessous du porte échantillon.

Il est établi que les échantillons analysés seront toujours moulés dans une rondelle d'époxy cylindrique. Le cylindre est appuyé contre des butées fixes à l'aide d'un levier de maintien monté sur une vis pivot et verrouillé en place par une vis de verrouillage. L'échantillon est ainsi fixé de façon très rigide, en opposition à ce que les machines de polissage conventionnelles font.

Ces dernières maintiennent l'échantillon contre le tapis de polissage à l'aide d'un petit cylindre pneumatique appuyé au centre du cylindre d'époxy (voir Figure 5). Cette méthode de maintien souple ne bloque pas efficacement les 3 degrés de liberté angulaires et crée une surface en forme de dôme sur l'échantillon. Une topographie d'un échantillon polie par maintien souple et une par maintien rigide sont présentées à la Figure 45.

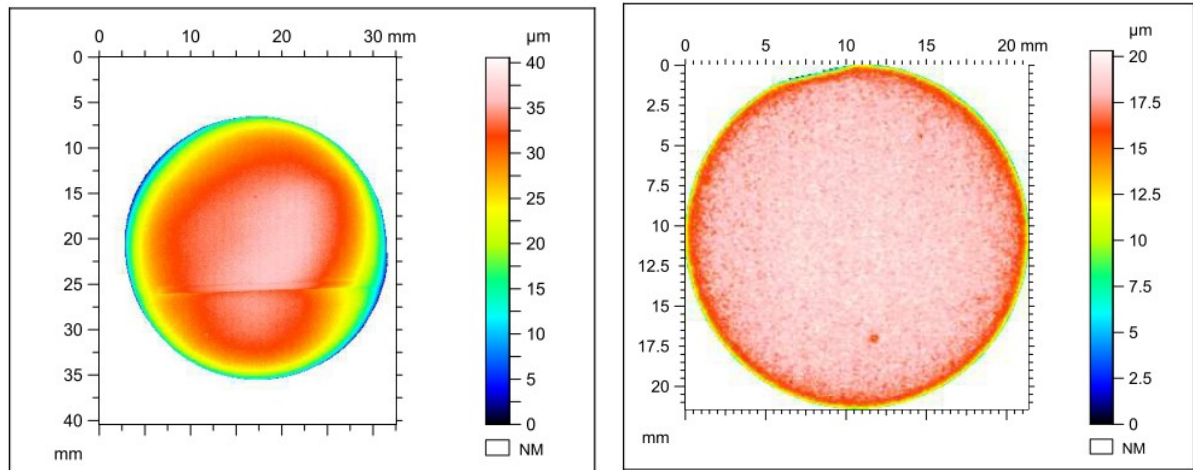


Figure 45: À gauche, topographie d'un échantillon poli par la technique de maintien conventionnelle. À droite, topographie d'un échantillon poli par une technique de maintien rigide.

Les topographies ont été réalisées à l'aide d'une sonde confocale chromatique installée dans une machine Altisurf 530. On constate sur l'image a) que la courbure de la surface est beaucoup plus prononcée que sur celle de b) et qu'il n'existe presque pas de plat. La distorsion sur l'image a) en $Y \approx 26$ est causé par la présence d'une puce électronique encapsulée dans la résine. L'essai en maintien rigide a été réalisé sans puce électronique, car la contribution de celle-ci sur la topographie est négligeable. Sur l'image de droite, on note une topographie beaucoup plus plane ce qui facilite la prise d'image à une même distance focale et minimise l'erreur de mesure de l'épaisseur de matière enlevée dans le cas où le rayon de courbure changerait en fonction du nombre de séance de polissage.

C'est aussi pour cette raison de planéité de surface à inspecter que le porte échantillon est appuyé contre un système de référencement rigide lors du polissage, tel que présenté dans la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Dans le cas où le maintien rigide et le système de référencement ne sont pas suffisant pour obtenir une surface plane à cause du moment tournant, un deuxième levier de maintien est installé en symétrie par rapport à l'axe de rotation et il est ainsi possible d'installer une deuxième rondelle d'époxy et éliminer le moment ainsi créé. Cette approche à deux rondelles d'époxy s'inspire des systèmes de maintien à force centrale utilisés dans les tables de polissage conventionnelle (Buehler, 2017).

Comme l'échantillon est installé de façon arbitraire dans la rondelle de résine, il est nécessaire d'orienter le plan de polissage. Pour ce faire, un croisillon est installé entre le plan de fixation de la rondelle et les zones d'appuis du porte échantillon. 3 vis micrométriques servent à orienter ce plan et à le verrouiller en place, tel que présenté à la Figure 46.

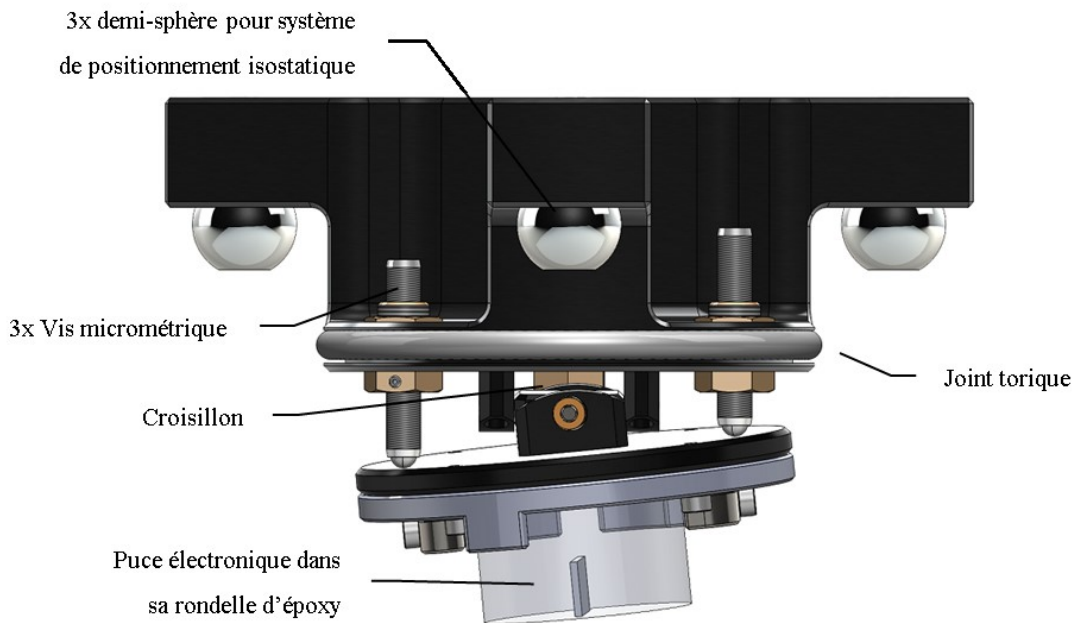


Figure 46: vue de côté du porte échantillon.

On note aussi la présence d'un joint torique en périphérie du porte échantillon. Ce dernier est utilisé pour étanchéiser la cuve de nettoyage durant le rinçage et le séchage de l'échantillon et éviter des éclaboussures sur les composants électriques environnants.

Les composants clé du porte échantillon sont sans contredit les 3 demi-sphères qui servent à réaliser un système de positionnement isostatique, conjointement avec les 3 demi-cylindres installés sur la plaque mobile du sous-système de caractérisation. Une caractérisation exhaustive de la répétabilité de positionnement et du type d'usure est décrite dans un article rédigé dans le cadre de ce projet de maîtrise et présenté dans la section suivante. Cette caractérisation est réalisée en premier lieu pour valider l'approche de mesure d'épaisseur de matière enlevée par une mesure relative de position de la surface à inspecter, tel que présenté à la **Erreur ! Source**

du renvoi introuvable. Comme plusieurs dizaines, voire centaines de cycles de polissage devront être réalisés pour reconstruire une image 3D, il est nécessaire de s'assurer qu'il n'y aura pas d'usure rapide des points de contact qui induirait une erreur significative de mesure de l'épaisseur de matière enlevée et par le fait même une déformation de la reconstruction. Aussi, pour un système mécanique fonctionnant avec une précision de l'ordre du micron, toute variation de température peut induire un comportement indésirable. La sensibilité thermique du montage est donc un second paramètre étudié.

En second lieu, la compréhension de la répétabilité de positionnement est nécessaire puisque tout le concept de la machine présentée dans ce mémoire pourrait être amélioré, avec des modifications modérées, afin de permettre la préparation et la caractérisation de plusieurs échantillons en parallèle. Dans ce cas, plusieurs porte-échantillon alterneraient sur chacune des stations et la dynamique de caractérisation d'épaisseur de matière enlevée par polissage devraient être légèrement différente. Après la caractérisation de la surface à inspecter par le microscope, celui-ci ne pourrait plus rester en position statique dans l'attente du retour du porte échantillon pour prendre la mesure d'épaisseur de matière enlevée. Il devrait alterner entre différentes positions, correspondant aux différentes dimensions des porte-échantillons et par conséquent, pour minimiser l'erreur de mesure, il est nécessaire que le porte-échantillon ait la capacité à se repositionner très précisément et que l'axe Z motorisé du microscope ait aussi une capacité de repositionnement afin de ramener le palpeur numérique à la même position.

4. Caractérisation du comportement du système isostatique

Cette section présente un article scientifique soumis, dans le cadre des travaux reliés à la caractérisation détaillée du système de positionnement isostatique.

Auteurs et Affiliation :

D. Langlois Demers :

Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique, 2500
Boul. De l'Université, QC, J1K 2R1, Canada.

Centre de Collaboration MiQro Innovation, 45 Boul. de l'Aéroport, QC, J2L 1S8,
Canada.

J.Sylvestre :

Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique, 2500
Boul. De l'Université, QC, J1K 2R1, Canada

Date de soumission : 10 Avril 2018

État de l'acceptation : En révision

Revue : Engineering Failure Analysis

Référence :

Langlois Demers, D. et Sylvestre, J. (2018) Surfaces Degradation, Loss of Positioning
Repeatability and Drifts of a Stainless Steel Balls-Cylinders Kinematic Mount in the Large
Cycling Limit. Engineering Failure Analysis.

Titre français :

Dégradation de surface, perte de répétabilité de positionnement et dérive d'un système
isostatique billes-cylindres fabriqués en acier inoxydable, dans les limites d'un grand nombre
de cyclage.

Contribution au document :

Tel que présenté à la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et par la **Erreur ! Source
du renvoi introuvable.**, la capacité à repositionner l'échantillon au même endroit est crucial à
la mise en œuvre de la stratégie de caractérisation de l'épaisseur de matière enlevée. Comme il

est désiré d'obtenir une reconstruction 3D avec une précision XYZ de 1 micron, il est nécessaire que l'erreur de mesure d'épaisseur de matière enlevé entre chaque image soit très petite. Le budget d'erreur alloué à chaque source d'erreur ne peut être d'au plus quelques dixièmes de micron. Aussi, comme il est nécessaire de générer plusieurs dizaines, voire centaines d'images par échantillon analysé, il faut s'assurer que la capacité à repositionner l'échantillon ne variera pas en fonction du temps, ou plutôt en fonction du nombre de cycle de repositionnement.

Résumé français :

L'effet de la dégradation des surfaces d'un simple système de positionnement isostatique est étudié au cours d'un très grand nombre d'insertions. Un total de huit séances, chacune avec plusieurs milliers de cycles d'insertion, ont été réalisées pour mesurer la robustesse du système. Une répétabilité de positionnement (entre deux mesures consécutives) de 40.5 nm à trois écart types a été mesurée sur l'ensemble des mesures. De la corrosion de contact, une sensibilité thermique ainsi qu'une dérive de position ont été observées, mesurées et caractérisées. Des essais avec deux types d'huile et une seule application sur les points de contact ont permis d'empêcher l'apparition de corrosion. Des inspections à l'aide de microscope optique et électronique à balayage ont permis de caractériser les points de contact ayant eu l'application de film d'huile, révélant l'absence de corrosion, mais la présence d'une usure mécanique. Les marques observées sont cohérentes avec la description et le mécanisme de faux brinellage. Les variations de position liées aux changements de température du système ont été compensées en utilisant un coefficient de sensibilité thermique calculé pour chaque essai et le développement d'un modèle analytique de la sensibilité thermique a permis de valider ces valeurs mesurées. La caractérisation expérimentale du système de positionnement isostatique démontre la possibilité d'utiliser des composants métalliques dans des applications ayant un nombre d'insertions très élevé.

Surfaces Degradation, Loss of Positioning Repeatability and Drifts of a Stainless Steel Balls-Cylinders Kinematic Mount in the Large Cycling Limit.

LANGLOIS DEMERS D.^{a,b,1}, SYLVESTRE J.^b

- a. MiQro Innovation Collaborative Center (C2MI), 45 Boul. de l'Aéroport, QC, J2L 1S8, Canada. Dominique.langlois.demers@c2mi.ca
- b. Department of Mechanical Engineering, Sherbrooke University, 2500 Boul. De l'Université, QC, J1K 2R1, Canada. Julien.Sylvestre@usherbrooke.ca

Abstract

The effect of surface degradation of a simple and low cost stainless steel balls and cylinders kinematic mount system is studied for repeated insertions in the large cycling limit. A total of eight runs, each with tens of thousands of cycles, were realized to measure the robustness of the system. Over this set of measurements, the average relative position repeatability error (between two consecutive insertions) along the vertical axis was measured to be 40.5 nm at three standard deviations. Fretting corrosion, thermal sensitivity and position drift of the system were observed, measured, and characterized. Fretting corrosion was controlled by a single application of a thin film of oil and two different oils were tried. Optical and electron microscopy were used to characterize the contact points, revealing that no fretting

¹Corresponding Author

corrosion has appeared, but mechanical wear is present. The observed marks are consistent with the visual description and creation mechanism of false brinelling. Position variations related to temperature changes were accounted for using experimental thermal sensitivity for each run and the development of the thermal sensitivity equation for the system validated the measured value. This experimental characterization demonstrates the capability of metallic components for kinematic mount system being used in the large cycling limit.

