



Power and productivity  
for a better world™



**6 Septembre 2012**

**Section Mécatronique**

**Stagiaire : GIANCOLA Silvio**

**Tuteur INSA : RENAUD Pierre**

**Tuteur ABB : CONCA Paolo**



**Présentation du projet de fin d'étude :**  
**Programmation offline de cellule robotisée à**  
**l'aide de techniques innovantes**



# Sommaire

- 1. Présentation du sujet**
- 2. Système d'acquisition**
- 3. Traitements des données**
- 4. Activités expérimentales**
- 5. Analyse métrologique**
- 6. Développements futurs**
- 7. Conclusions**

Power and productivity  
for a better world™



1. **Présentation du sujet**
2. *Système d'acquisition*
3. *Traitements des données*
4. *Expérimentations*
5. *Analyse métrologique*
6. *Développements futurs*
7. *Conclusions*

### Etude d'un besoin : La décoration de céramique



- *Décoration par peinture à la main*
- *Décoration par impression*

Peinture à la main

Impression

---

Avantages

---

Inconvénients

---

# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Présentation du sujet

1. *Présentation du sujet*
2. *Système d'acquisition*
3. *Traitements des données*
4. *Expérimentations*
5. *Analyse métrologique*
6. *Développements futurs*
7. *Conclusions*

### Existe-t-il une méthode de décoration alternative?

- *Qualité*
- *Rapidité*
- *Authenticité et unicité*
- *Quantité de production élevée*

### Utilisation de robots

- *Problématique : Comment les programmer ?*
- *Technique de programmation innovante :*
  - *Traçage des mouvements par vision*





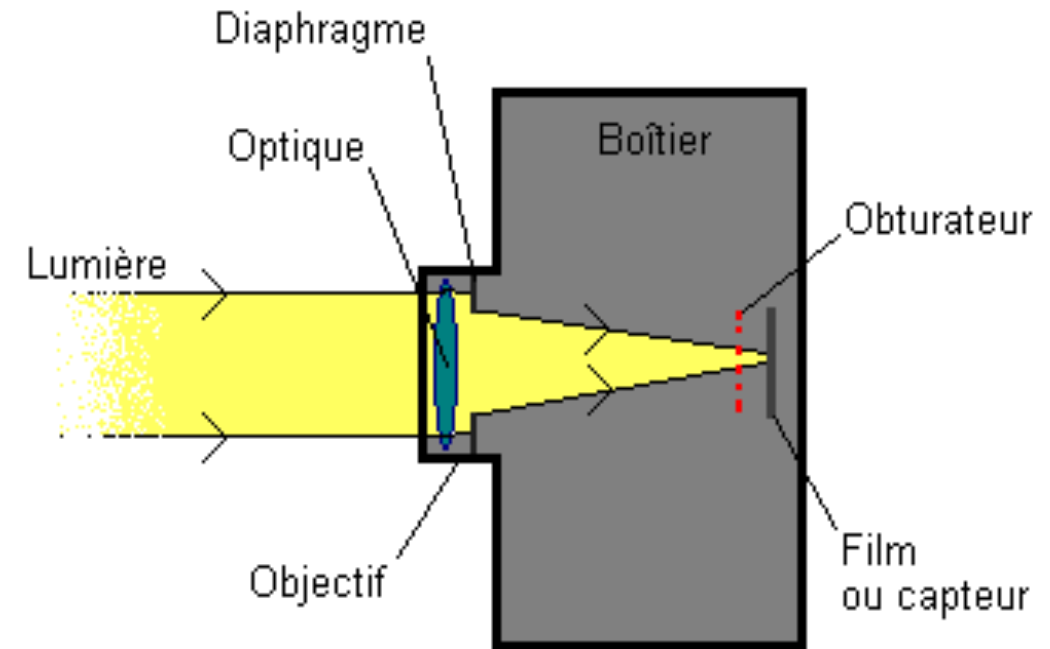
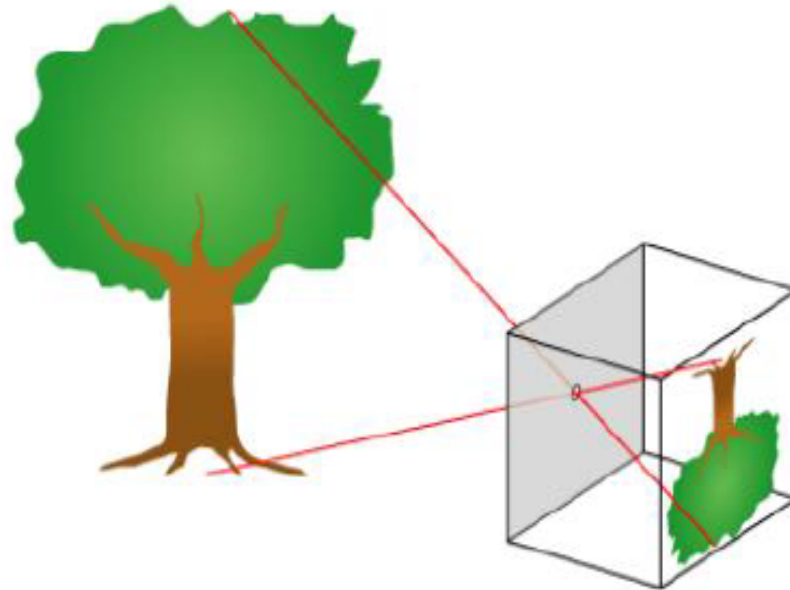
# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. Présentation du sujet
2. Systeme d'acquisition
  - a. Camera
  - b. Calibration
  - c. Stéréoscopie
  - d. Acquisition
3. Traitements des données
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Modèle de la caméra

- « Pinhole camera »



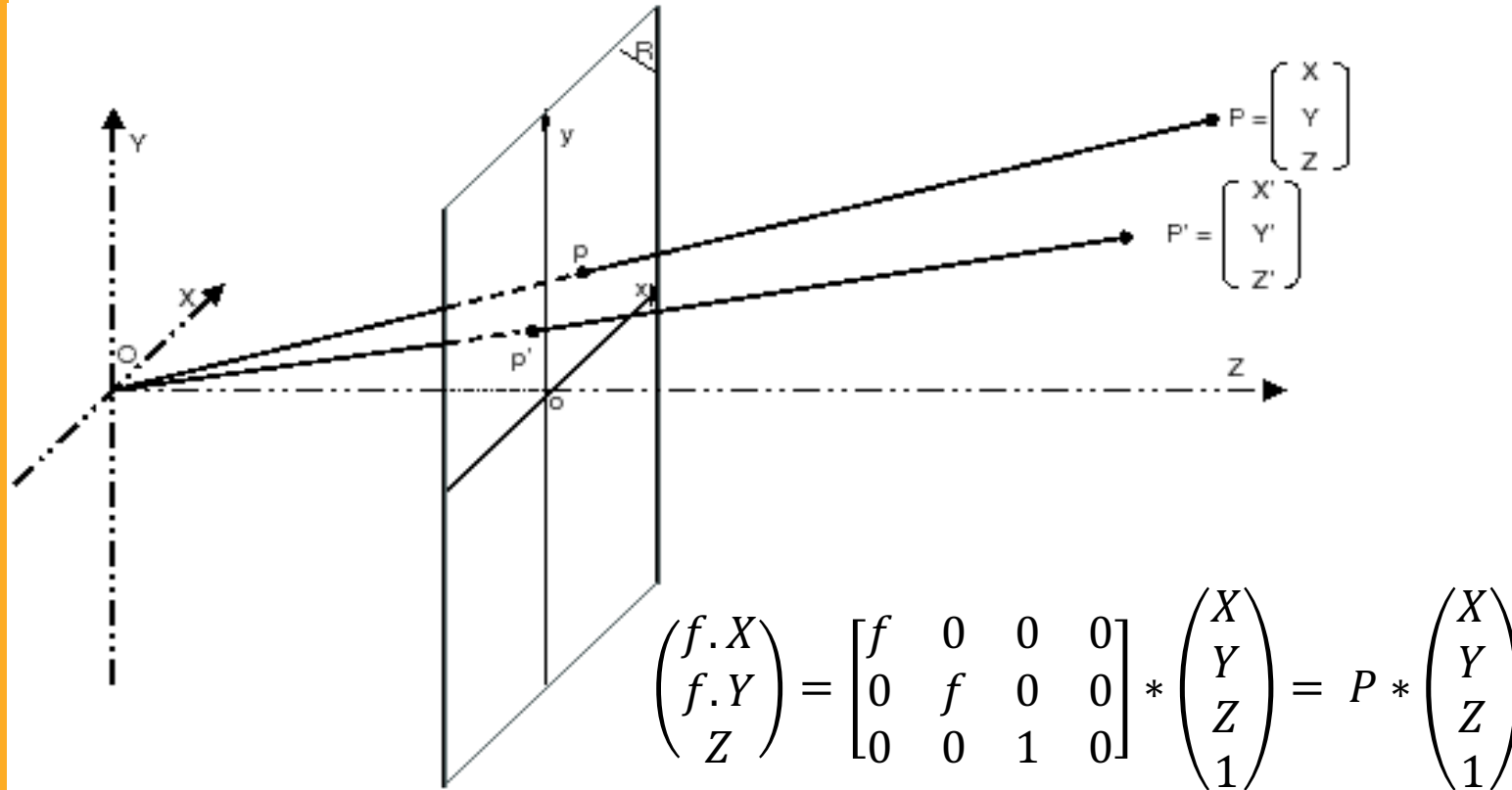
# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
  - a. Camera
  - b. Calibration
  - c. Stéréoscopie
  - d. Acquisition
3. Traitements des données
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Modèle de la caméra

