



Conception d'un capteur de stéréovision omnidirectionnelle : architecture, étalonnage et applications à la reconstruction de scènes 3D

Travaux de Thèse

présentés par Nicolas RAGOT

Le 7 Avril 2009



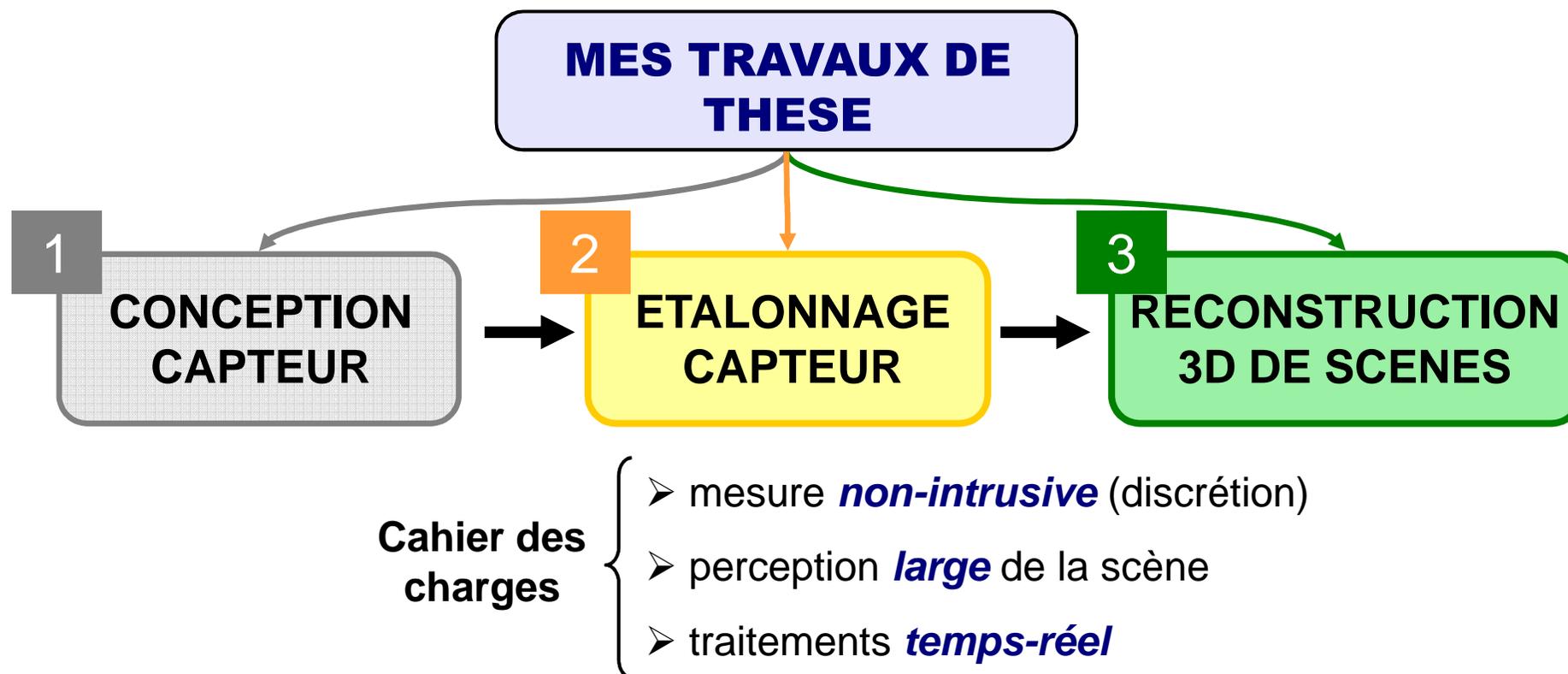
Directeur de thèse : Bélahcène MAZARI

Co-encadrement : Jean-Yves ERTAUD & Xavier SAVATIER



Contexte de travail

- programme de recherche européen : **OmniViss**
- **conception et évaluation d'un outil de reconstruction et d'analyse de scènes 3D**
- partenaires : IRSEEM (FR) & dpt. Electronique de l'Université du KENT (GB)





Plan

1. Conception du capteur

- A. Systèmes pour la numérisation de scènes 3D
- B. Solution matérielle

2. Etalonnage géométrique d'un capteur catadioptrique

- A. Etalonnage paramétrique
- B. Etalonnage non-paramétrique
- C. Méthode de pré-dimensionnement de la mire d'étalonnage

3. Reconstruction 3D par vision stéréoscopique omnidirectionnelle

- A. Reconstruction 3D volumétrique *statique*
- B. Reconstruction 3D volumétrique *dynamique*

4. Conclusions générales et perspectives



Plan

1. Conception du capteur

- A. Systèmes pour la numérisation de scènes 3D
- B. Solution matérielle

2. Etalonnage géométrique d'un capteur catadioptrique

- A. Etalonnage paramétrique
- B. Etalonnage non-paramétrique
- C. Méthode de pré-dimensionnement de la mire d'étalonnage

3. Reconstruction 3D par vision stéréoscopique omnidirectionnelle

- A. Reconstruction 3D volumétrique *statique*
- B. Reconstruction 3D volumétrique *dynamique*

4. Conclusions générales et perspectives

Solutions pour la numérisation de scènes 3D

Technologies pour la numérisation de scènes 3D

➤ Solutions actives : *télémétrie et projection d'un motif lumineux*

→ mesure *intrusive* ☹️

➤ Solutions passives : *les systèmes de vision*

→ *non-intrusif*

→ quantité d'information importante *instantanément*

→ champ d'observation *limité* ☹️



Champ de vue large
pour les applications de
l'étude

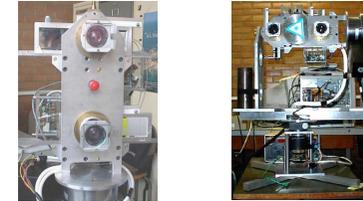
Solutions pour augmenter le champ d'observation

Objectif fish-eye



☹ Pas de centre de projection unique

Capteur cylindrique ou sphérique



☹ Traitements temps-réel difficiles

COMMENT ?