Keywords

Fretting corrosion, Brinelling, Kinematic mount, Position drift, Thermal sensitivity.

1. Introduction

Kinematic mount systems are passive mechanical systems which allow excellent positioning repeatability at a relatively low cost. These mechanisms are often used in optical applications for laboratory experiments, as for instance in some passive positioning systems. In some cases, kinematic mounts are used in industrial applications as well, such as for quickly replacing robots on assembly lines to reduce down time induced by robot failures [1] or locating 300 mm-diameter wafer carrying units on processing equipment [2].

The work presented in this paper is related to the fabrication of a laboratory equipment that requires the detection of sub-micron level changes in a surface repeatedly positioned normal to a vertical axis. Each analyzed sample will require a few hundred repetitions and therefore, after only a few samples the kinematic mount will have seen a few thousands cycles of insertion. As a result, a systematic study is required for the degradation mechanisms impacting the long-term reliability of the kinematic mount and eventually leading to its failure to meet its design positioning accuracy. Such study does not seem to be available in the technical literature. A characterization of the vertical positioning repeatability of the kinematic mount system with a low load (gravity only) in the large cycling limit is thus necessary, and an experimental validation setup has been designed and fabricated.

Inspired by previous work on kinematic mount design [3, 4] and characterization [1, 5] a simple system with half balls and half cylinders has been implemented (figure 1) and characterized by an automated cycling setup coupled to precision out-of-plane position measurements. The characterization of the kinematic mount has been performed over eight runs each with tens of thousands of insertion cycles, including detailed surface characterization and analysis after each run.

The paper is divided as follows. We start by presenting the details of the experimental setup (section 2), followed by the results of measurements of the positioning repeatability along the vertical axis and some observations and analysis of the components, with (section 3) and without (section 4) lubrication of the contact points. Finally, a discussion of the drift

and surface degradation phenomena is presented in section 5, to provide a framework to understand the experimental results.

2. Experimental setup

The kinematic mount is composed of two aluminum 6061-T6 plates, both 17 mm thick, three truncated spheres and six truncated cylinders, all with a 19.05 mm diameter. As seen on figure 1, the three vees on one of the mating plates, each formed by a pair of half cylinders, are positioned at 120° one from the others. The other plate supports the three spheres, also positioned every 120° , with a contact angle between each ball and cylinders of 58° when the plates are mated. This 58° contact angle is chosen to minimize the impact of friction on the position repeatability, as explained in [6].

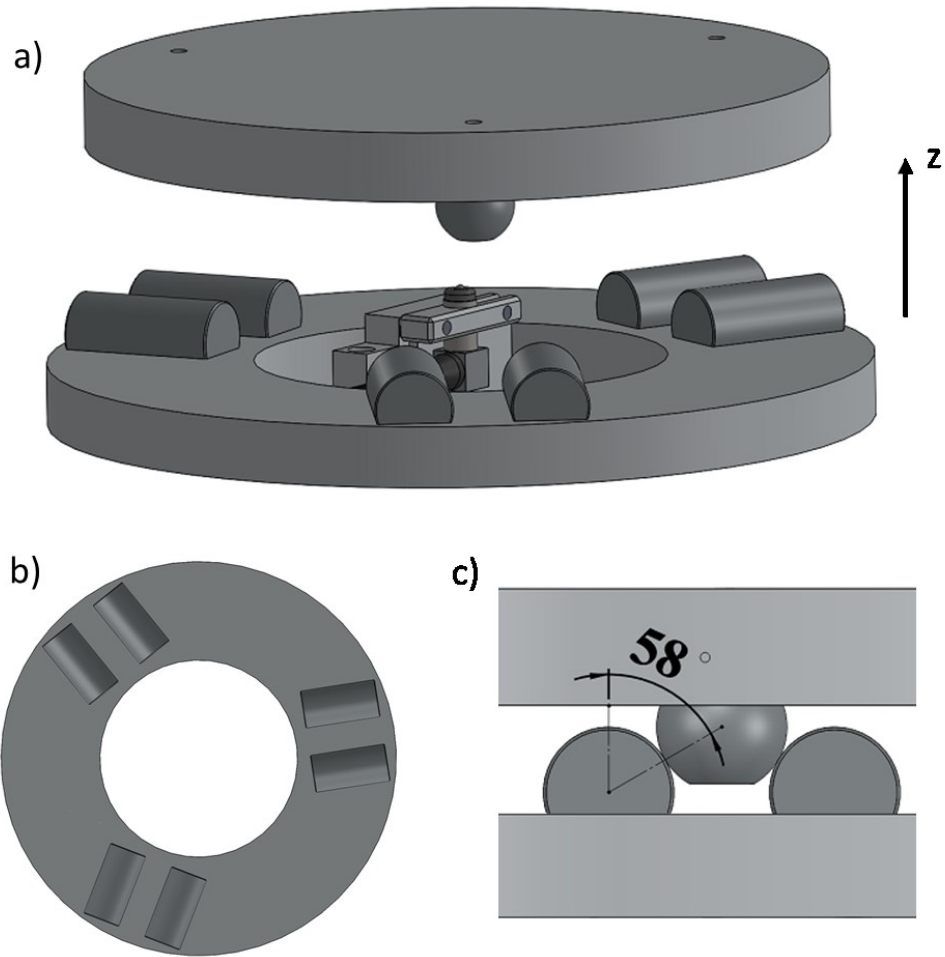


Figure 1 a) kinematic mount validation setup. A digital gauging probe is installed in the center of the system to characterize repeatability along the Z axis. b) The disposition of the vees. c) the contact angles.

The cylinders and spheres are commercially available components fabricated in SS440c stainless steel hardened to 58-65 on the Rockwell C scale [7]. After the first measurement (presented below), they were further polished to reduce their surface roughness, as it has been demonstrated the friction coefficient plays a major role in position repeatability of kinematic mount systems [5, 8]. A scan with an Altisurf 530 confocal chromatic optical profilometer shows, in figure 2, an arithmetic average roughness (Ra) of 142 nm before polishing and 23 nm after polishing.

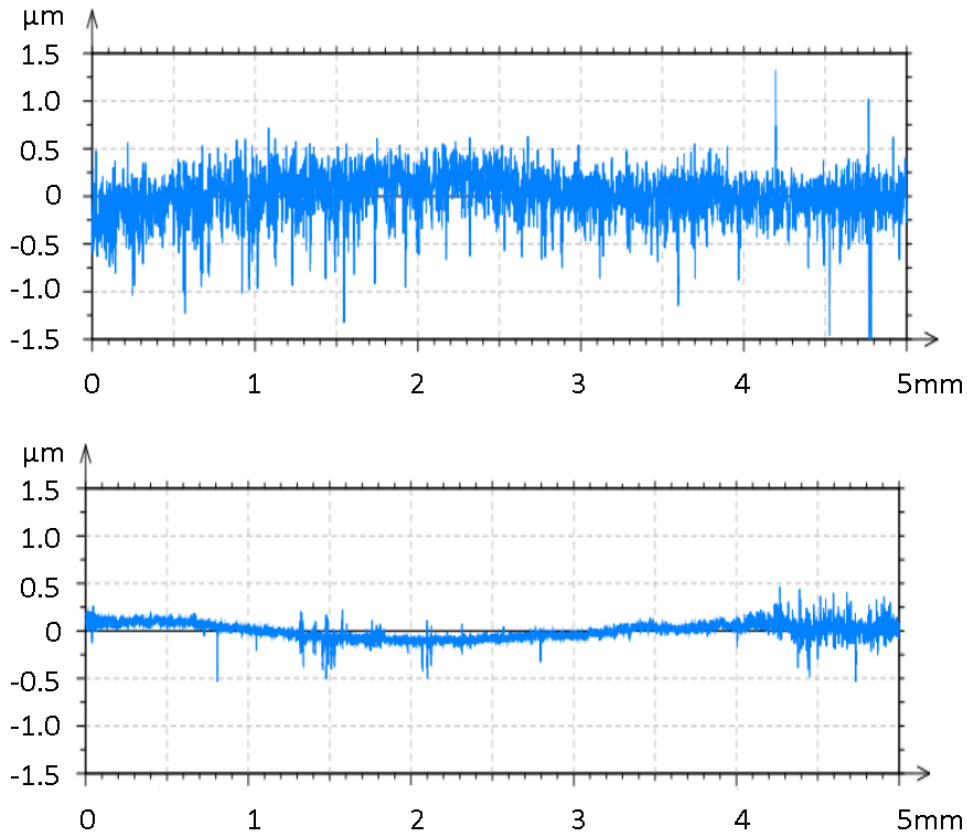


Figure 2: Roughness profile along the length of a cylinder used in the kinematic mount. Top: initial roughness profile. Bottom: roughness profile after polishing.

To measure the relative position of the plates, a digital gauging probe (DGP), model DP/05/S from Solartron Metrology, was installed at the center of the bottom plate. The tip of the DGP touches the top plate when the kinematic mount is engaged in its stable position. The DGP has a 500 μm measuring range with the accuracy of 0.25 μm , a typical repeatability of 0.05 μm and a resolution of 0.01 μm , according to specifications [9]. This probe was used to measure the relative position of the mating plates only along the Z axis (out-of-plane vertical). To ensure repeatable readings, a piece of silicon covered by a highly polished layer of silicon nitride (SiN) was glued on the top aluminum plate, where the DGP tip is touching. Also, to monitor the temperature of the setup, a thermocouple was installed, with thermally conductive paste, in the thin cavity between one of the cylinders and the bottom plate.

To automate the insertion cycles, the top plate was attached with three 30 cm long strings to a fixed structure, so it hung freely over the bottom plate of the kinematic mount, which was installed on a custom-made motorized vertical stage operated in closed-loop with an optical encoder. After each run, the system was dismantled for inspection, cleaning and polishing before being put back together. This induced a variation in the relative positioning between the top and bottom plate of approximately ± 1 mm and ± 1 degree. The stage was actuated so the bottom plate rose to pick up the top plate at a speed of 5 mm/s. When the docking motion was completed, the motor was turned off and the DGP was activated to acquire 100 measurements at a rate of 4 kHz. The mean of the 100 measurements was then recorded as the position of the top plate. The vertical stage was then brought down to disengage the kinematic mount components and the cycle was restarted for a new height measurement. With the mean of 100 independent measurements, the standard deviation of the DGP is theoretically improved by $\sqrt{100}$. Practical consideration reduces this improvement and an actual digital gauging probe position reading standard deviation of 7.2 nm has been measured using this averaging approach, which put the probe repeatability at 21.6 nm at three standard deviations. This standard deviation is the position repeatability, estimated by taking the difference between a large number of successive measurements, in the first test data (run 0) hereafter.

Run 0 was performed with the kinematic mount engaged, but no cyclic docking motion (static experiment). A measurement of the position and the temperature was recorded every second for 426 527 successive seconds to characterize the behavior of the static system. The results of this experiment are presented in figure 3.

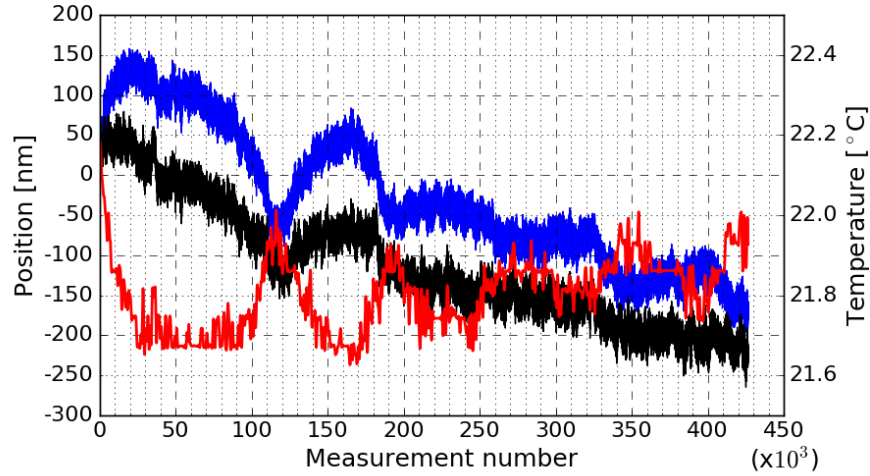


Figure 3: Blue) DGP position measurement. Black) position corrected for thermal drifts. Red) Temperature at the position between a half-cylinder and the bottom plate.

Looking at the position (blue) and temperature (red) curves on figure 3, one can easily detect a strong correlation between these parameters, as well as a drift over time for the position measurements. To attenuate the effects of the thermal expansion of the structure on position, the DGP position $\zeta(T,t)$ was fitted with the simple linear model

$$\zeta(T, t) = Z_T T + Z_t t + Z_0 \quad (1)$$

with T the temperature measured in the setup, t the time, Z_T the temperature sensitivity, Z_t the position drift rate and Z_0 a constant (position offset). Z_T and Z_t were numerically estimated using the data from figure 3 at $223 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ and 0.577 pm/s , respectively. The DGP position corrected for thermal drifts, $\zeta'(T, t) = \zeta(t) - Z_T(T(t) - T_0)$, is shown in black in figure 3, where T_0 is the mean temperature, measured simultaneously as the position, for the first 50 measurements. Position variations which are correlated with temperatures are still present but are significantly attenuated, resulting in a clearer drift in the position over time.

