



École des Ponts

ParisTech

Mesure de forme et de déformation par imagerie numérique

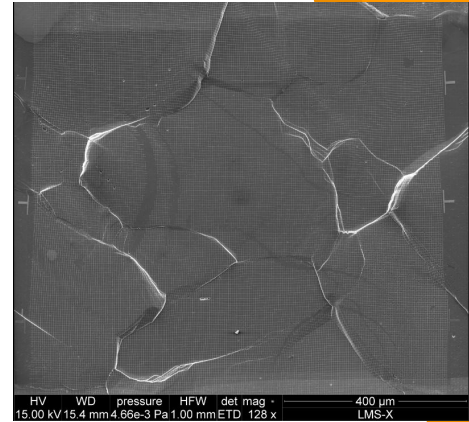
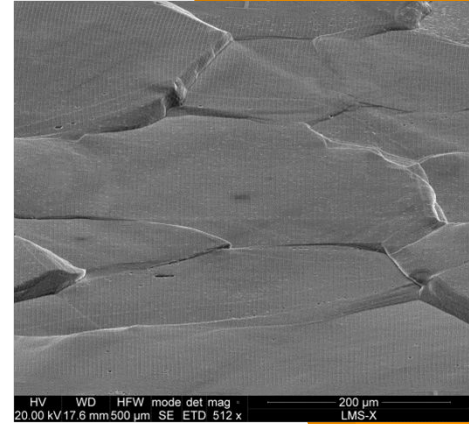
*Stéphane Allado
Caroline Pascal
Alexandre Pacaud
Diane Pugès
Pierre Uginet*

Cours d'ouverture 1A : Imagerie
numérique - Application en
mécanique des matériaux

*Mathieu Aubry (LIGM-Imagine)
Michel Bornert (Navier)*

Introduction

- Objet micrométrique (plaque Al)
- Séries de photographies
- Reconstitution de l'échantillon



*Vues au microscope électronique à
balayage de l'échantillon étudié*

Démarche et répartition du travail

- Etude approfondie des données initiales
- Poser clairement le problème
- Deux grands axes à relier

Introduction

I) Correspondances

II) Reconstruction 3D

III) Résultats et Analyse

IV) Discussions

Conclusions

Recherche de correspondances

1/ Principe de la recherche

- **Recherche de points-clés**

Patches avec des gradients élevés

Recherche de correspondances

- **Calcul des descripteurs**

Descripteur :

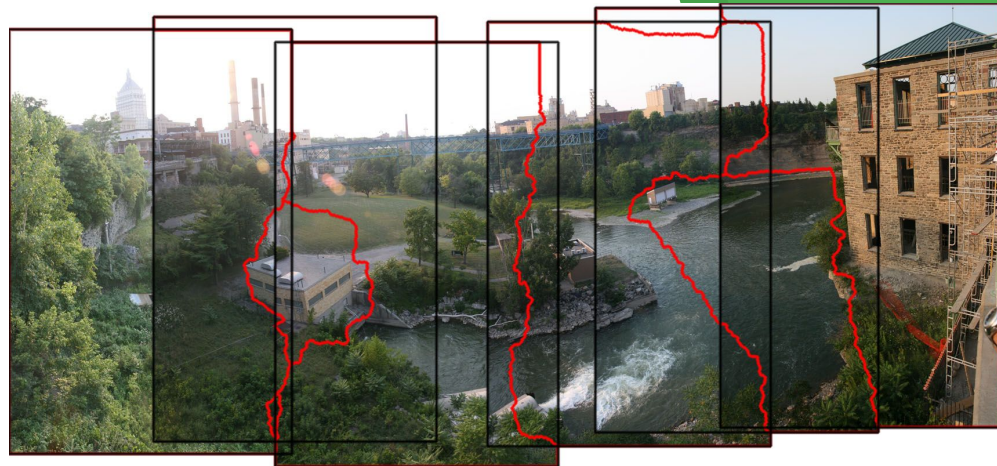
- Caractérise numériquement le point
- Varie le moins possible d'une prise de vue à une autre pour un même point