- Modélisation géométrique



Liste des paramètres :  
- f

# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
  - a. Camera
  - b. Calibration
  - c. Stéréoscopie
  - d. Acquisition
3. Traitements des données
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Modèle de la caméra

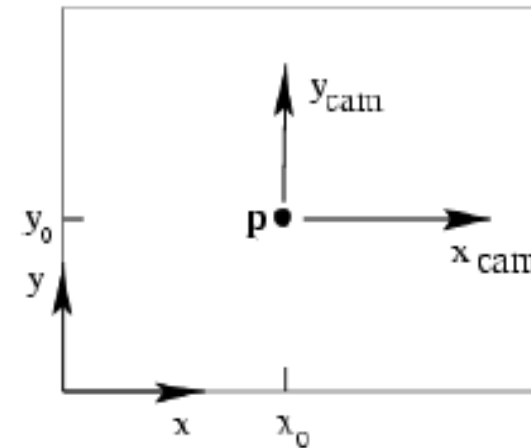
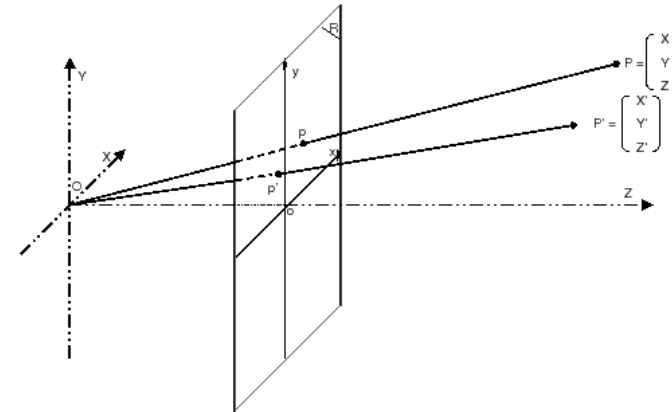
- Changement de repère

- $P = K * [I|0]$  avec  $K = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

- $P = K * [R|t]$

- Excentration entre optique et capteur

- $K = \begin{bmatrix} f & 0 & x_0 \\ 0 & f & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$



- ### Liste des paramètres :
- **f**
  - **t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>, t<sub>3</sub>**
  - **r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>, r<sub>3</sub>**
  - **x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>**

# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. Présentation du sujet

2. Systeme d'acquisition

a. Camera

b. Calibration

c. Stéréoscopie

d. Acquisition

3. Traitements des données

4. Expérimentations

5. Analyse métrologique

6. Développements futurs

7. Conclusions

### Modèle de la caméra

- Pixels non carrés

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

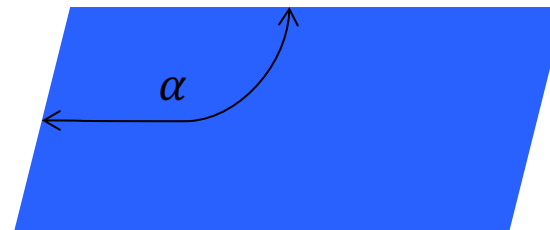


$$c_y = \frac{1}{m_y} = \frac{f}{f_y}$$

$$c_x = \frac{1}{m_x} = \frac{f}{f_x}$$

- Pixels non rectangulaires

$$s = \cos(\alpha) * f$$



### Liste des

paramètres :

-  $f_x, f_y$

-  $t_1, t_2, t_3$

-  $r_1, r_2, r_3$

-  $x_0, y_0$

-  $s$

# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
  - a. Camera
  - b. Calibration
  - c. Stéréoscopie
  - d. Acquisition
3. Traitements des données
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Modèle de la caméra

- Distorsions :

- Distorsion radiale

- $\hat{x} = x_0 + (x - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots)$

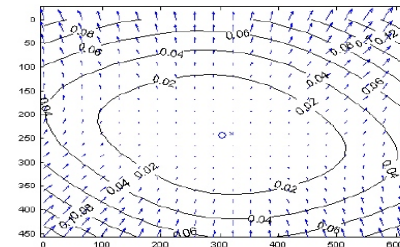
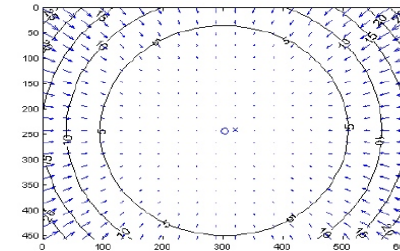
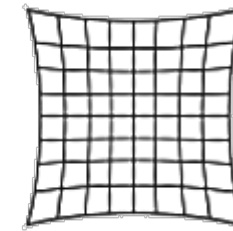
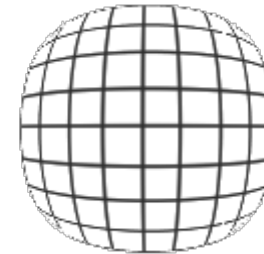
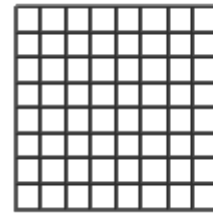
- $\hat{y} = y_0 + (y - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots)$

- Avec  $r = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$

- Distorsion tangentielle

- $x_d = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) * x_n + dx$

- $dx = \begin{bmatrix} 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2) \\ 2p_2xy + p_1(r^2 + 2y^2) \end{bmatrix}$



### Liste des paramètres :

- $f_x, f_y$
- $t_1, t_2, t_3$
- $r_1, r_2, r_3$
- $x_0, y_0$
- $s$
- $k_1, k_2, k_3$
- $p_1, p_2$



# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition



1. Présentation du sujet

2. Système d'acquisition

a. Camera

b. Calibration

c. Stéréoscopie

d. Acquisition

3. Traitements des données

4. Expérimentations

5. Analyse métrologique

6. Développements futurs

7. Conclusions

### Modèle de la caméra

- 5 paramètres intrinsèques :

- $f_x$  et  $f_y$ , la distance focale exprimée dans les deux directions du plan image,
- $x_0$  et  $y_0$ , les deux coordonnées du centre optique,
- $s$ , le « skew ».

- 6 paramètres extrinsèques :

- $r_1$ ,  $r_2$  et  $r_3$ , les trois paramètres de rotation exprimés en angle d'Euler,
- $t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$ , les trois paramètres de translation.

- 5 paramètres de distorsion :

- $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$ , les trois paramètres de distorsions radiales,
- $p_1$  et  $p_2$ , les deux paramètres de distorsions tangentielles.

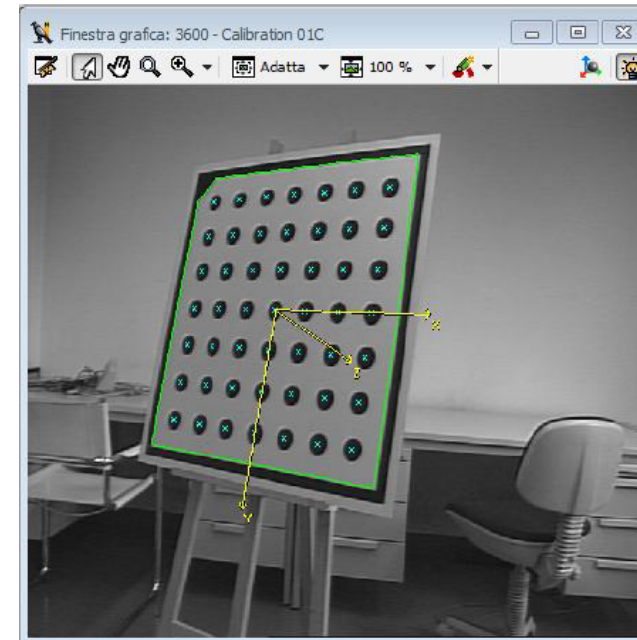
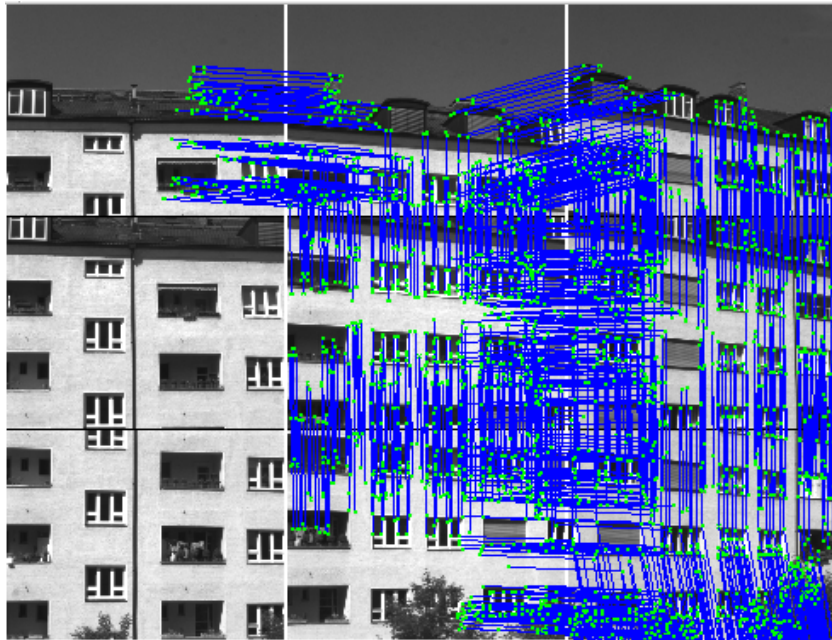
# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. *Présentation du sujet*
2. *Systeme d'acquisition*
  - a. *Camera*
  - b. *Calibration*
  - c. *Stéréoscopie*
  - d. *Acquisition*
3. *Traitements des données*
4. *Expérimentations*
5. *Analyse métrologique*
6. *Développements futurs*
7. *Conclusions*