At this point, the time drift measured is considered to be related to the digital gauging probe itself or to its installation condition, including possible slippage and other factors. Creep in

the kinematic mount components is not believed to be playing a major role in this time drift since stress in the contact point is estimated to be around 34 % of the yield strength (section 4). However, it is known that creep is largely influenced by temperature and usually accepted that for metals, creep deformation is sufficiently large to be of importance in a given material only above a temperature that is generally in the range of 30 % to 60 % of its absolute melting temperature [10], but the setup is at only 17 % of the melting temperature of 440c stainless steel. Further experiments are required to clearly identify the root cause of the time drift. The magnitude of this drift is however much smaller than the magnitude of other drifts (section 4).

3. Experimental Results Without Lubrication

The first cycling experiment (run 1) was conducted without lubrication and with the original roughness of the components (see table 1 for a summary of all experiments). All components of the kinematic mount and the DGP were first carefully cleaned with isopropyl alcohol and a clean wipe before starting the experiment. As seen on figure 4, after approximately 184 insertion cycles some high measurement values occurred, which went back to normal at cycle number 367. However, starting after approximately 1 074 cycles, the position started to change erratically at each insertion, eventually reaching a point where the reading of the probe was outside its range, meaning the DGP was no longer touching the top plate, when position is around 195 μ m.

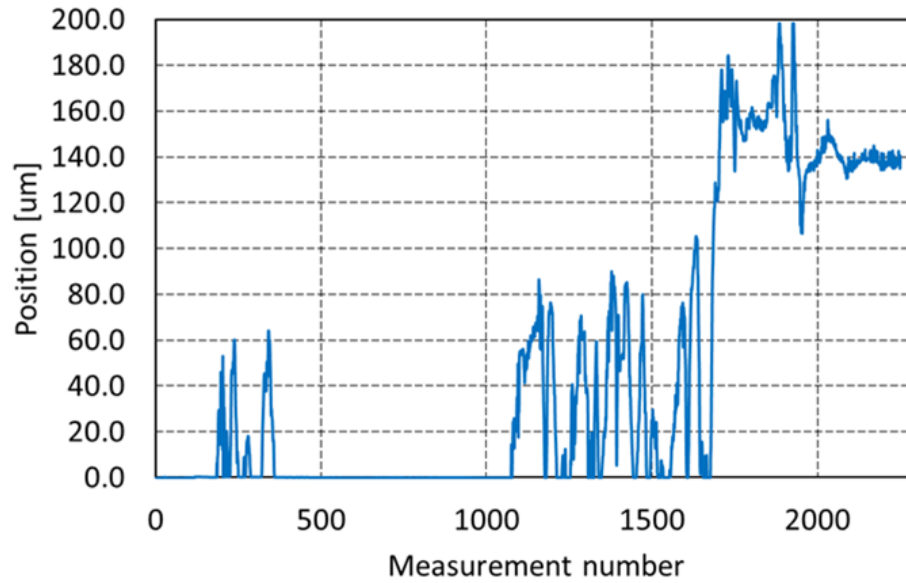


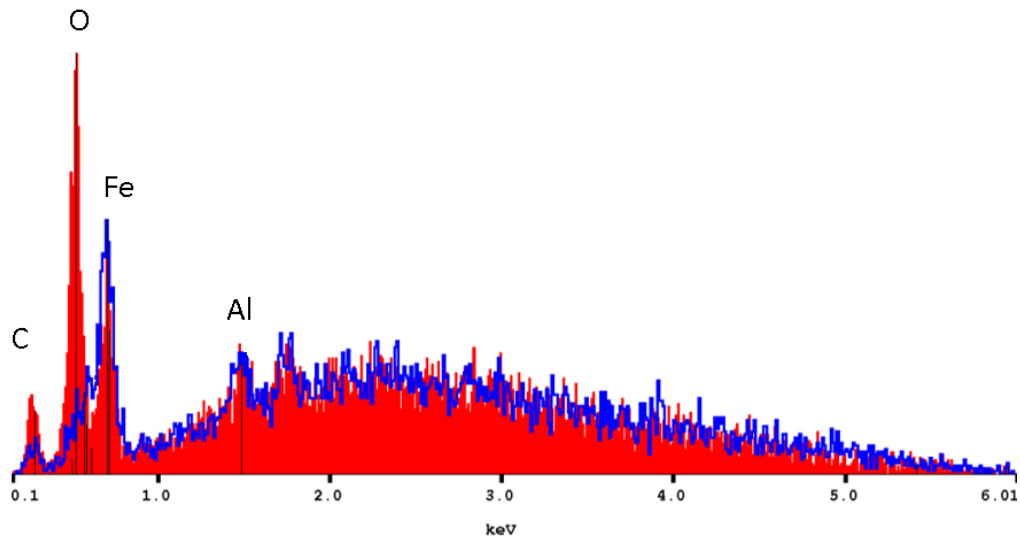
Figure 4: DGP position measurements during run 1 (without lubrication).

A visual inspection of the contact surfaces revealed obvious signs of deterioration on both the balls and cylinders, as shown in figure 5.



Figure 5: Micrograph showing the deterioration of a steel cylinder at the contact point after 2250 cycles of insertions without lubrication (run 1).

This visual inspection suggests oxidation on the stainless steel elements is the principal cause of the loss of positioning accuracy. One cylinder was submitted to an energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) analysis; figure 6 presents the analysis results.



.Figure 6: EDX spectrum at 6 keV on a deteriorated contact point (red line) and an untouched area (blue line) on a cylinder of the kinematic mount, after 2 250 cycles of insertion without lubrication (run 1). The Amplitude of the spectrum represents the number of counts of X-ray emission of certain energy level for a certain period of time. One should interpret the curves by a relative comparison between counts at the same energy.

The high concentration of oxygen in the contact point area suggests that it is indeed deteriorated by oxidation of the stainless steel components. Most likely, the high stress at the contact point caused fretting corrosion [4] on the steel elements.

4. Experimental Results With Lubrication

Before each of the following experiments (runs 2-9), the cylinders and balls were polished to ensure there was no undesirable effect coming from the previous runs due to surface degradation. A thin layer of oil was then applied to the cylinders, the balls and the contact point of the DGP. During the tests, the oil type had to be changed due to unintentional situation. The initial oil used was ISO 68 Motomaster compressor oil sold in local hardware

stores. Its exact composition is unknown, but it is assumed to contain proper additive for wear protection in high-pressure environment. The second oil used was Tellus Oil S2 M 68, an industrial hydraulic oil. The industrial oil technical data sheet [11] clearly mentions the presence of zinc-based anti-wear additives.

To possibly minimize the temperature effect of external heat sources and better understand the origin of position drifts over time, the kinematic mount setup (including the vertical positioning stage) was placed inside an enclosure made of isolating polystyrene panels resulting in a temperature stability of ± 0.2 °C. The vertical positioning stage control sequence was also modified so that 3 000 cycles could be performed at a lower height, with the kinematic mount balls and cylinders not touching, to reach a steady state temperature (positioning stage motor warm-up). The experiment was repeated a total of 8 times and the summary of the conditions is presented in table 1.

Table 1: Summary of the 8 runs of kinematic mount repeatability measurements.

<i>Run Number</i>	<i>Number of cycles</i>	<i>Thermal enclosure</i>	<i>Pre-heating cycling</i>	<i>Oil</i>
0	0	No	No	Tellus 68
1	2 296	No	No	None
2	17 296	No	No	Iso 68
3	30 000	Yes	Yes	Iso 68
4	30 000	Yes	Yes	Iso 68
5	30 000	Yes	No	Iso 68
6	30 000	Yes	Yes	Iso 68
7	25 000	Yes	No	Tellus 68
8	30 000	Yes	No	Tellus 68
9	30 000	Yes	No	Tellus 68

Using the procedure described in section 2 (equation 1), the temperature sensitivity Z_T and the position mean drift rate Z_i of each run was calculated. The fits were performed using filtered temperature data. To filter the temperature, a low-pass Butterworth filter of order 5 was used, with a cutoff period of 2 hours and a sampling period of 14 seconds. The temperature-compensated curves for the eight runs are shown in figure 7.

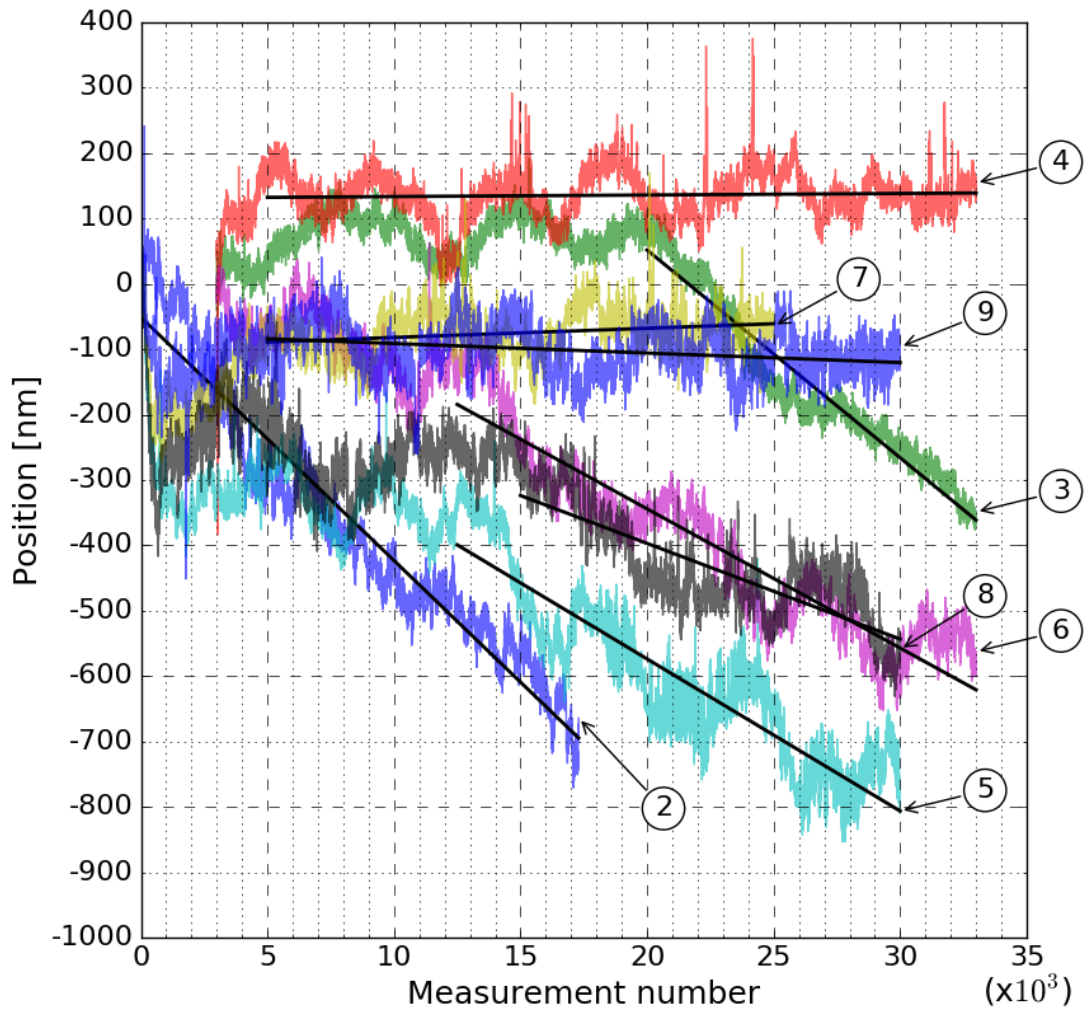


Figure 7: Temperature-compensated positions of runs 2 to 9. To compare the curves, an arbitrary zero was defined as the mean of the first 50 measurements. Black lines are the linear fit of the estimated time drift period of each run.

Figure 7 shows that the position begins to drift over time after different settling times in the different runs. The drift phenomenon can start directly from the first cycle (run 2), or never appear even after more than 25 000 insertion cycles (runs 4, 7, 9). For runs 3, 5, 6 and 8, the position is initially stable for 12 500 to 20 000 cycles, and it then starts to drift down at a regular rate. The starting measurement of time drift has been estimated visually on figure 7 with an error of $\pm 2\,500$ cycles and a black line is plotted over each run to emphasize the similitude of the slopes. No obvious trend emerges from the use of pre-heating cycles or of different types of oil.

The position repeatability of the system along the Z axis is estimated by taking the difference between two successive measurements. The statistical parameters, mean and standard deviation, were calculated on the position repeatability, and are presented in table 2, with the calculated temperature sensitivity and position drift rate.

Table 2: Experimental parameters for runs 2 to 9.

<i>Run Number</i>	<i>Mean Position Repeatability (pm)</i>	<i>Standard deviation of the Position Repeatability (nm)</i>	<i>Temperature sensitivity (nm/°C)</i>	<i>Position over portion (pm/cycle)</i>	<i>Drift linear</i>
2	43	11	-848	-37.2	
3	13	10	-71	-31.8	
4	-4	12	-371	0.24	
5	28	16	-445	-23.3	
6	18	10	-652	-21.3	
7	2	12	-513	1.40	
8	20	14	-535	-14.7	
9	6	13	-657	-1.46	

The overall standard deviation of the position repeatability along the Z axis, estimated from all data from runs 2 to 9 weighted by number of cycles in each run, is 13.5 nm. To cover 99.7 % of the population, ± 3 standard deviation is considered which lead to a position repeatability of 40.5 nm. Considering the averaging approach used for the DGP reading described earlier, this value is considered accurate. The temperature sensitivity of run 3 is much lower than the other runs and can be explained by the absence of temperature variations hence drifts which are too small to fit.

