

Travail de diplôme

2006

**Capteur pour la mesure in-situ d'épaisseur
de lames à faces parallèles**

Gilles Berchier

Répondant externe: Christophe Baur
Professeur responsable: François Wildi
Mandant: Schott Guinchard SA

*Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud.
Département Systèmes Industriels et Microtechniques.
Filière Microtechnique, orientation Mécatronique.*

RESUME

Ce travail est effectué dans le but d'obtenir le titre d'ingénieur HES en Microtechniques. L'entreprise mandante, Schott Guinchard SA à Yverdon-les-Bains, est active dans le domaine de l'usinage de verre optique. Elle dispose de diverses machines de doucissage et polissage de lames à faces parallèles.

L'objectif est la mesure robuste de l'épaisseur des lames pendant l'usinage. Actuellement, une solution indirecte basée sur un palpeur mécanique est en service mais sa fiabilité n'est pas suffisante. La méthode de mesure choisie repose sur deux capteurs à triangulation laser. Chacun détermine la position d'une des surfaces des pièces: c'est une mesure différentielle.

Les lames les plus fines mesurent 0.2 mm et la précision recherchée est de 10 microns pour le doucissage alors qu'elle doit atteindre le micron pour le polissage. Un prototype a été réalisé et les premiers essais in-situ ont pu avoir lieu. Bien que la précision obtenue ne soit pas encore suffisante, les résultats sont encourageants. Les défaillances du prototype actuel ont été analysées et les améliorations à lui apporter sont décrites en détail.

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduction | 6 |
| 1.1 | Schott Guinchard SA | 6 |
| 1.2 | Cadre | 6 |
| 1.3 | Descriptif de l'application | 7 |
| 1.4 | Objectif | 8 |
| 1.5 | Démarche | 9 |
| 2 | Méthode de mesure | 10 |
| 3 | Caractéristiques du Système Keyence LK-G | 12 |
| 3.1 | Têtes de mesure | 12 |
| 3.2 | Contrôleurs | 14 |
| 3.3 | Le logiciel LK-Navigator | 16 |
| 3.4 | Mesures statiques..... | 16 |
| 4 | Conception | 19 |
| 4.1 | Montage mécanique | 20 |
| 4.2 | Communication..... | 20 |
| 4.3 | Programmation | 22 |
| 4.3.1 | Analyse événementielle | 22 |
| 4.3.2 | Architecture du programme..... | 24 |
| 4.3.3 | Echantillonnage..... | 27 |
| 4.3.4 | Interpolation des données..... | 29 |
| 4.3.5 | Procédure de calibration | 34 |
| 5 | Résultats | 36 |
| 5.1 | Récapitulatif | 37 |
| 6 | Analyse des résultats | 38 |
| 6.1 | Sources d'erreurs | 38 |
| 6.2 | Dispersion..... | 39 |
| 7 | Améliorations | 42 |
| 7.1 | Conception mécanique | 42 |
| 7.2 | Interpolation | 43 |
| 7.3 | Programmation | 43 |
| 8 | Conclusion | 44 |

FIGURES ET TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Figure 1-1: Exemple de machine SOMOS | 7 |
| Figure 2-1: Emplacement du système de mesure | 10 |
| Figure 2-2: Coupe schématique d'une doucisseuse | 11 |
| Figure 3-1: Photographie du contrôleur et des têtes de mesure | 12 |
| Tableau 3-1: Caractéristiques des différents modèles de têtes de mesure | 13 |
| Figure 3-2: Fonction d'immunité face aux interférences | 14 |
| Tableau 3-2: Caractéristiques des différents modèles de contrôleurs | 15 |
| Figure 3-3: Principe d'un filtre à moyenne glissante | 15 |
| Figure 3-4: Dispersion en fonction de l'humidité | 17 |
| Figure 3-5: Dispersion en fonction de l'état de surface | 18 |
| Figure 4-1: Schéma de principe du prototype | 19 |
| Figure 4-2: Connectique pour la liaison RS-232C | 21 |
| Figure 4-3: Schéma de principe de la fonction <i>principal</i> | 25 |
| Figure 4-4: Schéma de principe de la fonction <i>veille</i> | 26 |
| Figure 4-5: Schéma de principe de la fonction <i>principal_traitement_ech</i> | 27 |
| Figure 4-6: Sélection des échantillons pour divers écarts types ciblés | 28 |
| Figure 4-7: Sélection des échantillons d'une mesure avec des erreurs grossières . | 29 |
| Figure 4-8: Applications de la fonction <i>robustfit</i> pour différentes pondération. | 32 |
| Figure 4-9: Applications de la fonction <i>robustfit</i> pour différentes pondération. | 33 |
| Figure 4-10: Comparatif des pondérations Andrews, Bisquare et Welsh | 34 |
| Figure 4-11: Principe de la calibration | 35 |
| Figure 5-1: Test 1 d'une durée de 7' 40" | 36 |
| Figure 5-2: Test 2 d'une durée de 20' | 36 |
| Figure 5-3: Test 3 d'une durée de 11' 40" | 37 |
| Figure 5-4: Test 4 d'une durée de 30' | 37 |
| Tableau 5-1: Récapitulatif des résultats | 37 |
| Tableau 6-1: Mesure de dispersion avant et après le redressage des plateaux..... | 40 |
| Figure 6-1: Mesures de dispersion avant et après le redressage des plateaux..... | 41 |
| Figure 7-1: Changement du positionnement des têtes de capteurs | 42 |

ANNEXES

Annexe A: Routines Matlab

Annexe B: Mise en plan du montage mécanique

Annexe C: Offre Keyence

Annexe D: Copie d'écran de l'interface

1 INTRODUCTION

Ce travail est effectué dans le but d'obtenir le titre d'ingénieur HES en Microtechniques. Il donne suite au travail de semestre effectué pendant les mois de février à juillet 2006.

M. François Wildi, professeur à la HEIG-VD, est le superviseur de ce travail. Il fournit le cahier des charges, jalonne le travail et l'évalue.

1.1 SCHOTT GUINCHARD SA

Schott Guinchard, qui a proposé ce projet, est une entreprise fondée il y a 35 ans, active dans l'usinage de composants high-tech pour l'optique. Elle emploie environ 150 employés et, depuis 2003, fait partie de la multinationale allemande Schott employant environ 17'000 personnes à travers le monde. (Europe, Malaisie, Etats-Unis d'Amérique, etc.)

Leur usine à Yverdon-les-Bains fabrique des produits sur mesure destinés aux industries optiques, à la métrologie, à l'industrie des capteurs, aux lasers, au domaine médical, à l'aviation, à l'industrie électronique, à l'horlogerie, aux domaines de l'affichage électronique, etc.

Ils usinent les matériaux durs tels que le verre optique, le verre de couleur, le verre technique, le quartz (SiO_2), le fluorure de calcium (CaF_2), le saphir (Al_2O_3), la céramique, etc.

Leurs procédés de fabrication englobent l'usinage et le micro usinage, le polissage, les lavages et conditionnement en salle blanche, l'assemblage, la déposition de couches minces sous vide, etc.

1.2 CADRE

Le doucissage et le polissage de lames à faces parallèles sont des opérations délicates qui doivent produire des lames dont la précision sur l'épaisseur est de 0.01 mm respectivement 0.001 mm. Aujourd'hui, dans les machines de production de la société Schott Guinchard SA, la mesure d'épaisseur se fait manuellement et nécessite l'extraction d'une pièce de la machine qui conduit régulièrement à l'endommagement du lot.

1.3 DESCRIPTIF DE L'APPLICATION

Le processus de fabrication de lames de verre à faces parallèles passe par diverses étapes. L'une d'elles est le polissage. En fait, pour obtenir l'état de surface souhaité, deux opérations sont nécessaires. Le polissage et le doucissage qui en est, en quelque sorte, l'ébauche. Pour ces opérations, un abrasif est mélangé à de l'eau est utilisé.

La différence entre ces deux processus réside dans le type d'abrasif contenu dans le mélange de polissage communément appelé slurry. Pour le doucissage, de l'alumine est utilisée alors que de l'oxyde de cérium permet un meilleur état de surface lors du polissage. Différentes machines permettant l'usinage de plusieurs dizaines de lames à la fois sont exploitées. Cependant, elles fonctionnent toutes selon le même principe.

SOMOS est un fabricant français de machines de meulage, meulage fin, doucissage et polissage de matériaux durs. Schott Guinchard possède plusieurs machines ressemblants à celles ci-dessous.



Figure 1-1: Exemple de machine SOMOS

Les plateaux supérieurs et inférieurs se rejoignent lors de l'usinage en exerçant une pression sur les pièces logées dans les satellites qui les entraînent. Cet entraînement est causé par la rotation de la couronne intérieure alors que celle extérieure est fixe. Les plateaux tournent également indépendamment l'un de l'autre. Le slurry est injecté par gravité dans le dispositif.

1.4 OBJECTIF

L'objectif de ce travail de diplôme est de développer un capteur qui puisse mesurer in-situ (dans la machine) l'épaisseur des lames à faces parallèles pendant les opérations de doucissage et de polissage.

Ce capteur doit être capable de fonctionner dans les conditions réelles de production, lorsque les pièces baignent dans le slurry.

La gamme de mesure des lames doit être de 0.2 mm à 1.5 mm (ou plus grand si possible).

La précision de mesure lors des opérations de doucissage doit être de 10 μm . Cette opération se réalise avec un abrasif composé de grain d'alumine de 12 μm et donne une qualité de surface de 0.4 μm . Cet abrasif se mélange en cours de production avec les grains de verre enlevés ainsi qu'avec les copeaux de fonte des plateaux d'usinage de la doucisseuse.

La précision de mesure lors des opérations de polissage doit être de 1 μm . Cette opération se réalise avec un abrasif composé de grain d'oxyde de Cérium de TBD μm et donne une qualité de surface nanométrique. Cet abrasif se mélange en cours de production avec les grains de verre enlevés. Le polissage s'effectue avec les plateaux de matière synthétique poreuse et molle.

1.5 DEMARCHE

Etant donné que les contraintes de production et le coût des machines ne permettront pas d'installation d'un prototype en production avant la validation finale, il faudra progresser de la manière suivante :

1. Tirer profit des résultats de la phase d'étude effectuée pendant le travail de semestre pour choisir deux méthodes possibles pour effectuer la mesure d'épaisseur.
2. Design et réalisation d'un ou plusieurs capteurs adaptés ou se procurer un ou des capteurs chez des fournisseurs.
3. Elaboration d'un plan de test permettant de quantifier la performance des capteurs dans différentes conditions.
4. Tests et caractérisation des capteurs dans des conditions de laboratoire à déterminer.
5. Itérations des points 1 à 5 jusqu'à obtenir un résultat satisfaisant.
6. Conception d'un système de mesure qui soit compatible avec les conditions réelles de production.
7. En fonction des possibilités, essais des capteurs sur les machines de production chez le mandant.

Le but du travail est de développer une mesure robuste et précise qui pourra être mise en œuvre dans les conditions de production réelles.

2 METHODE DE MESURE

Lors du travail de semestre, une analyse de nombreuses méthodes de mesure a été réalisée pour créer une matrice de sélection. Diverses solutions ultrasoniques sont à relever ainsi qu'une solution optique confocale et deux solutions à triangulation laser.

Lors de la séance effectuée chez Schott Guinchart le 12 juillet 2006 en présence de MM. C. Baur, F. Wildi et G. Berchier, il a été convenu de laisser tomber les solutions ultrasoniques au profit des solutions optiques dont le facteur risque est moindre.

Le point critique pour le choix de la solution finale est qu'elle doit être indépendante de l'indice de réfraction du matériau usiné. Cet indice n'est pas toujours connu et le mesurer précisément pour chaque nouveau lot serait trop fastidieux. En effet, l'opérateur change de produit plusieurs fois par jour. Selon la matrice précitée, il ne reste dès lors qu'une possibilité: la méthode de la triangulation laser avec deux têtes opposées en fonctionnement différentiel.

Deux fournisseurs proposent des solutions à triangulation laser: Keyence et Micro Epsilon. Après avoir expliqué la nature de l'application à M. P. Bischoff de la maison Micro Epsilon, il s'est avéré que leur solution ne convient pas aux cibles transparentes (polisseuses) et qu'il ne garantit pas son fonctionnement sur les cibles translucides (doucisseuses). Le système Keyence remplit le cahier des charges et après avoir rencontré à plusieurs reprises M. J. Magnin, représentant, il nous a proposé un prêt pour une évaluation. Le choix du système de mesure s'est donc porté sur la gamme LK-G de Keyence.

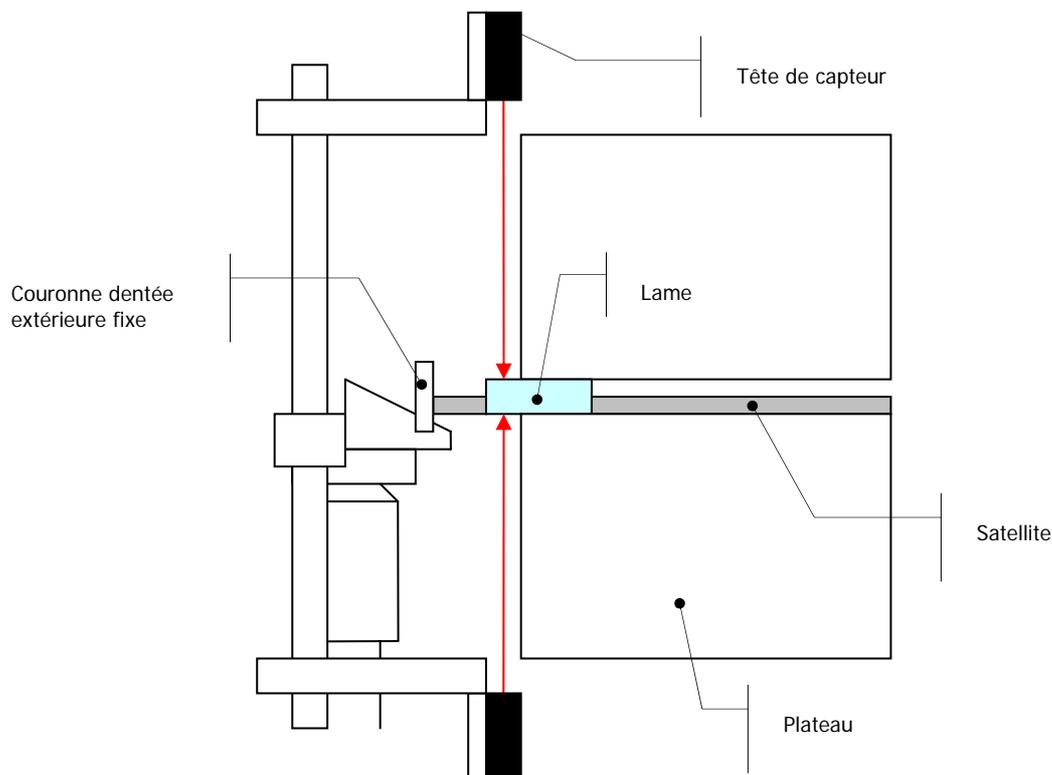


Figure 2-1: Emplacement du système de mesure

Dans l'état actuel d'avancement du projet, seul des essais sur une doucisseuse ont pu être réalisés. Lors du processus de doucissage, les lames de verre usinées sortent entre le bord des plateaux et la couronne dentée extérieure d'entraînement des satellites (voir Figure 2-2). Cette couronne n'est pas rotative mais elle se déplace dans le sens vertical de façon à pouvoir décharger plus facilement la machine une fois le processus terminé. Le système de mesure est positionné directement sur cette couronne (voir Figure 2-1). Il mesure les lames au moment où elles sortent de l'entre plateaux.