### Calibration

- *Processus de détermination des paramètres qui définissent le modèle de la caméra*
  - *Auto-étalonnage (« Self-Calibration »)*
  - *Utilisation de calibrateurs*



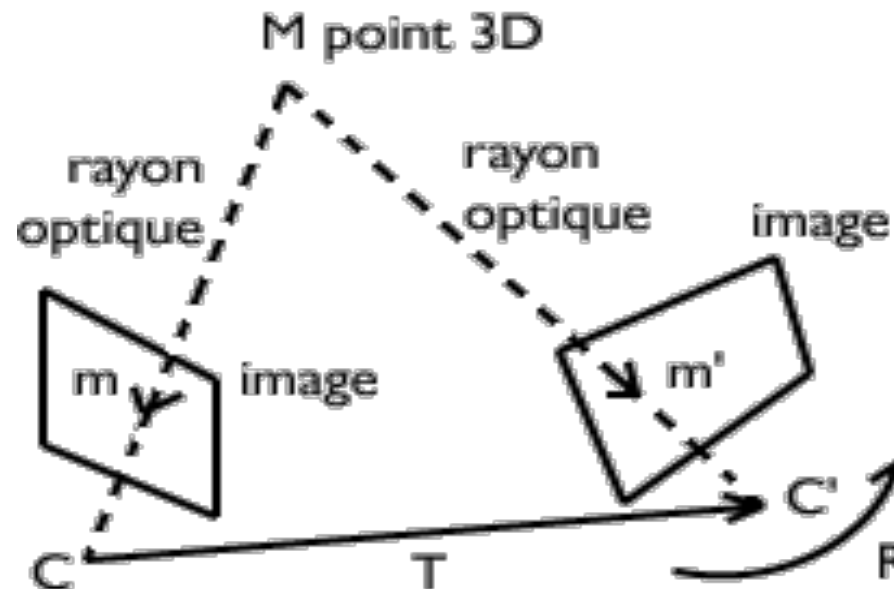
# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
  - a. Camera
  - b. Calibration
  - c. Stéréoscopie
  - d. Acquisition
3. Traitements des données
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Le modèle de stéréoscopie

- *Technique permettant de retrouver des informations sur une structure tridimensionnelle, grâce à au moins un couple d'images acquises de manière synchrone et à partir de positions différentes*



# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. Présentation du sujet

2. Systeme d'acquisition

a. Camera

b. Calibration

c. Stéréoscopie

d. Acquisition

3. Traitements des données

4. Expérimentations

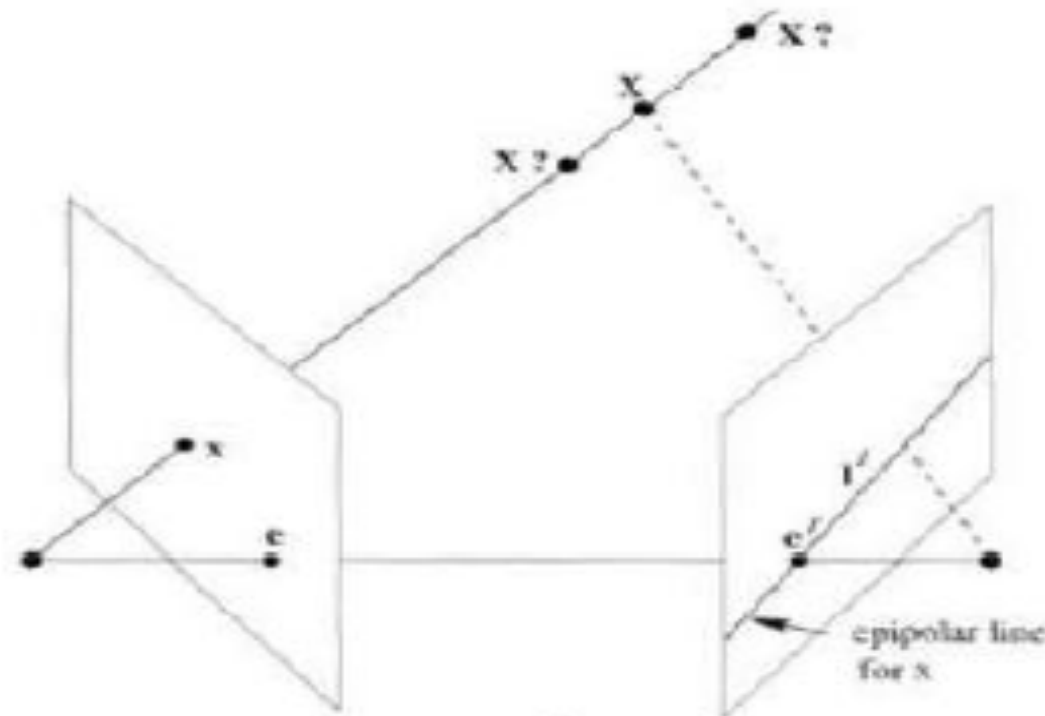
5. Analyse métrologique

6. Développements futurs

7. Conclusions

### Le modèle de stéréoscopie

- Stéréoscopie de base avec deux caméras



# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. *Présentation du sujet*

2. *Systeme d'acquisition*

a. *Camera*

b. *Calibration*

c. *Stéréoscopie*

d. *Acquisition*

3. *Traitements des données*

4. *Expérimentations*

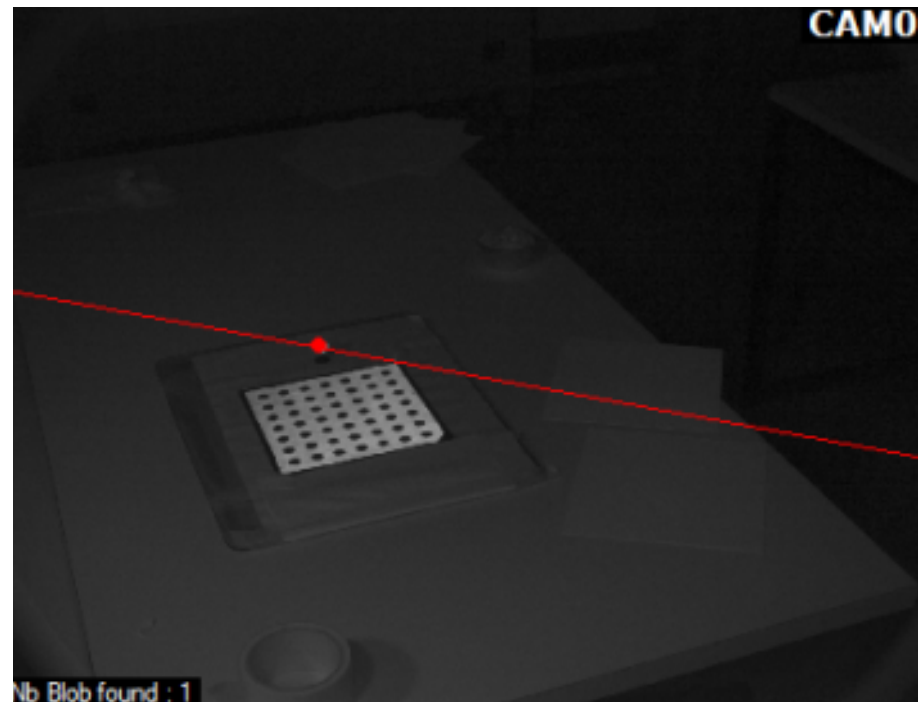
5. *Analyse métrologique*

6. *Développements futurs*

7. *Conclusions*

### Le modèle de stéréoscopie

- *Stéréoscopie de base avec deux caméras*
  - *Distance d'un point à une droite épipolaire*





# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. *Présentation du sujet*

2. *Systeme d'acquisition*

a. *Camera*

b. *Calibration*

c. *Stéréoscopie*

d. *Acquisition*

3. *Traitements des données*

4. *Expérimentations*

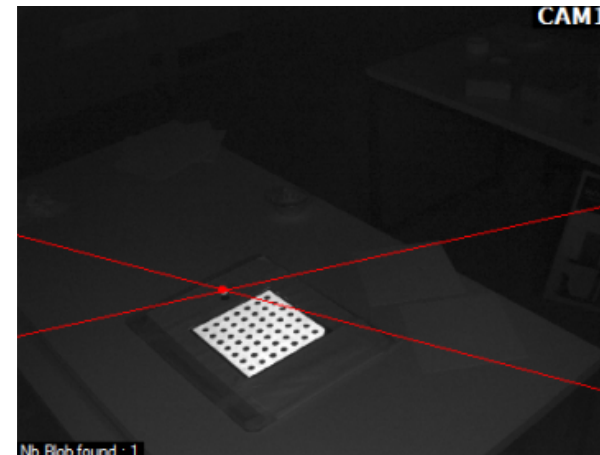
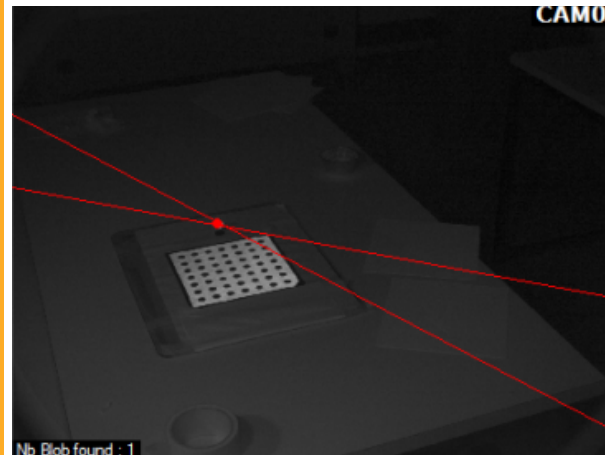
5. *Analyse métrologique*