- **Appariement des points**

Recherche de correspondances

2/ Choix de l'algorithme

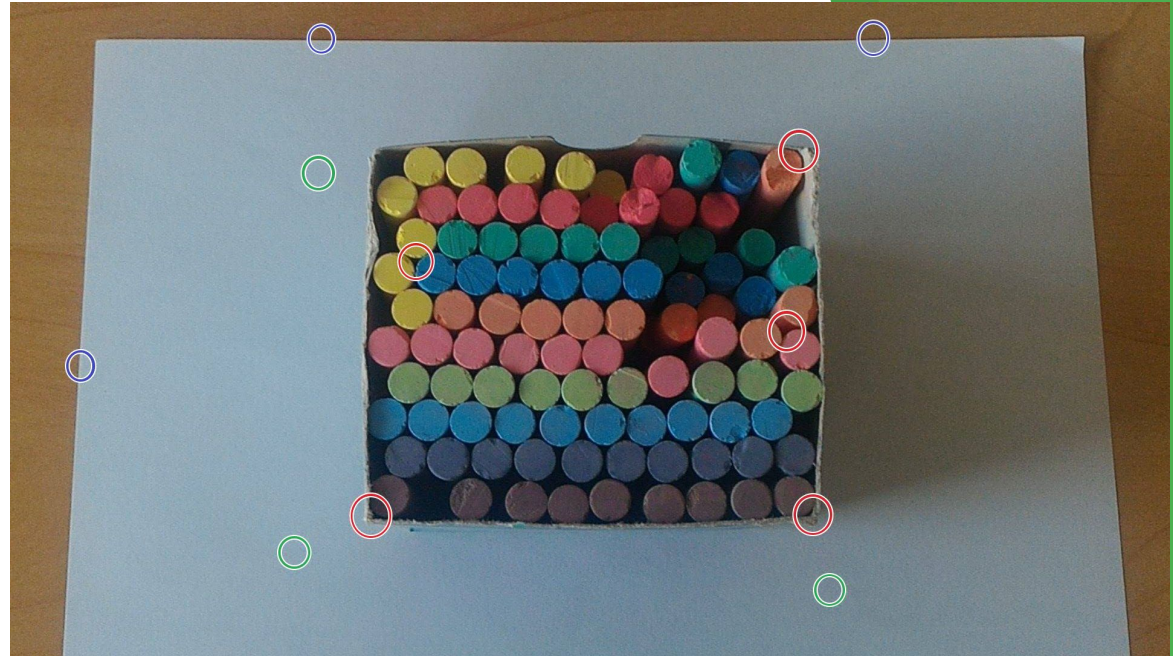
- **MOPS :**
 - Simple
 - Peu adapté au problème
- **HOG** (Descripteurs seulement):
 - Plutôt pour la détection de personnes, d'objets



Recherche de correspondances

- **SIFT:**

- Plus complexe
- Plus utilisé en imagerie 3D



Exemple de repérage de points-clés sur une image contrastée

Recherche de correspondances

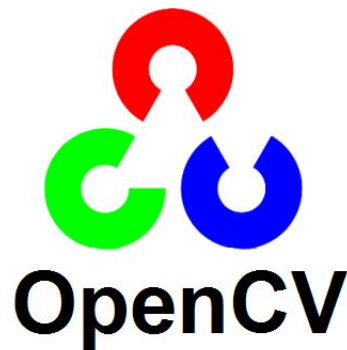
3/ Implémentation et tests

- Utilisation d'*OpenCV*

Bibliothèque implémenté sur C++.

-fonction Sift sur version opencv2

-fonction orb sur version opencv3



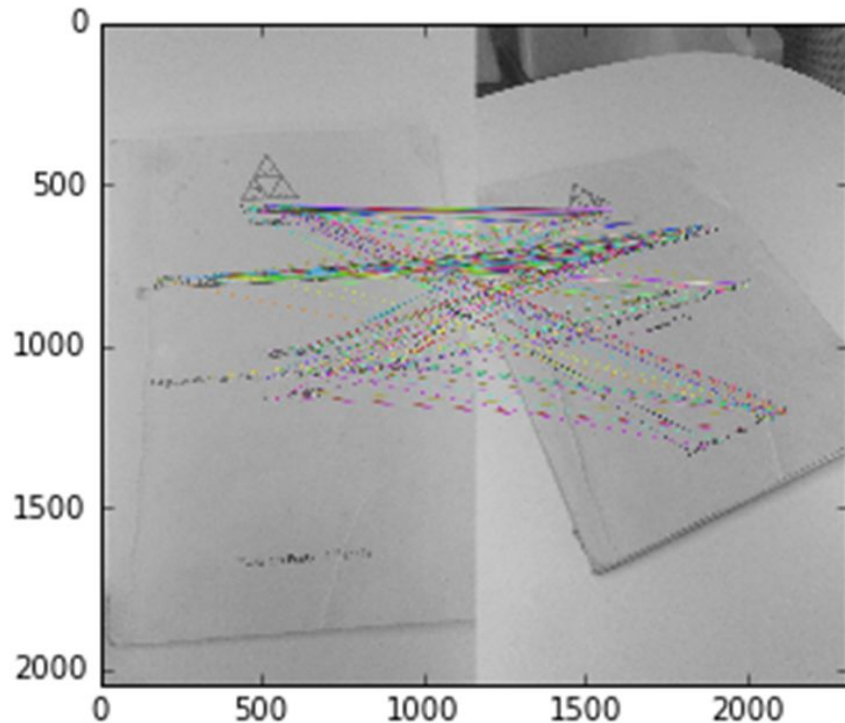
Recherche de correspondances

Améliorations (fonction orb):