C'est une mesure différentielle. C'est-à-dire qu'une première tête de capteur positionnée au dessus du plateau supérieur est dirigée vers le bas pour mesurer la surface supérieure des lames. Une seconde tête située au dessous du plateau inférieur est dirigée vers le haut pour mesurer la position de la surface inférieure des lames. Les échelles des deux têtes de mesure sont calibrées pour devenir semblables, seul leur signe diffère. Pour mesurer l'épaisseur d'un objet située entre les deux têtes, il suffit d'additionner entre-elles les mesures de chacune des deux têtes.

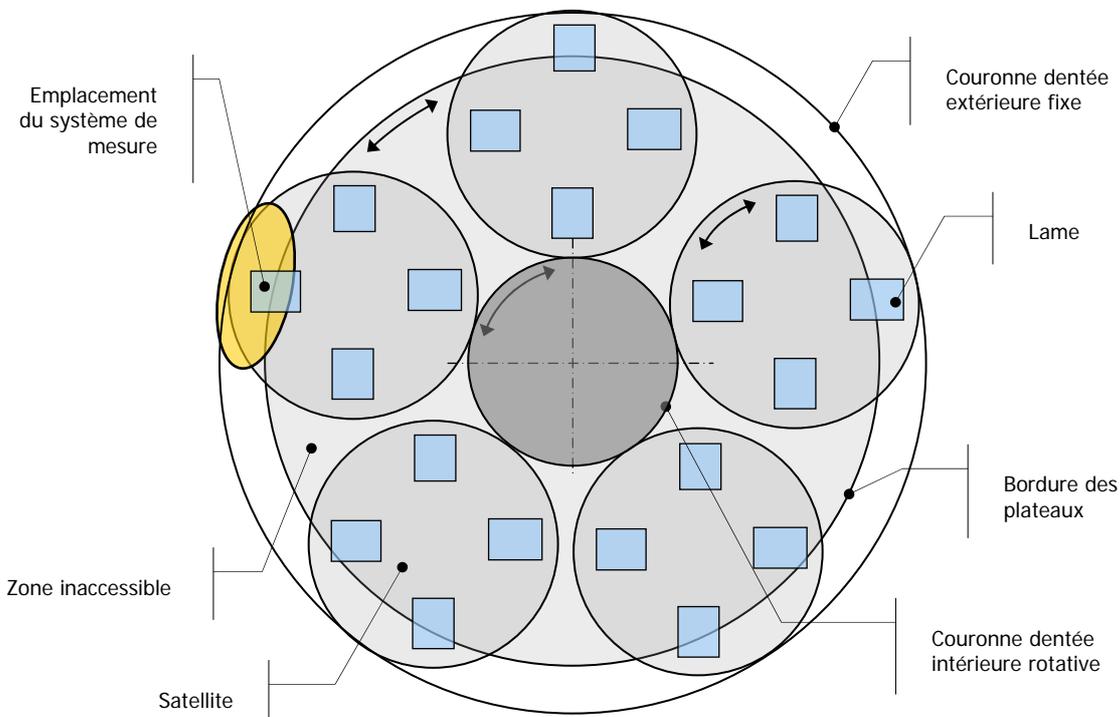


Figure 2-2: Coupe schématique d'une doucisseuse

Pour effectuer la mesure, les lames doivent être propres. Or lorsqu'elles sortent de l'entre plateaux, elles sont recouvertes de slurry. Deux jets d'air dirigés soufflent sur les surfaces des lames pour évacuer le liquide de polissage et les sécher. Les lames ne passent pas régulièrement entre les deux têtes de mesure. Leur passage est dépendant de nombreux facteurs parmi lesquels le nombre de satellites, le nombre de lames par satellite, la géométrie des lames, la position des logements pour les lames, la vitesse d'entraînement des satellites, etc. De manière générale, entre chaque passage de lame entre les deux têtes de mesure, il s'écoule quelques dizaines de secondes pendant lesquelles l'épaisseur diminue de quelques microns. Une extrapolation doit donc être effectuée pour estimer l'avance du processus d'usinage à un rythme plus élevé que les mesures elles-mêmes.

3 CARACTERISTIQUES DU SYSTEME KEYENCE LK-G

Le système en question est composé de deux têtes de mesure opposées reliées à un contrôleur. Le paramétrage du système peut s'effectuer depuis le contrôleur lui-même ou à partir d'un logiciel spécifique nommé LK-Navigator. Une alimentation 230 VAC / 24 VDC a également été prêtée par Keyence.



Figure 3-1: Photographie du contrôleur et des têtes de mesure

Une offre a été demandée pour l'achat d'un système complet. Elle est disponible en Annexe C (LK-G3001PV est le contrôleur, LK-G152 est la tête de mesure, LK-GC10 est le câble de liaison entre ces deux éléments, LK-H1W est le logiciel de paramétrage et CA-U2 est l'alimentation).

3.1 TETES DE MESURE

La tête de mesure est constituée d'une diode laser qui émet à une longueur d'onde de 650 nm et dont la lumière est dirigée dans une optique permettant la création d'un faisceau laser. Deux types de faisceaux sont disponibles: le premier émet un rayon dont le spot est circulaire et dont le diamètre vaut 30 μm à 150 mm. Le second émet un faisceau dit large avec un spot elliptique dont les grandes et petites diagonales valent respectivement 850 et 30 μm à la même distance de référence. Le faisceau fin est approprié pour les mesures d'éléments de très faible dimension ou à travers de très fines gorges. Le faisceau large est utilisé pour les autres applications et permet notamment un moyennage sur un spot plus large utile dans le cas d'états de

surface peut précis. Nous avons donc choisis un faisceau large au vu de l'état de surface des cibles doucies.

La cible doit se trouver dans la plage de mesure située à plus ou moins 40 mm de la distance de référence. Cette dernière a défini le choix du modèle car la tête du capteur doit se situer au dessus du plateau supérieur de la machine de façon à ce qu'il ne gêne pas la mesure. Idem pour la tête inférieure.

Deux types de cibles sont différenciées: les cibles spéculaires (surface polie) et les cibles diffusantes (surface doucie). Cela a son importance car l'angle d'attaque du faisceau laser doit être droit pour les cibles doucies alors qu'il doit être légèrement incliné pour les cibles polies de façon à ce que le rayon réfléchi soit renvoyé directement dans l'objectif du récepteur.

A quelques centimètres de l'endroit où émerge le faisceau de la tête se trouve le récepteur. Il est constitué d'un objectif et d'un CCD linéaire. En fonction de la position de la cible dans la plage de mesure, l'angle sous lequel le CCD voit le spot ou le faisceau réfléchi varie et la position de son image évolue.

Voici un tableau regroupant les principales caractéristiques des différents modèles de têtes de mesure proposées par la maison Keyence.

| Modèle | LK-G10/G15 | | LK-G32/ G37 | | LK-G152/G157 | | |
|---|---|---|---|----------------------|--|----------------------------------|--|
| Type de montage | Réflexion spéculaire | | Réflexion diffuse | Réflexion spéculaire | Réflexion diffuse | Réflexion spéculaire | |
| Distance de référence | 10 mm | | 30 mm | 23,5 mm | 150 mm | 147,5 mm | |
| Plage de mesure ¹ | ±1 mm | | ±5 mm | ±4,5 mm | ±40 mm | ±39 mm | |
| Laser rouge à semi-conducteur | | | | | | | |
| Source lumineuse | Longueur d'onde | 650 nm (visible), Classe 1 (CEI) | | | | 650 nm (visible), Classe 2 (CEI) | |
| | Sortie | 0,3 mW max. | | 0,95 mW max. | | | |
| Diamètre du spot (à la distance de référence) | Env. 20 x 500 µm (G15), Env. ø20 µm (G10) | | Env. 30 x 850 µm (G37), Env. ø30 µm (G32) | | Env. 120 x 1700 µm (G157), Env. ø120 µm (G152) | | |
| Linéarité ² | ±0,03 % de la pleine échelle (pleine échelle = ±1 mm) | | ±0,05 % de la pleine échelle (pleine échelle = ±5 mm) | | ±0,05 % de la pleine échelle (pleine échelle = ±40 mm) | | |
| Résolution ³ | 0,02 µm (0,01 µm) | | 0,05 µm ⁴ | | 0,5 µm ⁴ | | |
| Fréquence d'échantillonnage | 20/50/100/200/500/1000 µs (6 niveaux au choix) | | | | | | |
| Affichage LED | Centré autour de la mesure : vert Dans la zone de mesure : orange Hors de la zone de mesure : orange clignotant | | | | | | |
| Caractéristiques de température | 0,01 % de la pleine échelle/°C (pleine échelle = ±1 mm) | | 0,01 % de la pleine échelle/°C (pleine échelle = ±5 mm) | | 0,01 % de la pleine échelle/°C (pleine échelle = ±40 mm) | | |
| Résistance à l'environnement | Construction protectrice | IP67 (IEC60529) | | | | | |
| | Luminance ambiante | Lampe fluorescente ou à incandescence : 10 000 lux max. | | | | | |
| | Température ambiante | 0 à +50 °C, pas de condensation | | | | | |
| | Humidité relative | 35 à 85%, pas de condensation | | | | | |
| | Résistance aux vibrations | 10 à 55 Hz, amplitude multiple de 1,5 mm, pendant 2 h suivant X, Y et Z | | | | | |
| Matériau | Aluminium moulé sous pression | | | | | | |
| Poids (câble compris) | Env. 190 g | | Env. 280 g | | Env. 290 g | | |

1. Valeur obtenue sur cible de référence KEYENCE (céramique).

LK-G10/G15 : Pour un taux d'échantillonnage de 20 µs, la valeur devient +0,37 (côté éloigné) à -1 mm (côté proche).

LK-G32/G37 : Pour un taux d'échantillonnage de 20 µs, la valeur devient +1,8 (côté éloigné) à -5 mm (côté proche) en réflexion diffuse, et +1,6 (côté proche) à -4,5 mm (côté proche) en réflexion spéculaire.

LK-G152/G157 : Pour un taux d'échantillonnage de 20 µs, la valeur devient -22 (côté proche) à -40 mm (côté proche) en réflexion diffuse, et -22 (côté proche) à -39 mm (côté proche) en réflexion spéculaire.

2. Valeur obtenue sur cible de référence KEYENCE (céramique), en mode Standard.

3. Valeur obtenue sur référence KEYENCE (SUS), en faisant la moyenne de 4 096 mesures à la distance de référence. La valeur entre parenthèses représente la résolution typique obtenue en mesurant la cible avec 16 384 temps d'intégration.

4. Consultez le représentant KEYENCE le plus proche pour plus de détails sur le modèle de Classe IIIa à résolution améliorée.

Tableau 3-1: Caractéristiques des différents modèles de têtes de mesure

La résolution de la tête est sub-micrométrique (0.5 µm) ce qui, pour le système global à deux têtes, permet une résolution de mesure d'un micron. Différentes périodes d'échantillonnage sont disponibles allant de 20 à 1000 µs ce qui correspond à des fréquences situées entre 1 et 50 kHz. Le boîtier est protégé selon la norme IP67 ce qui signifie qu'il ne craint ni la poussière, ni l'immersion. Son étanchéité est importante car il subit de nombreuses projections d'eau et de slurry lorsqu'il est en service et notamment lors du nettoyage de la machine.

Pour une mesure d'épaisseur avec deux têtes opposées, une fonction spécifique permet aux faisceaux lasers d'émettre alternativement de façon à ce qu'ils ne s'interfèrent pas mutuellement.

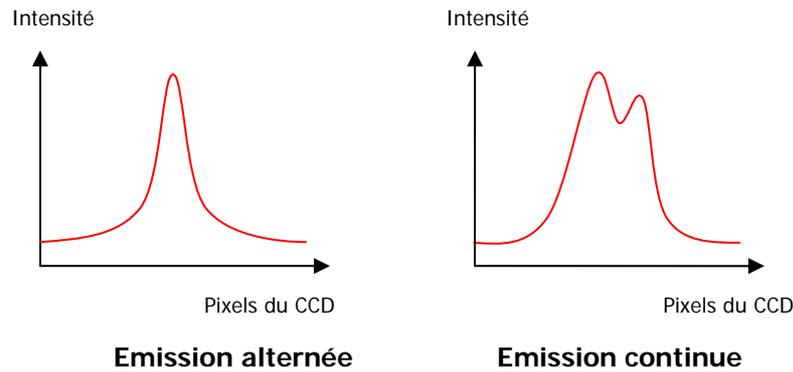


Figure 3-2: Fonction d'immunité face aux interférences

Le schéma ci-dessus montre l'intensité de la lumière reçue en fonction de la position du pixel sur le CCD linéaire avec et sans l'activation de la fonction d'immunité face aux interférences. Alors qu'en émission alternée, un seul spot est vu par le CCD, deux le sont en émission continue.

3.2 CONTROLEURS

Le contrôleur gère une ou deux têtes simultanément. Cinq différentes méthodes permettent la lecture de la mesure à distance.

Sortie analogique de tension: deux sorties de tension ± 10 V, ajustables sur la plage de mesure.

Sortie analogique de courant: deux sorties de courant 4...20 mA ajustables sur la plage de mesure.

Sortie binaire: sortie numérique de données mesurées sur 21 bits avec choix de la sortie désirée.

Interface RS-232C: interface série permettant la lecture numérique des données mesurées mais également la commande du système.

Interface USB: interface série permettant la lecture numérique des données mesurées mais également la commande du système.

| Type | NPN | | PNP |
|---|--|---|--|
| Modèle | LK-G3001V | | LK-G3001PV |
| | Afficheur séparé ¹ | | LK-G3001P/LK-GD500 |
| Afficheur | Compatible avec tous les capteurs LK-G | | |
| | 2 maximum | | |
| | 0,01 µm | | |
| Bornier de connexion | ±9999,99 mm à ±9999,99 µm (6 niveaux au choix) | | |
| | 10 fois/seconde | | |
| | 2 sorties à ±10 V, impédance de sortie : 100 Ω | | |
| Connecteur d'extension | 2 sorties de 4 à 20 mA, résistance de charge maxi. : 350 Ω | | |
| | Entrée non-tension pour OUT1 ⁴ | | Entrée de tension pour OUT1 ⁵ |
| | Entrée non-tension ⁴ | | |
| | Pour OUT1, sortie collecteur ouvert NPN ² | | Pour OUT1, sortie collecteur ouvert PNP ³ |
| | Pour OUT1, sortie collecteur ouvert NPN (NF) | | Pour OUT1, sortie collecteur ouvert PNP (NF) |
| | Entrée non-tension pour OUT2 ⁴ | | Entrée de tension pour OUT2 ⁵ |
| | 3 entrées non-tension ⁴ | | |
| | Entrée non-tension pour Head A /Head B (Tête A/Tête B) ⁴ | | Entrée de tension pour Head A /Head B (Tête A/Tête B) ⁵ |
| | Pour OUT2, sortie collecteur ouvert NPN ² | | Pour OUT2, sortie collecteur ouvert PNP ³ |
| | Pour OUT2, sortie collecteur ouvert NPN (NF) | | Pour OUT2, sortie collecteur ouvert PNP (NF) |
| Binaire | Sortie de données mesurées (21 bits), choix OUT1/OUT2, sortie collecteur ouvert NPN ² | | Sortie de données mesurées (21 bits), choix OUT1/OUT2, sortie collecteur ouvert PNP ³ |
| | Sortie collecteur ouvert NPN ² | | Sortie collecteur ouvert PNP ³ |
| | Sortie collecteur ouvert NPN ² | | Sortie collecteur ouvert PNP ³ |
| | Sortie collecteur ouvert NPN ² | | Sortie collecteur ouvert PNP ³ |
| Entrée non-tension ⁴ | | Entrée de tension ⁵ | |
| Interface RS-232C | | Sortie de données mesurées et entrée/sortie de commande (Débit en bauds maximum de 115 200 bit/s) | |
| Interface USB | | Conforme USB rev. 2.0 Full speed (Compatible USB 1.1) | |
| Fonctions principales | | | |
| 2 mesures simultanées en sortie, fonctionnement, intégration, filtre, étalonnage, mesure, AUTO ZERO, réglage fréquence d'échantillonnage, prévention des interférences croisées, stockage des données, mémoire 8 programmes, mode ECO, paramétrage ABLE, paramétrage du type de cible, réglage ABLE, option cible transparente, traitement statistique, connexion vers logiciel de paramétrage, choix de montage pour la tête, etc. | | | |
| Tension d'alimentation | | | |
| 24 VCC ± 10 %, Ondulation : 10 % (crête à crête) max. | | | |
| Intensité consommée | | | |
| 500 mA max. (1 tête), 600 mA max. (2 têtes) | | | |
| Température ambiante | | | |
| 0 à +50°C, pas de condensation | | | |
| Humidité relative | | | |
| 35 à 85%, pas de condensation | | | |
| Poids | | | |
| Env. 480 g (LK-G3001V/LK-G3001PV), Env. 370 g (LK-G3001/LK-G3001P), Env. 60 g (LK-GD500) | | | |

1. Le LK-G3001 peut être utilisé seul. L'affichage de la valeur mesurée et les modifications du paramétrage peuvent être commandés depuis le panneau d'affichage (LK-GD500) ou le logiciel de paramétrage
 2. Valeurs nominales pour le collecteur ouvert NPN : 50 mA max (40 V max.), tension résiduelle de 0,5 V max.
 3. Valeurs nominales pour le collecteur ouvert PNP : 50 mA max (30 V max.), tension résiduelle de 0,5 V max.
 4. Valeurs nominales pour l'entrée non-tension : 1 V max. en mise sous tension, 0,6 mA max. en courant de coupure (OFF)
 5. Valeurs nominales pour l'entrée de tension : 10,2 V min. en mise sous tension (26,4 V max.), 0,6 mA max. en courant de coupure (OFF)

Tableau 3-2: Caractéristiques des différents modèles de contrôleurs

Trois types de filtres sont disponibles: un filtre à moyenne glissante, un passe-bas et un passe-haut. Les fréquences de coupure ainsi que le nombre d'échantillons formant la moyenne sont paramétrables.