Réseau de caméras



☹ Traitements temps-réel difficiles

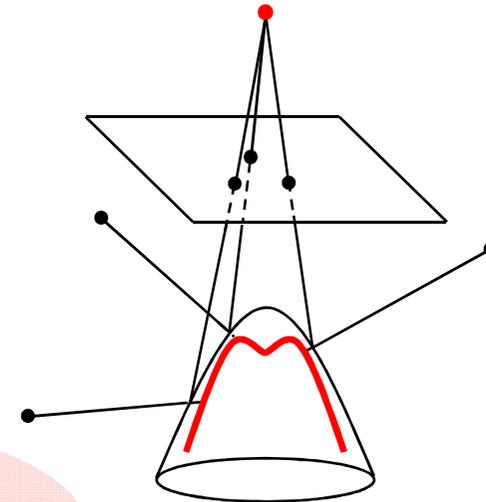
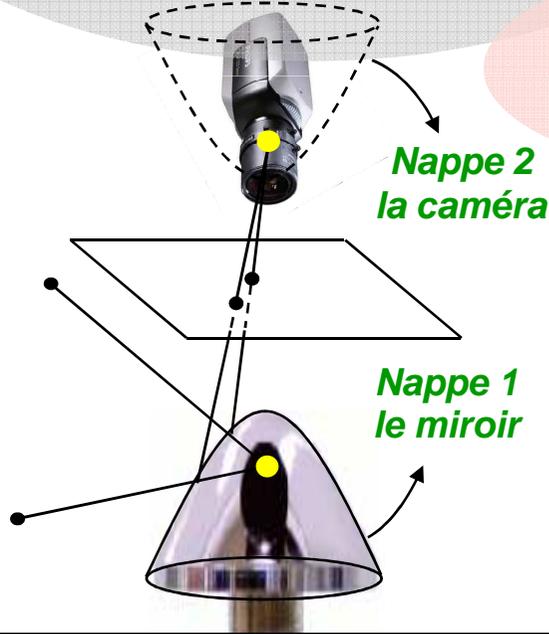
Capteur CATADIOPTRIQUE Caméra-Miroir



Capteur catadioptrique : **généralités**

Capteurs centraux

- **Unicité** du centre de projection²
- **Modélisation plus aisée** du capteur
- Une solution : **hyperboloïde à 2 nappes + caméra perspective**



Deux classes

Capteurs non-centraux

- **Plusieurs** centres de projection (surface **caustique**¹)
- Modélisation mathématique plus délicate

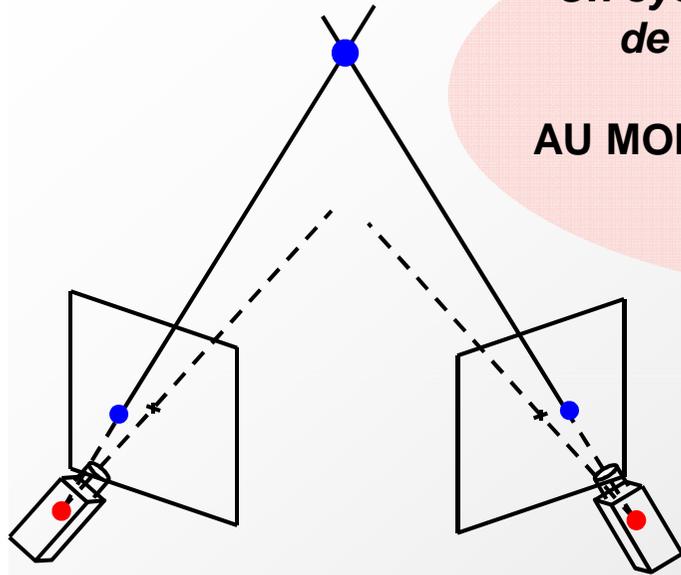
[1] : S. H. Leng and R. Benosman. *Les surfaces caustiques par la géométrie. Applications aux capteurs catadioptriques*. *Traitement du Signal*, 22(5) : 433-442, Décembre 2005

[2] : S. Baker and S. K. Nayar. *A theory of catadioptric image formation*. In *IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 3542, Bombay, India, January, 1998

Capteurs catadioptriques et reconstruction 3D

Un système de vision ne permet pas de déterminer la géométrie 3D

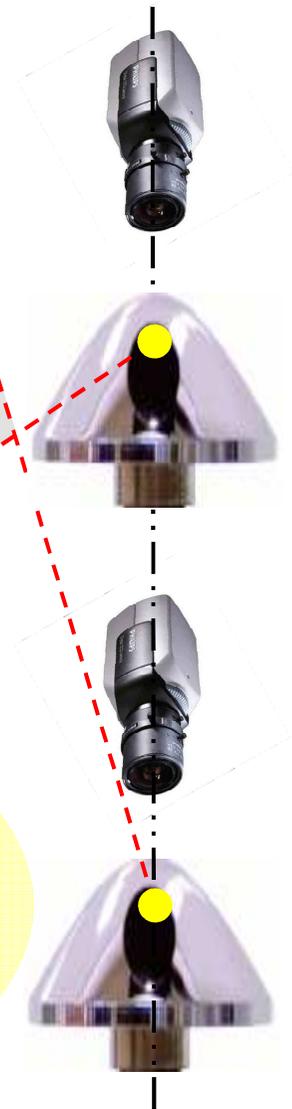
**AU MOINS 2 points de vue nécessaires :
*STEREOVISION***



Architecture stéréoscopique à capteurs catadioptriques

- configuration **verticale** (co-axiale)
- Optimisation du **champ de vue commun** aux 2 capteurs **par rapport aux applications envisagées**
- Processus d'**appariement** des pixels **facilité**

CHAMP DE VUE COMMUN



Système de stéréovision omnidirectionnelle formé de 2 capteurs catadioptriques co-axiaux