- points clés pertinents
- Beaucoup de correspondances exactes

Mais:

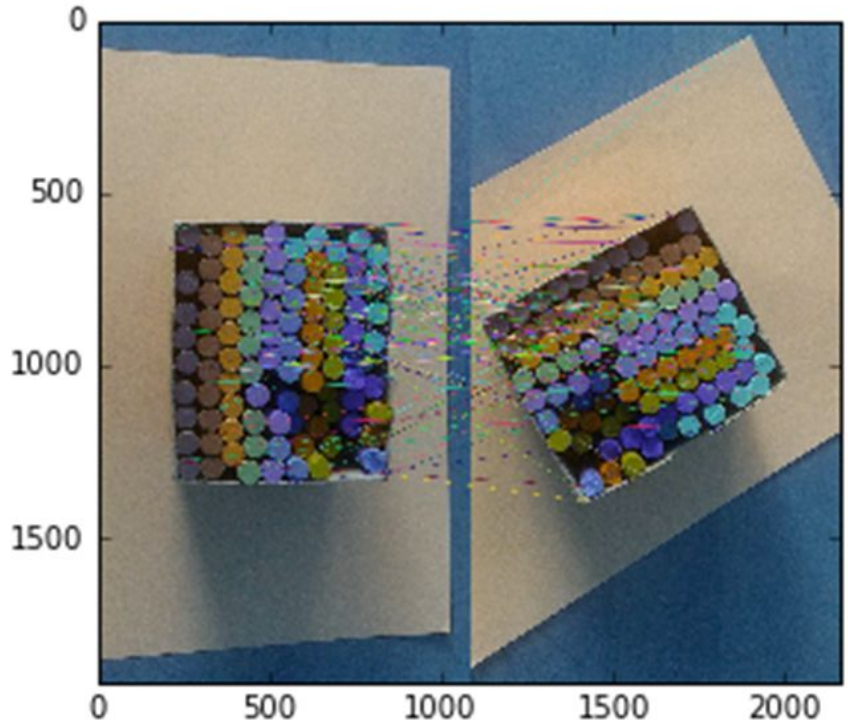
- Image noir et blanc
- Existence de nombreuses fausses correspondances



Recherche de correspondances

Améliorations (fonction orb):

- Correspondances exactes
- Couleur propice
- Points clés pertinents



Introduction

I) Recherche de correspondances

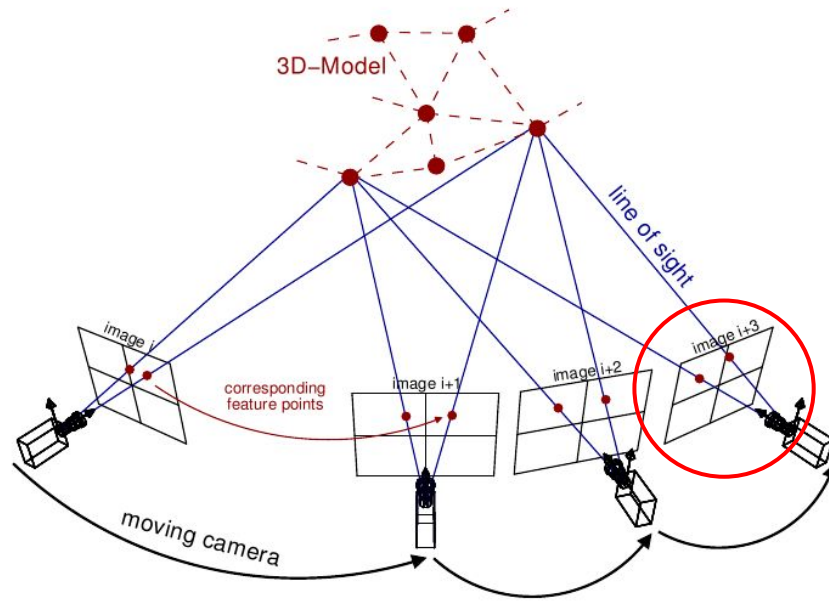
II) Reconstruction 3D

III) Résultats et Analyse

IV) Discussions

Conclusions

Reconstruction 3D : principes de base



*Schéma illustrant le principe de triangulation,
Theia Vision Library*

Modèle usuel : la projection perspective

Equation matricielle de projection

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \sim \underbrace{\begin{pmatrix} kf & 0 & 0 & kp_x \\ 0 & kf & 0 & kp_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}}_{\text{Intrinsèque}} \underbrace{\begin{bmatrix} R & -RC_{lab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{Extrinsèque}} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Équation de projection pour le modèle perspectif