Le filtre passe-haut limite l'échantillonnage aux brusques variations. Le filtre passe-bas lisse la mesure en supprimant les brusques variations. La méthode du filtre à moyenne glissante dit "moving average" en anglais effectue une moyenne sur les N derniers échantillons à chaque nouvel échantillon.

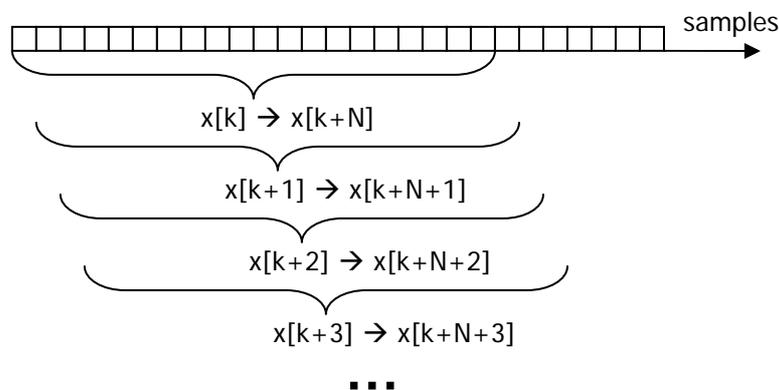


Figure 3-3: Principe d'un filtre à moyenne glissante

3.3 LE LOGICIEL LK-NAVIGATOR

LK-Navigator est un logiciel d'aide au paramétrage du système de mesure. Voici les principaux avantages qu'il apporte.

1. Connexion série rapide USB.
2. Facilité de paramétrage due à une meilleure visualisation que celle offerte par l'affichage du contrôleur.
3. Visualisation des données enregistrées par le contrôleur dans une fenêtre graphique.
4. Visualisation de l'intensité reçue par chaque pixel du CCD linéaire dans une fenêtre graphique.

Ce logiciel au prix élevé n'a aucun intérêt pour cette application puisque les fonctions qu'il propose sont déjà disponibles sur le contrôleur hormis celles de visualisation.

3.4 MESURES STATIQUES

Afin de caractériser le système, des mesures statiques ont été entreprises. La première consiste à quantifier l'effet d'un état de surface pas complètement sec. Pour ce faire, une lame doucie a été mesurée sèche puis légèrement humide de façon à ce qu'elle soit quasi transparente et finalement très humide, à la limite de la formation de gouttes d'eau en surface. Chaque mesure est constituée de 1000 échantillons pris à une fréquence de 10 kHz.

Pour chaque mesure, la moyenne, la médiane et la variance ont été calculées. La médiane d'une série de mesure est la mesure pour laquelle il y a autant d'échantillons de valeur supérieure que d'échantillons de valeur inférieure. Si le nombre total d'échantillons est pair, la moyenne des deux échantillons centraux est prise. Pour une distribution normale, la médiane vaut la moyenne arithmétique.

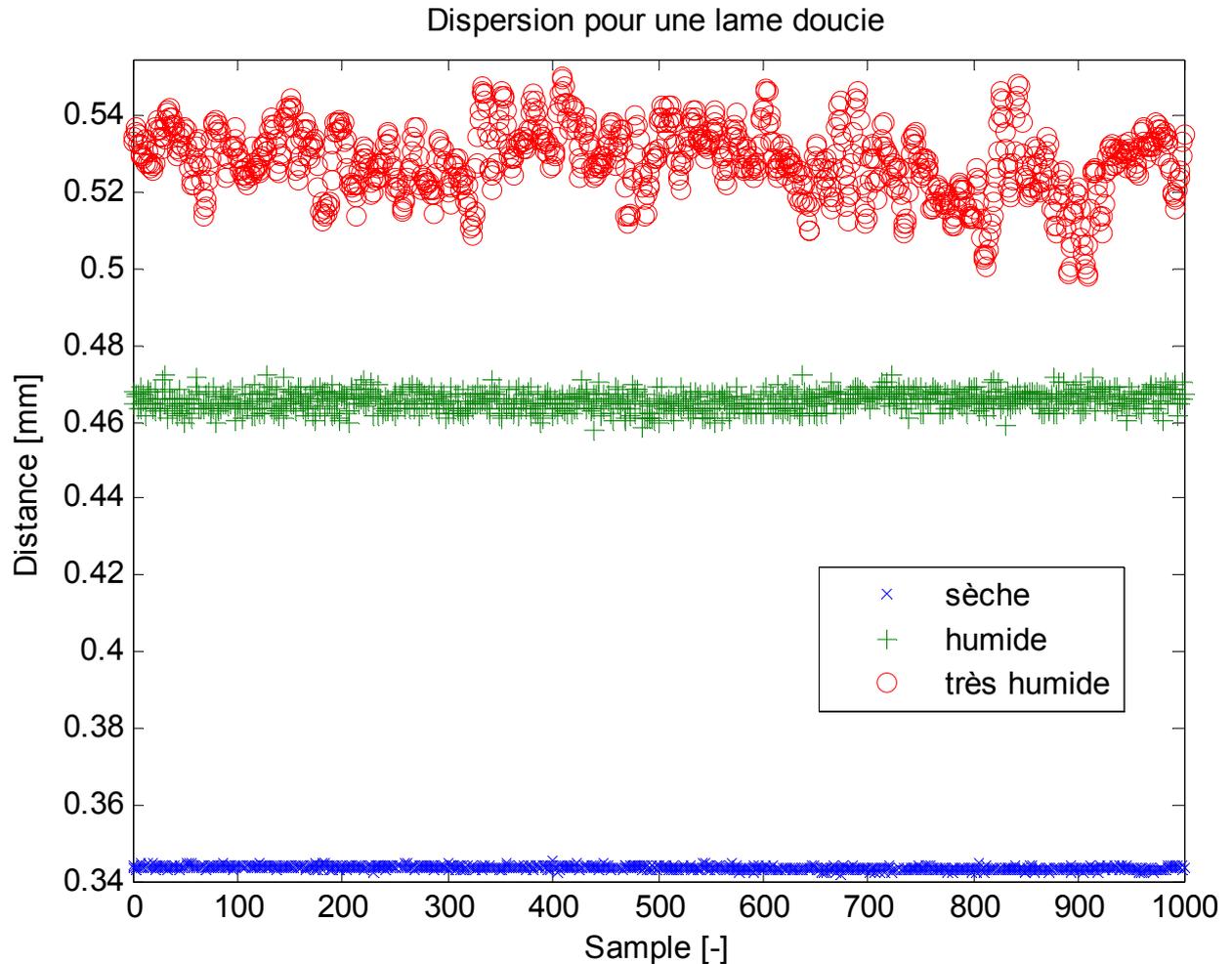


Figure 3-4: Dispersion en fonction de l'humidité

| | Lame sèche | Lame humide | Lame très humide |
|------------------------------|------------|-------------|------------------|
| Moyenne [mm] | 0.3435 | 0.4656 | 0.5281 |
| Médiane [mm] | 0.3434 | 0.4658 | 0.5287 |
| Variance [μm^2] | 0.27 | 5.57 | 78.22 |

La moyenne et la médiane sont très proche pour une lame sèche et moins pour une lame humide ce qui signifie que la distribution ressemble de mois en mois à une distribution normale. Plus la lame est humide, plus la variance est importante. De plus, la moyenne de la mesure varie. Ce phénomène s'explique par la quasi similitude des coefficients de réfraction du verre et de l'eau. La surface eau-verre n'est plus perceptible et le système mesure la surface eau-air plus proche.

La seconde mesure statique consiste à comparer la dispersion observée pour la mesure d'une cible diffusante et celle pour une cible spéculaire.

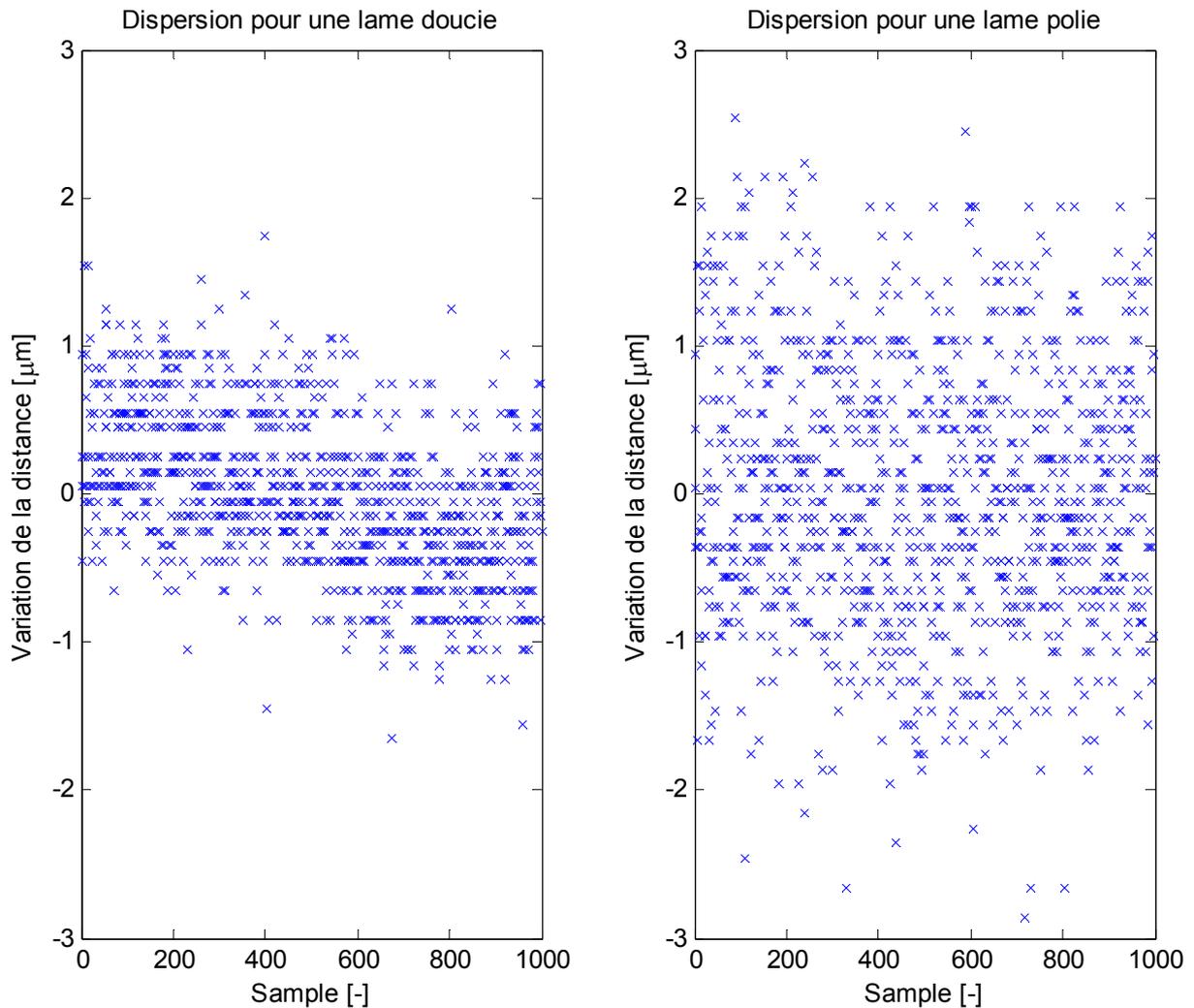


Figure 3-5: Dispersion en fonction de l'état de surface

Pour les deux types de lame, la variance a été calculée.

| | Lame doucie | Lame polie |
|------------------------------|-------------|------------|
| Variance [μm^2] | 0.27 | 0.80 |

Les variances sont très proches l'une de l'autre et en répétant la mesure, aucune des deux ne se distingue.

Pour finir, la dispersion a été quantifiée pour une lame doucie en fonction de l'angle d'attaque du faisceau laser. L'angle limite qui ne détruit pas la mesure se situe au environ de 70° mais la dispersion n'évolue pas lorsque l'angle d'attaque varie dans la plage de 0° à 70° .

4 CONCEPTION

Afin de pouvoir effectuer des tests sur les machines de production, un prototype fonctionnel a été conçu. Il englobe une conception mécanique, une interface de contrôle, une vanne électropneumatique et bien évidemment, les deux têtes de capteurs reliées au contrôleur. Voici un schéma de principe du fonctionnement du prototype.

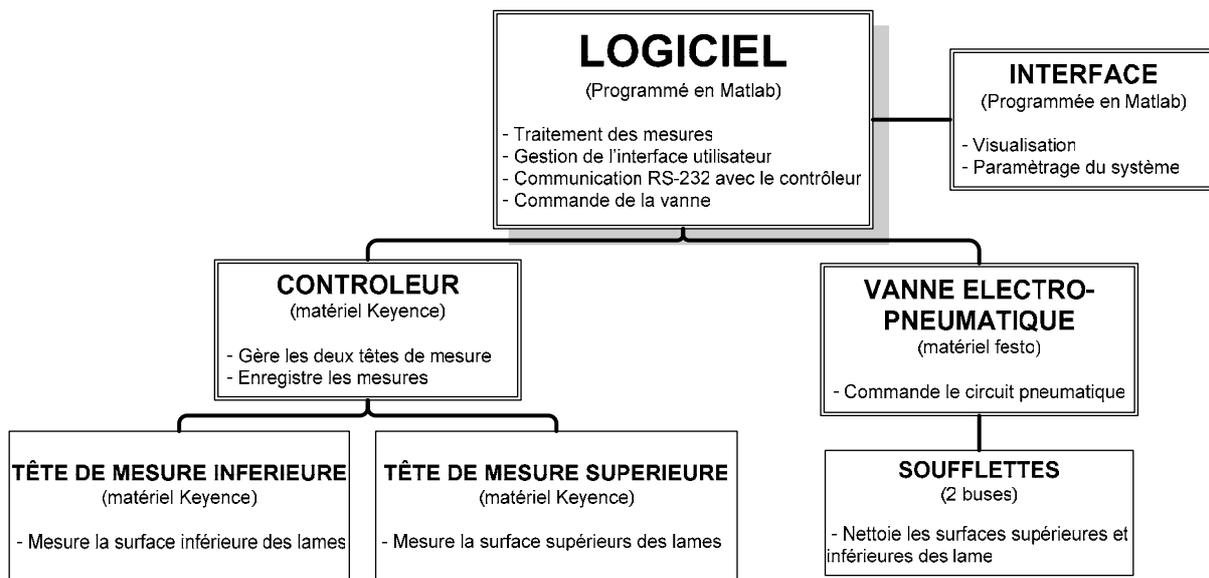


Figure 4-1: Schéma de principe du prototype

La programmation est réalisée avec Matlab. C'est un logiciel interactif très puissant pour le calcul numérique, pour la visualisation et l'analyse de données ou encore pour le développement d'algorithmes.

