



Qualification et Performances des Systèmes de mesure Optiques

« QualiPSO »

Nicolas AUDFRAY
Charyar MEHDI-SOUZANI & Claire LARTIGUE



Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée
École Normale Supérieure de Cachan
61, avenue du président Wilson
94235 Cachan Cedex

Table des matières

Préambule	1
I. Systèmes de numérisation	1
1. Définition d'un système	1
2. Classification des systèmes de numérisation	1
3. Capteurs	1
3.1. Paramètres géométriques variables	1
3.2. Paramètres géométriques fixes	2
4. Porteurs ou systèmes de déplacement	3
II. Grandeurs à évaluer	3
1. Caractéristiques systèmes	4
2. Performances	4
Bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation	5
1. Définition	5
2. Evaluation	5
2.1. Matériel et artefacts	5
2.2. Protocole porteurs pilotables	6
2.3. Protocole porteurs non pilotables	6
2.4. Protocole d'évaluation pour les porteurs avec plusieurs configurations articu- laires possibles	6
3. Calculs	6
Bruit de numérisation en fonction des angles de numérisation	7
1. Définition	7
2. Evaluation	7
2.1. Matériel et artefacts	7
2.2. Protocole porteurs pilotables	8
2.3. Protocole porteurs non pilotables	8
2.4. Cas des bras robotisés ou polyarticulés	8
3. Calculs	8
Justesse de mesure en fonction de la distance de numérisation	9
1. Définition	9
2. Evaluation	9
2.1. Matériel et artefacts	9
2.2. Protocole porteurs pilotables	10
2.3. Protocole porteurs non pilotables	10
2.4. Cas des bras robotisés ou polyarticulés	10
3. Calculs	10
Justesse de mesure dite « relative » en fonction de la distance de numérisation	11
1. Définition	11
2. Evaluation	11
2.1. Matériel et artefacts	11
2.2. Protocole porteurs pilotables	12
2.3. Protocole porteurs non pilotables	12
2.4. Cas des bras robotisés ou polyarticulés	12
3. Calculs	12
3.1. Calculs pour la sphère	12
3.2. Calculs pour le plan	12
Caractérisation de la fenêtre de mesure	13
1. Définition	13
2. Evaluation	13
2.1. Matériel et artefacts	13
2.2. Protocole d'évaluation	14

3.	Calculs	14
3.1.	Cas 2D	14
3.2.	Cas 3D	14
Evaluation du recalage des données acquises avec différentes configurations		15
1.	Définition	15
2.	Evaluation	15
2.1.	Matériel et artefacts	15
2.2.	Protocole porteurs pilotables	15
2.3.	Protocole porteurs non pilotables	16
2.4.	Cas des bras robotisés ou polyarticulés	16
3.	Calculs	16
Evaluation des remises en position capteurs et porteurs		17
1.	Définition	17
2.	Evaluation	17
2.1.	Matériel et artefacts	17
2.2.	Protocole porteurs pilotables	17
2.3.	Protocole porteurs non pilotables	18
2.4.	Cas des bras robotisés ou polyarticulés	18
3.	Calculs	18
Références		19
Annexes		I
A.1.	Artefacts de numérisation	I

Table des figures

1	Description d'un système de numérisation	1
2	Classification des systèmes de numérisation	2
3	Paramétrisation des capteurs confocaux et à triangulation	2
4	Paramètres des fenêtres de mesure : a. fenêtre 1D, b. fenêtre 2D, c. fenêtre 3D	3
5	Représentation graphique du bruit de numérisation et de la justesse	4
6	Représentation du bruit	5
7	Protocole d'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation	5
8	Position du capteur pour un porteur non pilotable	6
9	Représentation du bruit	7
10	Protocole d'évaluation du bruit en fonction de l'angle α	7
11	Calcul de la justesse absolue sur une hauteur de marche	9
12	Artefacts marches	9
13	Justesse relative [BOU05]	10
14	Justesse relative : position des plans associés par rapport au plan considéré comme référence	11
15	Protocole d'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation	11
16	Paramètres des fenêtres de mesure : a. fenêtre 1D, b. fenêtre 2D, c. fenêtre 3D	13
17	Cales étalon	13
18	Protocole pour la qualification de la fenêtre de mesure	14
19	Résultats pour un capteur laser plan	14
20	Type d'artefact	15
21	Type d'artefact	17
22	Cale étalon matifiée partiellement	I
23	Comparaison des numérisations de la cale matifiée avec deux capteurs différents	II

Préambule

Le présent document décrit un protocole d'évaluation des systèmes de numérisation utilisant des capteurs optiques. Celui-ci a été développé au LURPA. Le but est de qualifier les systèmes de numérisation afin de connaître et maîtriser la qualité des données acquises. Les premiers travaux au LURPA à ce sujet ont été menés par Alexandre Contri [CON02] et ont ensuite été approfondis par Charyar Mehdi-Souzani [MEH06]. Ces travaux sont toutefois limités aux capteurs laser-plan, une extension de ce protocole est donc proposée afin d'améliorer la maîtrise de la qualité des données acquises pour différents capteurs sans contact.

La qualité des données acquises est une notion délicate car non encore normalisée pour les capteurs sans contact. Nous utilisons pour qualifier une acquisition les indicateurs de qualité définis par Alexandre Contri [CON02] basés sur les définitions de Hoppe *et al* [HOP92]. Nous utilisons en particulier l'indicateur δ -bruit, qui varie en fonction des conditions de numérisation (pièce numérisée, distance de numérisation, angle de numérisation, environnement, etc.), ainsi qu'une évaluation de la justesse de mesure.

I. Systèmes de numérisation

1. Définition d'un système

Afin de numériser un objet, quelle que soit la technologie employée, un système de numérisation peut être décomposé de la manière suivante [LAR02] :

- un système d'acquisition ;
- un système de déplacement ;
- un système de traitement.

Cependant, pour ce protocole, un système de numérisation est considéré comme l'ensemble formé par un capteur et un porteur, c'est-à-dire un système d'acquisition et un système de déplacement. Le système de traitement ne rentre pas dans le cadre de cette étude. La figure 1 illustre la définition du système de numérisation.

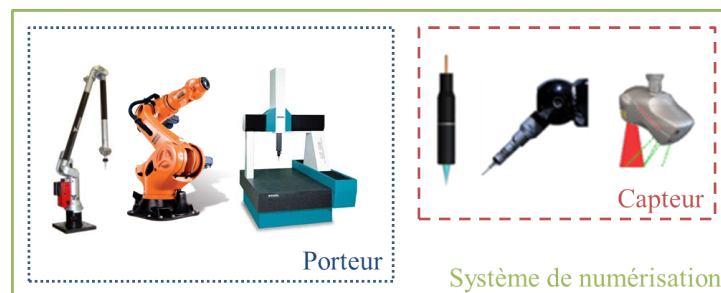


FIGURE 1 – Description d'un système de numérisation

2. Classification des systèmes de numérisation

Les capteurs et porteurs qui forment les systèmes de numérisation peuvent être classés suivant différentes catégories comme le montre la figure 2.

Les porteurs sont classés en deux catégories principales : les porteurs délivrant des coordonnées 3D (MMT, bras, robots, MOCN), les porteurs ne délivrant pas de coordonnées (trépieds, porteurs manuels). Les capteurs sont eux classés en deux catégories : à contact (rigide, déclenchement, scanning), sans contact (triangulation, confocaux, tomographie, vision). Le protocole se limite aux porteurs et capteurs encadrés sur la figure 2.