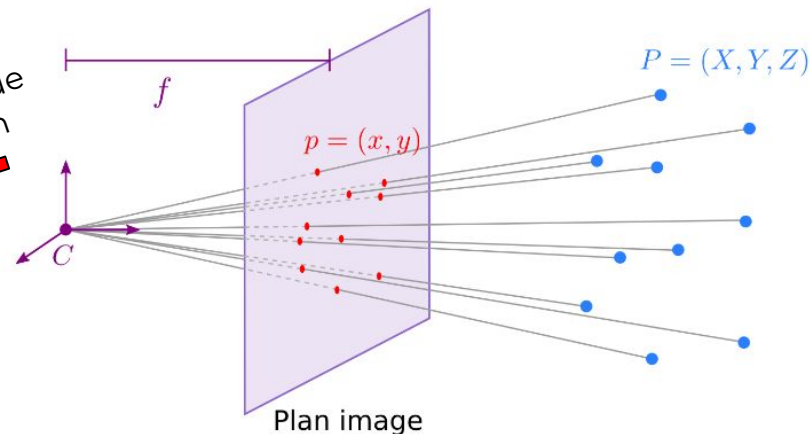


Schéma explicatif du modèle de projection perspective

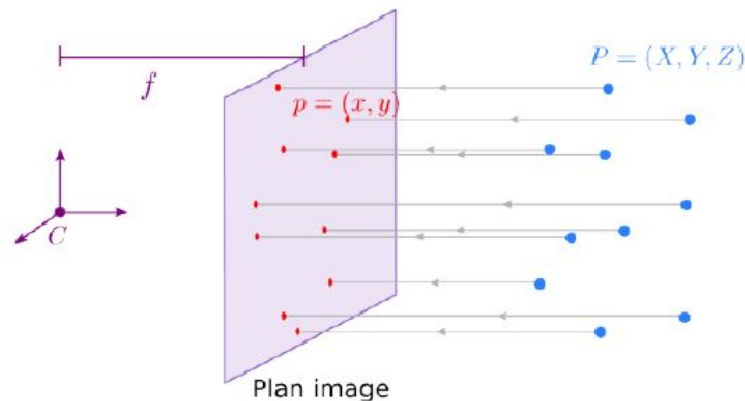
■ L.F. Julia, "Estimation de pose à trois vues : les mérites respectifs du tenseur trifocal et du modèle orthographique", 2016

→ Connaissance *précise* de la *calibration intrinsèque* de la caméra nécessaire pour résoudre le problème de triangulation

Modèle simplifié : la projection orthographique

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Equation
matricielle de
projection



Équation de projection pour le modèle orthographique

↪ Équivalent à la projection perspective
quand la caméra est à l'infini sur l'axe de
visée

*Schéma explicatif du modèle de projection
orthographique [1]*

projection orthographique avec échelle

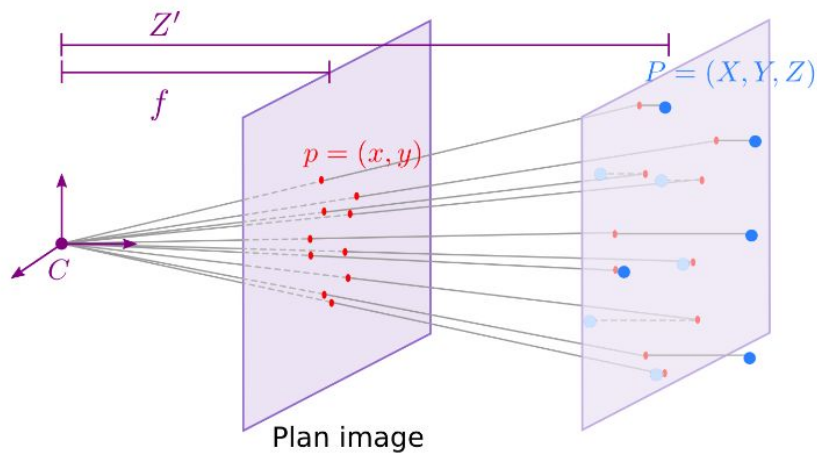


Schéma explicatif du modèle de projection orthographique avec échelle, [1]