Le contrôleur permet cinq différentes méthodes de transmission de la mesure. Bien qu'elles soient faciles à utiliser, les deux types de sorties analogiques ne sont pas les mieux adaptées dans le cas d'un traitement numérique de la mesure. Le signal digital du capteur est convertit en signal analogique par le contrôleur puis le système d'acquisition digitalise à nouveau le signal. Cet enchaînement d'opérations en dégrade la qualité. De plus, un signal analogique n'est jamais à l'abri de perturbations électromagnétiques. Cette méthode peut pourtant être intéressante dans le cas d'un traitement analogique de la mesure. La sortie binaire est quant à elle beaucoup plus appropriée mais elle ne permet que de lire les mesures sans pouvoir modifier les paramètres du système. Les interfaces séries permettent à la fois une lecture numérique de la mesure et un paramétrage à distance du système.

4.1 MONTAGE MECANIQUE

Schott Guinchard SA dispose d'un parc de polisseuses et doucisseuses très différentes les unes des autres cependant, un modèle de machine est servi à la fois pour les deux opérations. Il nous est apparu évident de concevoir un montage adaptable sur ce modèle de machine en particulier.

Les têtes de capteurs sont fixées de façon à ce qu'il soit possible de passer du mode de mesure sur cible spéculaire au mode sur cible diffusante. Quatre taraudages ont été usinés dans chaque pièce de fixation de capteur. En fonction des taraudages utilisés, les têtes sont dans l'une ou l'autre des positions de mesure (position droite ou position inclinée de 8.5°) tout en restant dans l'axe du système. Chacune des deux têtes est réglable selon deux degrés de liberté indépendamment l'une de l'autre. Un système de soufflette pneumatique a été conçu de façon à évacuer le slurry des lames au moment de la mesure. La mise en plan est disponible en Annexe B.

Le montage est constitué d'une pièce centrale fixée sur l'une des colonnes supportant la couronne extérieure d'entraînement des satellites. Cette pièce est fixée à la colonne grâce au filetage déjà existant ainsi, il n'est pas nécessaire d'effectuer une modification sur la machine. Cette pièce centrale guide deux tiges parallèles rectifiées. Deux supports réglables en hauteur sont disposés au bout de ces tiges. Sur ces supports, les têtes de capteur sont fixées à l'aide d'une pièce pouvant coulisser dans une rainure. Chaque capteur est donc réglable dans le sens de la hauteur ainsi que dans le sens du rapprochement avec les plateaux.

Le système pneumatique ne figure pas sur la mise en plan car son design a été réalisé une fois le prototype monté sur la machine pour plus de flexibilité. Certaines modifications légères effectuées pendant la période de validation n'y figurent pas non plus.

Etant donnée la nature différentielle de la mesure, la dilatation thermique du montage pose problème. Plus particulièrement, la dilatation linéaire dans le sens vertical. Les guides en acier sont les éléments les plus influents. La formule permettant de la calculer est la suivante.

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \theta$$

Le coefficient de dilatation α de l'acier vaut environ $12.0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. La longueur utile L_0 des guides est approximativement 300 mm. L'application de la formule ci-dessus détermine une variation de la distance entre les capteurs d'environ $3.6 \mu\text{m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Une variation de la température des guides de 3°C engendre donc une erreur de mesure supérieure à la précision recherchée (10 μm).

4.2 COMMUNICATION

Etant donné que les mesures sont traitées numériquement et qu'un PC est à disposition, il est plus adéquat d'utiliser la liaison série RS-232C. Les mesures sont immunisées contre le bruit et la résolution est accrue.

Voici les spécifications de la liaison utilisée.

| | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| Méthode de communication: | Full duplex |
| Méthode de synchronisation: | Start-stop synchrone |
| Code de transmission: | ASCII |
| Longueur d'une donnée: | 8 bits |
| Taille du bit d'arrêt: | 1 bit |
| Contrôle de la parité: | None/Even/Odd |
| Vitesse de transmission: | 9600/19200/38400/57600/115200 bps |
| Délimiteur de donnée: | CR |
| Contrôle du flux: | Aucun |

Le connecteur série utilisé pour le contrôleur est un RJ-11. Il a 6 pôles et seuls 3 d'entre eux sont utilisés. Le premier pour l'entrée, le second pour la sortie et le dernier est la masse. De l'autre côté, un connecteur RS-232 DB9 est utilisé. Voici le schéma de connexion.

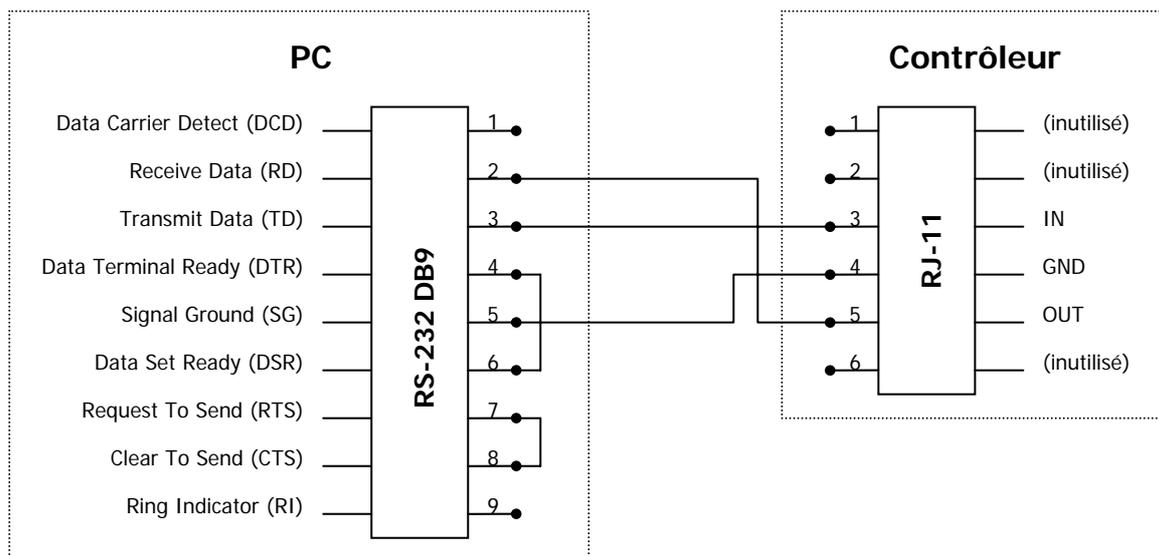


Figure 4-2: Connectique pour la liaison RS-232C

La liaison série permet le paramétrage du système à distance. Toutes les fonctionnalités accessibles sur le contrôleur le sont désormais aussi à distance. Un protocole de communication spécifique permet l'échange des données. Il est décrit en détail et avec des exemples dans la documentation du fournisseur.

4.3 PROGRAMMATION

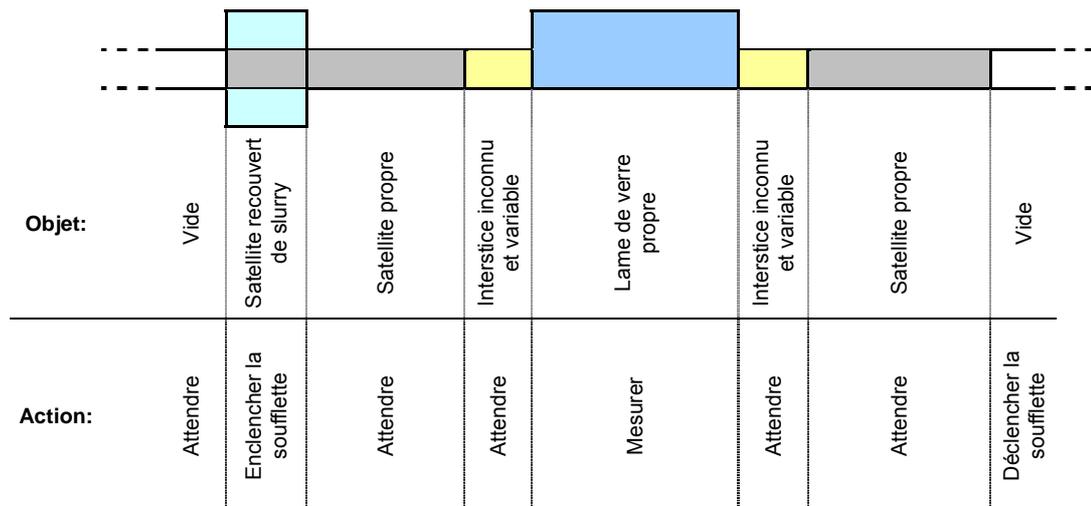
Le code des routines Matlab créés se trouve en Annexe A.

4.3.1 ANALYSE EVENEMENTIELLE

Au vu de la position fixe du système de mesure, les différentes possibilités de passage d'objets entre les deux têtes ont été analysées. Lorsque un élément passe devant le capteur, trois cas ont été définis.

Cas 1:

C'est le cas idéal et le seul dans lequel une mesure peut être réalisée. Le système détecte le vide, puis il mesure quelque chose d'instable: c'est le satellite recouvert de slurry. Il enclenche la soufflette pour nettoyer l'objet et attend pendant qu'il mesure l'épaisseur du satellite. Puis l'interstice entre le satellite et la lame arrive et il attend encore. Dès que la lame apparaît, il démarre une série de mesure qu'il enregistre jusqu'à l'arrivée de l'interstice suivant. Il détecte ensuite le satellite et déclenche la soufflette une fois l'objet disparu.



Cas 2:

Dans ce cas, aucune lame de verre ne passe. Comme précédemment, il détecte le vide puis souffle sur le satellite lorsqu'il apparaît recouvert de slurry. L'interstice passe mais lorsqu'il disparaît, c'est à nouveau le satellite qu'il mesure car la lame ne dépasse pas suffisamment. Il déclenche la soufflette lorsque le vide réapparaît sans avoir pu effectuer de mesure.

| | | | | | | |
|----------------|----------|-------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------|
| | | | | | | |
| Objet: | Vide | Satellite recouvert de slurry | Satellite propre | Interstice inconnu et variable | Satellite propre | Vide |
| Action: | Attendre | Enclencher la soufflette | Attendre | Attendre | Attendre | Déclencher la soufflette |

Cas 3:

Dans ce cas, seul le satellite passe entre les deux faisceaux ce qui signifie que la mesure ne peut pas être réalisée. C'est un cas très courant puisqu'il intervient dans la majorité des fois où un objet est détecté.

| | | | | | | |
|----------------|----------|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------------|
| | | | | | | |
| Objet: | Vide | Satellite recouvert de slurry | Satellite propre | Satellite propre | Satellite propre | Vide |
| Action: | Attendre | Enclencher la soufflette | Attendre | Attendre | Attendre | Déclencher la soufflette |

4.3.2 ARCHITECTURE DU PROGRAMME

La création d'une GUI (Graphical User Interface) génère automatiquement des fonctions associées à une action dans l'interface. Par exemple, une fonction est associée à un bouton, à un champ d'édition, etc. Le programme est composé d'une routine appelée "interface_gui.m" dans laquelle sont regroupées toutes ces fonctions appelées "Callbacks". Pour chaque action utile, une fonction associée est appelée ce qui signifie qu'aucun algorithme ou ligne de code autre qu'un appel de fonction n'a été créé dans la routine "interface_gui.m".

Pour chaque commande du contrôleur via la liaison RS-232C, il existe une fonction particulière. Par exemple, il y en a une qui ajoute un offset à la sortie choisie ou une autre qui initialise l'enregistrement des données, etc.

Afin de comprendre la structure du programme, deux routines sont expliquées en détail. La première est "principal.m" qui est appelée dès que le processus de mesure démarre. Elle appelle la routine "veille.m" qui recherche et mesure les lames. Cette routine principale effectue les représentations graphiques des échantillons et des mesures. Elle gère également l'interpolation de ces dernières ainsi que l'extrapolation.

Les deux schémas suivants expliquent le fonctionnement des routines "principal.m" et "veille.m". Dans les schémas, les losanges indiquent une condition, les encadrés simples indiquent les processus et les encadrés avec bordure, les appels de fonction.

La Figure 4.5 décrit la fonction *principal_traitement_ech.m*.