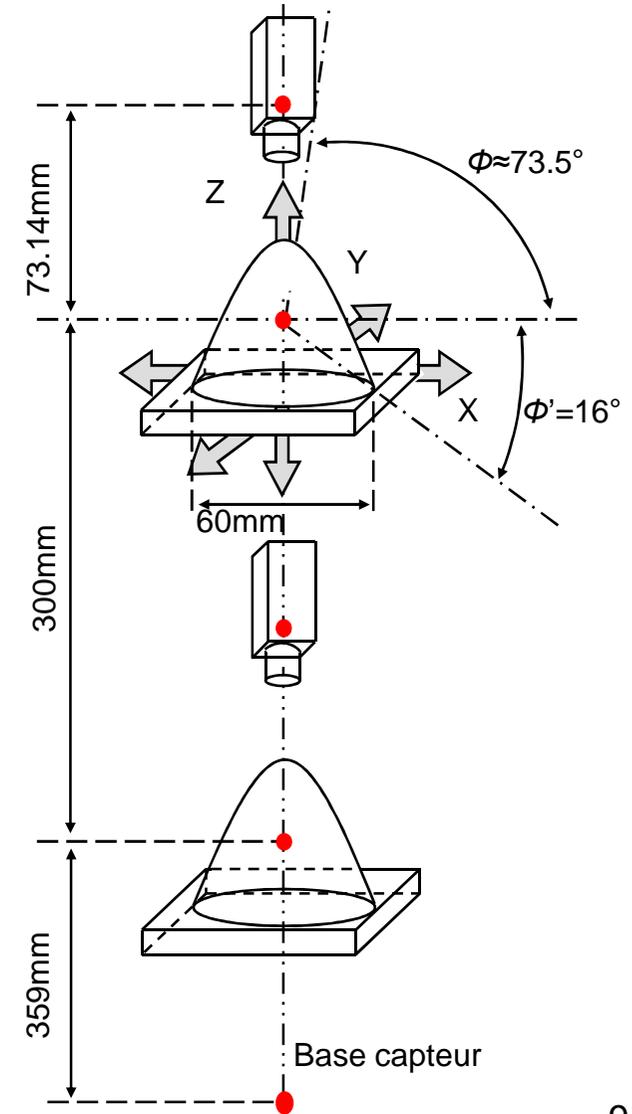
- **caméra** Marlin-F-145C :
 - monoCCD **couleur**
 - CCD $\frac{1}{2}$

- miroir **hyperboloïde** :

$$\frac{z^2}{789.3274} - \frac{x^2 + y^2}{548.1440} = 1$$

- **potence réglable** en X,Y,Z par des **vis micrométriques**

- **focale** : 6.5mm



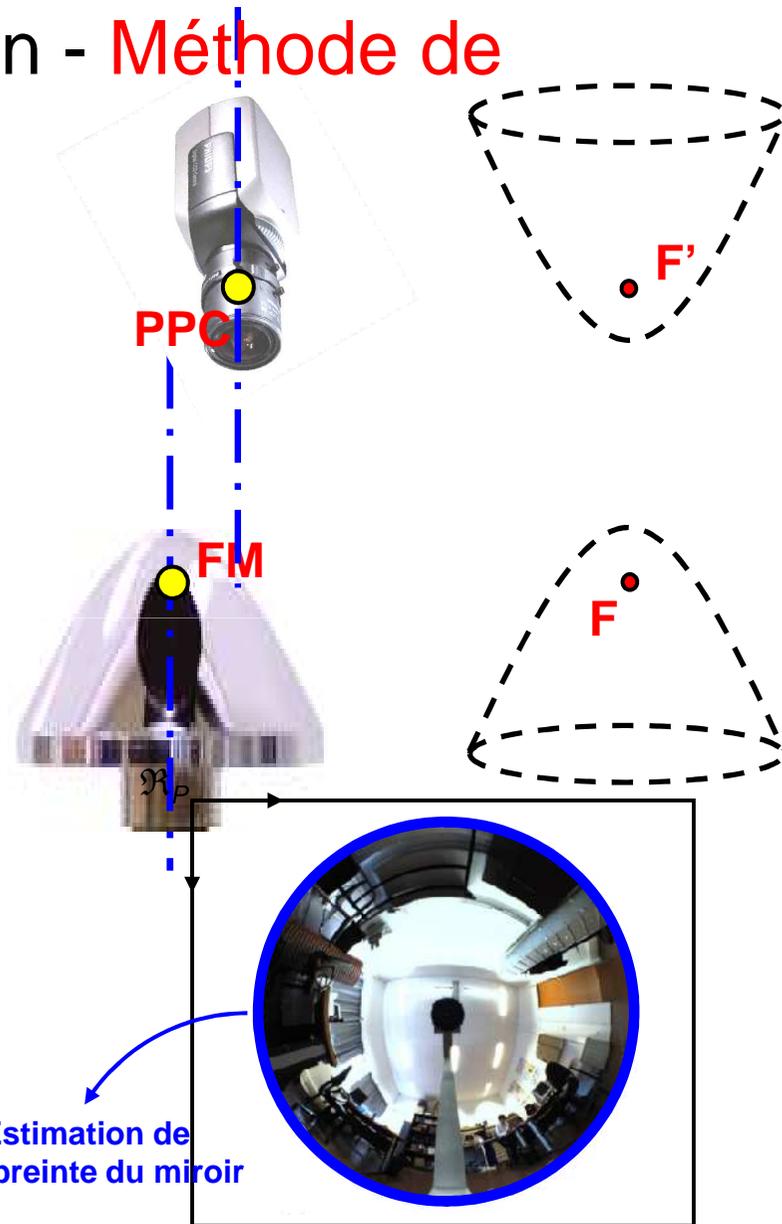
Unicité du centre de projection - Méthode de Zivkovic & Booij¹

Objectifs

→ Positionner **FM** en **F** et **PPC** en **F'**

Méthode

- **Etalonnage** de la caméra **seule**
- Estimation de la **projection de l'empreinte du miroir** dans l'image
- **Réglage mécanique** pour faire coïncider le miroir avec la trace pré-estimée



[1] : Z. Zivkovic and O. Booij. *How did we built our hyperbolic mirror omnidirectional camera - practical issues and basic geometry*. Technical report IAS-UVA-05-04, University of Amsterdam, April 2005.