The time drifts presented in table 2 are in pm/cycle and to compare them with the time drift of 0.577 pm/s, presented in section 2, it must be divided by the cycle period of 14 seconds. The corrected time drifts of runs 2, 3, 5, 6 and 8 are 1.8 to 4.6 times larger than the time drift of the DGP only. This additional drift is attributed to mechanical wear caused by the large number of contacts between the kinematic mount elements. Since wear of the contact points has a major contribution to the position drift and is realized over a short period of time, it is over conservative to consider the full cycle period. Hence the drift attributed to wear is one or two orders of magnitude larger than the time drift of the DGP only, measured in section 2. In runs 4, 7 and 9, the position drift is closer to the DGP and it is assumed that the lubrication played a better role in those cases, reducing the mechanical wear of the components. It is hypothesized that during the insertion cycle, the closing gap between the balls and cylinders led to a pumping effect actuated by surface tension which helped maintained the film of oil throughout the 30 000 cycles.

A histogram of position repeatability frequency for each run is presented in figure 8, using a logarithmic scaling for the frequency axis. The best-fitted normal distribution is plotted for each run to appreciate the normality of the repeatability data.

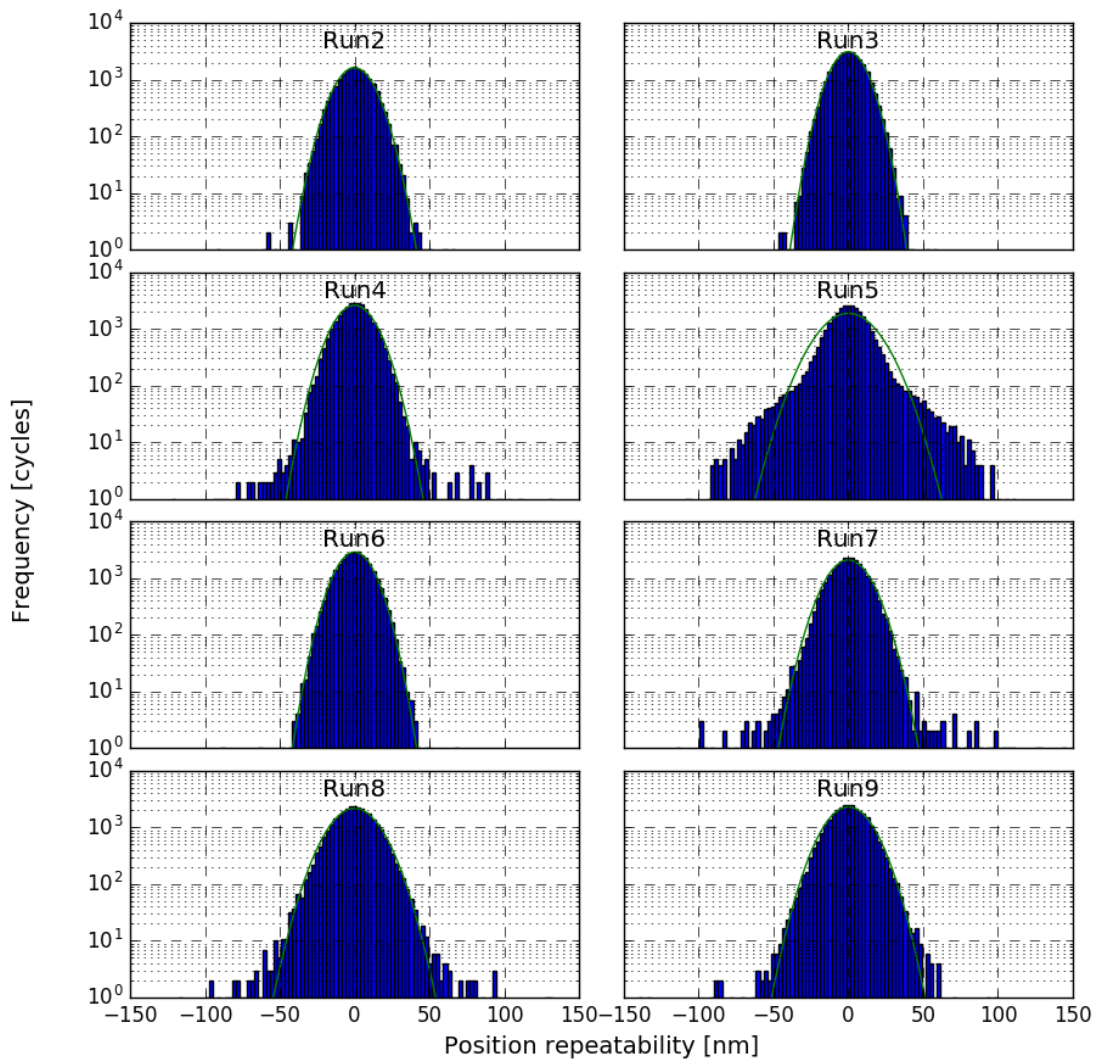


Figure 8 : Histograms of the position repeatability (blue) with the best-fitted normal distribution curves (green) for runs 2 to 9.

It is clear from the data presented in figures 7 and 8 that runs 4, 5, 7, 8 and 9 are more prone to larger repeatability errors (heavier distribution tails, both for positive and for negative repeatability errors). Run 5 presents a first portion (before 15 000 cycles) with a normal, low repeatability error distribution, and a second portion with much larger errors. Note that the transition to the larger repeatability error distribution in run 5 (around 15 000 cycles) is coincident with the beginning of a position drift (see figure 7).

The position repeatability standard deviation over all runs (13.5 nm, table 2) is smaller than the DGP reading repeatability of 50 nm as quoted by the probe manufacturer and close to the improve DGP repeatability using an averaging of 100 measurement. The measured position repeatability therefore stretches the limits of the measurement system used in these experiments. The kinematic mount position repeatability is nevertheless expected to be better than 50 nm.

5. Analysis and Discussion

During the experimental characterization of the kinematic system, two phenomena were identified: thermal sensitivity and mechanical wear. Temperature variations lead to the dilatation of the components, not affecting the position repeatability of the system, but inducing significant drift over time. During the characterization phase, each cycle period lasted 14 seconds and was well controlled, but in real applications the cycle period and the thermal sensitivity may affect the position repeatability. Also, the high position repeatability required for processes over hundreds or thousands of cycles will involve mechanical wear of the component and may also affect the quality of the results. Therefore, it is essential to better understand these two phenomena (thermal sensitivity and mechanical wear) by an analytical development for a stress approximation, by a deformation validation and by a development of the theoretical value for temperature sensitivity.

5.1. Mechanical wear

The starting point for a mechanical analysis of the kinematic mount is the evaluation of the equivalent radius of the circular contact (a), which is given in [4, 12] by

$$a = \left(\frac{3FR_e}{2E_e} \right)^{1/3} \quad (2),$$

where F is the applied force on the contact points, R_e the equivalent radius of the elements in contact and E_e the equivalent modulus of elasticity. R_e and E_e are defined by

$$R_e = \frac{R}{3} \quad (3),$$

and

$$E_e = \frac{E}{2(1-\eta^2)} \quad (4).$$

The kinematic mount components in this experiment were fabricated with stainless steel 440C balls and cylinders, where $R = 9.525$ mm is the radius of curvature, $\eta = 0.283$ is Poisson's ratio and $E = 210$ GPa is Young's modulus. With $F = 5$ N, the weight of the top plate on one contact, a is then equal to 59 μm .

Knowing the radius of contact, the Hertz contact stress q , as described by [4], can be obtained from

$$q = \frac{aE_e}{\pi R_e} \quad (5).$$

With the given geometry and material characteristics, $q = 679$ MPa, which is lower than $3\sigma_{\text{ultimate}} / 2$, recommended in [4], for a ultimate stress $\sigma_{\text{ultimate}} = 1\,975$ MPa in the stainless steel 440C alloy, tempered to obtain 58 HRC [13]. The maximum shear stress τ_{max} defined by [4], is

$$\tau_{\text{max}} = \frac{q}{2} \left\{ \frac{1+2\eta}{2} + \frac{2}{9} (1+\eta) \sqrt{2(1+\eta)} \right\} \quad (6).$$

The maximum shear stress calculated for the experimental setup is 421 MPa and again, it is lower than $\sigma_{\text{yield}} / 2$ recommended in [4] for a yield stress $\sigma_{\text{yield}} = 1\,900$ Mpa accepted for stainless steel 440C alloy, tempered to obtain 58 HRC [13]. These recommended shear and contact stresses are expected to minimize the risk of damaging the surface and apparition of brinelling [6] for hardened steel.

Visual inspection of the kinematic mount elements was conducted after 30 000 cycles of insertion for run 2. Five cylinders showed long scratches (see figure 9 a)) revealing a sliding

trajectory followed by the balls on the cylinders before the mount reached its stable position. During the engagement of the kinematic mount, as each ball encounter a cylinder, a degree of freedom is blocked, but always with the possibility to slide tangent to the cylinder. When 5 cylinders are contacted by a ball, assuming no friction, only one degree of freedom is remaining and is perpendicular to the surface of the 6th contact point. The inspection of the 6th cylinder showed an oval contact spot (see figure 9 b)) suggesting no macroscopic sliding movement on this cylinder before reaching the stable position.

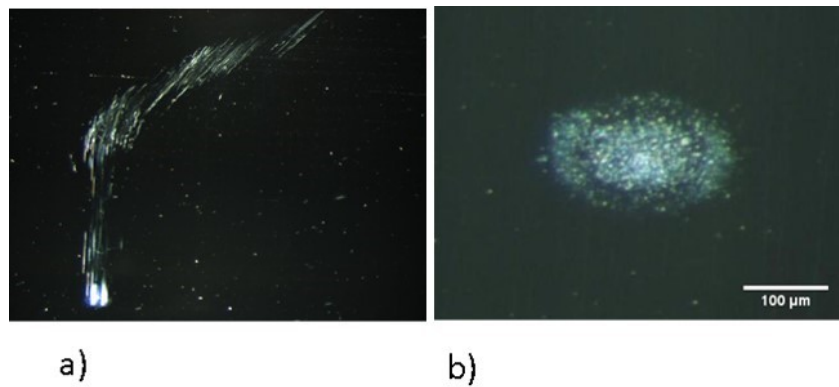


Figure 9: optical micrographs of the contact area on the cylinders used for the kinematic mount. a) typical scratches showing the sliding motion. b) 6th contact point having no sliding marks.

On figure 9 b), one can distinguish two concentric ovals. The smaller one has an equivalent radius R_E of 57 μm , as defined by $\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}$ with R_a that small radius and R_b the large radius of the oval, and the largest oval has an equivalent radius of 110 μm . The presence of two ovals is still under investigation. The experimental value of 57 μm is very close to the theoretical value of 59 μm , with a small difference that could be attributed to measurement errors and the 6th contact point supporting less force because of friction between the elements on the five other contact points.

Scanning electron microscope (SEM) imaging (figure 10) revealed that the marks were likely the result of pitting and scratches only at the surface of the component, since an EDX

analysis revealed the same chemical composition in the contacted region and in an untouched region.

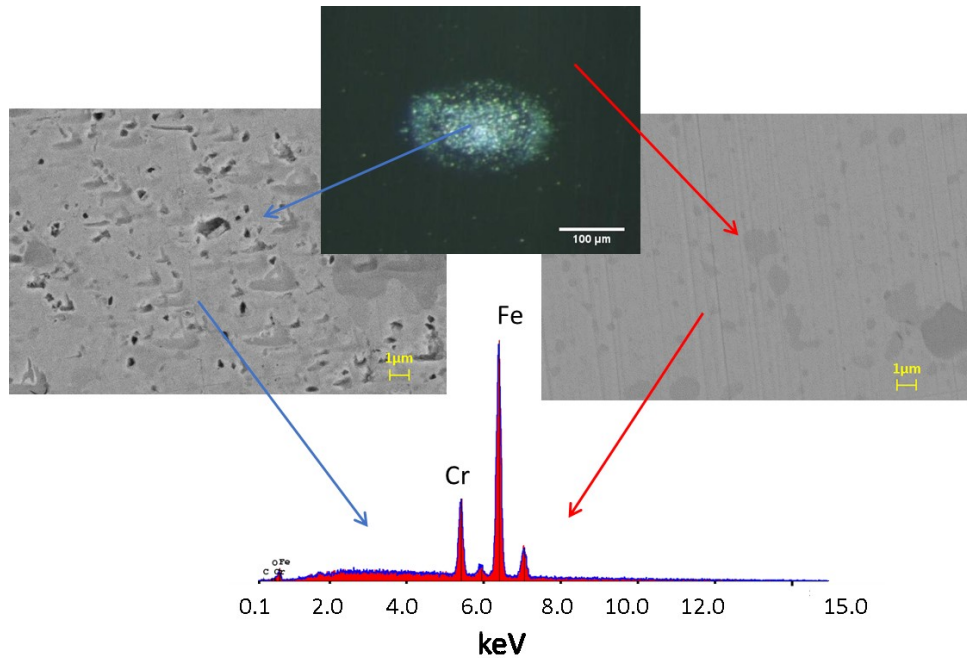


Figure 10: SEM and EDX analyses in the contacted region (blue, top-left) and in an adjacent area (red, top right).

When comparing the EDX spectrum results of run 0 without lubrication (figure 6) and run 2 with lubrication (figure 10), the absence of oxygen in run 2, and therefore the absence of oxidation, suggests that the oil played its role of protecting the component adequately from fretting corrosion. The visible marks are a combination of pits and scratches, attributed to false brinelling caused by the small vibration of the motorized stage before and after the kinematic mount elements are fully engaged and friction wear. Since the top elements are suspended by strings, some extra elevation of the motorized stage is used to ensure proper engagement, which can lead to vibrations acting on the parts while the mating process is completing.

The presence of false brinelling and scratches on the surface suggest important mechanical wear of the component. This mechanical wear is thought to be one of the major contributors for the drift of position over measurement numbers, as presented in table 2.