6. *Développements futurs*

7. *Conclusions*

### Le modèle de stéréoscopie

- *Stéréoscopie modifiée avec trois caméras*
  - *Distance d'un point à deux droite épipolaire*
  - *Intersection de deux droites → point*



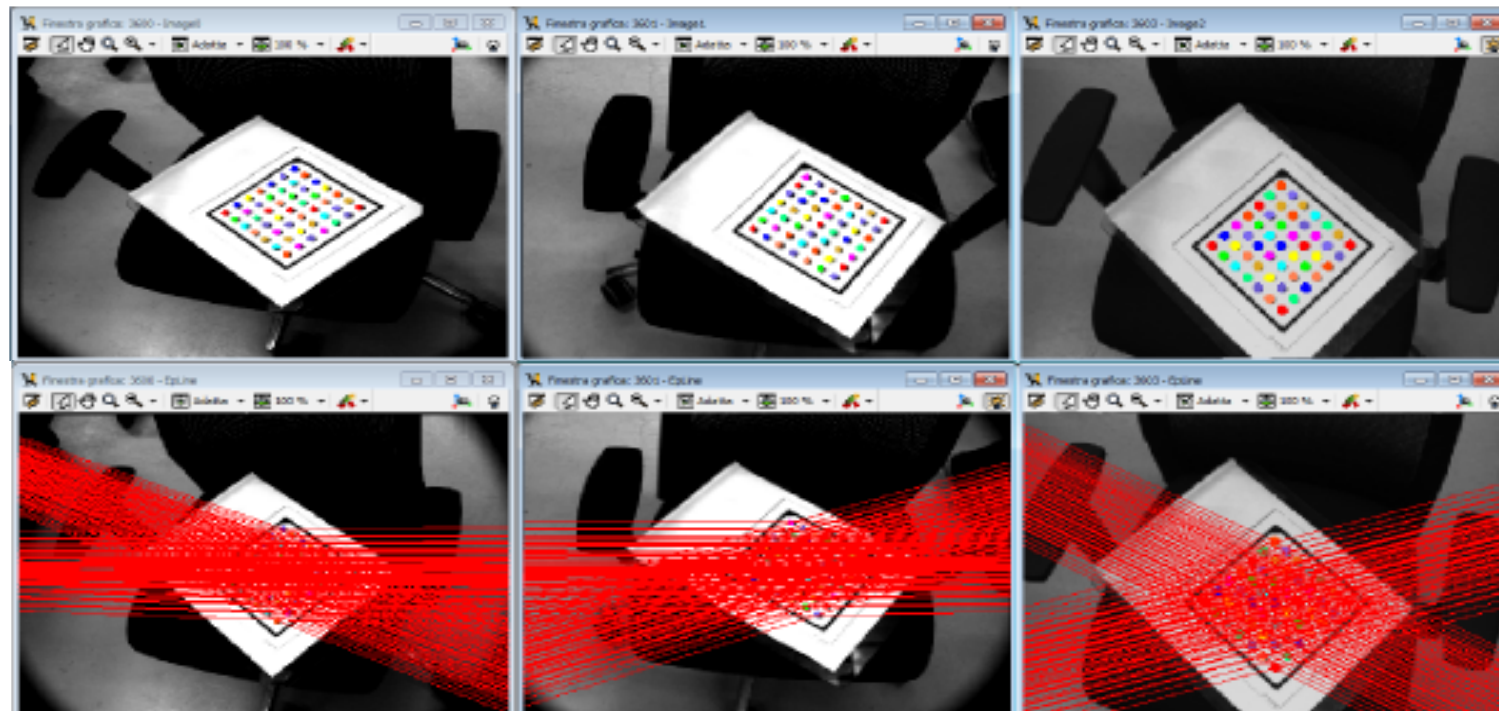
# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. *Présentation du sujet*
2. *Systeme d'acquisition*
  - a. *Camera*
  - b. *Calibration*
  - c. *Stéréoscopie*
  - d. *Acquisition*
3. *Traitements des données*
4. *Expérimentations*
5. *Analyse métrologique*
6. *Développements futurs*
7. *Conclusions*

### Le modèle de stéréoscopie

- *Stéréoscopie modifiée avec trois caméras*
  - *Exemple avec 49 points*



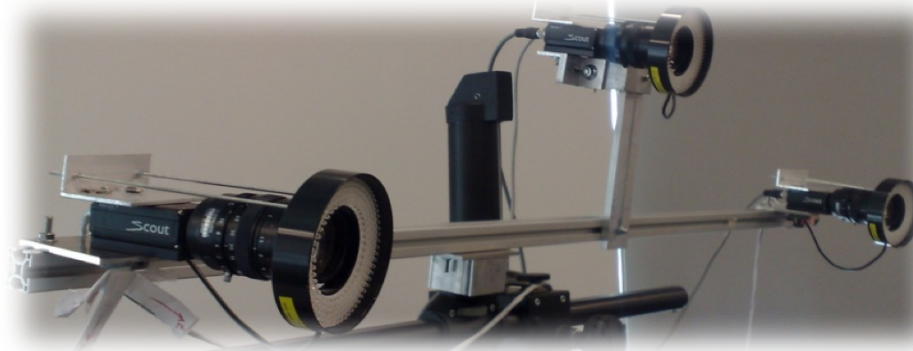
# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. Présentation du sujet
2. Systeme d'acquisition
  - a. Camera
  - b. Calibration
  - c. Stéréoscopie
  - d. Acquisition
3. Traitements des données
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Acquisition

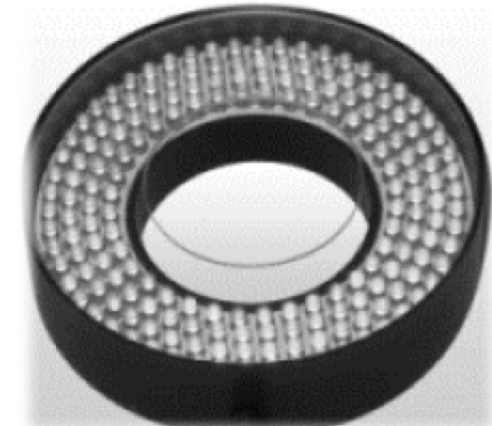
- Présentation du matériel
  - Caméras numériques



- Instrumentation par sphères réfléchissantes (« blobs »)



- Systeme d'illuminateurs + filtres



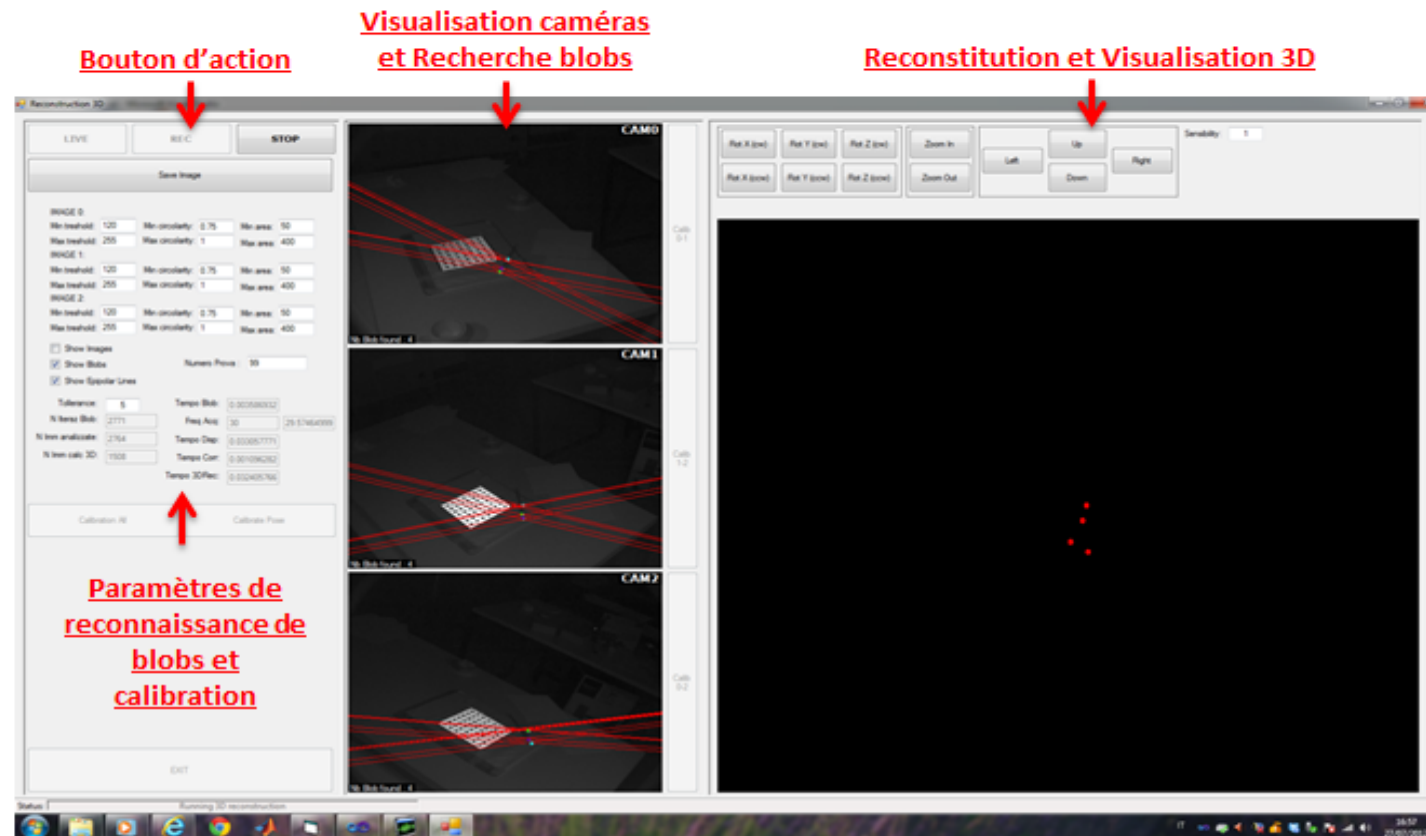
# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Systeme d'acquisition