Plan

1. Conception du capteur

- A. Systèmes pour la numérisation de scènes 3D
- B. Solution matérielle

2. Etalonnage géométrique d'un capteur catadioptrique

- A. Etalonnage paramétrique
- B. Etalonnage non-paramétrique
- C. Méthode de pré-dimensionnement de la mire d'étalonnage

3. Reconstruction 3D par vision stéréoscopique omnidirectionnelle

- A. Reconstruction 3D volumétrique *statique*
- B. Reconstruction 3D volumétrique *dynamique*

4. Conclusions générales et perspectives

Etalonnage géométrique : **généralités**

« étape incontournable [...] dès lors qu'il faut établir une **relation** entre l'**image** et le **monde 3D** »

Etalonnage Fort

- Utilisation d'une **mire 3D**
- Procédure **supervisée, hors-ligne**
- **Primitives** : points, droites

1

Etalonnage paramétrique

- Estimation des **paramètres du modèle 3D/2D**
- Problème de **minimisation**

Etalonnage non-paramétrique

2

- Association (point 2D-ligne de vue 3D)
- Aspect **discret** :
échantillonnage des relations 3D/2D
(cf. dimensions CCD)

Modèle 3D/2D ad hoc¹

➤ $Q: \frac{(z-e)^2}{\beta^2} - \frac{x^2+y^2}{\gamma^2} = 1$

➤ $\mathbf{Q}_W \xrightarrow{(R_M | \mathbf{t}_M)} \mathbf{Q}_M$ Paramètres extrinsèques

➤ $\mathbf{Q}'_M: Q \cap \mathcal{L}$

$\mathcal{L}: \{ \mathcal{L} \mid \mathcal{L} = \mathbf{O}_M + \lambda \mathbf{Q}_M, \lambda \in \mathbb{R}_+ \}$

➤ $\mathbf{Q}'_M \xrightarrow{(R_C | \mathbf{t}_C)} \mathbf{Q}_C$

➤ $\mathbf{Q}_C \xrightarrow{K_P} \mathbf{q}$ Paramètres intrinsèques

Point 2D

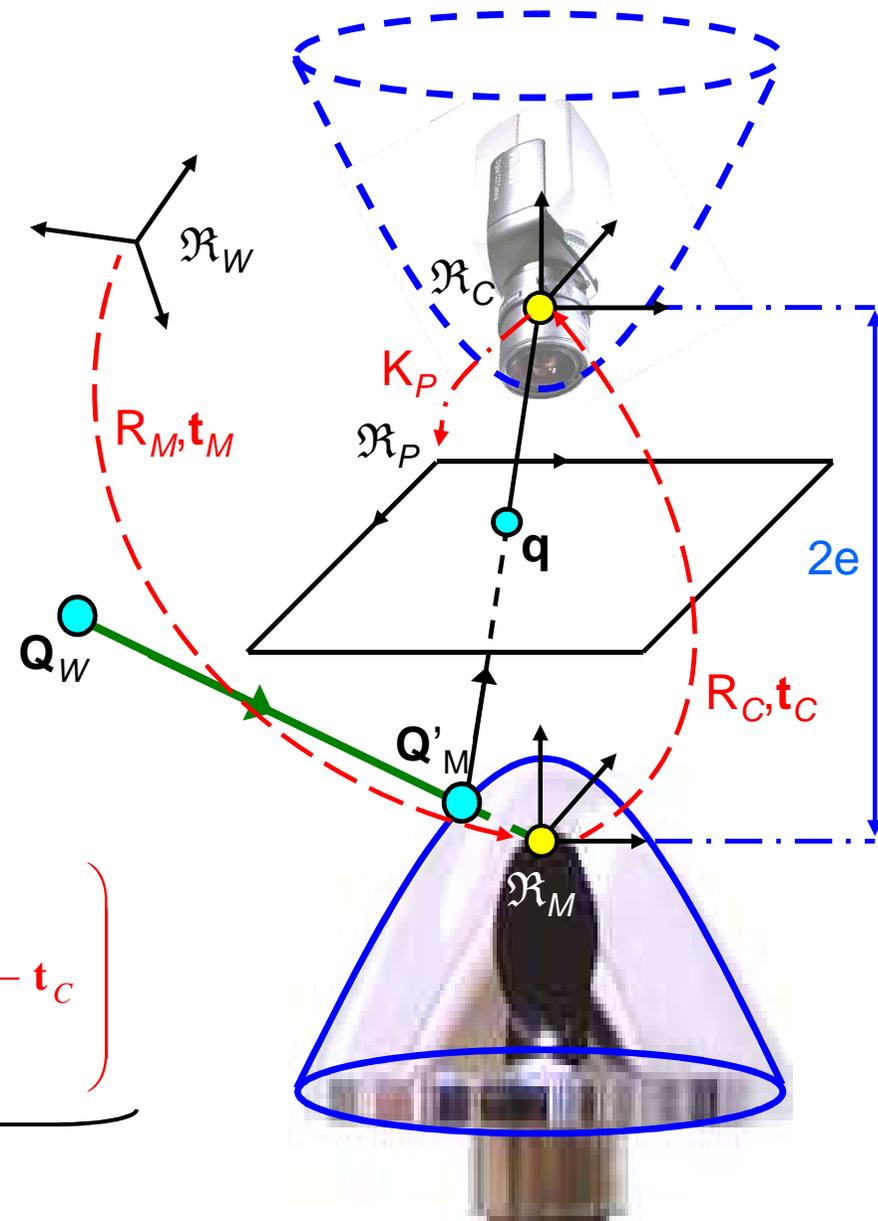
$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix}$

Point 3D

$\begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{pmatrix}$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = K_P \frac{1}{\delta} R_C \left(\lambda R_M \begin{pmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{pmatrix} - \mathbf{t}_M \right) - \mathbf{t}_C$$

$\chi = (K_P, R_M, \mathbf{t}_M)$



[1] : T. Svoboda. *Central Panoramic Cameras : Design, Geometry, Egomotion*. Phd, Czech Technical University, 1999

Stratégie de minimisation

Formulation du problème de minimisation

$$\chi^* = \min_{K_P, R_M, t_M} J(\chi)$$

$$J(\chi) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I (\mathbf{q}_i - \hat{\mathbf{q}}_i(\chi))^2$$

Sous la contrainte : $R_M^T R_M = I$

(obtenue par une **SVD** : $R_M^\dagger = AV^T \mid R_M = A \Sigma V^T$)

Stratégie de minimisation

➤ **Algorithme itératif** (Levenberg-Marquardt)

➤ Vecteur des **estimées initiales** :

$$\chi_0 = \begin{cases} K_{P_0} & \text{?} \\ R_{M_0} = I_{3 \times 3} \\ \mathbf{t}_{M_0} = (0, 0, t_{M_0}^z)^T \end{cases}$$

$$K_{P_0} = \underbrace{(W^T W)^{-1} W^T}_{W^+} X$$

Connus de part la géométrie du capteur

La mire d'étalonnage

Caractéristiques

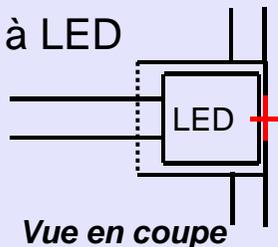
- **Cylindre de révolution** pour tirer profit de la **symétrie axiale** du capteur
- Dimensions : $R = 300\text{mm}$, $H = 1400\text{mm}$