Even with fresh lubrication applied before each run, the absence of oil feeding system limits the capacity of wear protection and might lead to a dry bearing behavior. The surface tension pumping effect described earlier may be sufficient for oxidation protection, but not wear protection. Depending on the initial oil film coverage, the acceleration of wear may start at different moments, which has been seen over the multiple runs. However, looking at the position drift rate in table 2, we can notice a tendency of lower drift rate when using the Tellus 68 oil. This oil is designed for industrial environment and its anti-wear additive probably offers a better protection than the compressor oil.

Once sufficient quantity of particles has been released by friction because of the lack of lubrication, it is assumed that the wear rate tends to a dry bearing behavior and the radial wear h , as described by [14], is

$$h = kPd \quad (7).$$

where k is the specific wear rate, P the nominal applied pressure and d the total sliding distance. Nominal applied pressure and total sliding distance with the load applied are of similar amplitude for each run. However, the specific wear rate is basically a material property, but reported to depend on the sliding condition and precise geometrical arrangement. Since the kinematic mount components have been removed and reinstalled after each run and that friction wear is not perfectly controlled, it is highly probable that k varies between each run. The variability of h is indeed hard to control for each run and leads to different drift over cycling.

5.2. Temperature sensitivity

An evaluation of the temperature sensitivity (Z_T) is calculated based on the simple geometrical model shown in figure 11. It is assumed that temperature is uniform across the components and that the three supporting ball-cylinder mechanisms are identical in terms of positioning and dimensions.

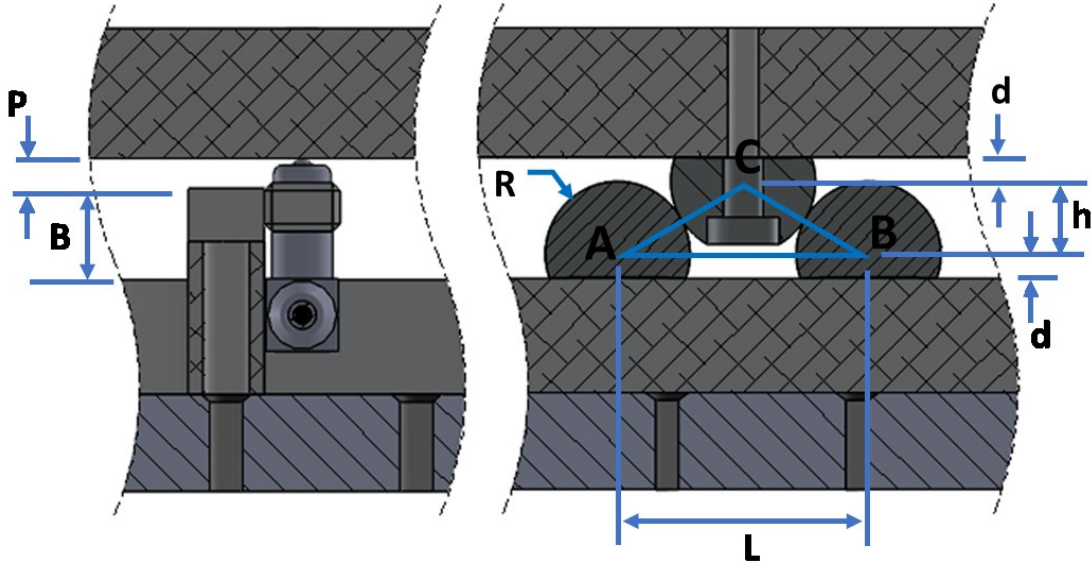


Figure 11: Geometrical variables identification for temperature sensitivity calculations. On the left, the DGP positioned in the center of the kinematic mount. On the right, the three spheres sit on two half cylinders.

Referring to the variables defined in figure 11, the triangle ABC is formed with the centers of the cylinders and of the ball. Because of the difference in the coefficient of thermal expansion between the aluminum top and bottom plates (CTE_{Al}) and the stainless steel 440c balls and cylinders (CTE_{ss}), the height of the triangle does not vary linearly with temperature. To simplify the analysis, we define an equivalent coefficient of thermal expansion CTE_h for the height h of the triangle. Simple geometry gives

$$(2R + 2R \times CTE_{ss} \times \Delta T)^2 - \left(\frac{L}{2} + \frac{L}{2} \times CTE_{Al} \times \Delta T\right)^2 = (h + h \times CTE_h \times \Delta T)^2 \quad (8).$$

Developing equation (8) using relation $h^2 + \frac{L^2}{4} = 4R^2$, we obtain

$$\frac{16R^2(2CTE_{ss} \times \Delta T + CTE_{ss}^2 \times \Delta T^2) - L^2(2CTE_{Al} \times \Delta T + CTE_{Al}^2 \times \Delta T^2)}{16R^2 - L^2} = 2CTE_h \times \Delta T + CTE_h^2 \times \Delta T^2 \quad (9).$$

which shows that CTE_h depends on the geometry of the system and on the temperature.

However, considering that CTE are small numbers, their squared values can be neglected. We then obtain a simpler approximation of the coefficient of thermal expansion for CTE_h :

$$\frac{16R^2(CTE_{SS}) - L^2(CTE_{Al})}{16R^2 - L^2} = CTE_h \quad (10).$$

The dependency of CTE_h on the dimensions R and L is obvious and in the actual setup R is fixed by the fabrication process, but L can vary at each run since the cylinders need to be removed, polished and reinstalled. Adding the thermal expansion of the gauging probe steel portion above the aluminum bracket of length P , and of its aluminum holding bracket of length B , as well as the expansion of the steel structures above and below triangle ABC (length $2d$, Figure 12b), we obtain the temperature sensitivity of the complete system:

$$Z_T = h \times CTE_h + (2d - P) \times CTE_{SS} - B \times CTE_{Al} \quad (11).$$

With $h = 9.525$ mm, $d = 3.175$ mm, $P = 3.375$ mm, $B = 12.5$ mm, $CTE_{SS} = 10.2$ ppm/ $^{\circ}$ C and $CTE_{Al} = 23.6$ ppm/ $^{\circ}$ C, we obtain a temperature sensitivity of 550 nm/ $^{\circ}$ C., which is consistent with the average temperature sensitivity calculated experimentally (table 2). The two main contributors to thermal sensitivity are the variation of h (286 nm/ $^{\circ}$ C), coming from the bottom aluminum plate increasing the cylinders spacing and variation on B (295 nm/ $^{\circ}$ C), pushing the sensor against the top plate. Both contributors produce a change in the DGP reading when the temperature increases, suggesting that the top plate is lowering. The sum of the contributions from h and B leads to a value higher than 550 nm/ $^{\circ}$ C, but the increasing radius of the half cylinders and balls with increasing temperature is moving the plate in the other direction.

To test the validity of this analysis a temperature compensation was applied to run 2, which had large temperature changes, using the fitting procedure outlined in section 3, which was then compared with temperature compensation using the temperature sensitivity calculated using equation 9. The results are presented in figure 12.

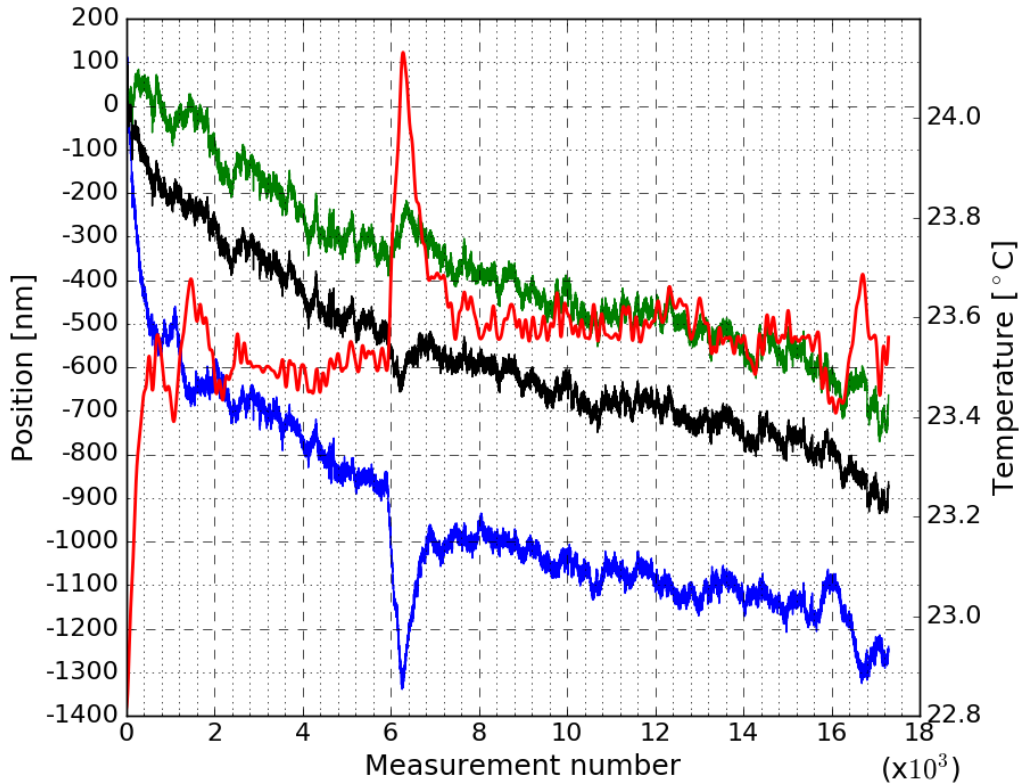


Figure 12: comparison of the original measurement (Blue), the temperature compensated position using measured temperature sensitivity (Green) and the temperature compensated position using calculated temperature sensitivity (Black). The red curve is the filtered temperature used for the temperature compensation.

The temperature sensitivity calculated with the experimental data tends to over-correct the data, as can be seen most clearly around 6 000 cycles. The theoretical value of the thermal sensitivity leads, in this experiment, to a similar and maybe slightly better temperature compensation, with the corrected data showing minimized position changes with temperature variations.

This theoretical value of temperature sensitivity validates the measured value, but is not being used to do the temperature compensation because, in some cases, it introduces a shift in the absolute value of the position and reduces the Pearson correlation coefficient as presented in table 3, calculated between the original curve and the corrected one using equation 9.

Table 3: Pearson correlation coefficient between the original position curve and the temperature corrected one using the experimental temperature sensitivity and theoretical temperature sensitivity.

<i>Run Number</i>	<i>Experimental temperature sensitivity</i>	<i>Theoretical temperature sensitivity</i>
2	0.977	0.969
3	0.928	0.820
4	0.860	0.860
5	0.957	0.952
6	0.976	0.975
7	0.972	0.972
8	0.967	0.967
9	0.983	0.983

On the experimental setup only one thermocouple was measuring the temperature. It is possible that during periods of rapid temperature change, the temperature of the structure is not uniform and leads to discrepancy between calculated and measured temperature sensitivities. A better mapping of temperature over the validation setup and controlled temperature variations are planned to have a better measurement of the experimental coefficient of thermal sensitivity.

6. Conclusion

Eight data acquisition runs, each with tens of thousands of insertion cycles, with a kinematic mount equipped with precision out-of-plane position measurements have been realized, to characterize the repeatability of the mount in the large cycling limit. It was observed that a unique application of oil on the contact points inhibited the apparition of oxidation, resulting in much better repeatability. However, the oil did not eliminate marks and pits at the contact points, which are thought to be caused by false brinelling and friction

wear. Even with appropriate lubrication, significant drifts in the mated position were observed, always with similar magnitudes and in the same direction (reduction of the height). These position drifts are thought to originate mainly from mechanical wear of the metallic components used for the kinematic mount.

In addition to position drifts related to mechanical wear in the mating components, position drifts related to the thermal expansion of the mount structure was observed. These drifts could be precisely accounted for using a simple geometrical model of the system and the experimental temperature sensitivity coefficient.

In spite of the tens of thousands of cycles endured by the kinematic mount, the mechanical wear of the contact points and the temperature variations, the average position repeatability along the vertical axis was measured to be only 40.5 nm at three standard deviations. Metallic components increase the risk of low repeatability for the fabrication of a kinematic mount because of fretting corrosion, false brinelling resulting from vibration in high stress regions and friction wear. However, their low cost and ease of procurement still make them interesting for industrial applications. The present characterization of position repeatability over hundreds of thousands of cycles demonstrates the viability of stainless steel components in the design and fabrication of kinematic mount devices used in manufacturing environments.

Acknowledgements

This work was supported by the NSERC/IBM Canada Industrial Research Chair in Smarter Microelectronic Packaging for Performance Scaling, with financial contributions from the IBM Corporation, the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, PROMPT, and the Université de Sherbrooke.

[1] J. Willoughby P, J. Hart A, H. Slocum A. Experimental Determination of Kinematic Coupling Repeatability in Industrial and Laboratory Conditions 2005;24.

[2] Slocum A. Kinematic couplings: A review of design principles and applications. Int J Mach Tools Manuf 2010;50:310–27.

- [3] Slocum AH. Kinematic couplings for precision fixturing—Part I: Formulation of design parameters. *Precis Eng* 1988;10:85–91. doi:10.1016/0141-6359(88)90005-0.
- [4] H. Slocum A. *Precision Machine Design*. United-State: Society of Manufacturing Engineers; 1992.
- [5] Slocum AH, Donmez A. Kinematic couplings for precision fixturing — Part 2: Experimental determination of repeatability and stiffness. *Precis Eng* 1988;10:115–22. doi:10.1016/0141-6359(88)90029-3.
- [6] Hale C. L. Optimal design techniques for kinematic couplings. *J Int Soc Precis Eng Nanotechnol* 2001:114 –127.
- [7] Baltec - Home n.d. <http://www.precisionballs.com/index.php> (accessed January 20, 2017).
- [8] Hale LC. Friction-based design of kinematic couplings. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA; 1998.
- [9] Solartron Metrology. Orbit 3, Digital Measurement System 2014.
- [10] Dowling NE. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4th ed. Boston: Pearson; 2013.
- [11] Shell. Shell Tellus S2 M 68 2016.
- [12] Tripp JH. Hertzian contact in two and three dimensions. NASA Tech Pap 2473 1985.
- [13] *Wrought Stainless Steels: Selection and Application*. Met. Handb. Desk Ed., 1998, p. 362–75.
- [14] Lancaster JK. Dry bearings: a survey of materials and factors affecting their performance. *Tribology* 1973;6:219–251.