3. Capteurs

3.1. Paramètres géométriques variables

Quel que soit le capteur utilisé (parmi ceux de l'étude) – capteurs à triangulation laser, capteurs à lumière structurée, capteurs chromatiques – il peut être paramétré par (figure 3) :

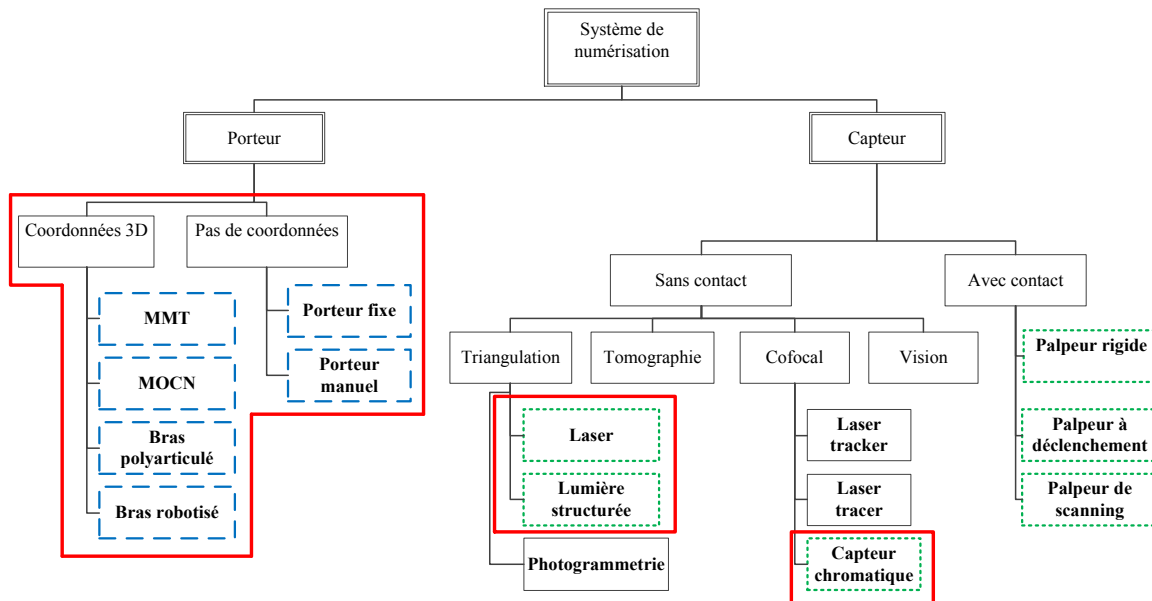


FIGURE 2 – Classification des systèmes de numérisation

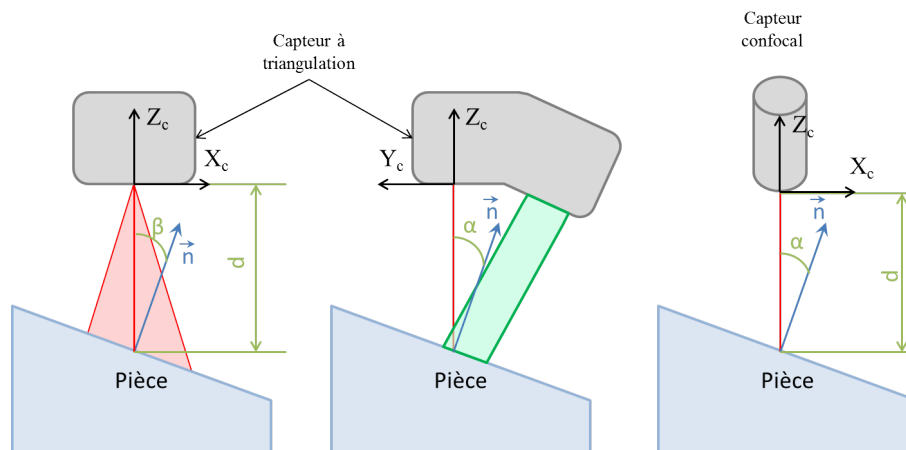


FIGURE 3 – Paramétrisation des capteurs confocaux et à triangulation

- d distance de numérisation, c'est la distance entre la source lumineuse du capteur et le point acquis.
- α angle de numérisation principal. Pour les capteurs confocaux, il s'agit de l'angle entre la normale de la surface et l'axe optique. Pour les capteurs à triangulation, cet angle est l'angle entre la normale à la surface au point considéré et le rayon lumineux émis dans le plan de triangulation.
- β angle de numérisation secondaire, qui n'existe que pour les capteurs à triangulation, il s'agit de l'angle entre le plan de triangulation et la normale à la surface au point considéré.

Ces paramètres influent sur la qualité des données acquises. Ils sont optimisés lors de la phase de planification de trajectoires afin d'obtenir la meilleure qualité de données après qualification et/ou évaluation du capteur, d'où l'intérêt d'un tel protocole.

3.2. Paramètres géométriques fixes

Les capteurs optiques ont un espace de travail représenté par une fenêtre de mesure. Suivant la technologie utilisée, la fenêtre peut avoir 1, 2 ou 3 dimensions. Les capteurs confocaux et laser ligne ont par exemple une fenêtre de mesure 1D (figure 4a), les capteurs à nappe laser ont une fenêtre de mesure 2D (figure 4b), les capteurs à lumière structurée classiques et les capteurs à balayage laser ont eux une

fenêtre de mesure 3D (figure 4c).

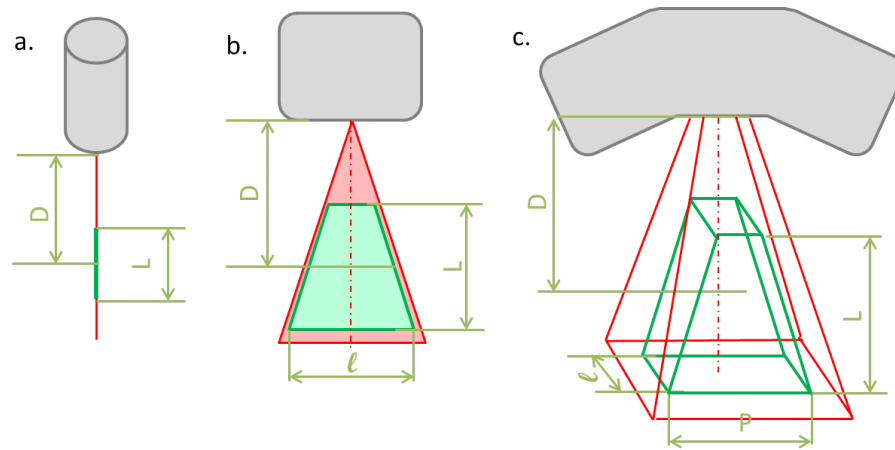


FIGURE 4 – Paramètres des fenêtres de mesure : a. fenêtre 1D, b. fenêtre 2D, c. fenêtre 3D

Les paramètres géométriques fixes des capteurs optiques sont les suivants :

- L la profondeur de champ de la fenêtre de mesure ;
- l la largeur de cette fenêtre pour les cas 2D et 3D ;
- P la profondeur de la fenêtre dans le cas 3D ;
- D la distance de travail, distance entre le capteur et le milieu de sa fenêtre de mesure.

Les distances de numérisation minimale d_{min} et maximale d_{max} sont définies par l'équation 1.

$$d_{min} = D - \frac{L}{2} \quad d_{max} = D + \frac{L}{2} \quad (1)$$

L'équation 2 donne une condition nécessaire à l'acquisition de points, elle signifie que la surface à numériser doit être située dans la fenêtre de mesure.

$$d_{min} \leq d \leq d_{max} \quad (2)$$

4. Porteurs ou systèmes de déplacement

Le porteur a pour fonction de maintenir le capteur en position et éventuellement de déplacer le capteur et/ou l'objet (en vue de son acquisition globale). La classification présentée précédemment permet d'orienter le choix du porteur en fonction d'une application donnée. Pour ce qui est de l'évaluation des performances d'un système, les différents porteurs sont séparés en deux familles : les porteurs pilotables tels que les MMT, les MOCN et les bras robotisés d'un côté et les porteurs non pilotables tels que les bras polyarticulés, les trépieds et les porteurs manuels de l'autre. En effet, pour les porteurs non pilotables il est difficile de maîtriser les paramètres de numérisation ou les paramètres de configuration capteur/surface tels que la distance de numérisation et l'angle de numérisation.

Dans un second temps, il est utile de classer les porteurs en deux nouvelles familles correspondant à l'unicité de la configuration articulaire vis-à-vis d'une configuration capteur/pièce. C'est-à-dire pour une position et une orientation du capteur par rapport à la pièce, existe-t-il plusieurs configurations articulaires du porteur ? Le tableau 1 récapitule la position des différents porteurs répertoriés dans chacun des deux classements proposés.

Le présent protocole précise donc les précautions à prendre dans chacun des quatre cas d'étude pour évaluer les performances des systèmes. Pour chaque caractéristique à évaluer, les différences de protocole sont précisées afin qu'il n'y ait pas d'ambiguïté.

II. Grandeurs à évaluer

Deux types de grandeurs sont à évaluer. D'un côté il faut considérer des caractéristiques système (fenêtre de mesure, calibration) et de l'autre des performances liées aux critères de qualité (justesse, bruit).

		Configuration articulaire pour une position capteur	
		unique	non unique
Porteurs	pilotables	MMT, MOCN	bras robotisés
	non pilotables	trépieds, porteurs manuels	bras polyarticulés

Tableau 1 – Classification des porteurs pour l'évaluation des performances

1. Caractéristiques systèmes

Tous les capteurs optiques ont une fenêtre de mesure qui n'est *a priori* pas isotrope. Il est donc nécessaire de qualifier cette fenêtre de mesure afin d'en connaître les limites.