Equation matricielle de projection
obtenue pour \mathbf{M} prises de vues de
 \mathbf{N} points d'intérêt de l'objet



$$W = \begin{pmatrix} \text{Points 2D} \\ x_1^1 & \dots & x_1^N \\ \vdots & & \vdots \\ x_M^1 & \dots & x_M^N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{m}_1^T \\ \vec{n}_1^T \\ \vdots \\ \vec{m}_M^T \\ \vec{n}_M^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{Points 3D} \\ \text{reconstruits} \\ X^1 & \dots & X^N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ \vdots \\ a_M \\ b_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Paramètres de rotation Paramètres de translation

Équation de projection pour le modèle orthographique

⇒ Modèle simplifié : la donnée de la *calibration intrinsèque* précise de la caméra n'est pas nécessaire

Amélioration de l'implémentation: RANSAC

- ↪ Sélectionne un sous ensemble de données et on les suppose pertinentes
- ↪ On regarde les autres données, et on compte celles qui s'accordent correctement avec le modèle
- ↪ En fonction du nombre de nouvelles données pertinentes on considère le sous ensemble et son modèle comme correcte

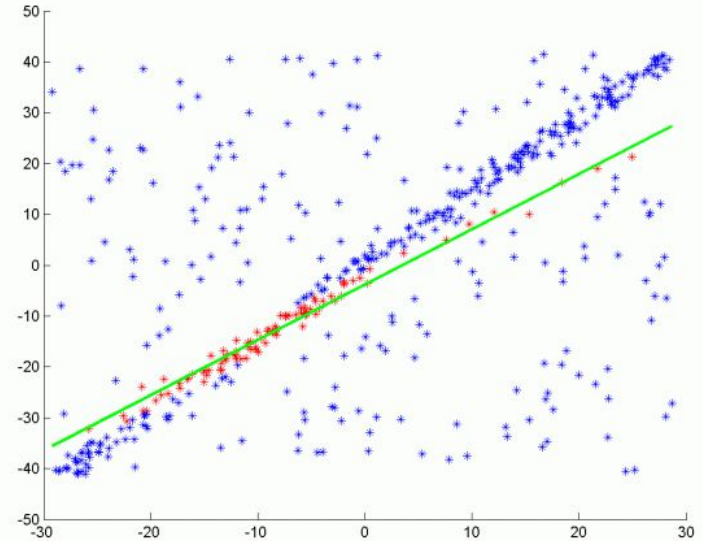
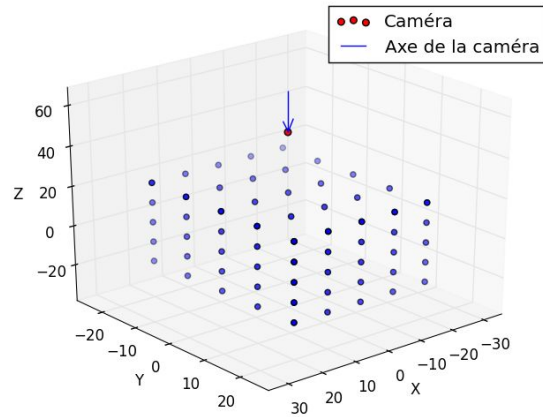
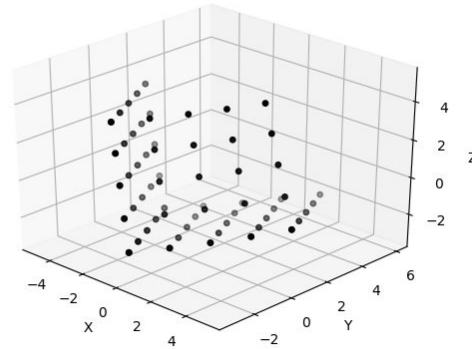
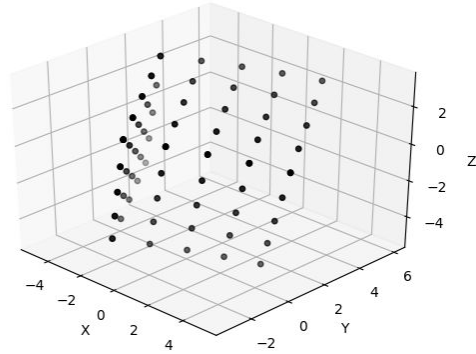