5. Fabrication de l'équipement

Afin de bien réaliser l'avancement du projet, cette section présente en rafale des photos de différents éléments de l'équipement. Pour commencer, on peut voir sur la Figure 47 une comparaison entre le modèle 3D et l'équipement réel dans son ensemble.

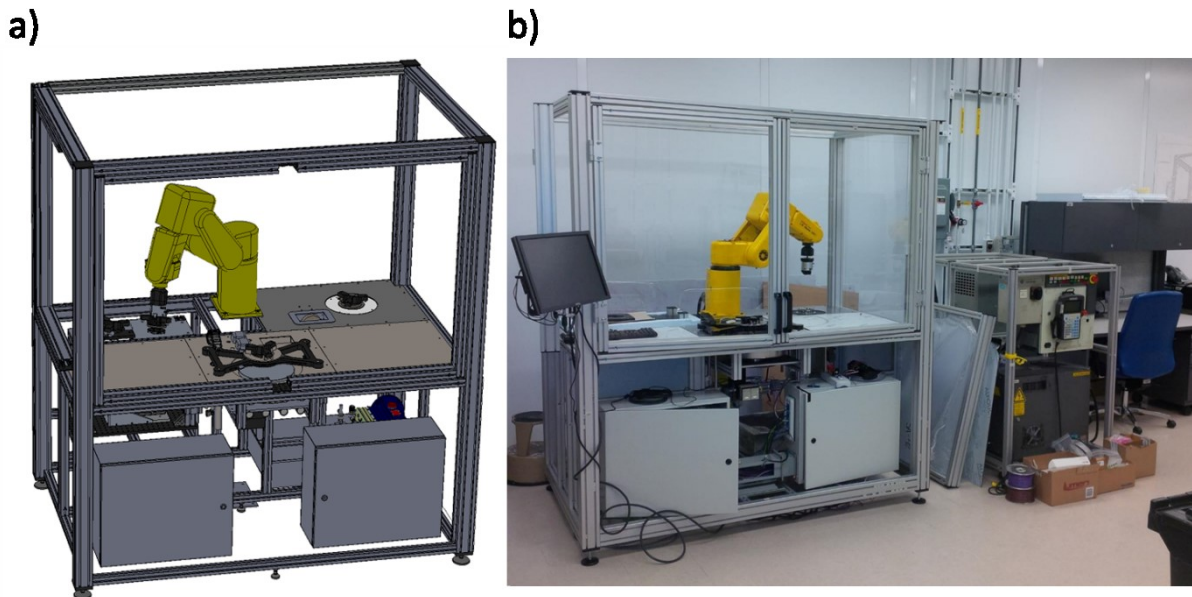


Figure 47: a) Modèle numérique du tomographe optique. b) Tomographe optique réel.

On constate sur la Figure 47 b), à droite de l'équipement, une structure en aluminium qui contient les éléments de contrôle du bras robotique. Il a été choisi de positionner ces composants à l'extérieur de la structure principale afin de limiter les sources de chaleur aux alentours de la station de caractérisation et de diminuer la dimension de la structure principale. La Figure 48 présente une comparaison entre le modèle 3D et la construction réelle du sous-système de préparation de surface.

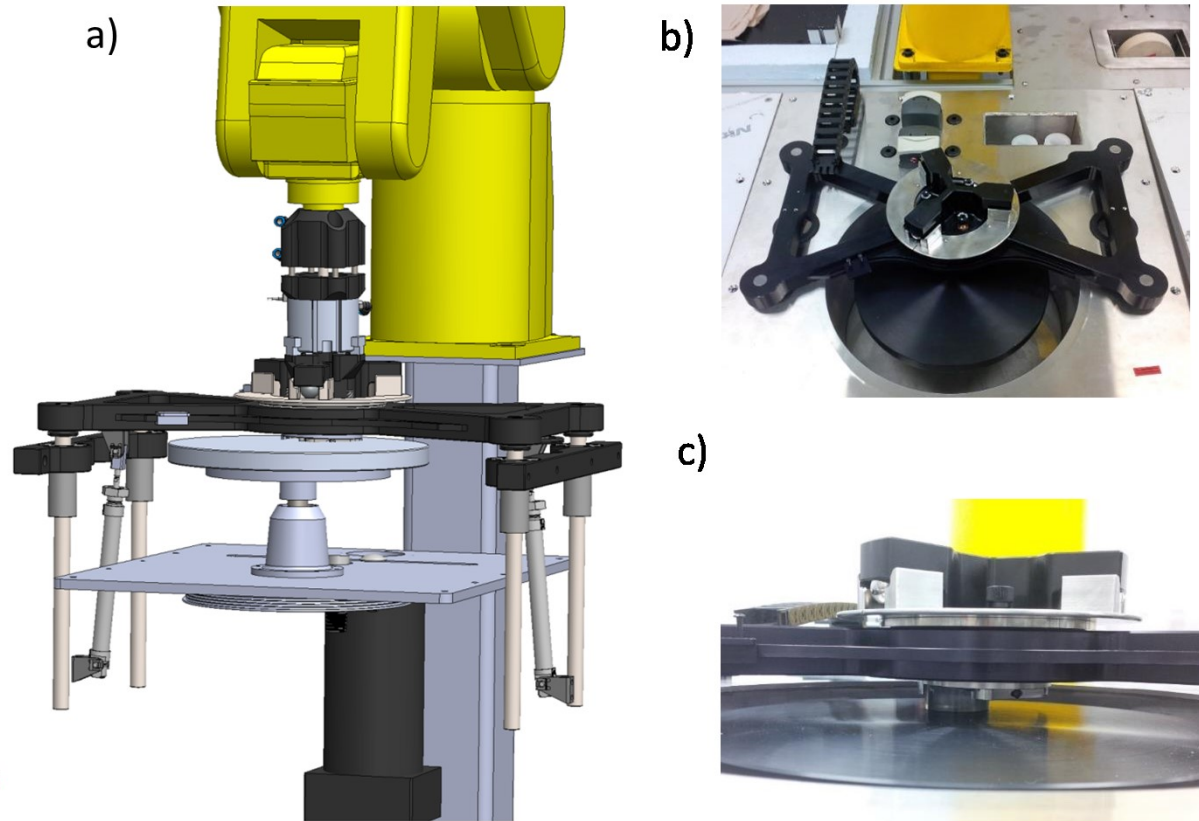


Figure 48: a) modèle 3D de la station de préparation de surface. b) vu du dessus de la station de préparation de surface. c) vue de face de la station de préparation de surface, avec échantillon.

Il est intéressant de remarquer sur le Figure 48 b) la présence de la cuve de récupération des résidus de préparation de surface ainsi que les pompes péristaltiques pour l'apport de lubrifiant et d'agent abrasif. Ces éléments sont cachés dans sur le modèle 3D (Figure 48 a)) afin de visualiser les éléments internes. Sur la Figure 48 c), qui présente une vue de face, on peut observer la présence d'un échantillon en contact avec la table de polissage.

Après la préparation de surface, tel que décrit précédemment, il faut passer par le sous-système de nettoyage, présenté à la Figure 49.

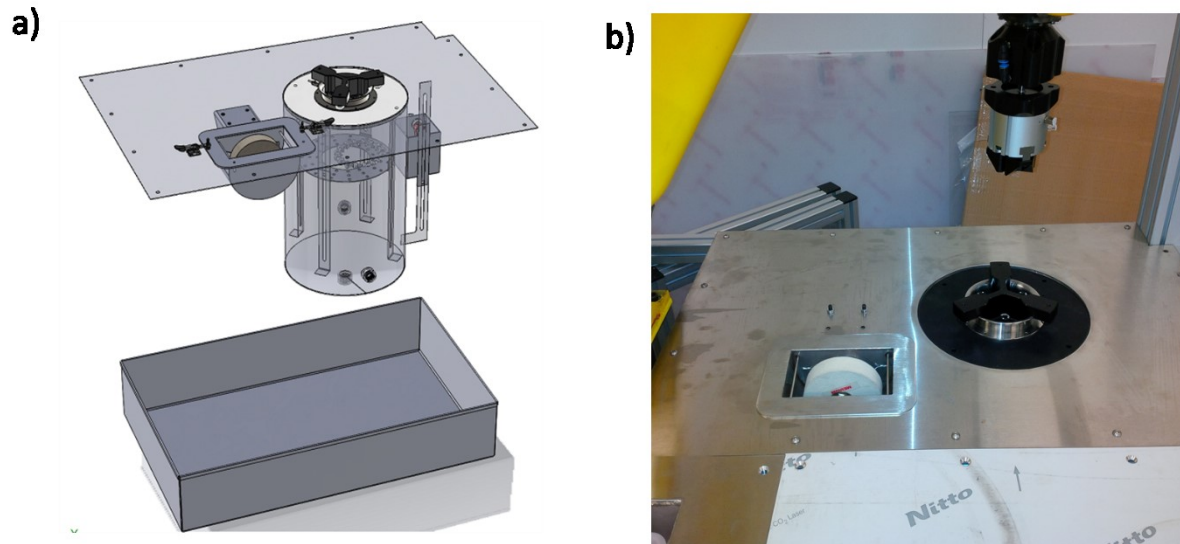


Figure 49 a) modèle 3D du sous-système de nettoyage. B) vue du dessus du sous-système de nettoyage fabriqué.

On peut observer sur la Figure 49 a), grâce à la transparence des composants, les éléments sous la plaque supérieure et interne à la cuve de rinçage. Sur la Figure 49 b), on peut identifier la brosse de savonnage ainsi que le porte échantillon positionné sur la cuve de nettoyage, mais on peut aussi observer la pince du bras robotisé au-dessus du porte échantillon. Suite au savonnage, rinçage et séchage de l'échantillon, celui-ci est transporté jusqu'au sous-système de caractérisation, présenté à la Figure 50.

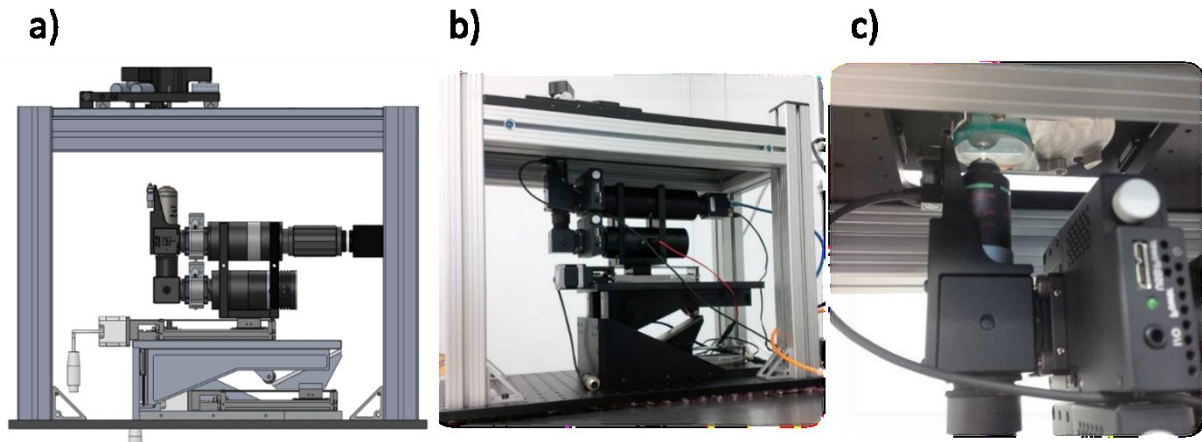


Figure 50: a) modèle 3D du sous-système de caractérisation. b) système de caractérisation fabriqué. c) vue rapproché de l'objectif du microscope en position d'imagerie.

La Figure 50 a) et b) permet de comparer le modèle 3D du sous-système de caractérisation avec le sous-système réel. La Figure 50 c) présente une vue rapprochée de l'objectif du microscope qui est en position d'imagerie, ainsi qu'à sa gauche le palpeur numérique utilisé pour la mesure de l'épaisseur de matière enlevée après chaque séance de polissage.

Le modèle 3D du porte échantillon ainsi qu'un porte échantillon fabriqué sont présentés à la Figure 51.

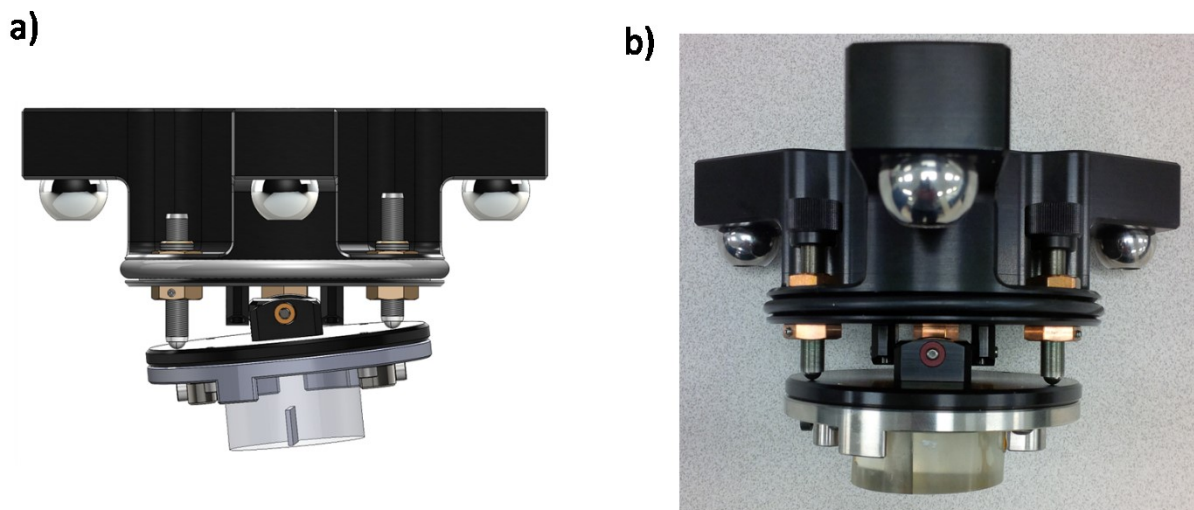


Figure 51: a) modèle 3D du porte échantillon. b) porte échantillon réel.