La deuxième caractéristique inhérente au système de mesure est l'incertitude de remise en position.

2. Performances

Le présent protocole s'attache à évaluer les performances des systèmes de numérisation en termes de bruit et de justesse dont les définitions sont illustrées sur la figure 5.

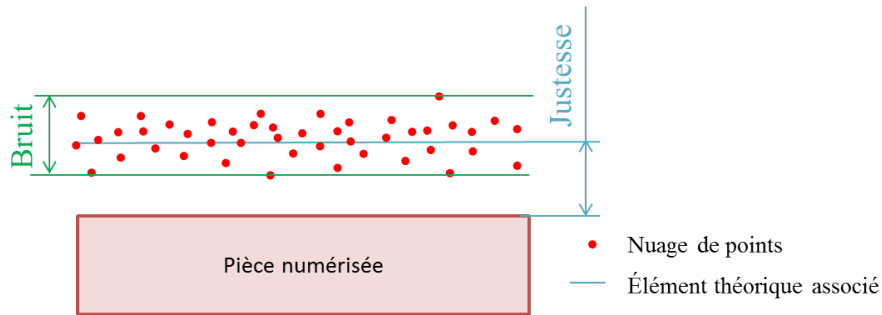


FIGURE 5 – Représentation graphique du bruit de numérisation et de la justesse

Ces deux indicateurs caractérisent l'erreur sur la position d'un point acquis. Le bruit représente l'erreur aléatoire sur l'acquisition d'un nuage de point, alors que la justesse représente l'erreur systématique.

Bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation

1. Définition

Le bruit de numérisation ne fait pas l'objet d'une norme, mais l'indicateur δ -bruit proposé dans la littérature [HOP92], permet de quantifier ce bruit. Soit M_i un point acquis avec un système de numérisation et P_i le point théorique qu'il représente, le point M_i peut s'écrire $M_i = P_i + e_i$ où e_i représente un vecteur erreur de position. Sur l'ensemble d'un nuage de points, il est possible de calculer l'écart-type σ de la répartition des e_i . Afin d'évaluer ce bruit, les points P_i étant inconnus, ils sont considérés comme les projections orthogonales des points M_i sur la surface idéale associée par le critère des moindres carrés (Figure 6). L'indicateur δ -bruit est ensuite donné par l'équation 3.

$$\delta = k \cdot \sigma = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i (e_i - \bar{e}_i)^2} \quad (3)$$

où

- k représente un facteur d'élargissement choisi ici égal à 1 ;
- p_i le poids de chacun des points ;
- \bar{e}_i la moyenne des écarts.

Dans le cas d'une association avec le critère des moindres carrés, les p_i sont égaux à 1 et la valeur moyenne \bar{e}_i est nulle [SHA98].

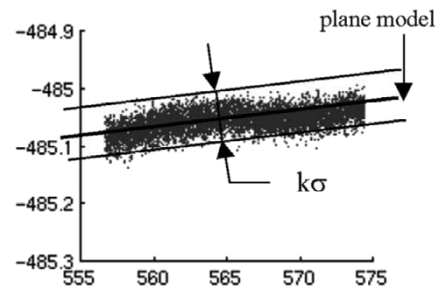


FIGURE 6 – Représentation du bruit

Cette partie propose l'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation d .

2. Evaluation

2.1. Matériel et artefacts

L'évaluation du bruit de numérisation en fonction de la distance de numérisation est réalisée sur un **artefact référence de planité** (Tableau 8), ce qui permet de maîtriser cette distance en plaçant le capteur normal à la surface. Si le capteur le permet, cet artefact peut être une cale étalon classique qui possède un très faible défaut de forme.

Tableau 2 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Plan		- d variable - $\alpha = 0$ fixe - $\beta = 0$ fixe

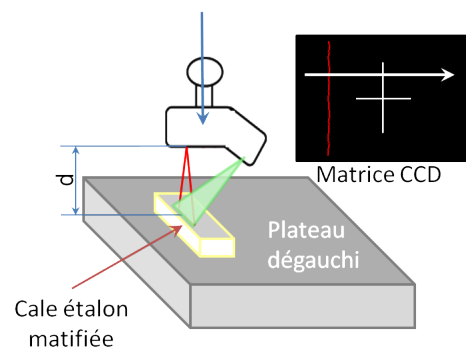


FIGURE 7 – Protocole d'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation

2.2. Protocole porteurs pilotables

1. Placer l'artefact sur un plan dégauchi de l'espace de travail.
2. Placer le capteur à la distance d_{max} de l'artefact.
3. Numériser le plan à cette distance d_{max} . Le nuage obtenu est $PL_{d_{max}}$.
4. Répéter l'opération en diminuant d d'une valeur $pas = \frac{L}{10}$ jusqu'à d_{min} . Les différents nuages obtenus sont PL_{d_i} , $i = \{d_{max}, \dots, d_{max} - k \cdot pas, \dots, d_{min}\}$.
5. Exporter les points au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

La valeur de pas est choisie arbitrairement ; le fait de prendre une dizaine de distances différentes donne une bonne évaluation de la variation du bruit.

2.3. Protocole porteurs non pilotables

Dans le cas d'un porteur non pilotable, la distance de numérisation est estimée qualitativement à partir du repère lumineux émis par le capteur qui détermine la distance préconisée par le constructeur (Figure 8).

1. Placer l'artefact sur un plan dégauchi de l'espace de travail.
2. Placer le capteur à une distance proche de d_{max} .
3. Numériser le plan à cette distance d_{max} . Le nuage de points obtenu est appelé $PL_{d_{max}}$.
4. Répéter l'opération au milieu $d \simeq D$ (nuage PL_D) et à l'autre extrémité de la fenêtre de mesure d_{min} (nuage $PL_{d_{min}}$).
5. Exporter les points au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

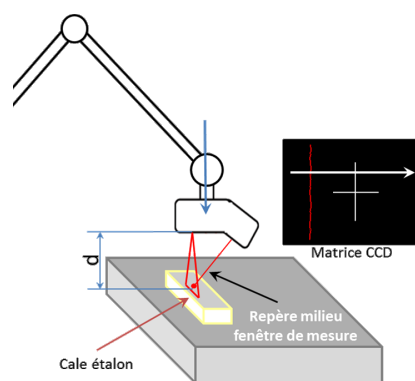


FIGURE 8 – Position du capteur pour un porteur non pilotable

2.4. Protocole d'évaluation pour les porteurs avec plusieurs configurations articulaires possibles

Dans le cas des porteurs ayant plusieurs configurations articulaires possibles pour une configuration capteur/pièce, comme les bras polyarticulés et les bras robotisés, il est nécessaire de faire varier les configurations articulaires à chaque acquisition, et ainsi réaliser plusieurs acquisitions à chaque distance de numérisation.

Le protocole est le même que dans les cas précédents, à choisir en fonction du caractère pilotable ou non du porteur, mais à chaque distance de numérisation, il est nécessaire de réaliser plusieurs acquisitions en modifiant les configurations articulaires. Les nuages obtenus sont appelés $PL_{d_i_j}$, avec j le numéro de l'acquisition pour une distance donnée.

3. Calculs

Le calcul du bruit est réalisé de la manière suivante sur chacun des nuages obtenus.

1. Associer un plan des moindres carrés au nuage.
2. Relever l'écart-type σ de la répartition des e_i .
3. Multiplier σ par le facteur d'élargissement k , $\delta = k \cdot \sigma$.

Bruit de numérisation en fonction des angles de numérisation

1. Définition

Le bruit de numérisation ne fait pas l'objet d'une norme, mais l'indicateur δ -bruit proposé dans la littérature [HOP92], permet de quantifier ce bruit. Soit M_i un point acquis avec un système de numérisation et P_i le point théorique qu'il représente, le point M_i peut s'écrire $M_i = P_i + e_i$ où e_i représente un vecteur erreur de position. Sur l'ensemble d'un nuage de points, il est possible de calculer l'écart-type σ de la répartition des e_i . Afin d'évaluer ce bruit, les points P_i étant inconnus, ils sont considérés comme les projections orthogonales des points M_i sur la surface idéale associée par le critère des moindres carrés (Figure 9). L'indicateur δ -bruit est ensuite donné par l'équation 4.

$$\delta = k \cdot \sigma = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i (e_i - \bar{e}_i)^2} \quad (4)$$

où

- k représente un facteur d'élargissement choisi ici égal à 1 ;
- p_i le poids de chacun des points ;
- \bar{e}_i la moyenne des écarts.

Dans le cas d'une association avec le critère des moindres carrés, les p_i sont égaux à 1 et la valeur moyenne \bar{e}_i est nulle [SHA98].