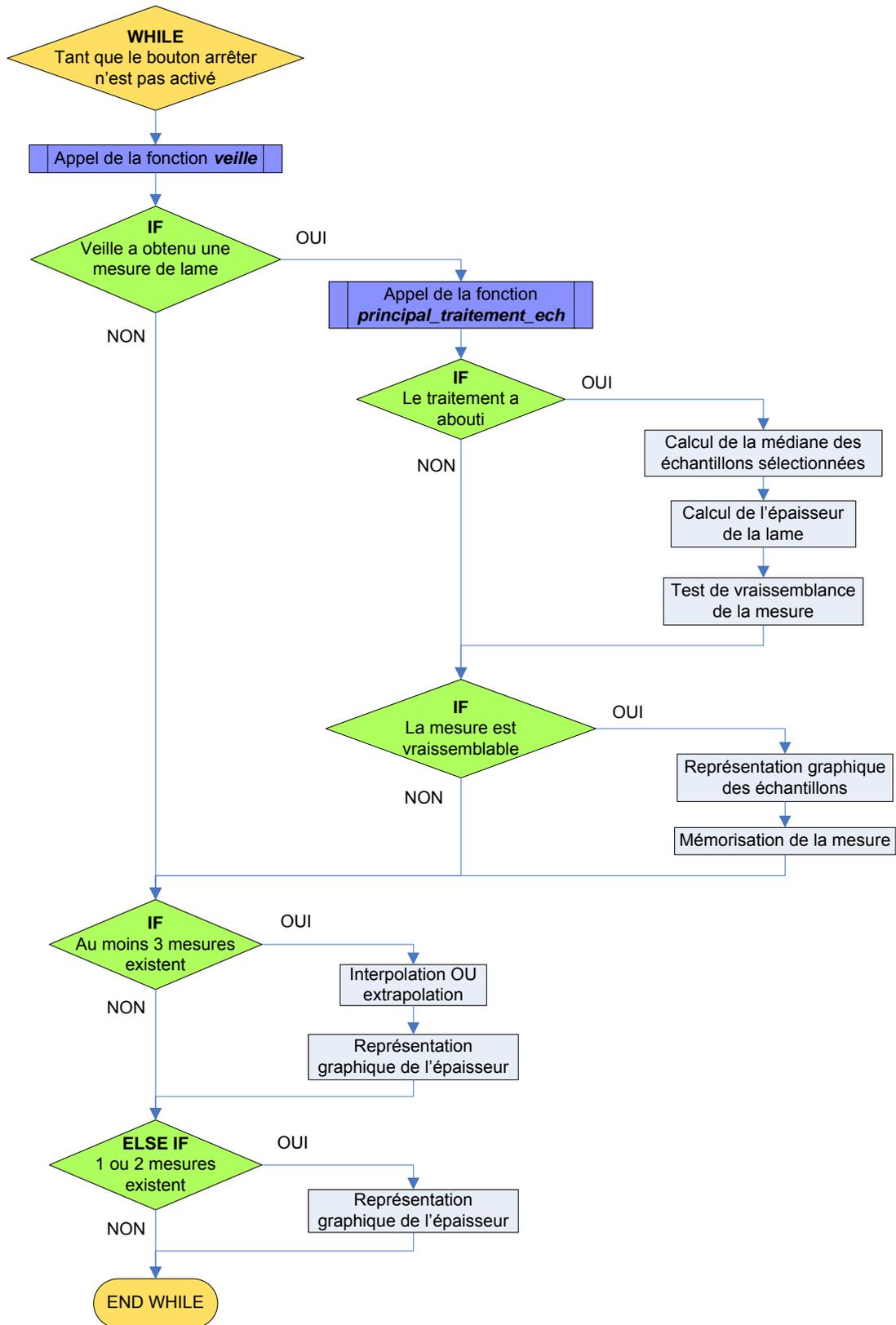


Figure 4-3: Schéma de principe de la fonction *principal*

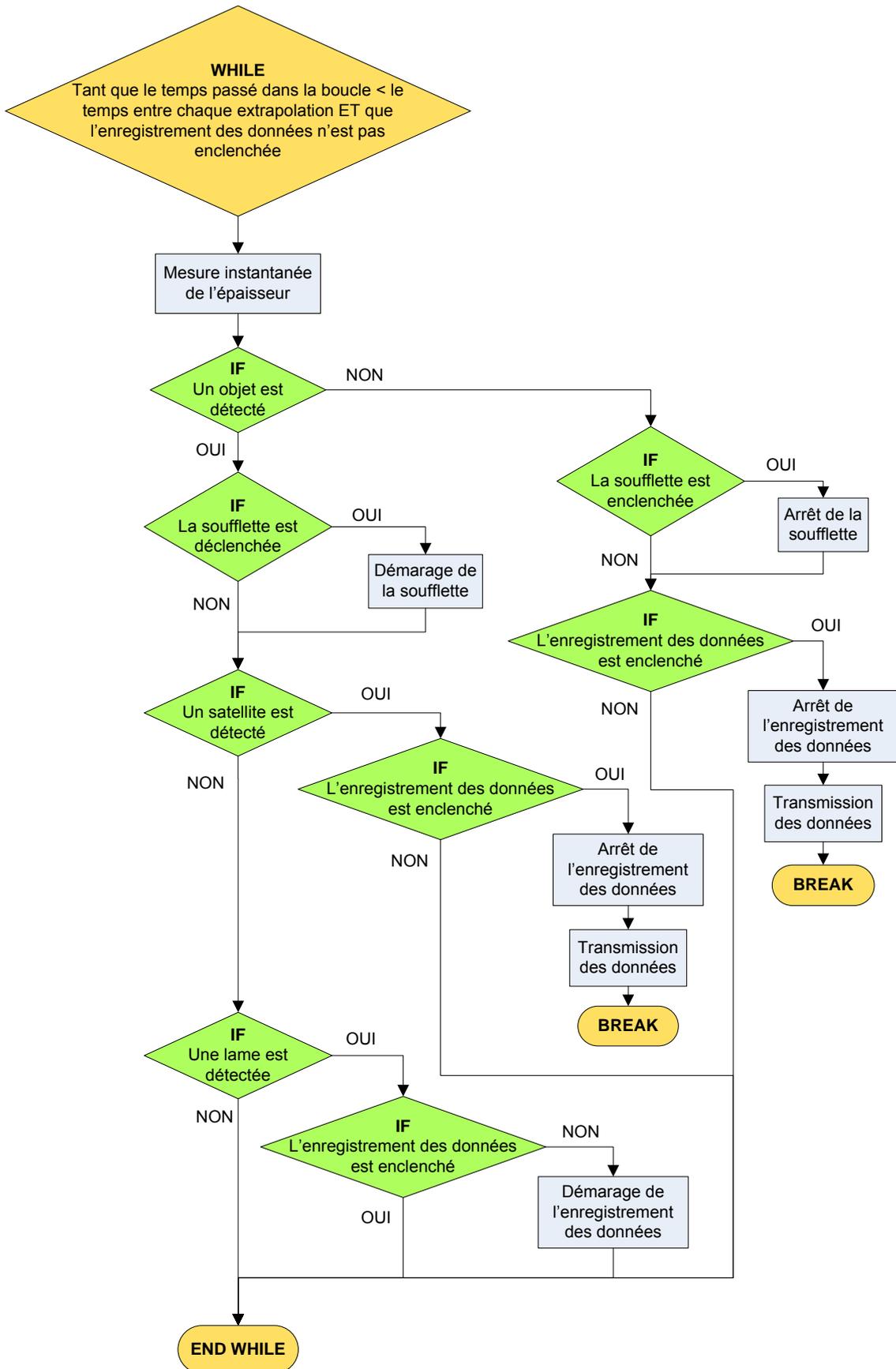


Figure 4-4: Schéma de principe de la fonction *veille*

4.3.3 ÉCHANTILLONNAGE

A chaque passage de lame, plusieurs échantillons sont enregistrés. La période d'échantillonnage est fixée à 100 μ s en raison de la nature de la cible semi transparente. Une période plus courte est déconseillée par le fabricant car elle engendre des erreurs qui ont été constatées lors des essais en laboratoire. Une limitation importante de la plage de mesure a été observée voir la destruction de la mesure dans le pire des cas. Une période plus élevée n'a aucun intérêt car elle limiterait le nombre d'échantillons composant la mesure de la lame.

Trois filtres sont accessibles pour que le traitement des échantillons soit effectué directement par le contrôleur. Cependant, afin d'avoir un contrôle total sur traitement des mesures, ils ne sont pas utilisés et un algorithme de sélection des échantillons appelé *principal_traitement_ech* est ajouté à la chaîne d'acquisition. Il supprime les échantillons s'écartant le plus de la médiane jusqu'à l'obtention de l'écart type voulu sur les échantillons restant.

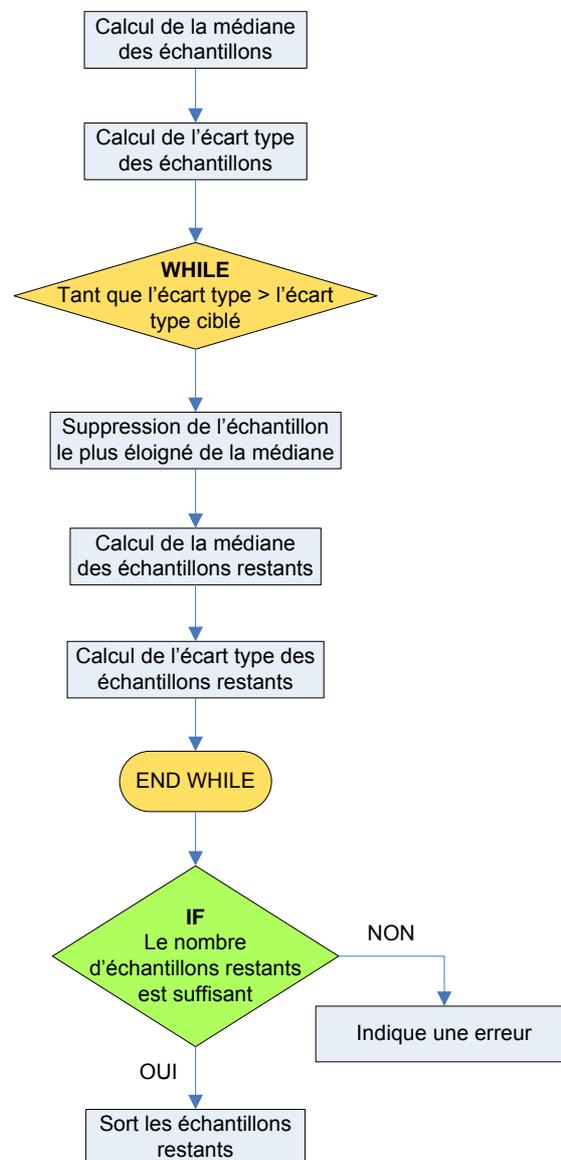


Figure 4-5: Schéma de principe de la fonction *principal_traitement_ech*

Cet algorithme a été appliqué pour trois différents écarts types ciblés à une mesure de la tête supérieure effectuée in-situ. Graphiquement, voici le résultat obtenu.

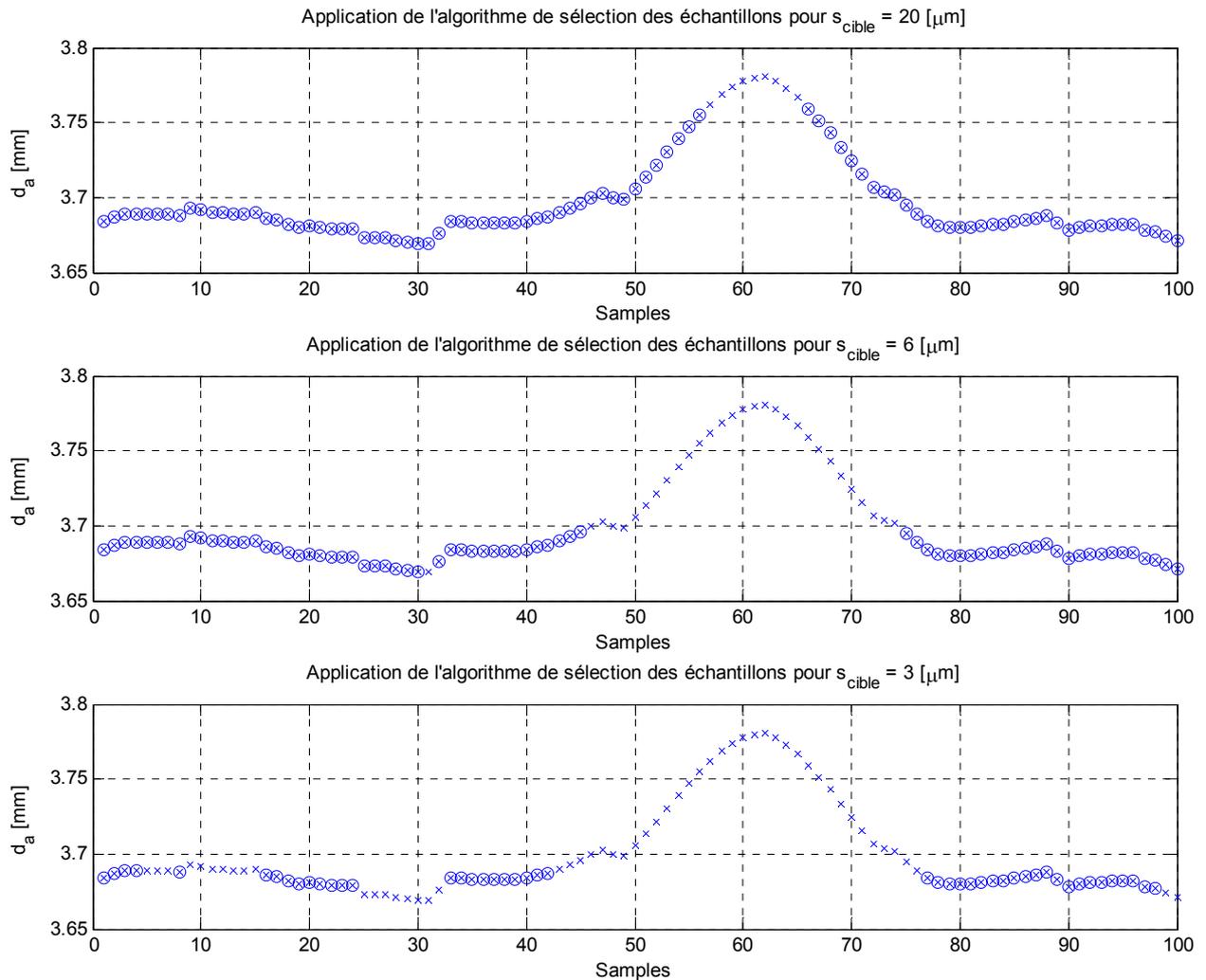


Figure 4-6: Sélection des échantillons pour divers écarts types ciblés

Sur cette figure, les échantillons entourés sont sélectionnés. Bien évidemment, le nombre de mesures sélectionnées baisse avec l'écart type. L'application de l'algorithme sur cette mesure semblant entachée d'une irrégularité de surface entre les 50^{ème} et 70^{ème} échantillons est positive. En fonction de la diminution de l'écart type, l'influence de l'irrégularité est progressivement diminuée.

L'algorithme a ensuite été appliqué à une mesure contenant des échantillons résultants d'une erreur grossière. Les 11 derniers échantillons ont été éliminés de la sélection.

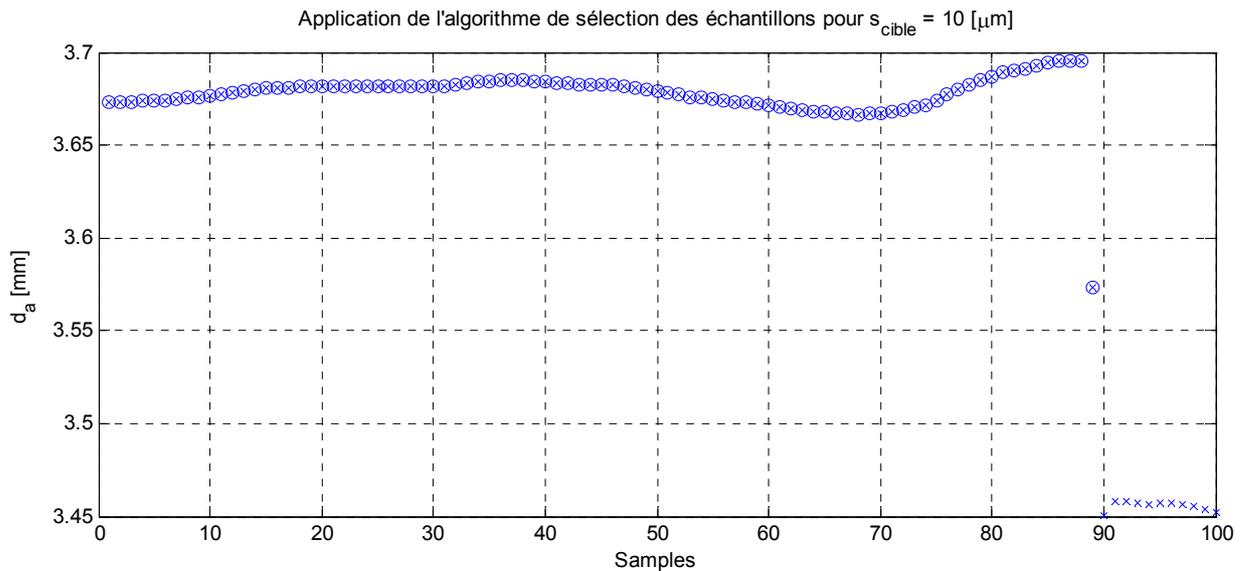


Figure 4-7: Sélection des échantillons d'une mesure avec des erreurs grossières

4.3.4 INTERPOLATION DES DONNEES

Au cours de l'usinage, les mesures sont effectuées à intervalles irréguliers au rythme moyen d'environ 5 mesures par minute. L'intervalle peut varier de quelques secondes à plusieurs dizaines de secondes. Au final, nous obtenons un nuage de points.

La vitesse de rotation des satellites ainsi que celle des plateaux est constante, le slurry utilisé a toujours la même composition étant donné qu'il n'est pas acheminé en circuit fermé. Le doucissage est donc un processus d'enlèvement de matière à vitesse constante. L'initialisation de l'usinage peut engendrer une non linéarité cependant, dans la grande majorité des cas, elle a lieu avant même que la première mesure soit effectuée c'est pourquoi elle n'a aucune influence sur le modèle. Dans le pire des cas, si elle se prolonge, elle n'interviendrait que sur une ou deux mesures, ce qui est quasi insignifiant pour la masse de mesures effectuées.