Illustration du principe de fonctionnement d'un filtre RANSAC

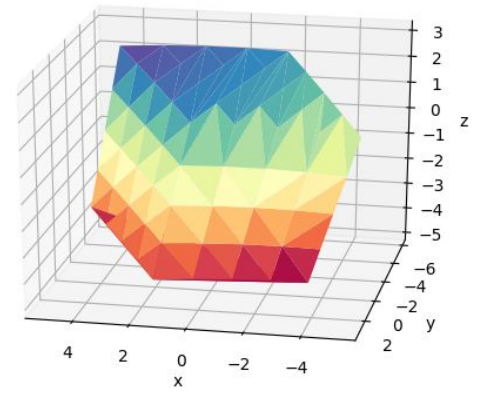
Exemple de reconstructions 3D



Objet tridimensionnel considéré : un demi-cube.



Reconstructions 3D du cube selon deux orientations



Reconstructions 3D avec triangulation de Delaunay

Introduction

I) Correspondances

II) Reconstruction 3D

III) Résultats et Analyse

IV) Discussions

Conclusions

Analyse de la précision de la reconstruction 3D

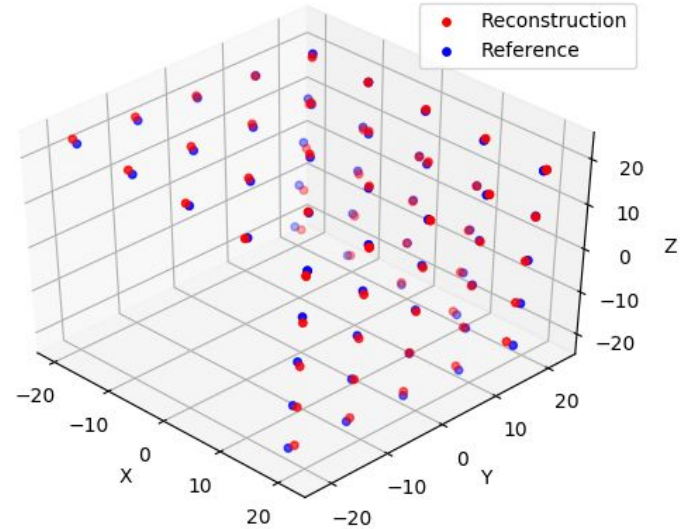
→ Utilisation de la méthode des **moindres carrés** afin de trouver la *transformation affine* rapprochant au mieux les points reconstruits des points de référence

Trouver $A \in \mathcal{M}(3,3)$ et $B \in \mathcal{M}(3,1)$ solutions de :

$$\min_{A,B} \|AX_{calc} + B - X_{ref}\|_2$$



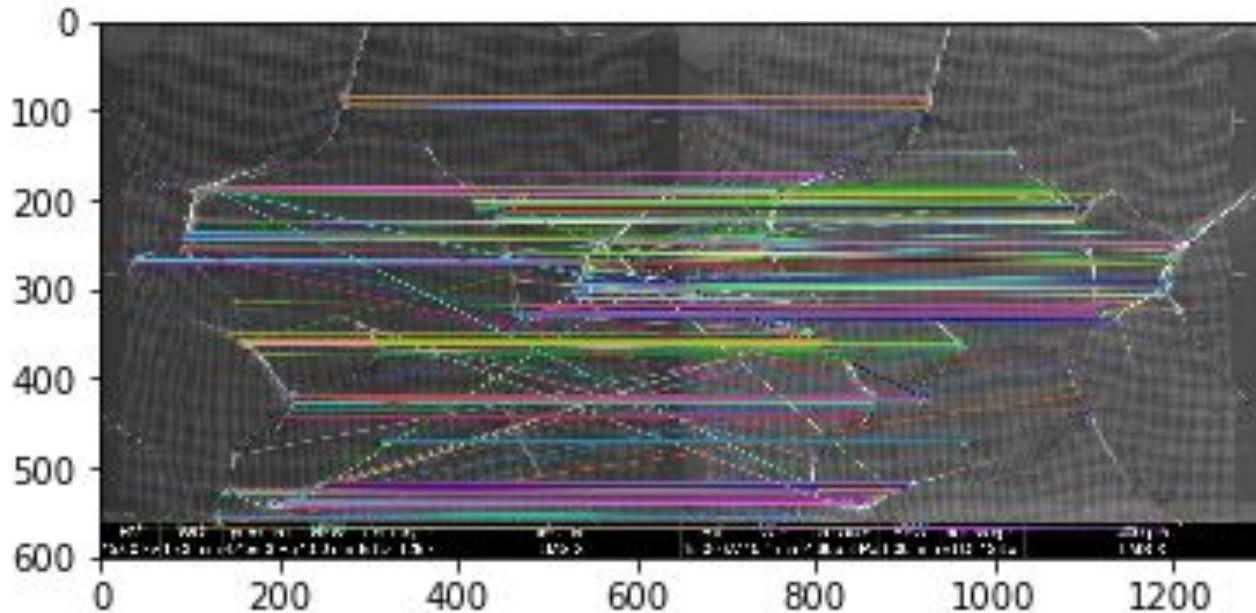
Erreur moyenne sur la position des points ramenée à la longueur du côté du cube : **2,83%**