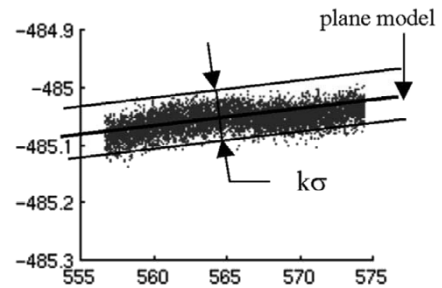


FIGURE 9 – Représentation du bruit

Cette partie propose l'évaluation du bruit de numérisation en fonction de l'angle α (et β pour les capteurs à triangulation).

2. Evaluation

2.1. Matériel et artefacts

Pour l'évaluation de l'influence des angles de numérisation, un **artefact référence de planéité** permet de maîtriser les différents angles, les cales étalons sont donc aussi préconisées.

Afin de faire varier les angles de numérisation, l'utilisation d'une règle sinus permet un contrôle simple de ces paramètres (Tableau 3).

Tableau 3 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Plan	- règle sinus - jeu de cales étalon	- d fixe optimale - α variable - β variable

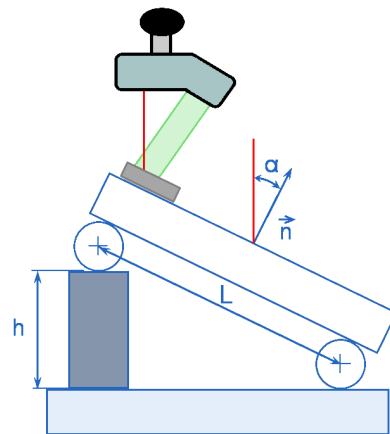


FIGURE 10 – Protocole d'évaluation du bruit en fonction de l'angle α

2.2. Protocole porteurs pilotables

L'évaluation de l'influence des angles de numérisation est réalisée en numérisant à distance constante en faisant varier les angles α et β . La distance est choisie égale à d_{opt} , distance de numérisation évaluée qui minimise le bruit. À défaut de connaître cette valeur, utiliser la valeur préconisée par le constructeur.

1. Placer l'artefact sur le plan dégauchi d'une règle sinus posée dans l'espace de travail.
2. Placer le capteur à la distance d_{min} .
3. Numériser le plan à cette distance constante d_{min} . Le nuage obtenu est nommé PL_a0 .
4. Incliner la règle sinus par l'ajout d'une cale étalon de dimension connue h sous la règle (Figure 10) de telle sorte que l'angle α_i .
5. Numériser à nouveau la cale à distance constante d_{min} . Le nuage obtenu est nommé $PL_a\alpha_i$, $\alpha_i = \{0, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_{max}\}$.
6. Répéter l'opération en inclinant la règle jusqu'à son maximum.
7. Répéter ensuite le tout en faisant varier l'angle β et nommer les nuages $PL_b\beta_i$.
8. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.
Nota : l'utilisation d'une table sinus peut permettre de ne pas déplacer le dispositif et de faire varier les deux angles.

2.3. Protocole porteurs non pilotables

De la même manière qu'il n'est pas possible de maîtriser la distance de numérisation, il n'est pas non plus possible de maîtriser les angles de numérisation. L'évaluation de leur influence est réalisée qualitativement.

- Placer l'artefact sur le plan dégauchi d'une règle sinus posée sur le marbre de la machine.
- Placer le capteur à la distance d_{min} de la surface.
- Numériser le plan à distance constante. Le nuage obtenu est nommé PL_a0 .
- Incliner la règle sinus par l'ajout d'une cale de dimension connue h sous la règle (Figure 10) de telle sorte que l'angle entre la normale à la surface et le plan laser soit d'environ 30° .
- Numériser à nouveau l'artefact à distance constante d_{min} . Le nuage obtenu est nommé PL_a30 .
- Répéter l'opération en inclinant la règle à 60° . Le nuage obtenu est nommé PL_a60 .
- Répéter ensuite le tout en faisant varier l'angle β et nommer les nuages $PL_b\beta_i$.
- Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.
Nota : l'utilisation d'une table sinus peut permettre de ne pas déplacer le dispositif et de faire varier les deux angles.

2.4. Cas des bras robotisés ou polyarticulés

Dans le cas des bras polyarticulés et bras robotisés, il n'est pas intéressant de faire varier indépendamment les différents angles de numérisation tant l'incertitude due aux codeurs est importante. De ce fait, de la même manière que pour l'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation, la configuration articulaire du porteur est modifiée plusieurs fois par configuration capteur/pièce.

Pour chacun des deux cas (porteur pilotable ou non), numériser avec différentes configurations articulaires à chaque configuration capteur/pièce et nommer les nuages $PL_a\alpha_j$ (resp. $PL_b\beta_j$), avec j le numéro de l'acquisition pour un angle α_i (resp. β_i) donné.

3. Calculs

Le calcul du bruit est réalisé de la manière suivante sur chacun des nuages obtenus.

1. Associer un plan des moindres carrés au nuage.
2. Relever l'écart-type σ de la répartition des e_i .
3. Multiplier σ par le facteur d'élargissement k , $\delta = k \cdot \sigma$.

Justesse de mesure en fonction de la distance de numérisation

1. Définition

La justesse de mesure est évaluée par la mesure d'une distance connue entre deux plans. L'erreur de justesse j_a est donnée par la différence entre la valeur mesurée de la distance et la valeur considérée comme vraie de cette distance. Cette valeur considérée comme vraie peut être donnée par la certification de l'artefact à numériser ou par la mesure à l'aide d'un système de mesure considéré comme plus juste.

La figure 11 représente un artefact de référence avec deux plans distants de h_0 , ainsi que le nuage issu de l'acquisition de ces deux plans.

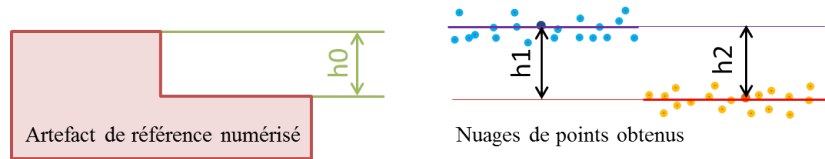


FIGURE 11 – Calcul de la justesse absolue sur une hauteur de marche

Le calcul de l'erreur de justesse absolue est réalisé de la manière suivante. Les points du nuage sont divisés en deux parties : d'une part les points représentant le plan supérieur et de l'autre les points représentant le plan inférieur. Les points pour lesquels il est difficile de décider de leur appartenance à un plan sont éliminés. Il en résulte donc deux nuages de points $M_{sup} = \{M_{sup,1}, \dots, M_{sup,n}\}$ et $M_{inf} = \{M_{inf,1}, \dots, M_{inf,n}\}$. \bar{M}_{sup} (resp. \bar{M}_{inf}) est le barycentre du nuage M_{sup} (resp. M_{inf}) et \vec{N}_{sup} (resp. \vec{N}_{inf}) est la normale du plan associé au nuage M_{sup} (resp. M_{inf}). Les plans sont associés avec le critère des moindres carrés [BOU05]. La hauteur h_1 est la distance entre le barycentre du nuage M_{sup} et le plan associé au nuage M_{inf} . La hauteur h_2 est la distance entre le barycentre du nuage M_{inf} et le plan associé au nuage M_{sup} . La distance h calculée entre les deux plans est la moyenne de h_1 et h_2 . L'erreur de justesse absolue j_a est obtenue par l'équation 5.

$$j_a = h - h_0 = \frac{h_1 + h_2}{2} - h_0 = \frac{|(\bar{M}_{sup} - \bar{M}_{inf}) \cdot \vec{N}_{inf}| + |(\bar{M}_{sup} - \bar{M}_{inf}) \cdot \vec{N}_{sup}|}{2} - h_0 \quad (5)$$

2. Evaluation

2.1. Matériel et artefacts

Idéalement la marche doit être réalisée en une seule pièce certifiée afin de garantir la meilleure justesse de la hauteur de marche. Toutefois s'il n'est pas possible d'obtenir un tel artefact, celui-ci peut être recréé à l'aide d'un empilement de cales étalon de dimensions connues. S'il est nécessaire de matifier l'artefact ainsi créé, il est très important de matifier l'ensemble des deux cales dans un même temps afin de ne pas ajouter de matière entre les deux cales en contact. Des exemples d'empilement de cales sont donnés sur la figure 12.