Points d'intérêt

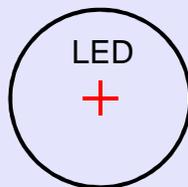
- **Répartition**
 - cercles directeurs (C_m)
 - génératrices
 - C_m défini par 8 points d'intérêt équirépartis appartenant aux génératrices

→ **LED blanche**

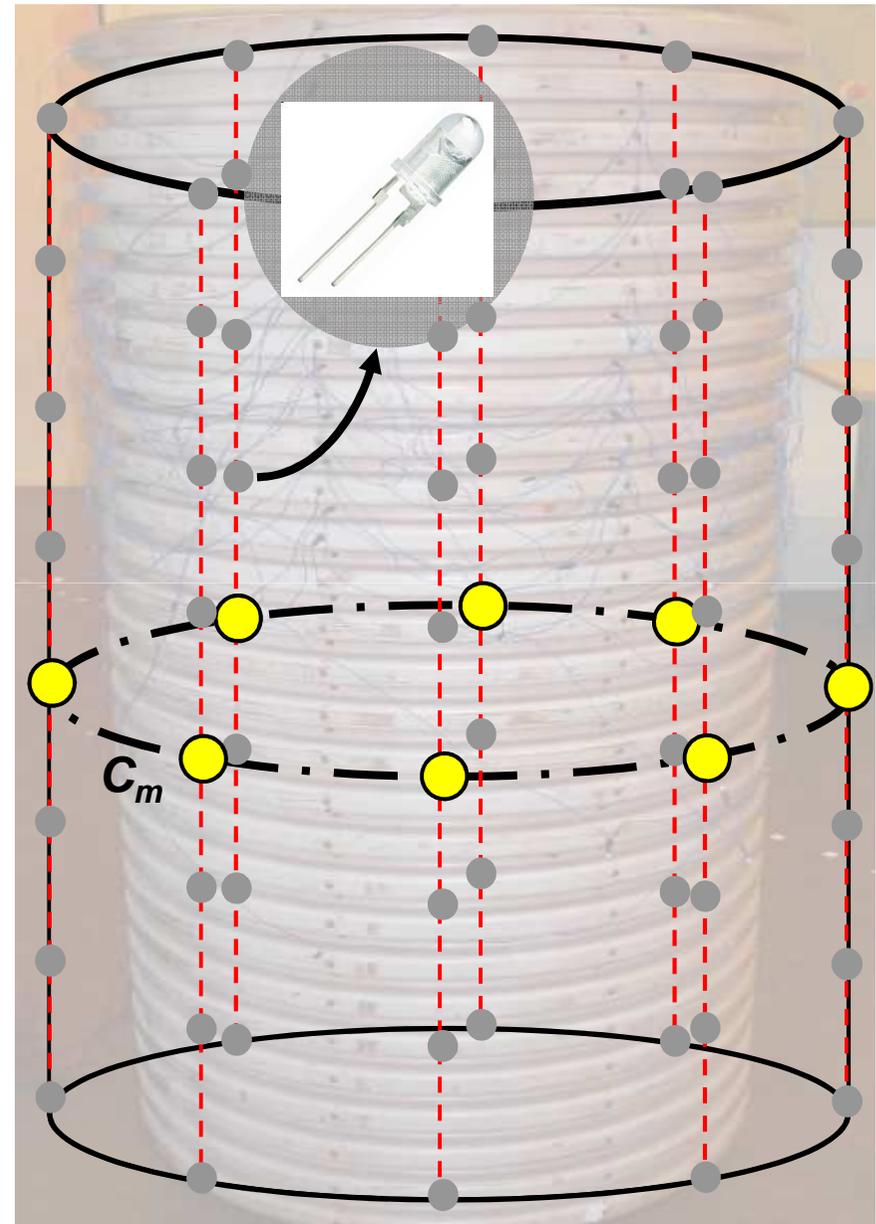
- Angle de diffusion : $\alpha > 70^\circ$
- Diffuseur à LED



Vue en coupe



Vue de face



Extraction des points d'intérêt

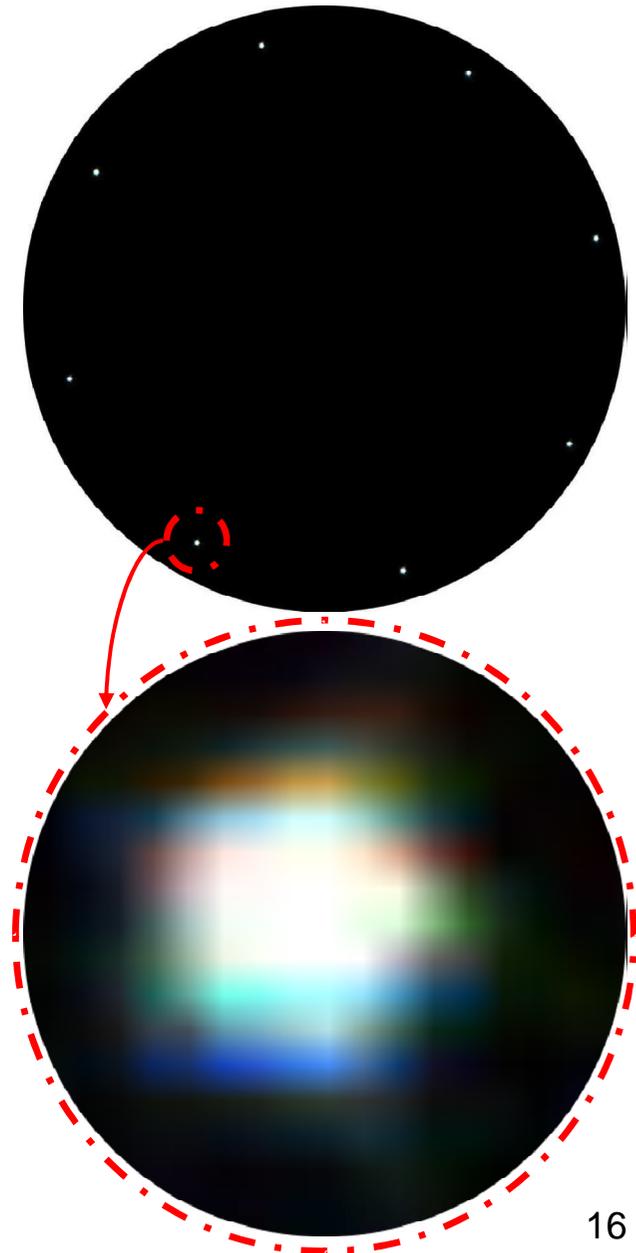
- Projection d'une LED : **halo lumineux**
- Critère d'extraction : **Intensité lumineuse – Luminance**
- Transformation : **RGB → CIE L*a*b***
- Segmentation régions homogènes (R) – 8-connexité

$$R : \bigcup q_i \mid d(L_i, L_{i+1}) < s$$

- Halo lumineux approximé à une **projection ponctuelle** :
le **barycentre du halo** $\left(\bar{\mathbf{q}} = (\bar{u}, \bar{v})^T \right)$