Superposition du demi-cube de référence et du demi-cube reconstruit après post-traitement avec :

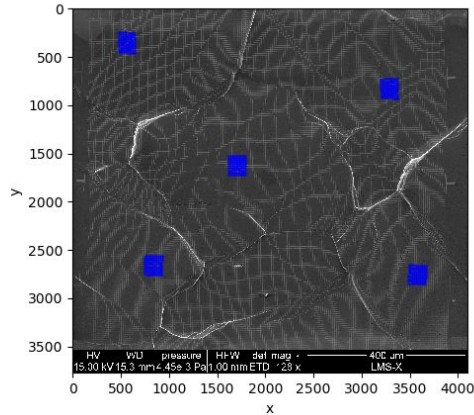
$$A = \begin{pmatrix} 0,76 & 0,61 & 0,20 \\ -0,59 & 0,79 & -0,14 \\ -0,25 & -0,15 & 0,97 \end{pmatrix} \begin{matrix} \\ R \\ \end{matrix} \begin{pmatrix} 6,28 & 0,01 & -0,03 \\ 0,01 & 6,19 & -0,08 \\ -0,03 & -0,08 & 6,24 \end{pmatrix} \begin{matrix} \\ U \\ \end{matrix} \text{ et } B = \begin{pmatrix} 7,09 \\ 6,76 \\ 6,11 \end{pmatrix}$$

Résultat du calcul des correspondances

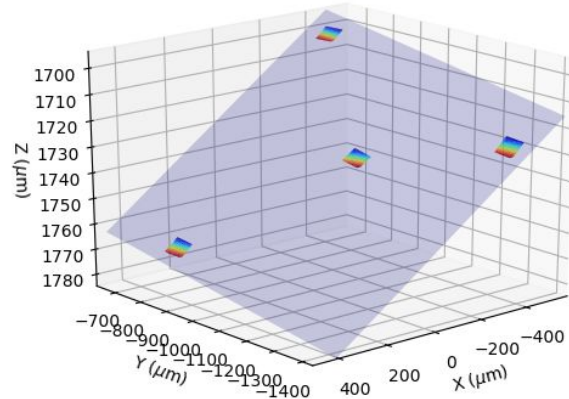
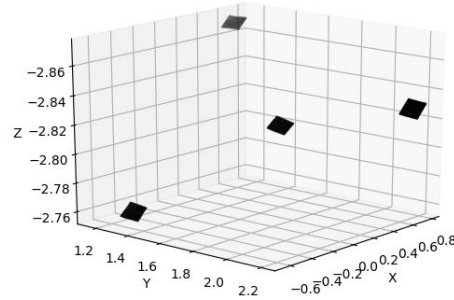


Correspondances entre deux projections différentes de l'échantillon

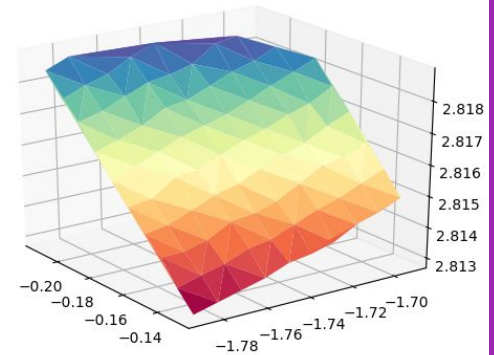
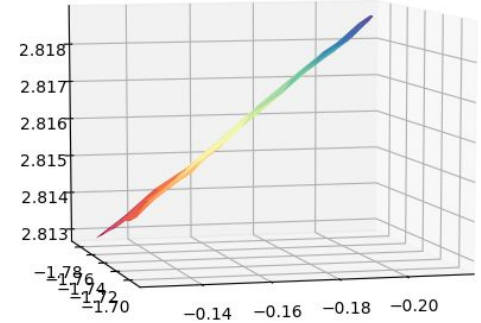
Résultats de la reconstruction 3D