Tableau 4 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Marche $h_0 = L$		- d variable
- Marche $h_0 = \frac{L}{2}$		- $\alpha = 0$ fixe
- Marche $h_0 = \frac{L}{10}$		- $\beta = 0$ fixe



FIGURE 12 – Artefacts marches

2.2. Protocole porteurs pilotables

La justesse absolue est évaluée en utilisant des marches qui occupent une place plus ou moins grande de la fenêtre de mesure. La numérisation est réalisée de telle sorte que l'artefact soit contenu en entier dans la fenêtre de mesure (Figure 13).

1. Placer les trois artefacts sur un plan dégauchi de l'espace de travail.
2. Numériser chacun des trois artefacts en positionnant le capteur à d_{max} par rapport aux plans inférieurs des artefacts. Nommer les nuages $PL_h_inf_d_{max}$ et $PL_h_sup_d_{max}$ où h est la hauteur de marche nominale.
3. Répéter les numérisations en diminuant la distance d de $\frac{L}{10}$ pour obtenir suffisamment de résultats, jusqu'à d_{min} . Seuls les artefacts dont les deux plans restent dans la fenêtre de mesure sont numérisés. Nommer les nuages $PL_h_inf_d_i$ et $PL_h_sup_d_i$ où d_i est la distance de numérisation.
4. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.3. Protocole porteurs non pilotables

En ce qui concerne les systèmes avec des porteurs non pilotables, de la même manière que pour l'évaluation du bruit, il n'est pas possible de piloter la distance de numérisation. Ainsi, les numérisations réalisées sont qualitativement à des distances égales à d_{min} , D et d_{max} .

1. Placer les trois artefacts sur un plan dégauchi dans l'espace de travail.
2. Placer le capteur approximativement à la distance d_{min} de la surface supérieure.
3. Numériser les artefacts. Nommer les nuages $PL_h_inf_d_{min}$ et $PL_h_sup_d_{min}$ où h est la hauteur de marche nominale.
4. Répéter l'opération en plaçant la marche au milieu de la fenêtre de mesure (distance D), puis en plaçant le plan inférieur à la deuxième extrémité de la fenêtre (distance d_{max}). Nommer les nuages $PL_h_inf_d_i$ et $PL_h_sup_d_i$, $d_i \in [d_{min}, D, d_{max}]$
5. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.4. Cas des bras robotisés ou polyarticulés

Pour chacune des acquisitions, 4 scans doivent être réalisés de manière à modifier complètement les configurations articulaires du bras. Il est toutefois très important de conserver une distance de numérisation constante durant les quatre scans. Nommer les différents nuages $PL_h_inf_d_i_j$ et $PL_h_sup_d_i_j$ où j est le numéro de l'acquisition pour une distance de numérisation d_i fixée.

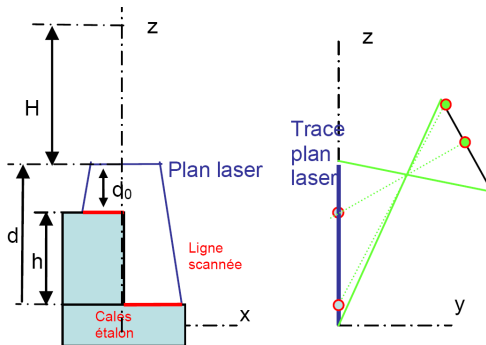


FIGURE 13 – Justesse relative [BOU05]

3. Calculs

Le calcul de la justesse absolue est réalisé de la manière suivante sur chacun des couples de nuages obtenus.

1. Associer un plan des moindres carrés PL_inf au nuage inférieur.
2. Calculer la distance moyenne $h1$ entre les points du nuage supérieur et le plan PL_inf .
3. Associer un plan des moindres carrés PL_sup au nuage supérieur.
4. Calculer la distance moyenne $h2$ entre les points du nuage inférieur et le plan PL_sup .
5. L'erreur de justesse est donnée par $j_a = \frac{h1 + h2}{2} - h0$.

Justesse de mesure dite « relative » en fonction de la distance de numérisation

1. Définition

La justesse dite « relative » est évaluée sur un artefact de référence comme la différence entre la position calculée d'une surface numérisée (plan, sphère, etc.) et sa position théorique. La distance calculée est donc la distance entre deux surfaces extraites de nuages de points représentant la même surface physique, la distance nominale entre les surfaces est donc nominale nulle. La figure 14 illustre les différents nuages de points obtenus lors de la numérisation d'une unique surface plane de référence.

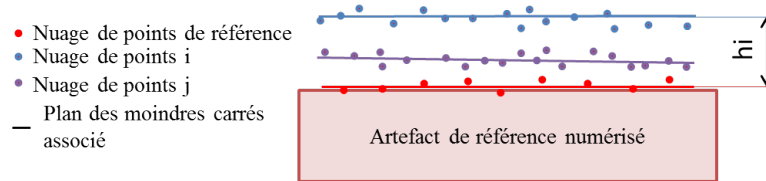


FIGURE 14 – Justesse relative : position des plans associés par rapport au plan considéré comme référence

La surface de référence est établie par une première numérisation (en rouge sur la figure 14), les hauteurs hi entre les différents nuages et le plan de référence sont évaluées de la même façon que pour la justesse absolue. La différence est que tous les nuages sont une représentation discrète de la même surface. Soit $M_{ref} = \{M_{ref,1}, \dots, M_{ref,n}\}$ le nuage de point de référence et $M_i = \{M_{i,1}, \dots, M_{i,n}\}$ les différents nuages de points acquis avec de la même façon \bar{M}_i et \vec{N}_i les barycentres des différents nuages et normales de leurs plans associés, l'erreur de justesse relative j_r est donnée par l'équation 6.

$$j_r = hi = \frac{hi1 + hi2}{2} = \frac{|(\bar{M}_i - \bar{M}_{ref}) \cdot \vec{N}_{ref}| + |(\bar{M}_i - \bar{M}_{ref}) \cdot \vec{N}_i|}{2} \quad (6)$$

avec $hi1$ et $hi2$ les distances calculées d'un barycentre au plan associé au deuxième nuage et vice versa.

2. Evaluation

2.1. Matériel et artefacts

La justesse relative est évaluée en comparant la position relative des surfaces associées à des nuages de points représentant la même surface physique, mais ayant été obtenus à différentes distances de numérisation. Pour ceci, deux tests sont proposés. Le premier consiste à numériser une **sphère de faible défaut de forme** (sphère d'étalonnage capteur par exemple) à des distances différentes, les coordonnées calculées du centre de la sphère sont comparées en prenant pour référence la première numérisation.

Le second test consiste à numériser un **artefact plan**. La position du plan associé au nuage est comparée à la position du même plan numérisé avec un capteur plus juste ayant le même repère de mesure, ou obtenu lors de la première numérisation.

Tableau 5 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Plan		- d variable
- Sphère		- $\alpha = 0$ fixe
		- $\beta = 0$ fixe

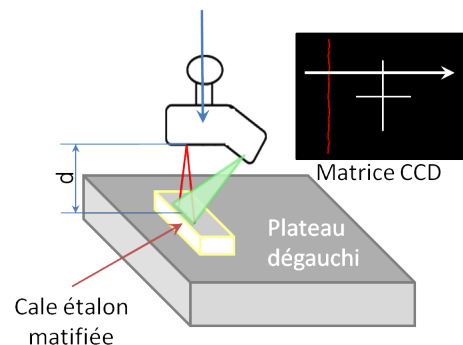


FIGURE 15 – Protocole d'évaluation du bruit en fonction de la distance de numérisation

2.2. Protocole porteurs pilotables

2.2.1. Test avec la sphère

1. Placer le capteur à la distance d_{min} .
2. Numériser la sphère à distance constante. Nommer le nuage obtenu $SP_{d_{min}}$.
3. Répéter la numérisation en éloignant le capteur de $\frac{L}{10}$. Nommer les nuages obtenus SP_{d_i} , avec d_i la distance.
4. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.2.2. Test avec le plan

1. Placer l'artefact plan sur un plan dégauchi.
2. Placer le capteur à la distance d_{min} .
3. Numériser l'artefact à distance constante. Nommer le nuage $PLjr_{d_{min}}$.
4. Répéter la numérisation en éloignant le capteur d'une valeur de $\frac{L}{10}$ jusqu'à d_{max} . Nommer les nuages $PLjr_{d_i}$, avec d_i la distance de numérisation.
5. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.3. Protocole porteurs non pilotables

Dans le cas de porteurs non pilotables, seules trois distances caractéristiques sont utilisées pour chacun des deux protocoles.