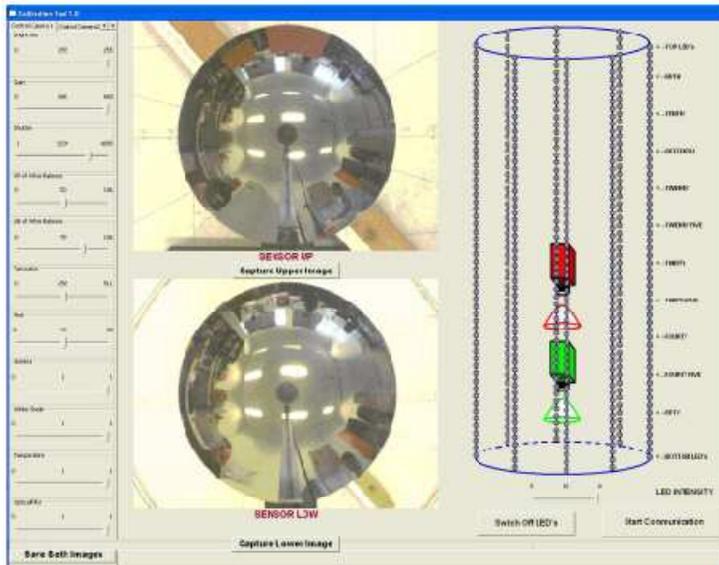
- **Moyenne pondérée** par les **paramètres de luminance**

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^I u_i L_i}{\sum_{i=1}^I L_i} \quad \bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^I v_i L_i}{\sum_{i=1}^I L_i}$$



Dispositif d'aide à l'étalonnage

Interface graphique

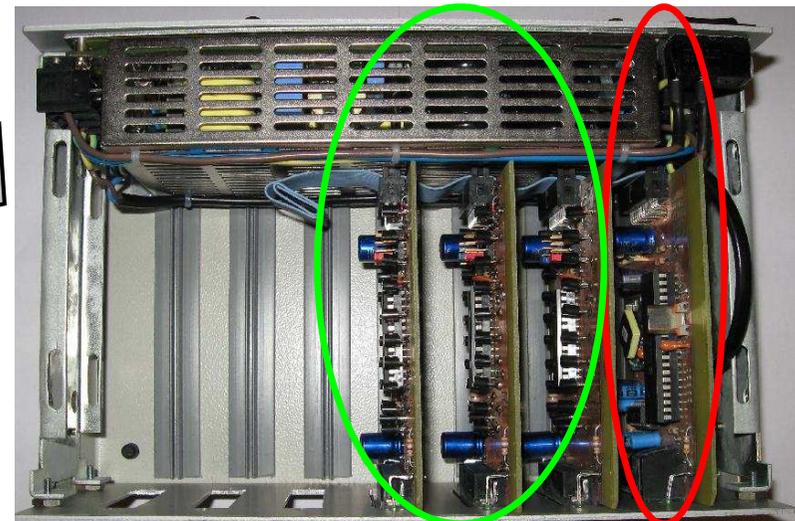


- Réglages des paramètres des caméras
- Récupération du flux vidéo en sortie des caméras
- Pilotage des LED à l'allumage et à l'extinction
- Réglage des intensités lumineuses suivant 16 niveaux

Protocole série

- **Carte maître** (carte microcontrôleur PIC)
- **Cartes esclaves** (MAX6956 driver de LED)
- Communication PIC \leftrightarrow MAX6956 : I2C

Carte électronique



Précision d'un étalonnage : les mesures

Erreur moyenne de projection

- Mesure d'**erreur en 2D** (en pixels)

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M d(\mathbf{q}_m, \hat{\mathbf{q}}_m)$$

Erreurs moyennes de rétro-projection et de reconstruction

- Mesure d'**erreur en 3D** (en mètre)

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(\mathbf{Q}_n, \hat{\mathbf{Q}}_n)$$

- Pour un système multi-caméras : points 3D estimés par **triangulation de primitives 2D appariées** (méthode du mid-point)

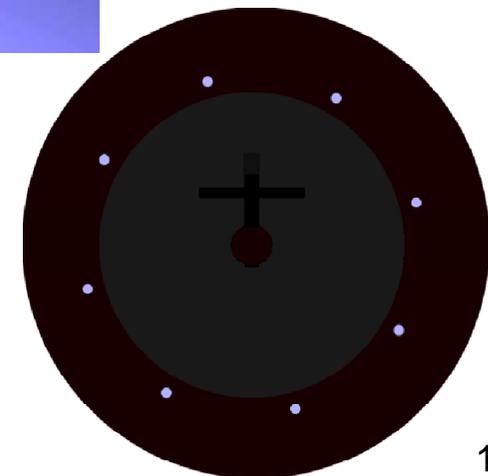
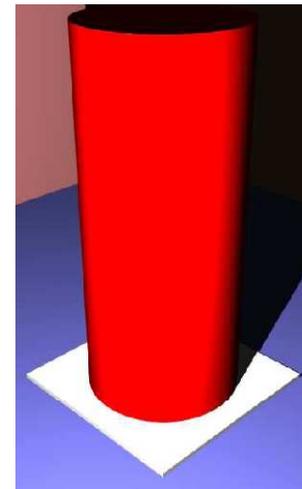
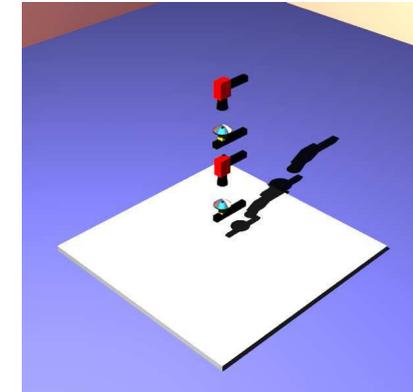
$$\hat{\mathbf{Q}} \in \Lambda \mid \Lambda = \min[\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2], \quad \Lambda = \mathbf{O}_1 \mathbf{O}_2 \frac{\mathcal{L}_1 \wedge \mathcal{L}_2}{\|\mathcal{L}_1 \wedge \mathcal{L}_2\|}$$