1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
  - a. Camera
  - b. Calibration
  - c. Stéréoscopie
  - d. Acquisition
3. Traitements des données
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Acquisition

- Méthodologie de mesure



Calibration du système stéréoscopique

Acquisition des données par la stéréoscopie

Traitement des données

Réalisation du mouvement au robot

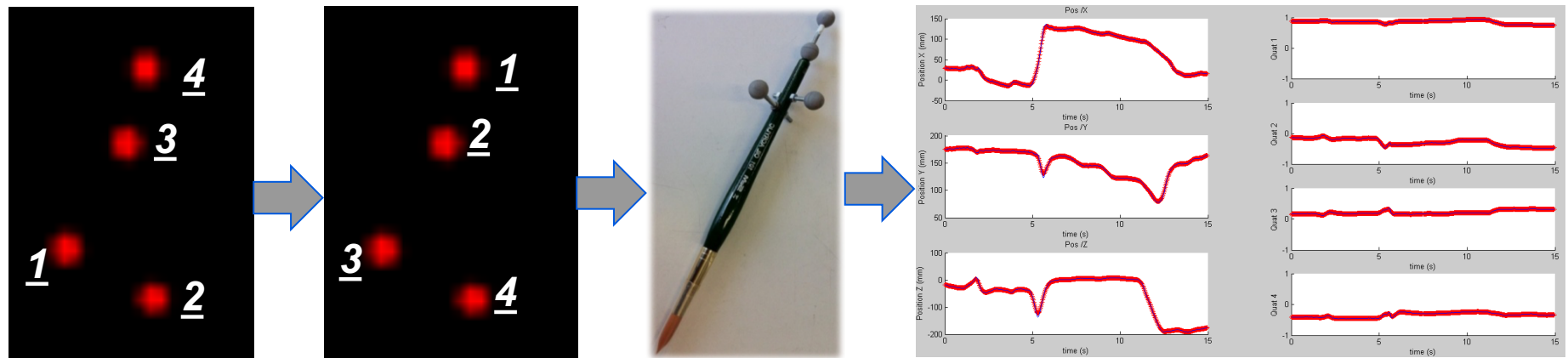
# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Traitements des données

1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
3. Traitements des données
  - a. Réordination
  - b. Rigid Registration
  - c. Filtrage
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Traitements des données acquises

- Réordination des « blobs »
- Recalage rigide (« Rigid Registration »)
- Filtrage des données





1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
3. Traitements des données
  - a. Réordination
  - b. Rigid Registration
  - c. Filtrage
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Réordination des « blobs »

- *Méthode expérimentale utilisant la matrice des distances*

$$\begin{bmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & 0 & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & 0 & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & 0 \end{bmatrix}$$

- *Ex : Inversion entre blob 2 et 3 :*

$$\begin{bmatrix} 0 & d_{13} & d_{12} & d_{14} \\ d_{31} & 0 & d_{32} & d_{34} \\ d_{21} & d_{23} & 0 & d_{24} \\ d_{41} & d_{43} & d_{42} & 0 \end{bmatrix}$$

- *Analyse des informations de la matrice*
- *Inversions pour réordonner les données*

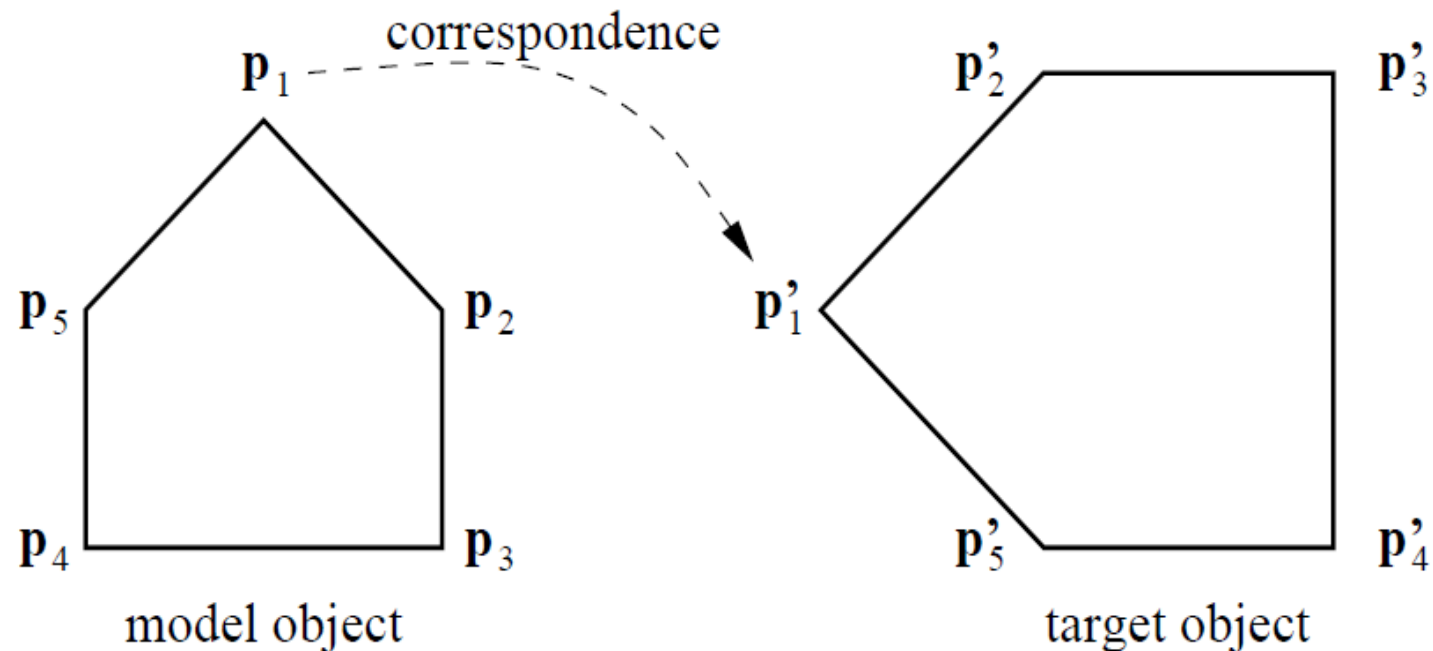
# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Traitements des données

1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
3. Traitements des données
  - a. Réordination
  - b. Rigid Registration
  - c. Filtrage
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Recalage rigide (« Rigid Registration »)

- Récupération des rotations et translations d'un nuage de points par rapport à un modèle



1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
3. Traitements des données
  - a. Réordination
  - b. Rigid Registration
  - c. Filtrage
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Recalage rigide (« Rigid Registration »)

- Récupération des rotations et translations d'un nuage de points par rapport à un modèle
- Décomposition en valeurs singulières (SVD)
  - $M = \sum_{i=1}^n r'_i * r_i^T = U * S * V,$   
avec  $r'_i$  et  $r_i$  les écarts des points d'un nuage au barycentre correspondant
  - Rotation =  $U * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \text{sign}(\det(U * V^T)) \end{bmatrix} * V^T$
  - Translation =  $\hat{p}' - \text{Rotation} * \hat{p}$   
avec  $\hat{p}'$  et  $\hat{p}$  les barycentres des nuages

# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Traitements des données



1. *Présentation du sujet*
2. *Système d'acquisition*
3. **Traitements des données**
  - a. *Réordination*
  - b. *Rigid Registration*
  - c. **Filtrage**
4. *Expérimentations*
5. *Analyse métrologique*
6. *Développements futurs*
7. *Conclusions*

### Filtrages et interpolations :

- *Interpolations cubique / Spline*
- *Interpolations par courbes de Bézier*
- *Interpolations par B-Spline (NURBS)*
- *Filtres passe-bas*