La fabrication du porte échantillon se fait sans difficulté majeur, respectant le modèle et à faible coût. Il est envisageable de le fabriquer en plusieurs exemplaires pour paralléliser le procédé de tomographie optique.

Bien que le sous-système de contrôle soit décrit par les travaux d'un autre étudiant, la Figure 52 présente les panneaux électriques durant leur assemblage.

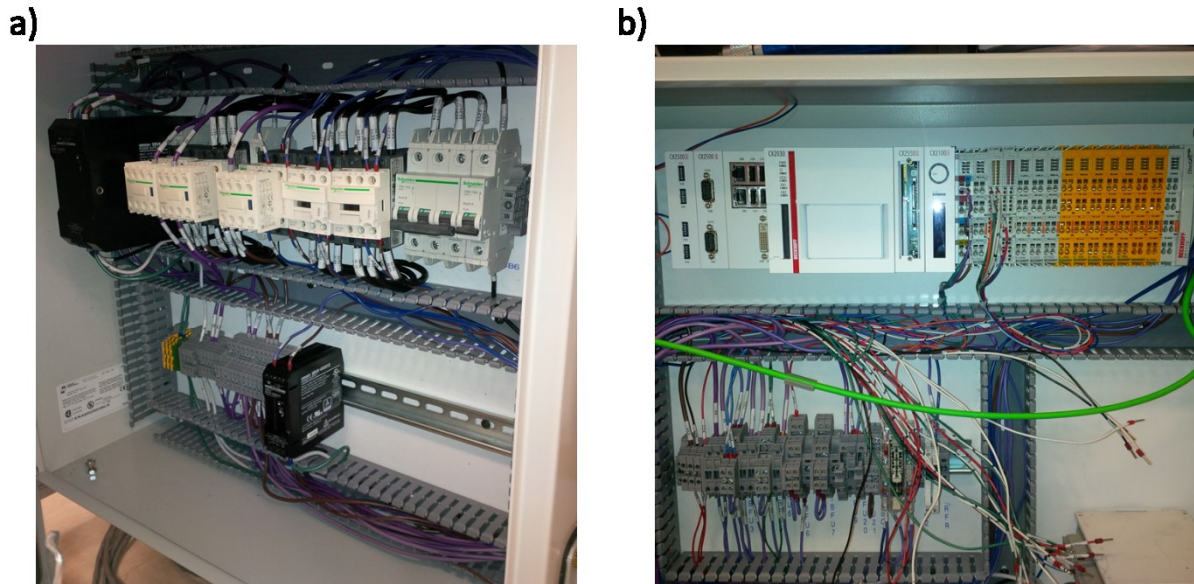


Figure 52: a) vue du panneau électrique de contrôle de puissance, en cours de fabrication. b) vue du panneau de contrôle, en cours de fabrication.

La conception des plans électriques, par un sous-traitant ayant la compétence, a mené à un concept à 2 panneaux : la puissance électrique d'un côté (Figure 52 a)) et le système de contrôle de l'autre (Figure 52 b)).

Tel qu'il est possible de le constater sur les différentes figures, l'assemblage de l'équipement est bien avancé et en constante évolution. Pour donner un aperçu plus global de l'avancement de la fabrication de la machine, la Figure 53 présente un diagramme en radar avec l'avancement de chaque sous-système, au moment de la rédaction de ce mémoire.

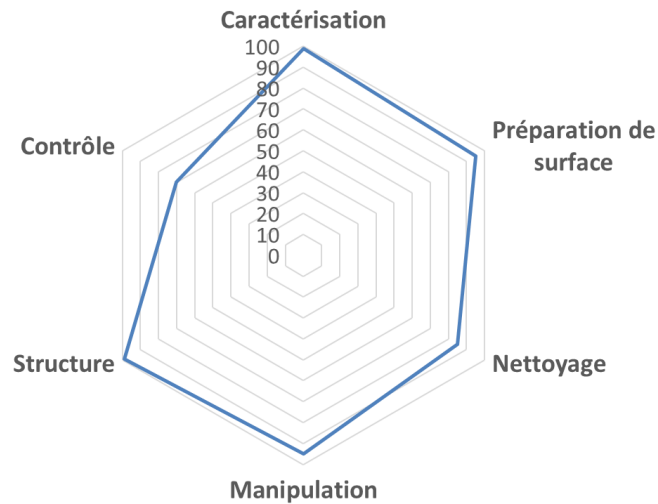


Figure 53: diagramme en radar de l'avancement de fabrication de chaque sous-système.

Les derniers petits ajustements de fabrication terminés, les premiers tests d'automatisation de procédé seront réalisés. Le travail restant est continué par un autre étudiant.

6. Conclusion

Le domaine de la microélectronique ne cesse d'évoluer depuis son apparition et les défis reliés à l'assemblage des composants par le procédé de puce renversée sont toujours grandissants. La réduction de la taille des joints des interconnexions et l'augmentation de la dimension des puces résultent en l'augmentation des contraintes dans les joints de brasure et une réduction de la fiabilité des assemblages. L'utilisation des alliages étain-argent-cuivre pour les joints de brasure provoque l'apparition de plusieurs domaines cristallographiques ayant des tailles et des orientations différentes, en fonction des différents paramètres d'assemblage. Comme il a été démontré que l'interface entre ces domaines cristallographiques est l'un des contributeurs majeurs à l'apparition de fissure et de la défaillance des puces électroniques, il est essentiel d'étudier l'effet du nombre, de la géométrie et de la taille de ces domaines sur la fiabilité des composants.

Les techniques conventionnelles de laboratoire permettent de générer des images en 2 dimensions qui mettent en évidence les différents domaines cristallographiques à l'aide de l'éclairage polarisé croisé. Cette technique simple et utilisant l'imagerie par photon dans le

spectre visible à l'avantage d'être bien connue et de nécessiter des équipements peu complexes pour la réaliser. Un concept d'automatisation de ce procédé est donc proposé afin de générer une séquence d'images qui serviront à réaliser une reconstruction tridimensionnelle d'une zone d'un assemblage microélectronique montrant des interconnexions. Pour arriver au concept final, un processus de développement de produit a été suivi pour bien identifier les besoins, les fonctions et établir un cahier des charges claires afin de réaliser une conception optimale.

L'équipement en question utilise un bras robotique pour déplacer un porte-échantillon entre une station de préparation de surface (sablage et polissage), une station de lavage (savonnage, rinçage et séchage) et finalement une station de caractérisation (mesure de l'épaisseur de matière enlevée et photographie). Une structure en extrudé d'aluminium contient le tout et assure une partie de la protection des usagers tandis qu'un système de contrôle coordonne les opérations et finalise le système de sécurité.

L'élément clé de la dynamique de caractérisation est sans aucun doute le porte échantillon. Celui-ci sert à transporter l'échantillon entre les différentes stations, mais aussi à maintenir de façon rigide l'échantillon, à permettre une correction de l'orientation du plan à inspecter et positionner de façon très précise et répétable l'échantillon dans la zone de caractérisation. Pour réaliser ce positionnement précis et répétable, trois demi-sphères installées sur le porte échantillon sont utilisées conjointement à trois paires de demi-cylindres installées sur la station de caractérisation, pour former un système de positionnement isostatique. Une caractérisation exhaustive de la répétabilité de positionnement a été réalisée pour bien comprendre les défis liés à l'utilisation d'un tel système et pour être en mesure de compenser toutes variations de positions causées par une dilatation thermique des composants. Une répétabilité de positionnement relative de 40.5 nm à trois écarts types a été mesurée avec ce mécanisme isostatique et permet de valider l'approche de caractérisation.

En parallèle de cette caractérisation de positionnement, une validation du microscope a permis de démontrer la capacité du microscope conçu à bien mettre en évidence les domaines cristallographiques présents dans un joint de brasure, à offrir une résolution spatiale numérique de $0.17\mu\text{m}/\text{pixel}$ et un champ de vision de $422\mu\text{m} \times 353\mu\text{m}$ en utilisant un objectif de microscope ayant une limite de Rayleigh de $0.84\mu\text{m}$. Ces validations expérimentales montrent

que tous les éléments sont en place pour obtenir une résolution d'image 3D inférieure à $1 \times 1 \times 1 \mu\text{m}^3$.

L'objectif de l'équipement conçu et fabriqué est bien de caractériser les domaines cristallographiques de joints de brasure dans les interconnexions des puces électroniques assemblées par le procédé puce renversée, mais offrira aussi la possibilité de visualiser bien d'autres types de microstructure et de défaut dans les composants. L'utilisation d'un microscope optique permet de bien visualiser certains matériaux qui peuvent être difficilement différenciables par d'autres types d'équipements de tomographie. Par exemple, certains matériaux organiques apparaissent quasiment invisibles par tomographie rayon X alors qu'à l'aide de photons ils sont très faciles à distinguer.

Grâce au système de porte échantillon, qui permet un positionnement très précis de façon passive, le concept proposé se distingue particulièrement des modèles déjà existant par la possibilité de grandement paralléliser ce procédé d'imagerie à l'aide d'un seul équipement. En effet, par des modifications simples il serait possible de traiter plusieurs échantillons en même temps puisque le bras articulé sert principalement au transport des portes échantillons et non d'assurer la précision du polissage. La cadence d'imagerie d'une grande population d'échantillon devrait donc être supérieure aux modèles présentés dans ce mémoire.

Il sera aussi possible d'élargir les modes de polissage avec quelques ajouts à l'équipement. Entre autres, une seconde station de polissage permettrait d'avoir différents paramètres de polissage pour, par exemple, faire des enlèvements de matière rapide sur une station et de la finition pour inspection sur la seconde. De cette façon, il serait possible de réaliser de façon automatique une vue de coupe à travers chacune des rangées d'interconnexion, distancées de plusieurs dizaines ou centaines de microns, ce qui n'a jamais été fait.

Les diverses validations réalisées jusqu'à présent permettent de confirmer le fonctionnement de cet équipement novateur. Des études de la microstructure des interconnexions pourront être réalisées sur un grand nombre d'échantillons et ainsi améliorer la compréhension fondamentale des modes de défaillance des puces électroniques. Aussi, les ajouts potentiels à l'équipement pour élargir le spectre d'analyses réalisées en font un équipement d'analyse clé pour les

innovations de procédé d'assemblage par puce renversée des micro processeurs. Cet équipement s'inscrit donc parfaitement dans les stratégies déployées pour continuer à suivre la tendance d'évolution des composants, dictée par la loi de Moore.

- Alkemper, J. et Voorhees, P. W. (2001) Quantitative serial sectioning analysis. *Journal of Microscopy*, vol. 201, n°3, p. 388-394.
- Arnold, T. (2013) The making of an Asic.
- Beckhoff (2017) EL5021, EL5021-0090 SinCos Encoder Interfaces.
- BECKHOFF Automation GmbH (2012) TwinCAT3 eXtended Automation (XA).
- BECKHOFF Automation GmbH (2017) Manual CX2020, CX2030, CX2040 Embedded PC.
- Bertheau, J., Bleuet, P., Hodaj, F., Cloetens, P., Martin, N., Charbonnier, J. et Hotellier, N. (2014) Reflow processes in micro-bumps studied by synchrotron X-ray projection nanotomography. *Microelectronic Engineering*, vol. 113, n°0, p. 123-129.
- Bhandari, Y., Sarkar, S., Groeber, M., Uchic, M. D., Dimiduk, D. M. et Ghosh, S. (2007) 3D polycrystalline microstructure reconstruction from FIB generated serial sections for FE analysis. *Computational Materials Science*, vol. 41, n°2, p. 222-235.
- Bieler, T. R., Jiang, H., Lehman, L. P., Kirkpatrick, T. et Cotts, E. J. (2006) Influence of Sn grain size and orientation on the thermomechanical response and reliability of Pb-free solder joints. *Electronic Components and Technology Conference, 2006. Proceedings. 56th*, p. 6 pp.-.
- Buehler (2017) EcoMet/AutoMet Grinder-Polisher System (No. FN01325_0417). Illinois Tool Works Inc.
- Burnett, T. L., Kelley, R., Winiarski, B., Contreras, L., Daly, M., Gholinia, A., Burke, M. G. et Withers, P. J. (2016) Large volume serial section tomography by Xe Plasma FIB dual beam microscopy. *Ultramicroscopy*, vol. 161, p. 119-129.
- Charron, F. et Desbiens, J.-P. (2005) Aide à la réalisation de l'analyse fonctionnelle dans le processus de développement de produit. Thèse de doctorat, Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke, 60 p.
- F. Vander Voort, G. (2004) Light Microscopy. *ASM Handbook, Metallography and Microstructures (Vol. 9, p. 332-354)*.
- FANUC Robotics (1999) LR Mate 200i.
- Heidenhain (2016) Exposed Linear Encoders.
- Hilton, E. (2013) Automated Metallography, ROBO-MET.3D.
- Hülsmann, M. (2009) Test Report, Art.-No. 229-9001.00-00000.
- IDS-Imaging (2013) Technical data sheet - UI-6280SE-C-HQ Rev.3.