Environnement de simulation

→ Utilisation du logiciel *POV-Ray*

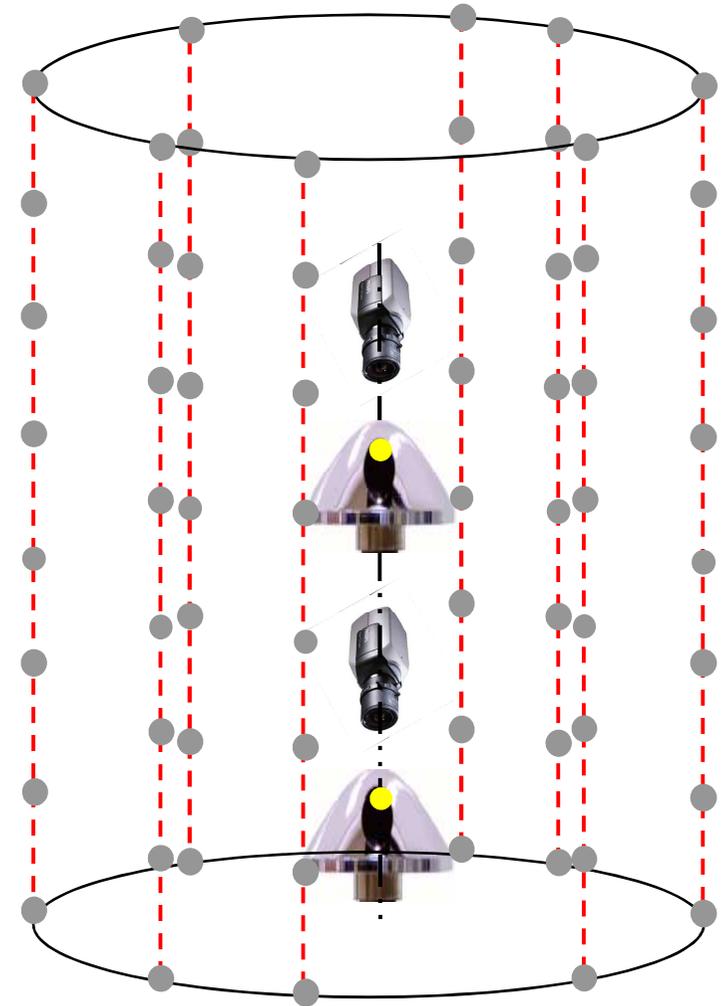
→ Modélisation :

- **Capteur** de stéréovision omnidirectionnelle
- **Mire** d'étalonnage 3D
- **LEDs** : cylindres lumineux blancs

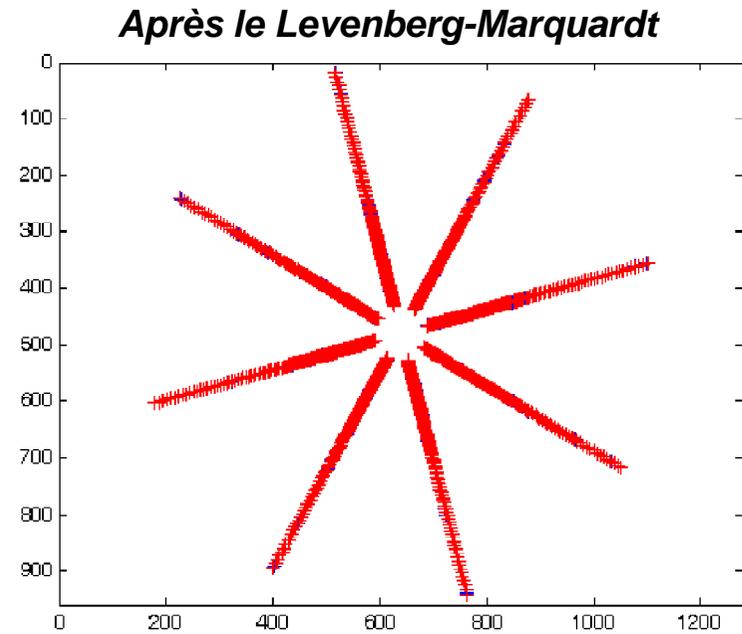
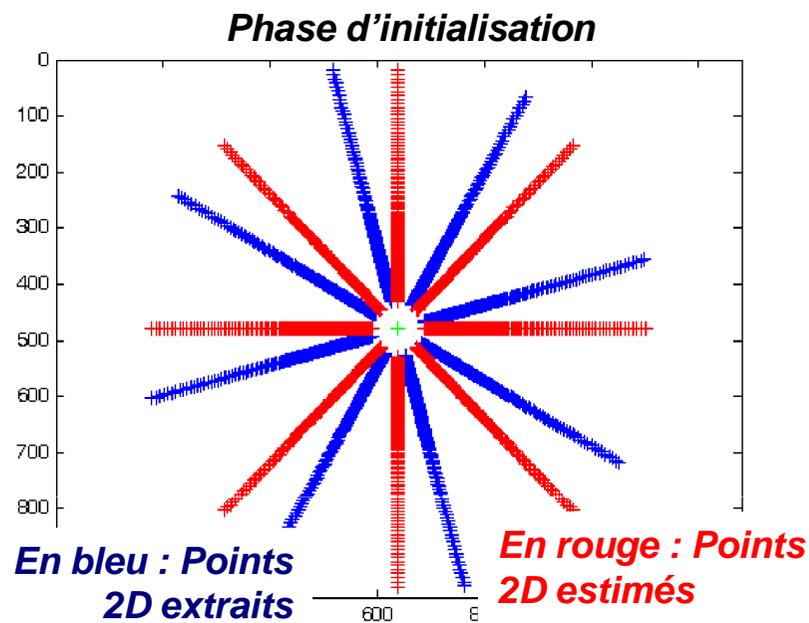