### Tests :

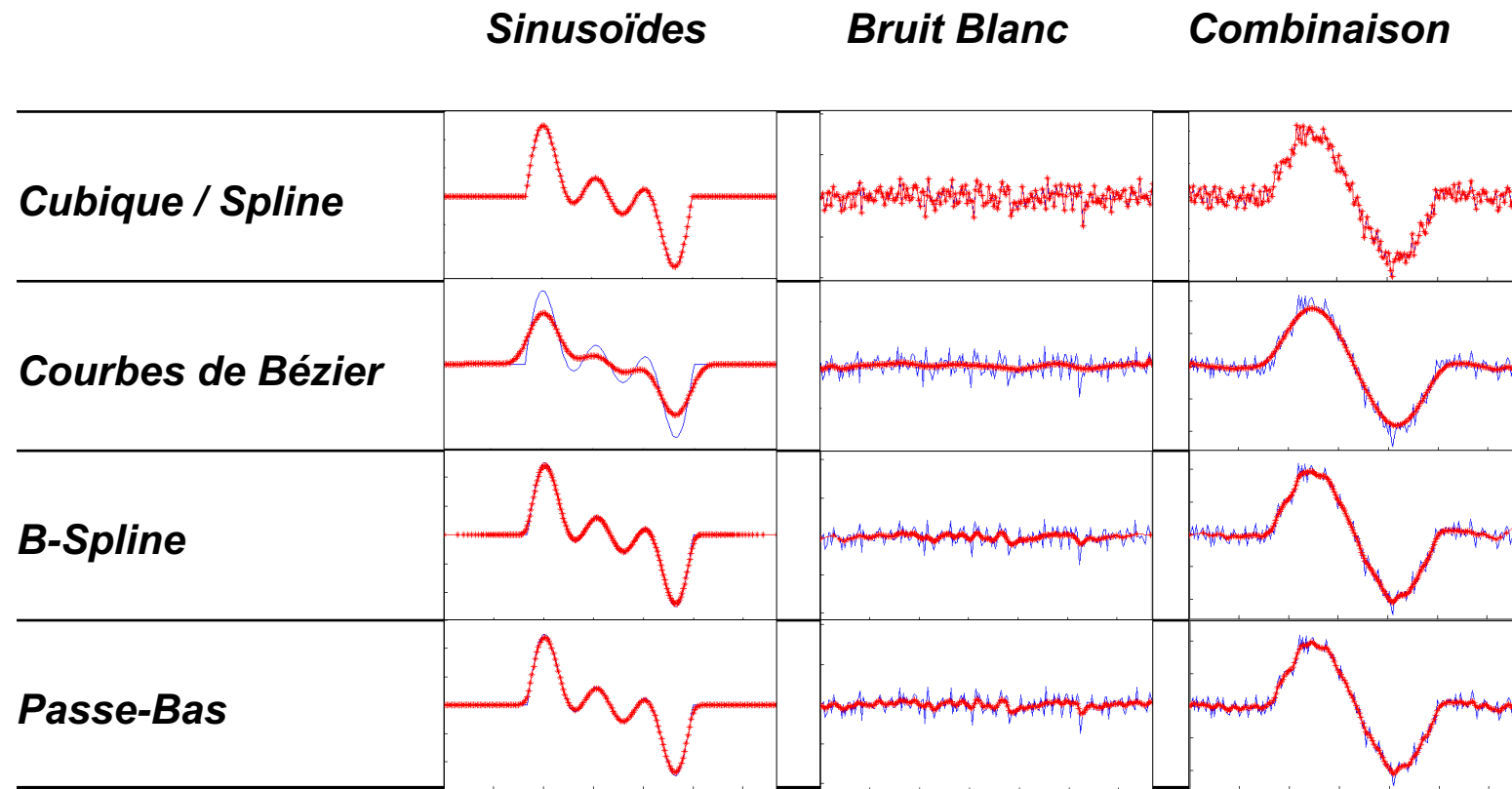
- *Suivi de sinusoides*
- *Atténuation d'un bruit blanc*
- *Combinaison sinusoides et bruit blanc*
- *Données acquises*

# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Traitements des données

1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
3. Traitements des données
  - a. Réordination
  - b. Rigid Registration
  - c. Filtrage
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Filtrages et interpolations





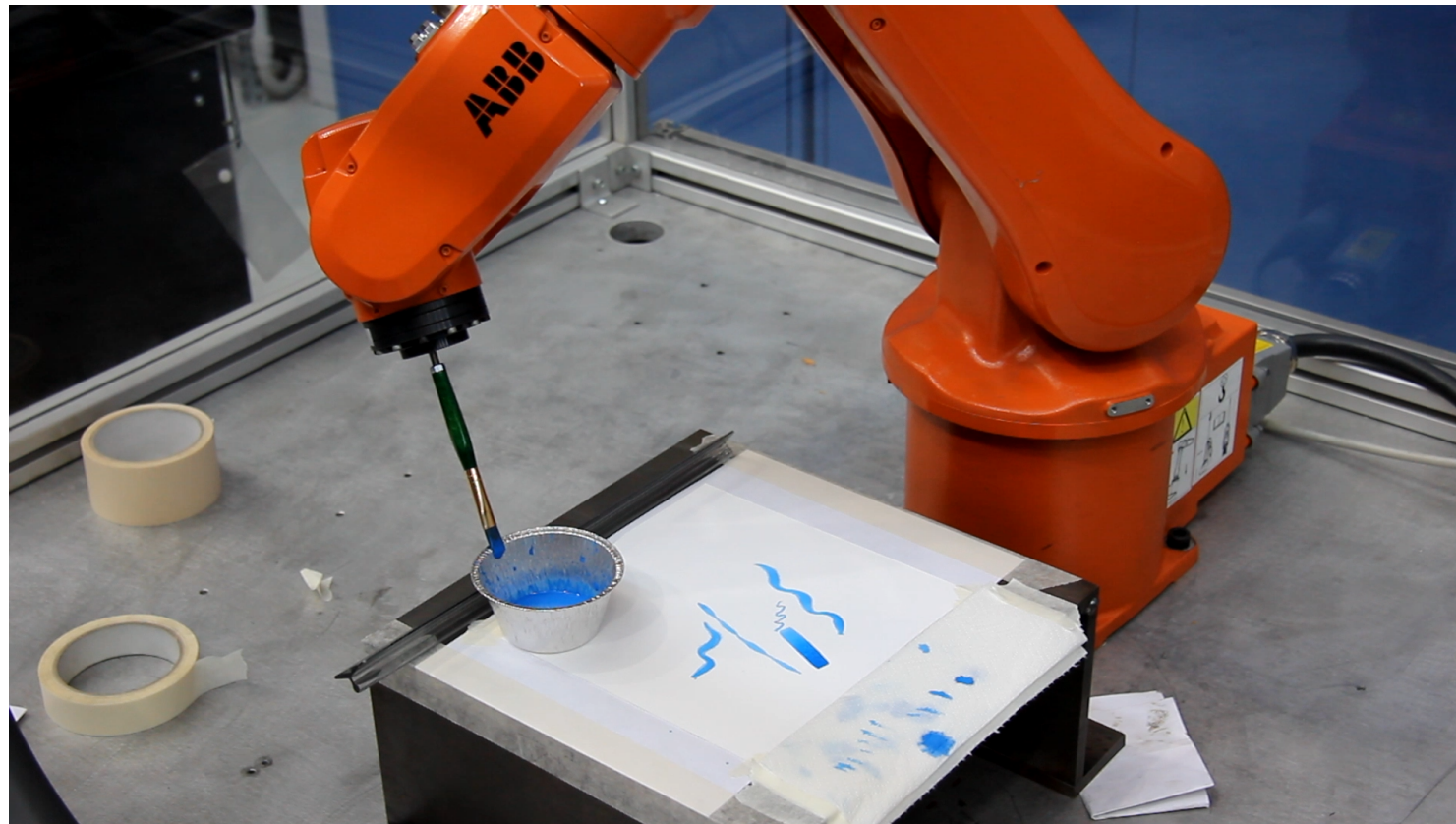
# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Expérimentations

1. *Présentation du sujet*
2. *Système d'acquisition*
3. *Traitements des données*
4. **Expérimentations**
  - a. **Cellule robotisée**
  - b. *Essais*
5. *Analyse métrologique*
6. *Développements futurs*
7. *Conclusions*