2.3.1. Test avec la sphère

1. Placer le capteur à une distance proche de d_{min} de la sphère.
2. Numériser la sphère à distance constante. Nommer le nuage obtenu $SP_{d_{min}}$.
3. Répéter la numérisation aux distances D et d_{max} . Nommer les nuages obtenus SP_D et $SP_{d_{max}}$.
4. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.3.2. Test avec le plan

1. Placer l'artefact plan sur un plan dégauchi.
2. Placer le capteur à une distance proche de d_{min} de la surface plane.
3. Numériser l'artefact à distance constante. Nommer le nuage $PLjr_{d_{min}}$.
4. Répéter la numérisation aux distances approximatives D et d_{max} . Nommer les nuages $PLjr_D$ et $PLjr_{d_{max}}$.
5. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.4. Cas des bras robotisés ou polyarticulés

De la même manière que pour l'évaluation de l'influence de la distance sur le bruit de numérisation, pour chacune des acquisitions, quatre scans doivent être réalisés de manière à modifier complètement les configurations articulaires du bras. Il est toutefois très important de conserver une distance pièce/capteur constante durant les quatre scans. Nommer chacun des scans $SP_{d_i_j}$ ou $PLjr_{d_i_j}$ avec j le numéro de l'acquisition pour une distance d_i .

3. Calculs

3.1. Calculs pour la sphère

1. Associer une sphère des moindres carrés $SP_{mc_{d_i}}$ à chaque nuage.
2. Calculer la distance moyenne h_i entre le centre C_i de la sphère $SP_{mc_{d_i}}$ et le centre C_0 de la sphère $SP_{mc_{d_{min}}}$.
3. $j_r = \|C_i - C_0\|$.

3.2. Calculs pour le plan

1. Associer un plan des moindres carrés $PL_{mc_{d_i}}$ à chaque nuage.
2. Calculer la distance moyenne $h1$ entre les points du nuage $PLjr_{d_i}$ et le plan $PL_{mc_{d_{min}}}$.
3. Calculer la distance moyenne $h2$ entre les points du nuage $PLjr_{d_{min}}$ et le plan $PL_{mc_{d_i}}$.
4. $j_r = \frac{h1 + h2}{2}$.

Caractérisation de la fenêtre de mesure

1. Définition

Les capteurs optiques ont un espace de travail appelé aussi fenêtre de mesure. Pour les capteurs confocaux ou laser ligne il s'agit d'un segment, pour les capteurs laser plan c'est un plan limité et pour les capteurs à lumière structurée un volume limité (Figure 16). Ce protocole s'applique pour les cas 2D et 3D uniquement.

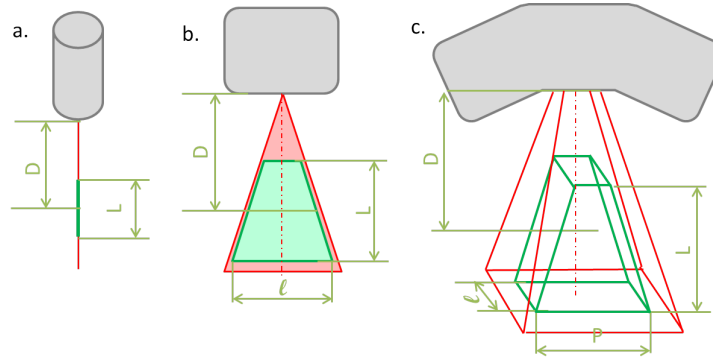


FIGURE 16 – Paramètres des fenêtres de mesure : a. fenêtre 1D, b. fenêtre 2D, c. fenêtre 3D

Du fait des parties optiques qui composent le capteur, des distorsions apparaissent. Il est donc intéressant de caractériser la fenêtre de mesure, afin de visualiser l'allure générale des défauts dus à la position des points numérisés dans cette fenêtre. La visualisation des écarts sur l'acquisition d'un plan supposé parfait permet déjà d'avoir une idée du caractère anisotrope de la fenêtre de mesure.

2. Evaluation

2.1. Matériel et artefacts

L'artefact de numérisation est **une surface plane** de faible défaut de forme. Cet artefact doit occuper une grande partie du champs de vue du capteur, en particulier pour les capteurs à fenêtre de mesure 3D. Cet artefact est positionné à l'aide d'un empilement de cales étalon afin de faire varier la distance de numérisation sans déplacer la capteur. Si besoin, cet artefact peut être matifié afin d'être numérisable par le capteur, il est néanmoins préférable d'utiliser des artefacts non matifiés.

Tableau 6 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Plan	- Jeu de cales étalon	- d variable - $\alpha = 0$ fixe - $\beta = 0$ fixe - Capteur fixe



FIGURE 17 – Cales étalon

2.2. Protocole d'évaluation

Pour cette partie du protocole, seul le capteur est évalué, indépendamment de son porteur. De ce fait le capteur est fixé de manière à rester immobile pour toute la mesure. Ainsi le protocole est identique quel que soit le type de porteur utilisé.

1. Placer l'artefact plan sur un plan dégauchi dans l'espace de travail.
2. Placer le capteur au-dessus de l'artefact à la distance d_{max} .
3. Réaliser l'acquisition d'une seule image (point, ligne, surface en fonction du capteur). Nommer ces données $DR_{fen}_{d_{max}}$ ou $PL_{fen}_{d_{max}}$ en fonction du type d'entité numérisée.
4. Rehausser l'artefact de $\frac{L}{10}$ à l'aide d'un jeu de cales étalon **sans déplacer le capteur**. La cale est alors rapprochée du capteur sans que la position de ce dernier n'ait changé (Figure 18).
5. Réaliser une nouvelle acquisition d'une seule image. Nommer ces données $DR_{fen}_{d_i}$ ou $PL_{fen}_{d_i}$ en fonction du type d'entité numérisée, avec d_i la distance de numérisation.
6. Répéter les opérations de rehausse et d'acquisition jusqu'à la limite inférieure de la fenêtre de mesure (d_{min}).
7. Les données obtenues sont composées de N images (point, ligne, surface en fonction du capteur) représentatives de la fenêtre de mesure.
8. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

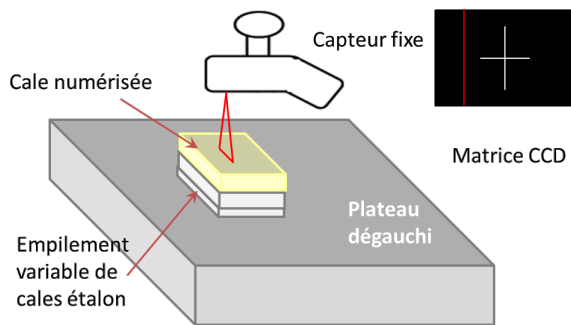


FIGURE 18 – Protocole pour la qualification de la fenêtre de mesure

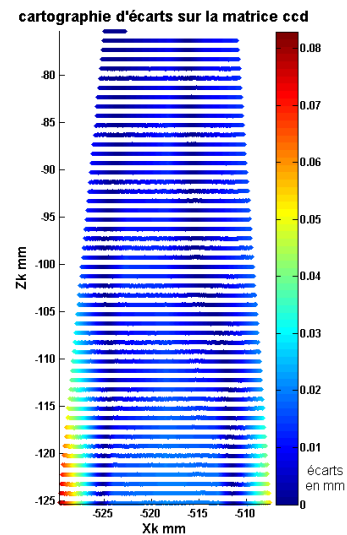


FIGURE 19 – Résultats pour un capteur laser plan

3. Calculs

3.1. Cas 2D

1. Fusionner l'ensemble des données.
2. Associer un plan des moindres carrés à l'ensemble obtenu.
3. Relever le défaut de forme de l'élément (Figure 19).

3.2. Cas 3D

1. Associer un plan des moindres carrés à chaque entité numérisée.
2. Relever le défaut de forme de chaque entité.

Evaluation du recalage des données acquises avec différentes configurations

1. Définition

Pour la plupart des systèmes de numérisation, lorsqu'une acquisition est réalisée suivant plusieurs vues différentes, le recalage des données est réalisé par le système de traitement à partir de la procédure de calibration externe du système. Ce recalage est une boîte noire pour l'utilisateur, il est donc proposé ici une procédure permettant de quantifier l'erreur de recalage des données obtenues avec plusieurs configurations du système.

2. Evaluation

2.1. Matériel et artefacts

Pour cette évaluation, seule une sphère de faible défaut de forme est nécessaire, le diamètre réel de cette dernière doit être connu.

Tableau 7 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Sphère de rayon R_0 connu		- $d = d_{opt}$ fixe - $\alpha = 0$ fixe - $\beta = 0$ fixe

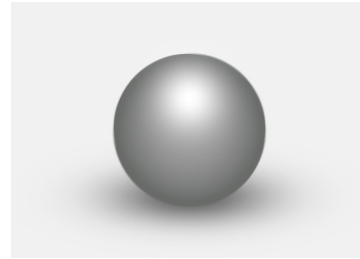


FIGURE 20 – Type d'artefact

2.2. Protocole porteurs pilotables

La numérisation est réalisée toujours dans les mêmes configurations capteur/artefact. La distance de numérisation est choisie égale à la distance qui minimise l'erreur de justesse et les angles de numérisation sont fixés à 0° . Si l'évaluation de cette distance optimale n'a pas été réalisée, utiliser la distance préconisée par le fabricant du capteur.