Cartographie des zones de l'échantillon reconstituées

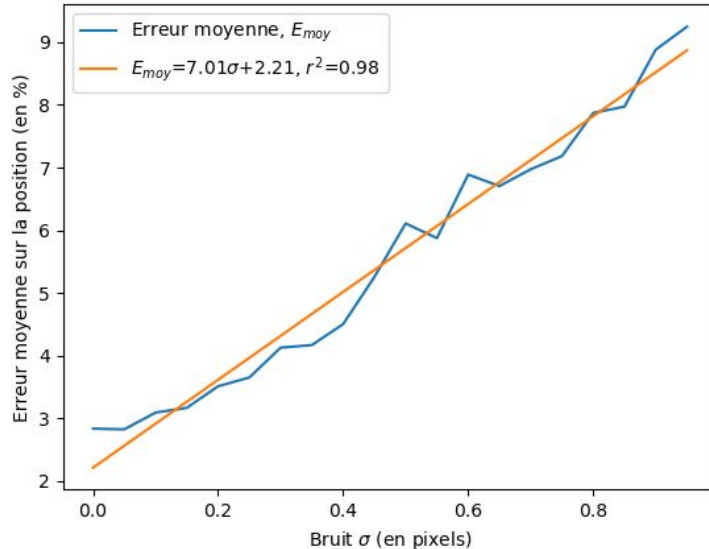


Reconstructions 3D de l'échantillon

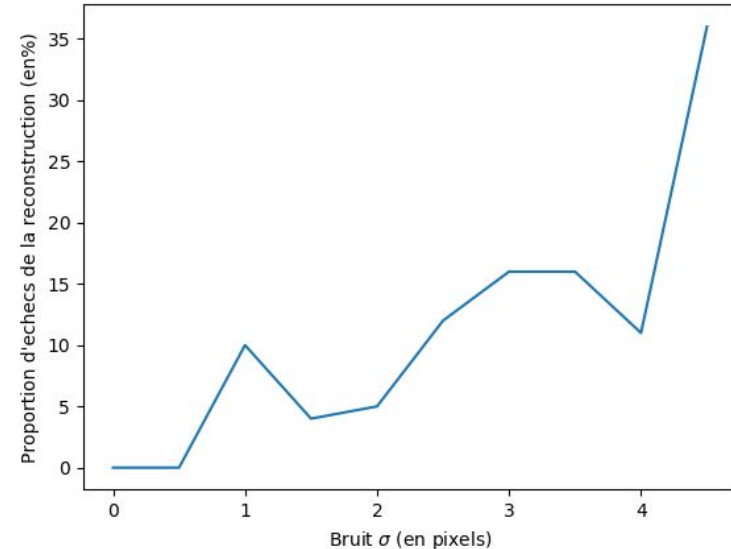


Vues de la reconstruction 3D de la surface d'une des zones de l'échantillon

Analyse de la robustesse de la reconstruction 3D



Evolution de la proportion d'échecs de l'algorithme en fonction de l'écart-type du bruit gaussien σ



Evolution de la proportion d'échecs de l'algorithme en fonction de l'écart-type du bruit gaussien σ

↪ Algorithme *peu robuste* et *non convergent* pour une perturbation trop importante

Introduction

I) Correspondances

II) Reconstruction 3D

III) Résultats et Analyse

IV) Discussions

Conclusions

Discussions sur le calcul des correspondances

Améliorations possibles :

- Pouvoir sortir la liste des points clés correspondants entre les différentes images pour *faire le lien entre reconstitution 3D et correspondances*
- Tester d'autres algorithmes

Discussions sur l'algorithme de reconstruction 3D

↪ Etude des limites du modèle de projection orthographique avec échelle

→ Etude des faiblesses du modèle : précision décroissante de l'algorithme face aux *faibles distances focales* et aux *surfaces quasi-planes* [2]

⇒ Tester la précision de l'algorithme pour différentes distances focales ↪ *Distances focales faibles* et *importantes* devant le relief considéré

⇒ Tester la précision et la réussite de l'algorithme face à un relief faible, voir nul ↪ Reconstruction d'un *disque*

Discussions sur l'algorithme de reconstruction 3D

- ↪ Implémentation d'une autre méthode de reconstruction 3D basées sur d'autres modèles de projection
- Implémentation du modèle plus général de projection perspective
 - ⇒ Évaluation *précise* de la *calibration intrinsèque* de la caméra
- Simplification du modèle en considérant les spécificités du matériel utilisé : le **MEB**
 - ⇒ Approximation par une *projection orthographique* à grossissement variable ↪ Vérification *expérimentale*

Conclusion

- Résultats finaux encourageants malgré quelques erreurs
- Bons résultats en correspondances
- Projet très intéressant, complet et ambitieux