Interpoler permet de déterminer l'équation d'une droite modélisant au mieux le processus. Il existe de très nombreuses méthodes d'interpolation. La plus utilisée est la méthode des moindres carrés. Elle consiste à trouver la droite minimisant la somme du carré des résidus entre les points générés par la fonction et les échantillons. La fonction de la droite recherchée est la suivante.

$$f(x) = ax + b$$

En supposant N échantillons de la forme (x_i, y_i) , voici la somme du carré des résidus.

$$S = \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2$$

C'est cette somme S qu'il faut minimiser en fonction des coefficients a et b de la fonction $f(x)$. Cette minimisation est effectuée grâce à une routine générique du logiciel Matlab. C'est la fonction *polyfit* qui permet également l'ajustement de courbe de degré supérieur.

Parfois, il peut être intéressant de diminuer la contribution apportée par une catégorie particulière d'échantillons. Pour cette application, quelques mesures résultant d'une erreur dans le processus d'échantillonnage apparaissent dans le nuage de point. Elles influencent l'ajustement de la droite de régression dans leurs sens alors que visiblement, elles ne correspondent pas à une mesure réelle de l'épaisseur. Ces mesures sont appelées "outliers" et différents algorithmes d'ajustement robuste ou résistant ont été développés pour minimiser leur influence. Intuitivement, certains échantillons dont le résidu est élevé semblent diminuer la qualité de l'interpolation cependant, ils contiennent tout de même de l'information. Il faut les différencier des erreurs grossières qui sont dues à une mesure erronée induite par une mauvaise manipulation. Elles n'apportent aucune information et perturbent l'interpolation. La difficile décision de retirer ou non une mesure douteuse est inutile. Il est plus intéressant de diminuer leur poids plutôt que de supprimer complètement la mesure.

La Statistics Toolbox de Matlab propose une fonction permettant l'ajustement robuste d'une droite à une série de points. Cette fonction itérative est appelée *robustfit*.

La méthode des moindres carrés a été modifiée de telle sorte à pouvoir pondérer la contribution de chaque échantillon séparément. Voici la somme du carré des résidus pondérés.

$$S = \sum_{i=1}^N w_i (y_i - f(x_i))^2$$

En plus des vecteurs x et y représentant les données, un vecteur w accorde un poids particulier à chaque mesure. En général, ce poids est fonction du résidu, bien qu'il puisse également l'être de l'ancienneté ou d'une variable externe. La fonction *robustfit* pondère les mesures en fonction de la variable ci-dessous.

$$r = \frac{\text{résidu}}{\text{tune} \cdot s \cdot \sqrt{1-h}}$$

Où *résidu* est le vecteur contenant les résidus de l'itération précédente. h est une fonction de l'influence de chaque mesure sur la droite de régression. Une faible valeur de la constante *tune* tend à diminuer le poids des mesures à large résidu plus sévèrement, et inversement. Elle peut être paramétrée sinon sa valeur par défaut est utilisée. L'estimation de l'écart type de l'erreur est contenue dans le terme s .

$$s = \frac{\text{médiane} | x_i - \text{médiane}(x) |}{0.6745}$$

Voici les différentes méthodes de pondération proposées par Matlab pour son calcul.

Andrews: $w = (|r| < \Pi) \cdot \frac{\sin(r)}{r}$

Bisquare: $w = (|r| < 1) \cdot (1 - r^2)^2$

Cauchy: $w = \frac{1}{1 + r^2}$

Fair: $w = \frac{1}{1 + |r|}$

Huber: $w = \frac{1}{\max(1 \text{ ou } |r|)}$

Logistic: $w = \frac{\tanh(r)}{r}$

Talwar : $w = 1 \cdot (|r| < 1)$

Welsch: $w = e^{-(r^2)}$

Les méthodes Andrews, Bisquare, Huber et Talwar possèdent une condition dans leur algorithme. La méthode Talwar permet d'obtenir un vecteur de poids binaire.

L'application de ces différents algorithmes donne les résultats suivants sur une série de mesure in-situ.

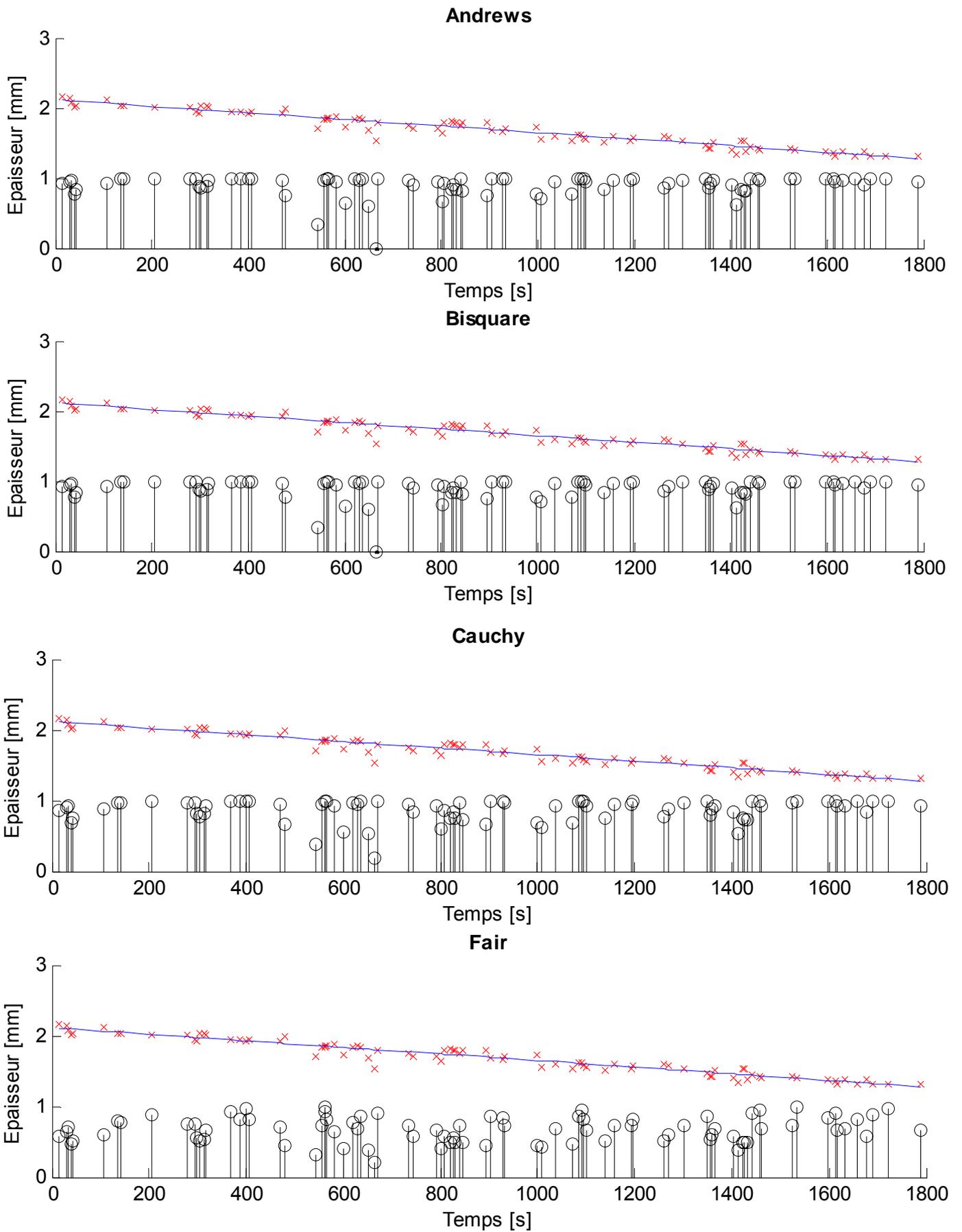


Figure 4-8: Applications de la fonction *robustfit* pour différentes pondérations

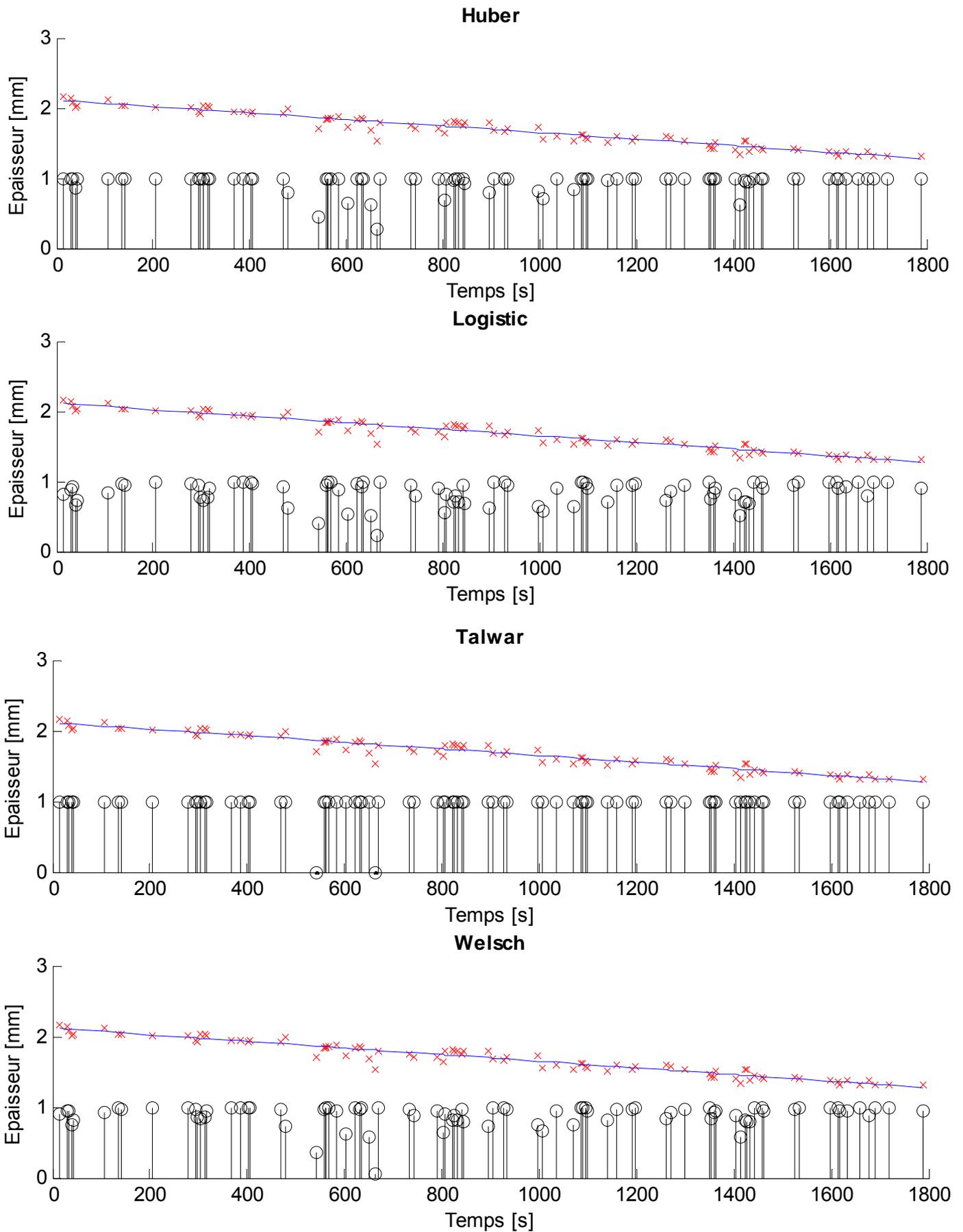


Figure 4-9: Applications de la fonction *robustfit* pour différentes pondérations

Les méthodes Cauchy, Huber, Fair et Logistic permettent une contribution aux erreurs grossières. Elles ne sont donc pas adaptées. La méthode Talwar supprime purement et simplement les erreurs grossières mais pondère pareillement les mesures restantes ce qui n'est pas suffisant. Voici le comparatif des trois méthodes restantes.

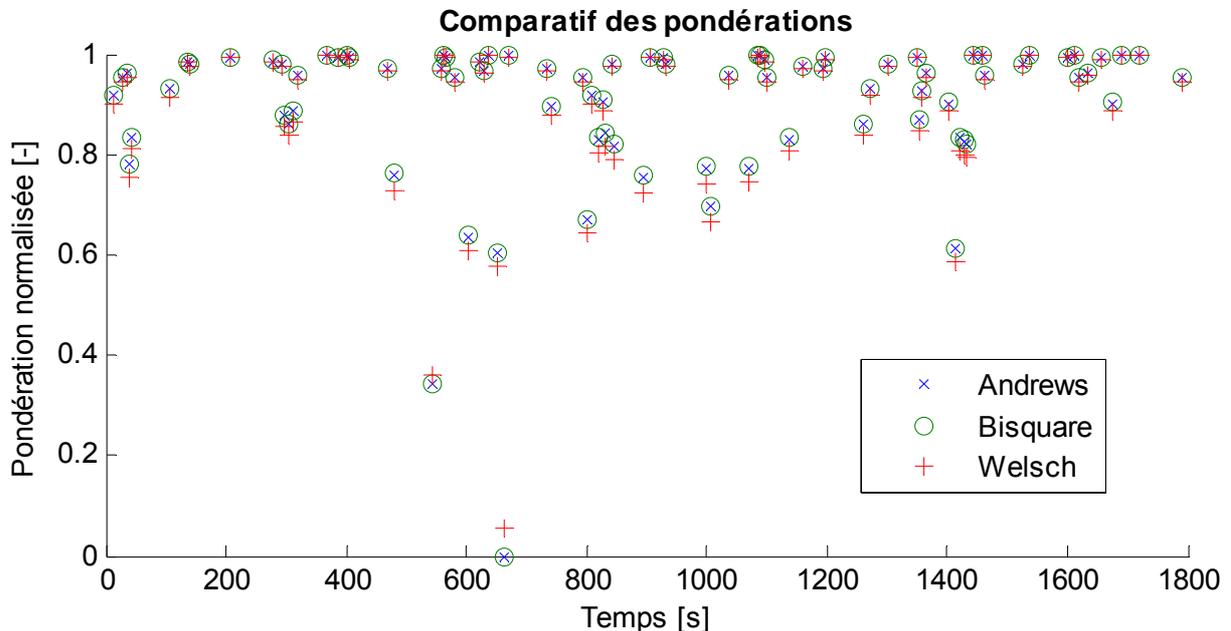


Figure 4-10: Comparatif des pondérations Andrews, Bisquare et Welsh

Les méthodes Andrews et Bisquare sont quasiment identiques et annulent l'influence des mesures se trouvant au dessous d'un seuil définit. La méthode Welsch diverge légèrement et à tendance à diminuer la pondération plus rapidement en fonction de l'écart sans toutefois l'annuler. Andrews et Bisquare sont les méthodes les plus adaptées à l'application.

Le temps de calcul de la fonction *robustfit* ne dépasse le dixième de seconde pour 68 échantillons. Bien que le nombre de mesures puisse augmenter, il est peut probable qu'il atteigne la seconde pour cette application. Ce temps est définit par les caractéristiques du PC ainsi que par la charge que représentent les autres processus en cours.

Le calcul de la droite de régression est un algorithme non récursif puisqu'il s'effectue pour tous les échantillons à chaque nouvelle mesure. Il est envisageable de créer un algorithme itératif récursif de calcul d'une droite de régression robuste par la méthode des moindres carrés pondérés. Cependant, l'interpolation est effectuée entre le passage de deux lames et plusieurs secondes sont à disposition pour le calcul. Il n'y a donc pas d'intérêt à créer un tel algorithme dans la situation actuelle. Cette solution peut toutefois être envisagée si le temps de calcul est augmenté en fonction du système ou si, pour une raison ou pour une autre, le temps s'écoulant entre le passage de deux lames successives devait diminuer drastiquement.