### Cellule robotisée

- *Modèle du robot : ABB IRB120*



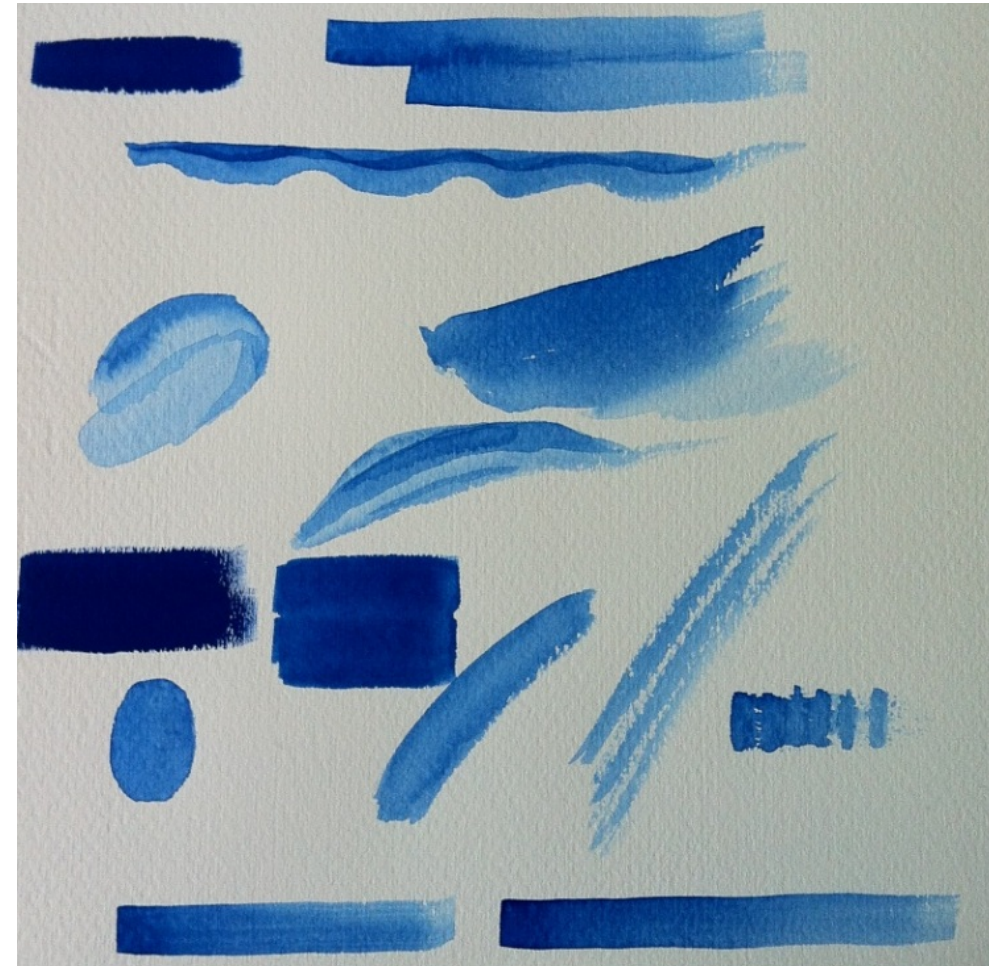
# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Expérimentations

1. *Présentation du sujet*
2. *Système d'acquisition*
3. *Traitements des données*
4. **Expérimentations**
  - a. *Cellule robotisée*
  - b. **Essais**
5. *Analyse métrologique*
6. *Développements futurs*
7. *Conclusions*

### Essais

- *Effets de peinture recherchés :*
  - *Nuance de couleurs*
  - *Écrasement de la pointe*
  - *Charge du pinceau*
  
- *Venue d'une décoratrice :*
  - *Enregistrement de mouvements*
  - *Duplication de ces mouvements*



# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Expérimentations



### Essais – Vidéo

1. *Présentation du sujet*
2. *Système d'acquisition*
3. *Traitements des données*
4. **Expérimentations**
  - a. *Cellule robotisée*
  - b. **Essais**
5. *Analyse métrologique*
6. *Développements futurs*
7. *Conclusions*

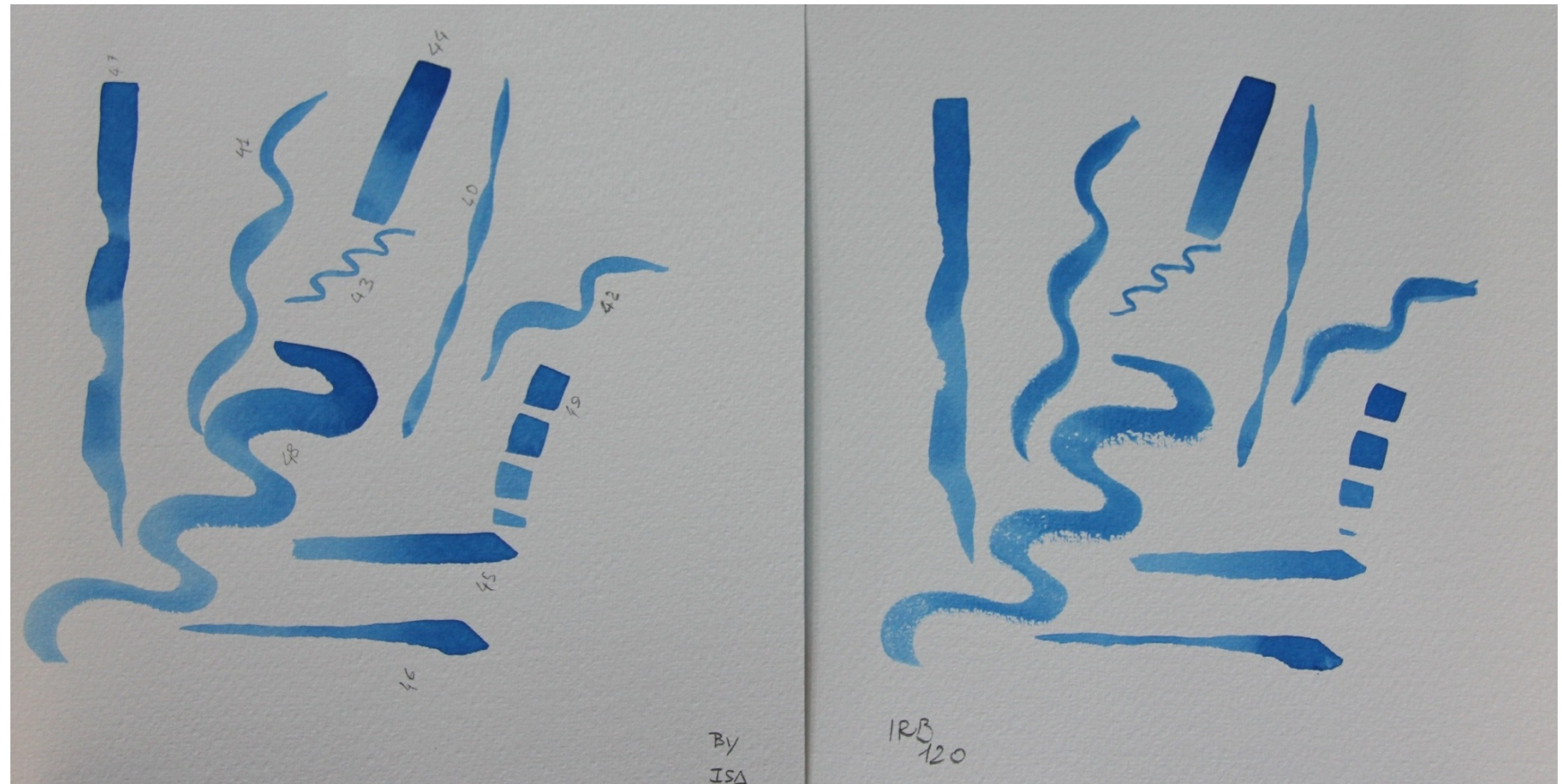


# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Expérimentations

1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
3. Traitements des données
4. Expérimentations
  - a. Cellule robotisée
  - b. Essais
5. Analyse métrologique
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Essais – Résultats



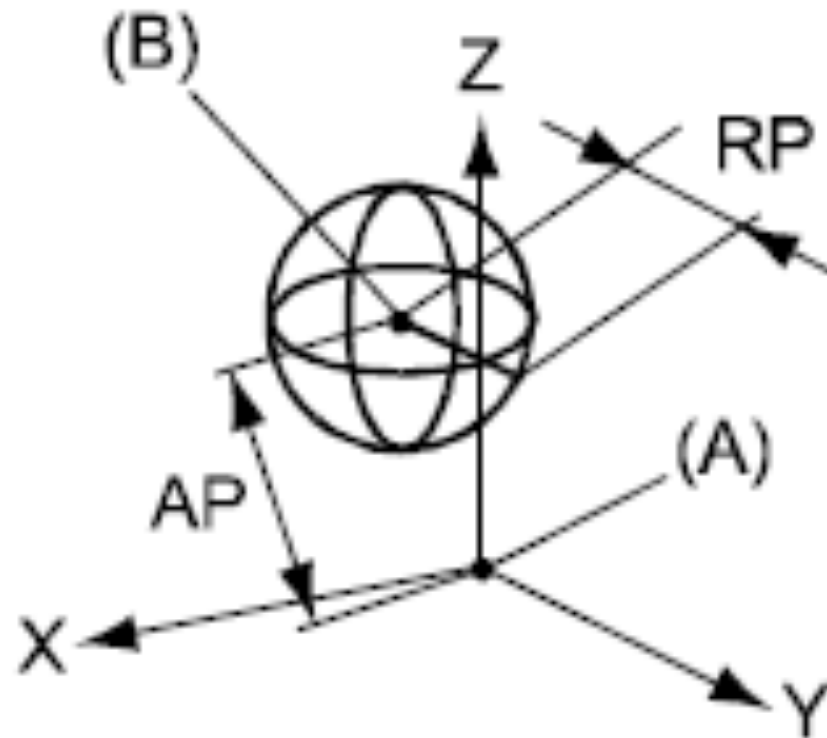
# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Analyse métrologique

1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
3. Traitements des données
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
  - a. Précision
  - b. Répétabilité
  - c. Bilan
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Analyse métrologique