Le terme « calibrer » présent par la suite désigne la calibration externe, parfois appelée étalonnage par les fabricants.

1. Calibrer si possible le système de numérisation dans la position verticale.
2. Numériser 5 fois la sphère à distance constante d_{opt} .
Nommer les nuages $SP_recal_Z +_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
3. Orienter le système de manière à positionner le capteur suivant l'axe $X+$.
4. Calibrer si possible le système de numérisation dans cette position.
5. Numériser à nouveau 5 fois la sphère à distance constante d_{opt} .
Nommer les nuages $SP_recal_X +_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
6. Répéter les opérations de réorientation et de numérisation selon les axes $X-$, $Y+$ et $Y-$.
Nommer les nuages $SP_recal_j_i$ $j \in \{X-, Y+, Y-\}$ en incrémentant i à chaque numérisation.
7. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.3. Protocole porteurs non pilotables

Dans le cas des porteurs non pilotables, la distance de numérisation utilisée est celle qui place la surface de la sphère au milieu de la fenêtre de mesure. Cette position est obtenue grâce au guide visuel de capteur.

1. Calibrer si possible le système de numérisation dans la position verticale.
2. Numériser 5 fois la sphère à distance constante proche de d_{opt} .
Nommer les nuages $SP_recal_Z+_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
3. Orienter le système de manière à positionner le capteur suivant l'axe X+.
4. Calibrer si possible le système de numérisation dans cette position.
5. Numériser à nouveau 5 fois la sphère à distance constante d_{opt} .
Nommer les nuages $SP_recal_X+_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
6. Répéter les opérations de réorientation et de numérisation selon les axes X-, Y+ et Y-.
Nommer les nuages $SP_recal_j_i$ $j \in \{X-, Y+, Y-\}$ en incrémentant i à chaque numérisation.
7. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.4. Cas des bras robotisés ou polyarticulés

Dans le cas des bras robotisés ou polyarticulés, l'étalonnage à chaque orientation n'est pas possible.

1. Positionner le capteur dans la position verticale
2. Numériser 5 fois la sphère à distance constante d_{opt} .
Nommer les nuages $SP_recal_Z+_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
3. Orienter le système de manière à positionner le capteur suivant l'axe X+.
4. Numériser à nouveau 5 fois la sphère à distance constante d_{opt} .
Nommer les nuages $SP_recal_X+_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
5. Répéter les opérations de réorientation et de numérisation selon les axes X-, Y+ et Y-.
Nommer les nuages $SP_recal_j_i$ $j \in \{X-, Y+, Y-\}$ en incrémentant i à chaque numérisation.
6. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

3. Calculs

Le calcul consiste à évaluer le défaut de forme du nuage global ainsi que la dispersion des positions des centres sphère de chacun des nuages obtenus.

1. Associer une sphère des moindres carrés de rayon imposé $R0$ à chaque nuage obtenu.
2. Evaluer l'erreur de position des différents nuages en relevant la moyenne P_{moy} et l'écart-type σ_{pos} de la position des centres des sphères.

1. Concaténer tous les nuages.
2. Associer une sphère des moindres carrés de rayon imposé $R0$ au nuage obtenu.
3. Relever le défaut de forme et l'écart-type de la répartition des points à la sphère des moindres carrés

Evaluation des remises en position capteurs et porteurs

1. Définition

Suivant le type de systèmes de numérisation, certaines parties peuvent nécessiter des remises en position (tête rotative PH10 sur MMT, remise en position d'un bras de mesure, changement d'outil sur MOCN, etc.). La présente partie propose un protocole d'évaluation de l'incertitude de ces remises en position à travers la numérisation d'une sphère plusieurs fois après réorientation du système de numérisation, sans recalibration externe du système.

Cette partie se veut qualitative pour permettre à l'utilisateur de connaître l'ordre de grandeur des défauts engendrés par les remises en position.

2. Evaluation

2.1. Matériel et artefacts

Pour cette évaluation, seule une sphère de faible défaut de forme est nécessaire.

Tableau 8 – Matériel et artefacts

Artefacts	Matériel	Caractéristiques
- Sphère		<ul style="list-style-type: none"> - $d = d_{opt}$ fixe - $\alpha = 0$ fixe - $\beta = 0$ fixe

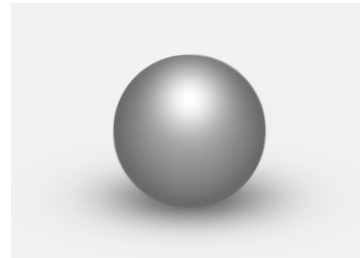


FIGURE 21 – Type d'artefact

2.2. Protocole porteurs pilotables

La numérisation est réalisée toujours dans les mêmes configurations capteur/artefact. La distance de numérisation est choisie égale à la distance qui minimise l'erreur de justesse. Si l'évaluation de cette distance optimale n'a pas été réalisée, utiliser la distance préconisée par le fabricant du capteur.

Le terme « calibrer » présent par la suite désigne la calibration externe, parfois appelée étalonnage par les fabricants.

1. Si besoin, calibrer le système de numérisation dans la position désirée.
2. Numériser dix fois la sphère à distance constante d_{opt} . Nommer les nuages $SP_repet_0_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
3. Effectuer un remise en position du système sans recalibration.
4. Numériser à nouveau cinq fois la sphère à distance constante d_{opt} . Nommer les nuages $SP_repet_1_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
5. Répéter les opérations de remise en position et de numérisation plusieurs fois. Nommer les nuages $SP_repet_j_i$ en incrémentant j à chaque remise en position et i à chaque numérisation.
6. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.3. Protocole porteurs non pilotables

Dans le cas des porteurs non pilotables, la distance de numérisation utilisée est celle qui place la surface de la sphère au milieu de la fenêtre de mesure. Cette position est obtenue grâce au guide visuel de capteur.

1. Si besoin, calibrer le système de numérisation dans la position désirée.
2. Numériser dix fois la sphère à distance constante proche de d_{opt} . Nommer les nuages $SP_repet_0_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
3. Effectuer un remise en position du système sans recalibration.
4. Numériser à nouveau cinq fois la sphère à distance constante d_{opt} . Nommer les nuages $SP_repet_1_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
5. Répéter les opérations de remise en position et de numérisation plusieurs fois. Nommer les nuages $SP_repet_j_i$ en incrémentant j à chaque remise en position et i à chaque numérisation.
6. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

2.4. Cas des bras robotisés ou polyarticulés

Dans le cas des bras robotisés ou polyarticulés, l'influence des différentes configurations articulaires est mise en avant dans cette partie.

1. Numériser dix fois la sphère à distance constante proche de d_{opt} dans une configuration articulaire qui varie peu. Nommer les nuages $SP_repet_0_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
2. Changer de configuration articulaire et numériser à nouveau cinq fois la sphère à distance constante d_{opt} . Nommer les nuages $SP_repet_1_i$ en incrémentant i à chaque numérisation.
3. Répéter les opérations de changement de configuration articulaire et de numérisation plusieurs fois. Nommer les nuages $SP_repet_j_i$ en incrémentant j à chaque remise en position et i à chaque numérisation.
4. Exporter les données au format ASCII de préférence ou STEP à défaut.

3. Calculs

Le calcul revient ici à un calcul de justesse relative avec une notion de répétabilité.

1. Associer une sphère des moindres carrés à chaque nuage obtenu.
2. Evaluer la répétabilité de la mesure d'une sphère en relevant la moyenne P_{moy} et l'écart-type σ_{pos} de la position des centres des sphères des 10 premières acquisitions.
3. Pour chaque numérisation suivante, relever la distance entre le centre de la sphère associée au nuage et P_{moy} .
4. L'Étendue et l'écart-type des distances calculées permettent de connaître l'influence de la remise en position du système en termes de justesse de mesure relative.