4.3.5 PROCEDURE DE CALIBRATION

La calibration du système s'effectue avec une lame de référence. Lorsque la machine est à l'arrêt, et que les deux têtes sont montées, il suffit de déposer la lame

en question sur le plateau inférieur de telle sorte qu'elle coupe les faisceaux lasers. L'interface propose une fonction de calibration dans laquelle il faut entrer l'épaisseur de la lame de référence et appuyer sur calibrer. Automatiquement, les mesures correspondant au deux têtes sont misent à zéro et un offset de l'épaisseur entrée est ajouté à OUT1. Pour réinitialiser les échelles des deux capteurs, il suffit d'appuyer sur annuler.

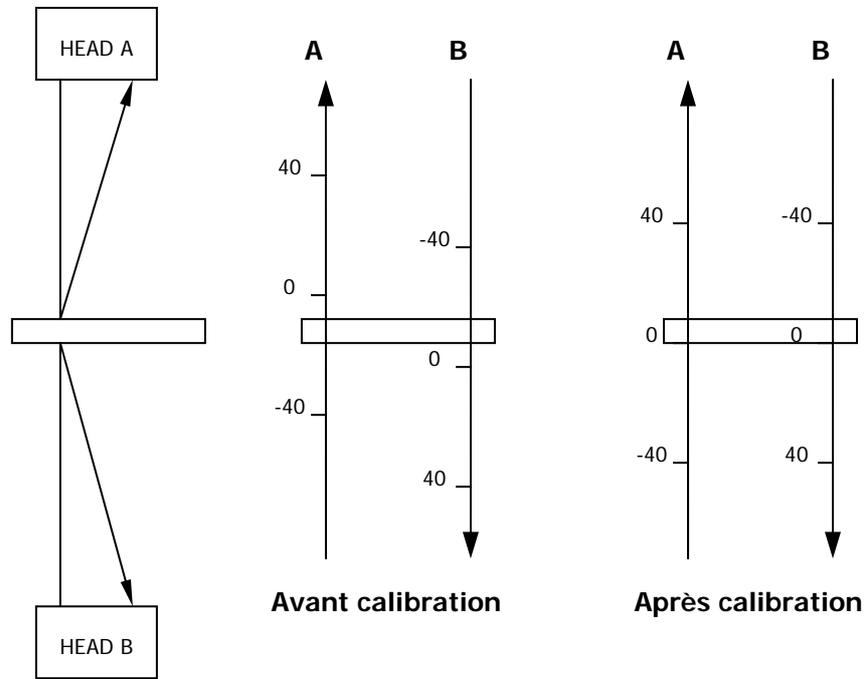


Figure 4-11: Principe de la calibration

Une mauvaise calibration peut engendrer des erreurs de mesure c'est pourquoi cette étape est très importante. Il faut s'assurer que la lame soit bien propre, idem pour la surface sur laquelle elle est déposée. La lame doit avoir le même état de surface que les autres lames lorsqu'elles sont usinées. En fonction de la nature de la matière usinée est notamment de sa couleur, deux lames d'épaisseurs identiques risquent de ne pas donner la même mesure. Il est donc préférable de calibrer la machine avec une lame de la même nature que celles qui sont usinées.

5 RESULTATS

Afin d'évaluer la solution, quatre mesures in-situ ont été réalisées sur la doucisseuse. Les lames utilisées sont transparentes et ne filtrent aucune longueur d'onde en particulier. Elles mesurent 50 par 50 mm et leur épaisseur varie entre 1.2 et 3.5 mm. Les satellites utilisés ont une épaisseur de 0.9 mm et entraînent chacun 5 lames. Etant donné qu'ils sont 6, 30 lames sont usinées simultanément.

Chaque mesure est constituée de 100 échantillons et la période d'échantillonnage est de 100 μ s. Les temps de cycles sont variables et pour les trois premiers tests, un filtrage à moyenne glissante sur 16 échantillons a été effectué alors que pour le dernier, aucune méthode de filtrage n'a été appliquée.

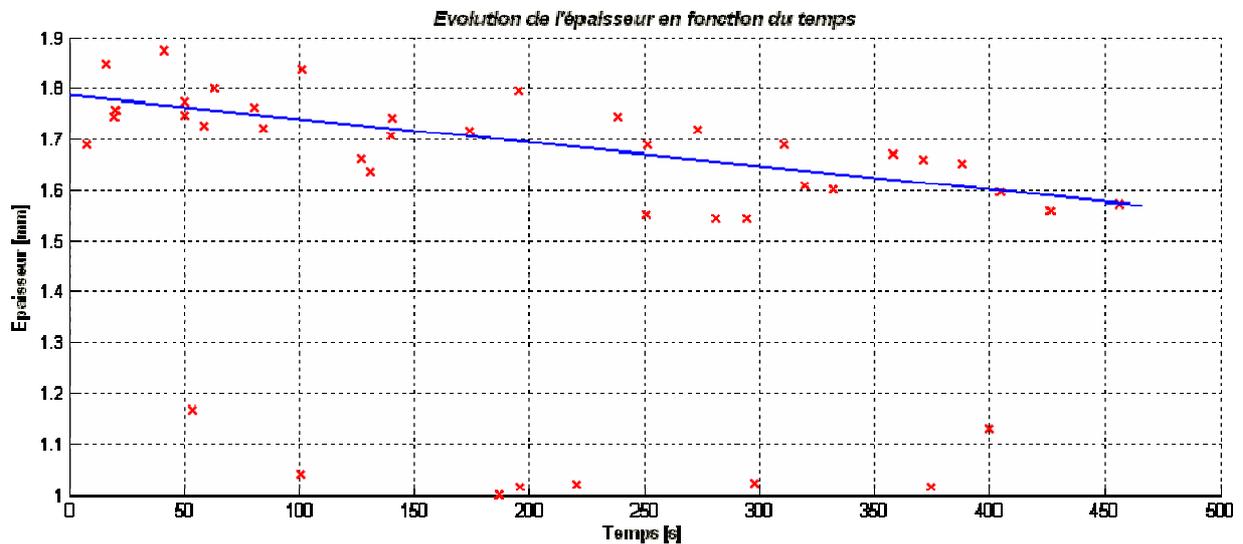


Figure 5-1: Test 1 d'une durée de 7' 40''

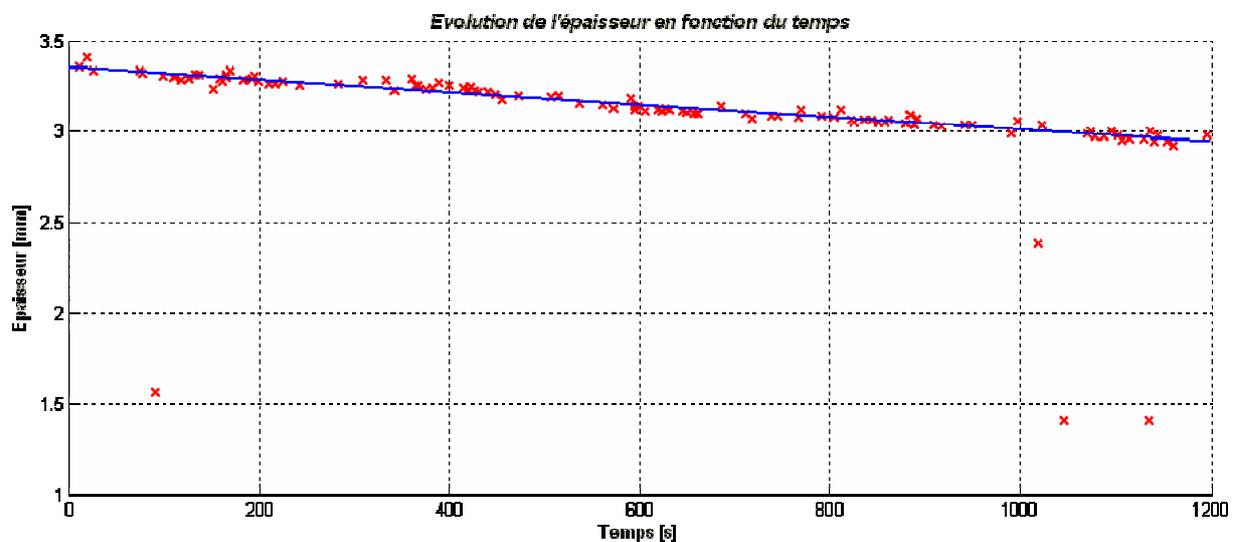


Figure 5-2: Test 2 d'une durée de 20'

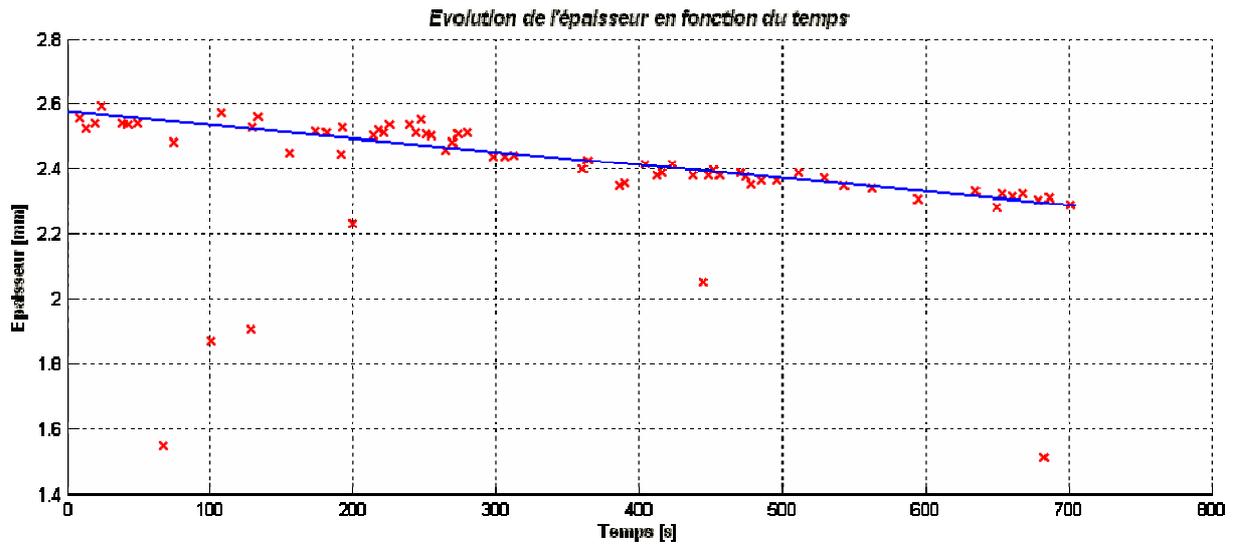


Figure 5-3: Test 3 d'une durée de 11' 40''

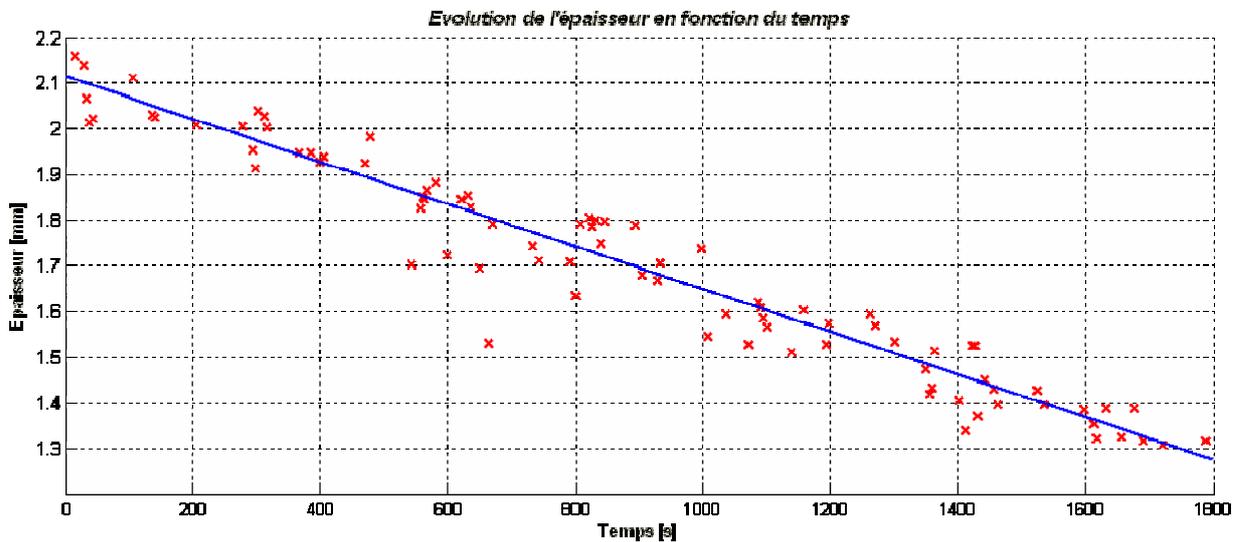


Figure 5-4: Test 4 d'une durée de 30'

5.1 RECAPITULATIF

Voici un tableau récapitulant les résultats obtenus lors des trois tests.

| Durée [s] | Mesure vraie [mm] | Dernière extrapolation [mm] | erreur [µm] |
|-----------|-------------------|-----------------------------|-------------|
| 460.000 | 1.589 | 1.570 | -19 |
| 1200.000 | 2.954 | 2.942 | -12 |
| 700.000 | 2.320 | 2.288 | -32 |
| 1800.000 | 1.299 | 1.280 | -19 |

Tableau 5-1: Récapitulatif des résultats

6 ANALYSE DES RESULTATS

L'interprétation des résultats est difficile en raison de la faible quantité de données observées. Toutefois, un certain nombre d'hypothèses sont formulables.

Une erreur systématiquement négative est observée sur les mesures. Si d'autres tests venaient à la confirmer, il serait envisageable de corriger la mesure en ajoutant systématiquement la moyenne de l'erreur observée. En diminuant la mesure de 21 microns, les erreurs seraient ramenées à 2, 9, -11 et 2 microns. Cependant, il est probable que d'autres tests amènent des résultats contradictoires et que cette correction ne soit pas justifiée.

Toutes les méthodes de pondération pour le calcul de la droite de régression ont été testées sur la dernière mesure.

6.1 SOURCES D'ERREURS

Calibration

La calibration est effectuée sur la base d'une lame de référence mesurée à l'aide d'un instrument mécanique de précision (TESA Micromaster capa μ system 0-30 mm). La précision de la référence est de ± 1 micron.

Mesure de la référence

Comme lors de la calibration, la mesure dite vraie est entachée d'une erreur de ± 1 micron.

Propreté de la cible

Les lames mesurées ne sont pas toujours idéalement nettoyées du slurry les recouvrant. Si de l'eau est encore présente en surface, l'erreur associée peut atteindre 400 microns. Bien que ce cas de figure puisse occasionner des erreurs grossières, il est relativement rare. Il arrive régulièrement que l'eau soit proprement évacuée mais que les particules d'abrasif aient tendance à persister. Etant donné leur taille relativement grande de 12 microns, elles risquent de perturber fortement la mesure. La surface importante du spot elliptique dont les diagonales valent 850 et 30 microns permet de moyenniser la mesure. Il est difficile de déterminer la quantité d'abrasif persistant sur la lame mais une estimation de l'erreur systématique à 0...20 microns paraît raisonnable. Ce qui revient à une erreur systématique de +10 microns à laquelle il faut ajouter une erreur aléatoire de ± 10 microns.

Procédure

La synchronisation entre l'arrêt de la mesure et l'arrêt du doucissage n'est pas parfaite. En effet, la mesure est arrêtée en premier, puis, le temps de se déplacer de l'autre côté de la machine, l'arrêt de l'usinage en second. Le temps de la désynchronisation se situe aux environs de 4 secondes. Au vu de la vitesse

moyenne d'usinage de $0.40 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, cela représente une erreur systématique de +1.6 microns. Ce problème de synchronisation n'existe pas pour le dernier test.