- Lehman, L. P., Kinyanjui, R. K., Wang, J., Xing, Y., Zavalij, L., Cotts, E. J. et Borgesen, P. (2005) Microstructure and damage evolution in Sn-Ag-Cu solder joints. *Electronic Components and Technology Conference*, vol. 55, p. 674. IEEE; 1999.
- Li, M., Ghosh, S., Rouns, T. N., Weiland, H., Richmond, O. et Hunt, W. (1998) Serial Sectioning Method in the Construction of 3-D Microstructures for Particle-Reinforced MMCs. *Materials Characterization*, vol. 41, n°2-3, p. 81-95.
- Matin, M. A., Coenen, E. W. C., Vellinga, W. P. et Geers, M. G. D. (2005) Correlation between thermal fatigue and thermal anisotropy in a Pb-free solder alloy. *Scripta Materialia*, vol. 53, n°8, p. 927-932.
- Matin, M. A., Vellinga, W. P. et Geers, M. G. D. (2007) Thermomechanical fatigue damage evolution in SAC solder joints. *Materials Science and Engineering A*, vol. 445-446, n°Journal Article, p. 73-85.
- MayTec Aluminium Systemtechnik GmbH (2015) Safety Barrier.
- MetLab (2015) FORCIPOL.
- Moore E., G. (1998) Cramming more components onto integrated circuits. *IEEE*, vol. 86, n°1.
- Nikon Instruments Inc. (2016) Microscope Objectives for Bioscience.
- P.A. Adiga, U., J. Hooper, D., Joshi, N., S. Banks, D. et K. Gorantla, M. (2015) Automated high speed metallographic system. United-State.
- Sidhu, R. S. et Chawla, N. (2004) Three-dimensional microstructure characterization of Ag₃Sn intermetallics in Sn-rich solder by serial sectioning. *Materials Characterization*, vol. 52, n°3, p. 225-230.
- Solartron Metrology (2014) Orbit 3, Digital Measurement System.
- Spowart, J. E. (2006) Automated serial sectioning for 3-D analysis of microstructures. *Scripta Materialia*, vol. 55, n°1, p. 5-10.
- Subramanian, K. N. et Lee, J. G. (2004) Effect of anisotropy of tin on thermomechanical behavior of solder joints. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 15, n°4, p. 235-240.
- Sylvestre, J. et Blander, A. (2008) Large-Scale Correlations in the Orientation of Grains in Lead-Free Solder Joints. *Journal of Electronic Materials*, vol. 37, n°10, p. 1618-1623.
- THK CO. LTD (2015) LM Guide Actuator Model KR.
- Thorlabs, Inc. (1999) Sorbothane Isolators.

- Thorlabs, inc. (1999) Thorlabs, Inc. - Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control.
- Tsuritani, H., Sayama, T., Okamoto, Y., Takayanagi, T., Uesugi, K., Hoshino, M. et Mori, T. (2013) Application of synchrotron radiation X-ray laminography to nondestructive evaluation of the fatigue crack propagation process in flip chip solder joints. ASME 2013 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems, InterPACK 2013, vol. 1.
- Tsuritani, H., Sayama, T., Okamoto, Y., Takayanagi, T., Uesugi, K. et Mori, T. (2011) Application of synchrotron radiation X-ray microtomography to nondestructive evaluation of thermal fatigue process in flip chip interconnects. Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME, vol. 133, n°2.
- Vianco, P. T., Rejent, J. A. et Kilgo, A. C. (2004a) Creep behavior of the ternary 95.5Sn-3.9Ag-0.6Cu solder - Part I: As-cast condition. Journal of Electronic Materials, vol. 33, n°11, p. 1389-1400.
- Vianco, P. T., Rejent, J. A. et Kilgo, A. C. (2004b) Creep behavior of the ternary 95.5Sn-3.9Ag-0.6Cu solder: Part II-aged condition. Journal of Electronic Materials, vol. 33, n°12, p. 1473-1484.
- Vogler, D. (2011) 3D-CT-X-ray-imaging-fills-inspection-gaps-says-Xradia | Solid State Technology.
- Xradia (2013) Identifying Failures (Bump Cracks and Voids) Within Advanced 3D Packages for Semiconductors. AZoM.com.
- Yan, J., Yoshino, M., Kuriagawa, T., Shirakashi, T., Syoji, K. et Komanduri, R. (2001) On the ductile machining of silicon for micro electro-mechanical systems (MEMS), opto-electronic and optical applications. Materials Science and Engineering: A, vol. 297, n°1-2, p. 230-234.
- Yazzie, K. E., Williams, J. J., Phillips, N. C., De Carlo, F. et Chawla, N. (2012) Multiscale microstructural characterization of Sn-rich alloys by three dimensional (3D) X-ray synchrotron tomography and focused ion beam (FIB) tomography. Materials Characterization, vol. 70, n°Journal Article, p. 33-41.

Annexe A

Tableau 13: Liste des besoins de premier niveau pour l'ensemble de l'équipement.

No	Besoin	Classe
B001	Est sécuritaire	B
B002	Possède un arrêt d'urgence	B
B003	Arrête en cas de collision	B
B004	Ergonomique	B
B005	Protège l'environnement	B
B006	Respecte le budget alloué	C
B007	Permet un accès à chacune des stations pour réaliser les ajustements de départ.	B
B008	Poli la surface de l'échantillon pour mettre en évidence la microstructure	B
B009	Permet un ajustement des paramètres de polissage : vitesse de rotation de la table, pression, débit de lubrifiant, débit d'agent abrasif, durée.	B
B010	Utilise du matériel de polissage commercial.	B
B011	Nettoie et sèche la surface à inspecter.	B
B012	Permet l'ajustement des paramètres de nettoyage.	
B013	Manipule des échantillons cylindriques.	C
B014	Permet l'ajustement de la zone à inspecter.	B
B015	Permet d'arrêter la séquence après un nombre fixe de passes.	B
B016	Permet la visualisation de la microstructure de l'échantillon comportant des éléments d'environ 1 μm .	B
B017	Utiliser les services (air comprimé, eau, etc.) déjà disponibles au C2MI.	C
B018	Photographie l'échantillon.	B
B019	Permet l'ajustement de l'orientation du plan à inspecter	
B020	Reconstruit une image en 3D avec la série d'images 2D.	B
B021	Les images obtenues doivent être conservées en cas de panne, ainsi que l'information sur l'épaisseur de matière enlevée entre chaque.	P

B022	Génère des images à une cadence similaire ou supérieur aux équipements présenté dans l'état de l'art.	P
B023	Est capable de mesurer l'épaisseur de matière enlevée après chaque séance de polissage.	B
B024	Obtient une surface à inspecter exempte de résidus et de rayures.	B
B025	L'échantillon peut être retiré, amené au MEB, puis relancer la séquence.	P
B026	Opérations automatisées.	P
B027	Utilise des éléments matériaux et éléments de machines communs, faciles à se procurer.	P
B028	Peut être entretenu par les techniciens d'IBM.	B
B029	Est modifiable facilement puisqu'il s'agit d'un prototype	B
B030	Compense les variations de température qui pourraient affecter les mesures.	P
B031	Obtient une image aux caractéristiques comparables aux équipements d'inspection disponible au C2MI.	P
B032	Permet le rajout de stations supplémentaires dans une deuxième phase de projet.	P
B033	Permettre de paralléliser le procédé d'imagerie et de préparation de surface.	I

Annexe B

Tableau 14: Fonctions que doit réaliser le tomographe optique micro-structuel.

No	Fonction	Type	Kano	AFNOR
F001	Avertir des sources de dangers	Estime	B	IMP
F002	Avertir du fonctionnement de l'appareil	Estime	B	IMP
F004	Empêcher l'accès facile aux pièces mobiles	Usage	B	IND
F005	Empêcher l'accès facile au circuit électrique	Usage	B	IND
F006	Couper toutes formes d'énergie en cas de nécessité	Usage	B	IND
F007	Détecter les collisions	Usage	P	IMP
F008	Absorber l'énergie de collision	Technique	P	IND
F009	Être ergonomique	Estime	B	IMP
F010	Disposer des produits chimiques	Usage	B	IMP
F012	Utiliser des composants commerciaux	Estime	B	INT
F013	Réutiliser des pièces d'équipements existants	Contrainte	P	INT
F014	Permettre un accès à chacune des stations pour réaliser les ajustements de départ.	Usage	B	IMP
F015	Sabler la surface	Usage	B	IND
F016	Polir la surface	Usage	B	IND
F017	Permettre un ajustement de la vitesse de rotation de la table	Technique	P	INT
F018	Permettre l'ajustement de la force appliqué sur l'échantillon	Technique	P	IMP
F019	Permettre l'ajustement du débit de lubrifiant	Technique	P	INT
F020	Permettre l'ajustement du débit d'agent abrasif	Technique	P	INT
F021	Permettre l'ajustement de la durée du polissage	Technique	P	INT
F022	Être compatible avec le matériel de polissage commercial, disponible au C2MI.	Contrainte	C	INT
F023	Générer une surface plane.	Technique	I	INT

F024	Rincer l'échantillon.	Usage	B	IND
F025	Sécher l'échantillon.	Usage	B	IND
F026	Permettre l'ajustement du temps d'exposition aux jets d'air.	Technique	P	INT
F027	Permettre l'ajustement de la vitesse de savonnage.	Technique	P	INT
F028	Permettre l'ajustement du temps de savonnage.	Technique	P	INT
F029	Permettre l'ajustement du débit d'eau.	Technique	P	INT
F030	Permettre l'ajustement du débit d'air.	Technique	P	INT
F031	Permettre l'ajustement de l'orientation des jets.	Technique	P	INT
F032	Permettre l'ajustement de la position des jets.	Technique	P	INT
F033	Permettre l'ajustement du temps d'exposition aux jets d'eau.	Technique	P	INT
F034	Gérer les résidus de préparation de surface.	Usage	B	IMP
F035	Maintenir un échantillon cylindrique.	Contrainte	C	IND
F036	Permettre l'ajustement de la position de la zone à inspecter en X et Y.	Usage	B	IND
F037	Permettre l'arrêt de la séquence après un nombre défini d'images.	Technique	B	INT
F038	Utiliser les services disponibles aux C2MI.	Contrainte	C	IND
F039	Capturer des images en couleur, dans le spectre visible	Usage	B	ACC
F040	Permettre l'ajustement des paramètres d'imagerie.	Technique	P	IND
F041	Offrir un résolution spatiale inférieur à 1 micron.	Technique	P	IMP
F042	Permettre l'ajustement du focus.	Usage	B	IND
F043	Ajuster les angles de l'échantillon pour polir le plan à inspecter.	Usage	B	IMP
F044	Reconstruire un volume 3D à l'aide des images 2D.	Usage	B	IND
F045	Sauvegarder l'image et l'information pertinente après chaque cycle.	Estime	B	INT
F046	Générer des images à une cadence similaire ou supérieur aux équipements présenté dans l'état de l'art.	Estime	P	ACC
F047	Mesurer l'épaisseur de matière enlevée.	Technique	B	IND

F048	Ne pas endommager la zone à inspecter.	Technique	B	IND
F049	Ne pas être sensible aux matériaux transparents pour la mesure.	Technique	P	INT
F051	Utiliser des éléments matériaux et éléments de machines communs, faciles à se procurer.	Estime	B	ACC
F052	Posséder les plans de détail pour les composants fabriquer	Estime	B	IMP
F053	Posséder les plans électriques	Estime	B	IND
F054	Posséder la documentation technique pour les éléments achetés	Estime	B	IMP
F055	Permettre l'ajout de nouveaux éléments de machine facilement	Estime	P	INT
F056	Permettre l'ajustement de position des composants de la machine.	Estime	P	INT
F057	Permettre l'ajout d'entrées/ sorties/ contrôleur/ carte d'acquisition au contrôleur.	Estime	P	INT
F058	Mesurer la température à plusieurs endroits.	Technique	P	IMP
F060	Gérer plusieurs échantillons dans l'équipement.	Estime	I	ACC
F061	Garder le suivi de quelles mesures/photos sont reliées à quel échantillon	Technique	I	IND
F062	Identifier les produits chimiques utilisés	Usage	B	IND
F063	Empêcher les produits chimiques d'entrer en contact avec l'utilisateur	Usage	B	IND
F064	Permettre l'accès aux composants pouvant nécessiter de la maintenance ou des réparations	Estime	B	IMP
F065	Indiquer l'étape en cours	Estime	P	ACC
F066	Indiquer le temps restant	Estime	P	ACC
F070	Protéger	Usage	B	IMP
F071	Déplacer l'échantillon entre les stations	Usage	B	IMP
F072	Caractériser la surface à inspecter	Usage	B	IMP
F073	Nettoyer l'échantillon	Usage	B	IMP
F074	Préparer les surfaces à inspecter	Usage	B	IMP
F075	Alimenter la zone de sablage en eau	Technique	B	IMP

F076	Alimenter la zone de polissage en lubrifiant	Technique	B	IMP
F077	Alimenter la zone de polissage en agent abrasif	Technique	B	IMP
F078	Savonner l'échantillon	Usage	B	IMP
F079	Éclairer l'échantillon	Usage	B	IMP
F080	Polariser l'éclairage	Usage	B	IMP
F082	Agripper l'échantillon	Usage	B	IMP
F083	Positionner l'échantillon sur une station	Usage	B	IMP
F084	Empêcher les contacts entre les pièces mobiles et l'utilisateur	Usage	B	IMP
F085	Appliquer une force sur l'échantillon durant la préparation de surface	Technique	B	IMP
F086	Permettre la discrétisation de deux domaines cristallographiques adjacents dans un alliage de SnAgCu.	Estime	I	IND