Références

- [BOU05] Pierre BOURDET, François THIEBAUT, Claire LARTIGUE et Pierre BRETEAU : Évaluation des performances de la mesure par capteur optique sur machine à mesurer tridimensionnelle. *In 12ème Congrès International de Métrologie*, Lyon, jun 2005.
- [CON02] Alexandre CONTRI : *Qualité géométrique de la mesure de surfaces complexes par moyens optiques*. Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [HOP92] Hugues HOPPE, Tony DEROSE, Tom DUCHAMP, John MCDONALD et Werner STUETZLE : Surface reconstruction from unorganized points. *Computer Graphics*, 26(2):71–78, 1992.
- [LAR02] Claire LARTIGUE, Alexandre CONTRI et Pierre BOURDET : Digitised point quality in relation with point exploitation. *Measurement*, 32:193–203, 2002.
- [MEH06] Charyar MEHDI-SOUZANI : *Numérisation 3D intelligente d'objets de formes inconnues basée sur des critères de qualité*. Thèse de Doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2006.
- [SHA98] Craig M. SHAKARJI : Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 103(6):633–641, nov 1998.

Annexes

A.1. Artefacts de numérisation

Certains capteurs optiques ne permettent pas l'acquisition de tous les types de surface (surfaces brillantes, surfaces transparentes, surfaces absorbantes, etc.), le choix de l'artefact est donc primordial. Cet artefact doit être de faible défaut de forme (cale étalon par exemple) et répondre aux conditions de réflexion associées au capteur utilisé. Toutefois, dans le cas où il est impossible d'obtenir un artefact respectant cette condition de réflexion, il est possible de matifier une cale étalon à l'aide de poudre réflecteur utilisée pour le ressuage¹. Il est néanmoins évident que la qualité de la surface est dégradée, une surépaisseur variable est ajoutée à la surface. La figure 22 montre le résultat d'acquisition d'une cale étalon en partie matifiée (une partie de la surface a été protégée lors de la pulvérisation de la poudre), à l'aide d'un capteur monochromatique confocal STIL. Ce capteur est utilisé pour le contrôle de l'état de surface des pièces. Il a une résolution de $0.1 \mu\text{m}$ et une plage de mesure de 0.3 mm pour le crayon utilisé ici. Le nuage de point obtenu a été réorienté de sorte que la partie non matifiée (en bleu sur la figure) soit orientée suivant Z.

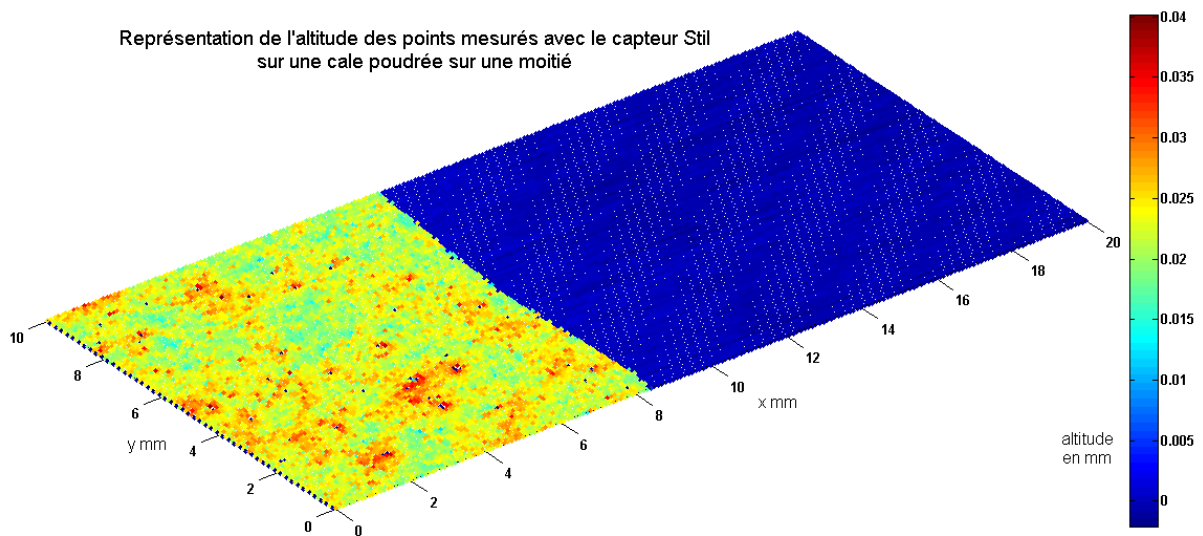


FIGURE 22 – Cale étalon matifiée partiellement

Ces résultats montrent que l'épaisseur moyenne de matifiant est de l'ordre de $0,025 \text{ mm}$. Ceci ne poserait aucun souci si la répartition du matifiant était homogène, mais ce n'est pas le cas, la différence d'épaisseur peut varier jusqu'à $0,02 \text{ mm}$. Dans le cas de la mesure d'un défaut de forme, la variation d'épaisseur de matifiant pourra ainsi engendrer une erreur de mesure importante. Il faudra donc être très prudent lors de l'exploitation des données issues d'une telle numérisation.

Afin de s'assurer que l'influence de la matification n'influence pas les résultats obtenus, il est intéressant de comparer les résultats de l'acquisition du même artefact matifié obtenus avec deux systèmes de numérisation différents : celui à évaluer et un système de meilleure exactitude. La figure 23 présente les résultats obtenus à l'aide d'un système composé d'un capteur laser-plan Kréon KZ25 et d'une MMT SEIV Renault, et du capteur STIL précédemment présenté monté sur sa station de déplacement dédiée dédiée. Les résultats montrent que les défauts du capteur laser-plan sont supérieurs aux défauts engendrés par la poudre, l'écart-type de la répartition des écarts au plan des moindres carrés associé à chacun des nuages est deux fois plus grand dans le cas du capteur laser-plan. Dans le cas de ce système de numérisation, une cale étalon matifiée peut donc être utilisée pour la qualification du système.

1. méthode de contrôle des fissures dans une soudure

Cale matifiée numérisée avec deux capteurs différents

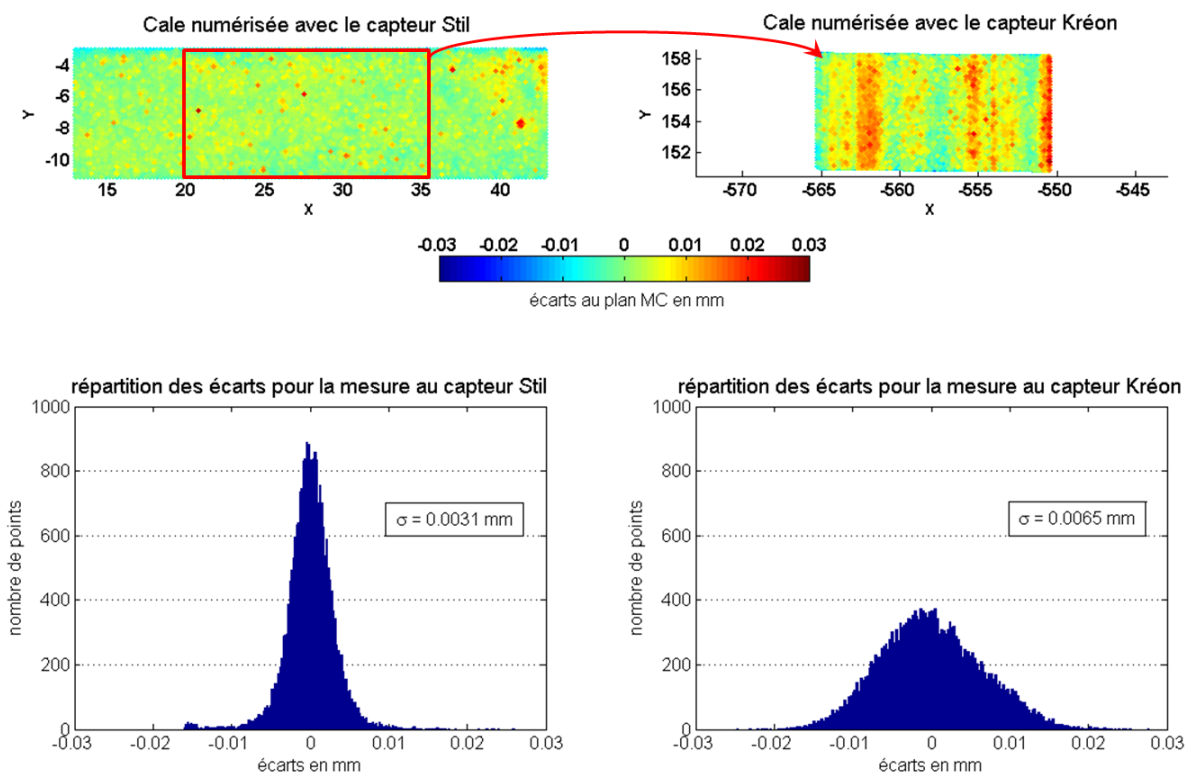


FIGURE 23 – Comparaison des numérisations de la cale matifiée avec deux capteurs différents