Rythme de l'extrapolation

L'extrapolation de la mesure est effectuée toutes les 5 secondes. La vitesse d'usinage moyenne lors des tests est de $0.40 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ce qui implique que si la machine est arrêtée juste avant l'extrapolation, la mesure sera entachée d'une erreur maximale de +2 microns et minimale nulle. Ce qui revient à une erreur systématique de +1 micron à laquelle il faut ajouter une erreur aléatoire de ± 1 micron.

Environnement

La dilatation thermique de la structure joue un rôle très important. En estimant la variation de température des guides à $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, cela représente une erreur de ± 10.8 microns sur la mesure.

Limite des capteurs

Les caractéristiques des capteurs induisent une erreur de mesure qui même si elle est faible doit être prise en considération. Etant donnée que chaque têtes de mesure à une résolution de 0.5 micron, à elles deux, elles permettent une mesure à 1 micron de résolution. Cette erreur est aléatoire c'est pourquoi, plus le nombre de mesures augmente, moins elle est influente. En supposant une distribution normale, après une vingtaine de mesures, elle peut être considérée comme nulle. La linéarité du système sur une plage de mesure aussi faible que celle utilisée n'a pas d'influence significative. Idem pour les caractéristiques thermiques.

L'erreur systématique calculée à partir de l'analyse des sources d'erreurs est positive (environ +12 microns) alors que visiblement, l'erreur systématique réelle semble négative (environ -22 microns). Aucune explication valable n'a pu être trouvée pour expliquer cette différence. D'avantage de tests in-situ permettraient une analyse statistique plus fine et plus sûre.

6.2 DISPERSION

La mesure ne s'effectue pas toujours sur la même lame mais au contraire, elle est effectuée indifféremment sur toutes les lames de la charge en cours. Hors pour chaque charge, il existe une dispersion entre les différentes lames qui peut être importante lorsque les plateaux ne sont pas parfaitement plans et parallèles. Le redressage des plateaux s'effectue à l'aide de satellites rainurés en acier tournant pendant une dizaine de minutes plusieurs fois par jour en fonction de l'usure.

Une évaluation de la dispersion sur une charge de 11 lames rectangulaires d'environ 100 par 50 mm à été effectuée. La première fois lorsque les plateaux n'étaient pas redressés, puis après un redressage de 10 minutes. L'épaisseur de chaque lame a donc été mesurée deux fois et à chaque fois, trois points de mesure ont été pris. Le premier dans un bord, le second au centre et le dernier dans le bord opposé. Voici les résultats obtenus.

| Avant redressage | | | Après redressage | | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| mesure 1 [mm] | mesure 2 [mm] | mesure 3 [mm] | mesure 1 [mm] | mesure 2 [mm] | mesure 3 [mm] |
| 3.440 | 3.443 | 3.440 | 3.355 | 3.358 | 3.360 |
| 3.408 | 3.406 | 3.407 | 3.366 | 3.369 | 3.363 |
| 3.413 | 3.410 | 3.410 | 3.352 | 3.356 | 3.354 |
| 3.425 | 3.426 | 3.424 | 3.353 | 3.352 | 3.351 |
| 3.423 | 3.427 | 3.419 | 3.354 | 3.358 | 3.357 |
| 3.439 | 3.441 | 3.437 | 3.358 | 3.361 | 3.357 |
| 3.443 | 3.443 | 3.440 | 3.363 | 3.365 | 3.365 |
| 3.410 | 3.407 | 3.405 | 3.363 | 3.362 | 3.362 |
| 3.426 | 3.428 | 3.424 | 3.359 | 3.364 | 3.361 |
| 3.424 | 3.425 | 3.426 | 3.364 | 3.365 | 3.363 |
| 3.446 | 3.441 | 3.444 | 3.361 | 3.364 | 3.361 |

Tableau 6-1: Mesure de dispersion avant et après le redressage des plateaux

Les extremum ont été calculés ainsi que l'écart type:

| | <i>Avant redressage</i> | <i>Après redressage</i> |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| <i>Ecart maximum:</i> | 41 [μm] | 18 [μm] |
| <i>Ecart type:</i> | 14 [μm] | 5 [μm] |

Avant le redressage, les écarts sont plus de deux fois plus élevés. Voici la représentation graphique correspondant à ces mesures. L'épaisseur moyenne a été ramenée à zéro pour faciliter l'interprétation des graphiques.

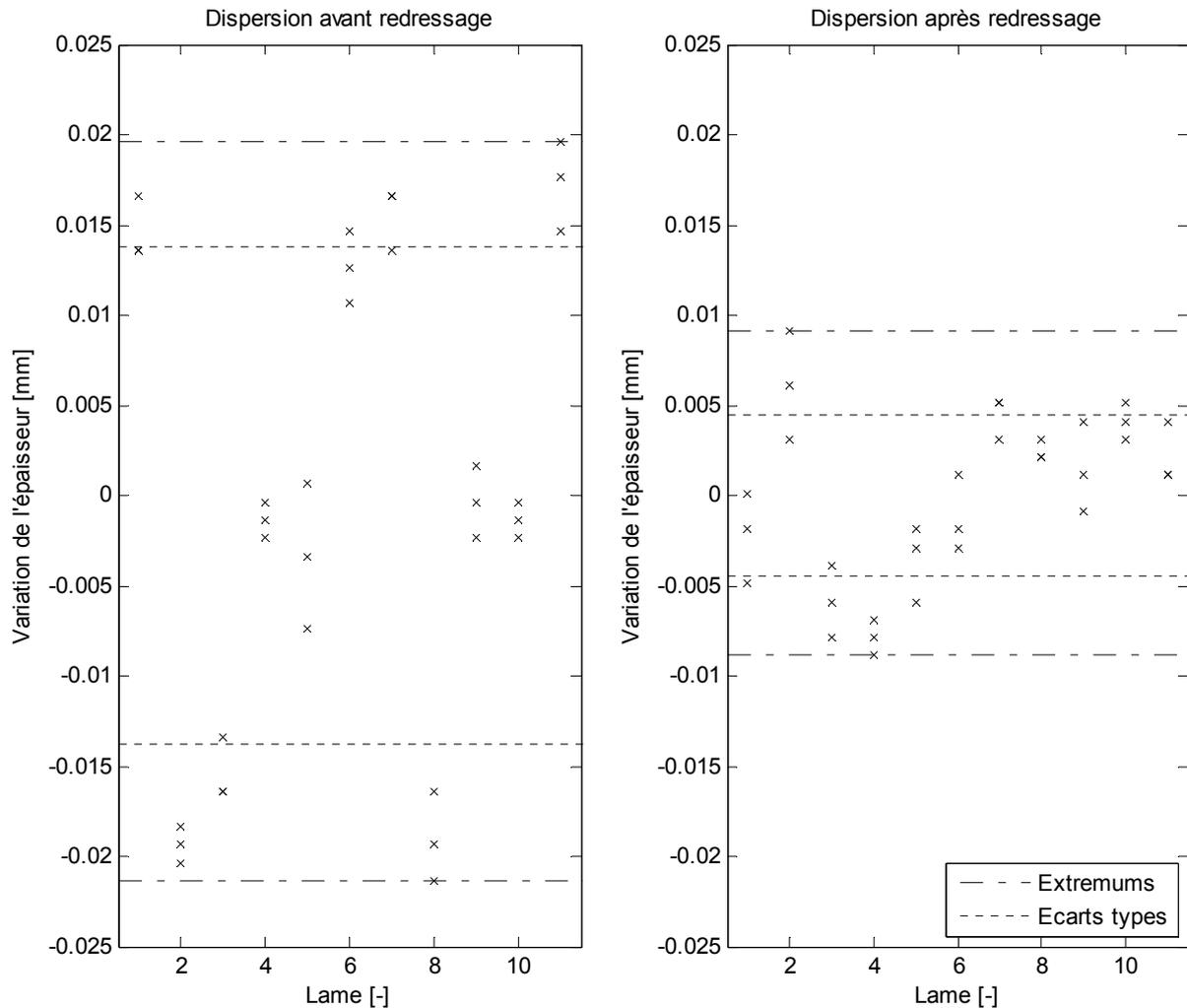


Figure 6-1: Mesures de dispersion avant et après le redressage des plateaux

Ces données sont à prendre avec précautions car elles sont valables dans des conditions et avec des échantillons bien déterminés. Il est probable que l'on obtienne d'autres résultats dans d'autres conditions cependant, ils donnent une bonne idée de l'utilité du redressage et permettent de connaître l'ordre de grandeur de la dispersion.

Il est évident que prétendre à une précision des lames à la sortie de l'usinage plus importante que la dispersion à laquelle elles sont soumises n'est pas possible. Même après le redressage des plateaux, obtenir un lot dont l'épaisseur de toutes les lames est précise à ± 0.01 mm demanderait une précision de mesure micrométrique ce qui n'est pas envisageable dans le cadre du douçissage. Toutefois, cette méthode permet l'obtention d'un lot dont l'épaisseur moyenne est à ± 0.01 mm.

7 AMELIORATIONS

7.1 CONCEPTION MECANIQUE

La nature réglable du système peut être abandonnée au profit d'une solution fixe une fois les bons réglages déterminés. Le montage gagnerait en encombrement et en stabilité. De plus, la structure devrait être adaptée pour éviter l'écoulement de slurry ou d'eau sur les têtes de mesure.

En ce qui concerne les erreurs de mesure induites par la dilatation thermique de la structure, deux solutions sont envisageables. La première consiste à remplacer l'acier par de l'invar. C'est un alliage composé à 64% de fer et à 36% de nickel dont le coefficient de dilation α vaut environ 10^{-6} K^{-1} . Il engendrerait une erreur de mesure 12 fois moindre et pour une variation de température de 3 K, la dilatation n'atteindrait pas le micron. La seconde consiste à isoler les éléments clés de la structure avec un matériau à faible coefficient de conduction thermique comme le PVC, la laine de verre, le polystyrène expansé ou même de l'air mais une calibration régulière du système serait nécessaire.

En ce qui concerne la corrosion de la structure, les guides en acier sont très exposés et l'aluminium porte déjà quelques traces d'oxydation. Etant donné la nature provisoire du prototype, ce phénomène n'a pas gêné la procédure d'évaluation. Pour une question de délai de fabrication, le choix des matériaux a été fait en fonction du stock disponible au magasin de l'atelier de mécanique de l'école. Il devra être revu dans le cas d'une solution définitive subissant cette atmosphère à long terme. L'utilisation d'acier inoxydable ou d'aluminium traité en surface peut être une bonne piste.

Le positionnement des têtes devrait être modifié de façon à ce qu'un changement brusque de niveau n'interrompe pas le faisceau laser. Il suffit de les faire pivoter de 90° comme le montre le schéma suivant.

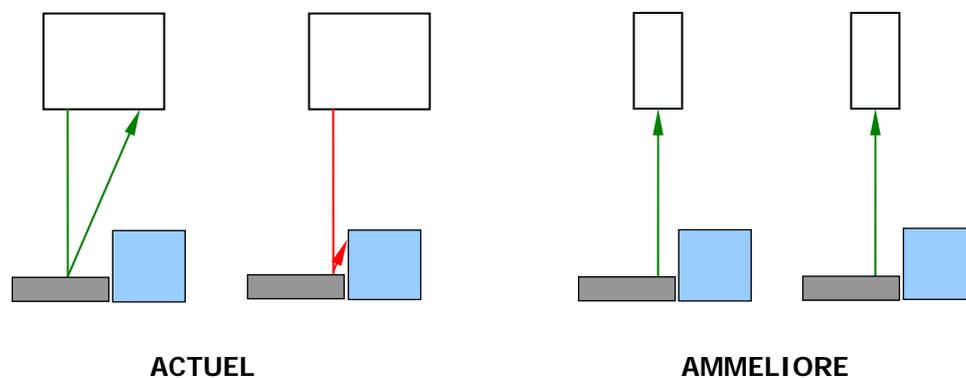


Figure 7-1: Changement du positionnement des têtes de capteurs

Plus la variation de niveau est élevée, plus le phénomène prend de l'ampleur. Pour l'application, le passage d'un satellite mince à une lame d'épaisseur importante peut le provoquer.

A chaque changement de lot, le plateau supérieur est remonté de plusieurs dizaines de centimètres pour permettre le déchargement et le chargement. Lors de ce mouvement, il risque d'entrer en collision avec le capteur supérieur s'il n'est pas retiré. Ce problème peut être résolu en le fixant sur un dispositif à levier prenant appui sur le plateau supérieur. Ce dernier l'entraînerait vers le haut lorsqu'il monte. Idem pour la descente où un aimant pourrait garantir une position stable pour la mesure. Cette méthode aurait l'avantage de ne nécessiter aucun actionneur ni aucun capteur.

7.2 INTERPOLATION

Une autre solution permettant l'ajustement robuste d'une droite de régression à un nuage de points est la moindre médiane des carrés (LMS: Least Median of Squares). Voici la somme S à minimiser pour calculer les coefficients de la droite.

$$S = \sum_{i=1}^N \text{médiane}((y_i - f(x_i))^2)$$

Cette solution ne passe pas par le calcul de pondérations, de plus, elle n'est pas itérative. Il serait intéressant d'évaluer son efficacité appliquée à cette application.

7.3 PROGRAMMATION

L'architecture des routines est telle que lorsqu'une fonction en appel une seconde, les seules variables contenue dans la parenthèse regroupant les paramètres ne suffisent pas toujours à son fonctionnement. Des variables globales sont également nécessaires. Ces fonctions ne sont donc pas génériques et leur utilisation doit se restreindre à cet ensemble de routine en particulier. Il serait plus adéquat de les généraliser de façon à pouvoir les utiliser dans d'autres applications.

8 CONCLUSION

Le système de mesure choisi est valable pour tout type de cible. Du verre à la céramique, la mesure fonctionne. L'épaisseur des pièces peut être de quelques dixièmes jusqu'à plusieurs centimètres.

La précision de la mesure n'est pas encore suffisante car elle ne remplit pas le cahier des charges. Cependant, la perspective d'un nouveau montage réduisant l'influence de l'environnement et éliminant les défauts de conception est réjouissante. La réussite de l'application passe forcément par cette réalisation.

L'adaptation du système au reste du parc de doucisseuses et aux polisseuses n'est pas chose facile au vu de leurs différences. Ce système ne fonctionne que dans le cas où les lames sortent de l'entre plateaux. Sur certaines machines, et particulièrement au polissage, les lames n'en sortent pas et la mesure est tout simplement impossible. Pour d'autres, les lames en sortent mais le dégagement nécessaire au positionnement des capteurs n'est pas suffisant. La solution doit donc être adaptée au modèle de machine.

Yverdon-les-Bains, le 22 décembre 2006

Gilles Berchier

REFERENCES

Traitement du signal:

- [1] J. Stewart, 2001. Analyse: concepts et contextes: volume 1: fonction d'une variable, ISBN 2-7445-0118-2
- [2] B. D. Ripley, 2004, Robust statistics
- [3] R. Longchamp, 2006, Commande numérique de systèmes dynamiques: cours d'automatique, ISBN 2-88074-642-6
- [4] F. Delafontaine & G. Berchier, 2006, Acquisition d'un signal analogique: Recherche de la bande de fréquences utiles
- [5] A. Rumley, 2005, Cours de métrologie

Optique:

- [6] F. Wildi, 2006, Optique appliquée à l'usage des ingénieurs en microtechnique
- [7] P. H. Tomlins & R. K. Wang, 2005, Theory, developments and applications of optical coherence tomography
- [8] E. Hecht, 2005, Optique, ISBN 2-7440-7063-7

Normes:

- [9] VSM, 1997, Extrait des normes pour écoles techniques: septième édition, ISBN 3 909 750 087
- [10] G. Camponovo, D. Solcà & M. Despont, 1997, Normes techniques pour les installations électriques et de télécommunication dans la pratique

Général:

- [11] K. + R. Gieck, 1997, Formulaire technique: Dixième édition française, ISBN 3-920-379-24-1
- [12] G. Berchier, 2006, Travail de semestre: capteur pour la mesure in-situ d'épaisseur de lames plans parallèles
- [13] www.wikipedia.com, l'encyclopédie libre...