- Performances conformes à la norme ISO 9283



- Précision (AP) : écart par rapport à la position commandée
- Répétabilité (RP) : écart entre diverses positions entre elles

# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Analyse métrologique

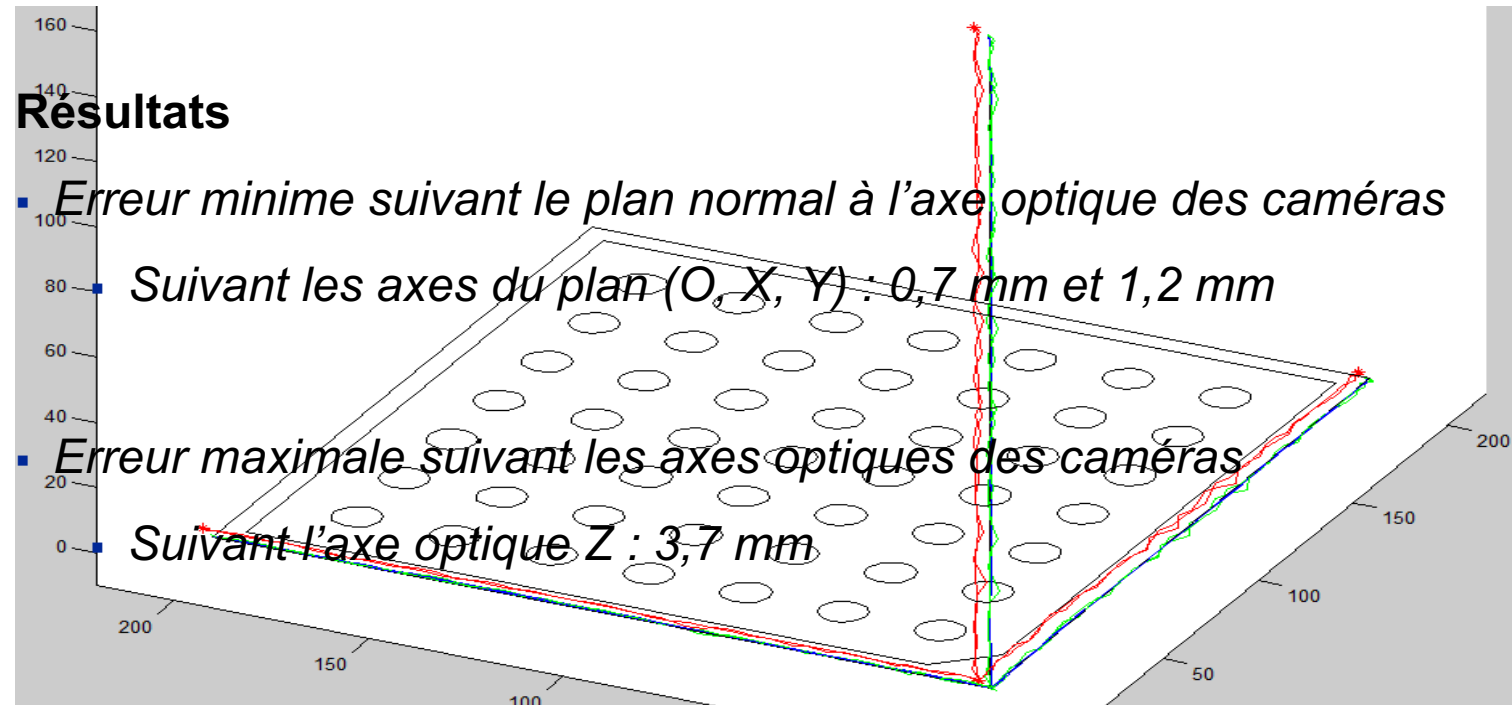
1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
3. Traitements des données
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
  - a. Précision
  - b. Répétabilité
  - c. Bilan
6. Développements futurs
7. Conclusions

### Précision

- Analyse de points d'une trajectoire suivant les axes du repère
- Utilisation du recalage rigide sur un nuage de point

### Résultats

- Erreur minime suivant le plan normal à l'axe optique des caméras
- Suivant les axes du plan (O, X, Y) : 0,7 mm et 1,2 mm
- Erreur maximale suivant les axes optiques des caméras
- Suivant l'axe optique Z : 3,7 mm





# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Analyse métrologique

1. Présentation du sujet
2. Système d'acquisition
3. Traitements des données
4. Expérimentations
5. Analyse métrologique
  - a. Précision
  - b. Répétabilité
  - c. Bilan
6. Développements futurs
7. Conclusions

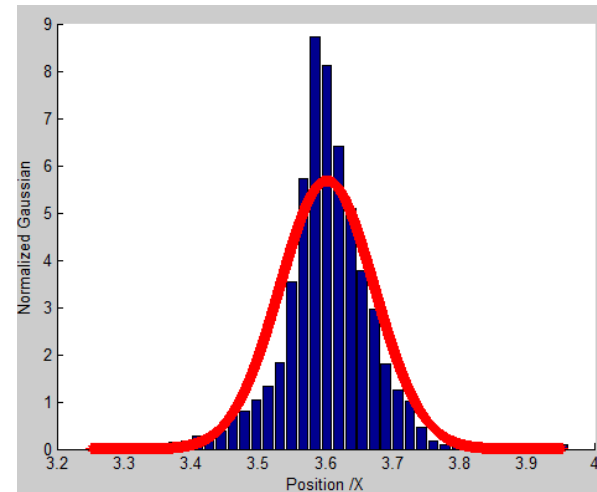
### Répétabilité

- Analyse de la position à l'origine du repère
- Etude statistique de gaussienne

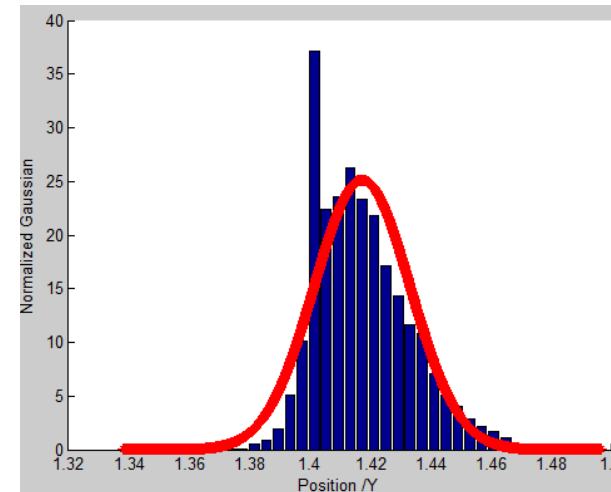
### Résultats

- Erreurs faibles suivant les 3 axes :

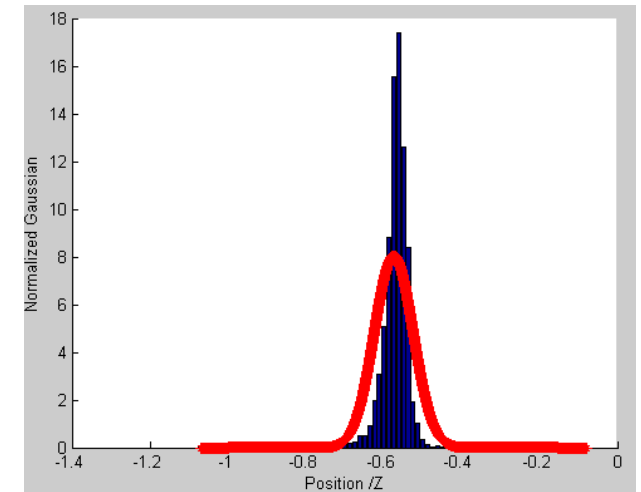
- Suivant X : 0,21 mm



- Suivant Y : 0,05 mm



- Suivant Z : 0,15 mm



# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Analyse métrologique



1. *Présentation du sujet*
2. *Système d'acquisition*
3. *Traitements des données*
4. *Expérimentations*
5. **Analyse métrologique**
  - a. *Précision*
  - b. *Répétabilité*
  - c. **Bilan**
6. *Développements futurs*
7. *Conclusions*

- **Bilan**
- *Erreur de répétabilité faible*
- *Erreur statique importante*

### **Solution mise en place**

- *Définition du modèle du recalage rigide*
- *Suppression de cet offset dans la reproduction*

### **Qualification du système**

- *Essai* → **OK**
- *Analyse métrologique* → **OK**

# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Développements futurs

1. *Présentation du sujet*
2. *Système d'acquisition*
3. *Traitements des données*
4. *Expérimentations*
5. *Analyse métrologique*
6. **Développements futurs**
7. *Conclusions*

### Développements futurs

- *Déploiement industriel de la cellule robotisée*
- *Utilisation de différentes couleurs de peinture*
- *Utilisation de différents pinceaux spéciaux pour la peinture sur céramique*
- *Ajout d'une pince pour le changement d'outil*
- *Insertion dans une ligne de production*



# Présentation du Projet de Fin d'Etude

## Conclusions

1. *Présentation du sujet*
2. *Système d'acquisition*
3. *Traitements des données*
4. *Expérimentations*
5. *Analyse métrologique*
6. *Développements futurs*
7. **Conclusions**

### Conclusions sur le projet

- *Projet complet liant recherche, développement et industrie*
- *Projet innovant*
- *Découverte du monde de la vision et de la robotique industrielle*
- *Enrichissement par l'étude dans une langue étrangère*
- *Murissement plan personnel et professionnel (route tracée pour le futur)*