Protocole d'étalonnage

- **Etalonnage dissocié** des 2 capteurs
- **Données** pour étalonner 1 capteur :
 - **Coordonnées des points 3D** dans le repère Mire
 - Images d'étalonnage : **1 image \equiv 1 cercle allumé**
- **1768** points d'intérêt



Résultats



| | K_P | | | | $R_M(\text{en } ^\circ)$ | | | $t_M(\text{en mm})$ | | |
|--------------------------|------------|------------|-------|-------|--------------------------|------------|------------|---------------------|---------|---------|
| | α_u | α_v | u_0 | v_0 | α_x | α_y | α_z | t_M^x | t_M^y | t_M^z |
| <i>Théorie</i> | 1315.8 | 1315.8 | 640.0 | 480.0 | 0.00 | 0.00 | 15.00 | 0.0 | 0.0 | 359.0 |
| <i>Estimation</i> | 1313.1 | 1313.1 | 639.5 | 476.9 | 0.00 | -0.02 | 14.99 | 0.0 | -0.1 | 359.8 |

Erreur moyenne de projection estimés sur 1768 points $\bar{\epsilon} = 0.02 \pm 0.29 \text{ pix}$

Conclusions : « étalonnage paramétrique »

- Méthode d'**étalonnage paramétrique par un modèle ad hoc**
- Mire 3D : **cylindre de révolution** pour tirer profit des spécificités du capteur
- Résultats :
 - Valeurs estimées coïncident avec les valeurs théoriques
 - Résultat attendu puisque réalisé en simulation (cas parfait)
 - ➔ **Validation de la méthode**
 - ➔ **Validation de l'approximation de la projection d'une LED**
- **En pratique**
 - Unicité du centre de projection est **difficile à mettre en œuvre**
 - Prise en compte de **systèmes bas-coût** (défaut d'usinage)

Proposition d'une méthode alternative d'étalonnage utilisant une approche non-paramétrique



Plan

1. Conception du capteur

- A. Systèmes pour la numérisation de scènes 3D
- B. Solution matérielle

2. Etalonnage géométrique d'un capteur catadioptrique

- A. Etalonnage paramétrique
- B. Etalonnage non-paramétrique**
- C. Méthode de pré-dimensionnement de la mire d'étalonnage

3. Reconstruction 3D par vision stéréoscopique omnidirectionnelle

- A. Reconstruction 3D volumétrique *statique*
- B. Reconstruction 3D volumétrique *dynamique*

4. Conclusions générales et perspectives

Principe

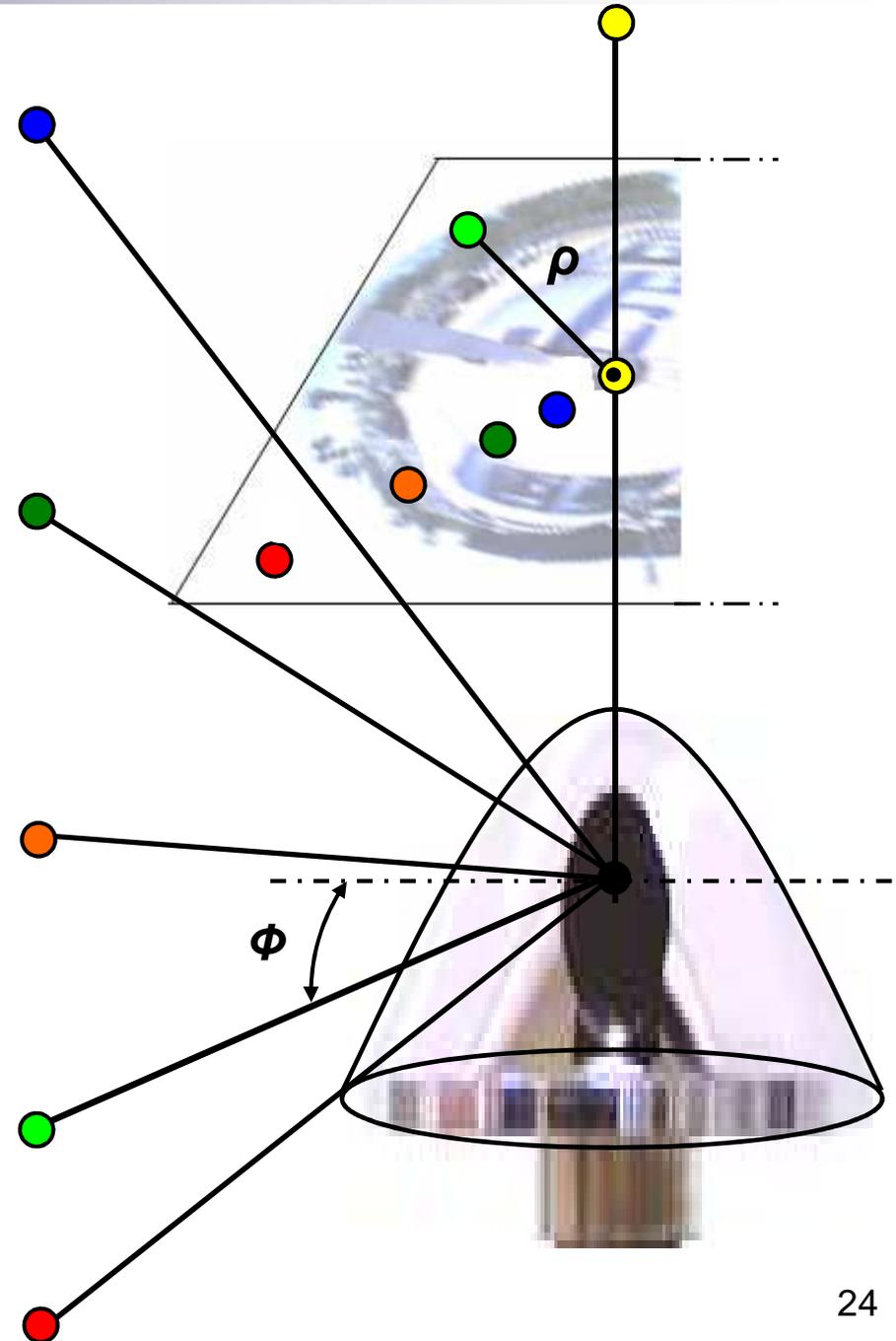
Constat

Il existe une relation telle que :

$$\rho = f(\Phi)$$

Proposition

- Méthode d'**étalonnage fort**
- **Mire 3D** préalablement utilisée
- Méthode **non-paramétrique**

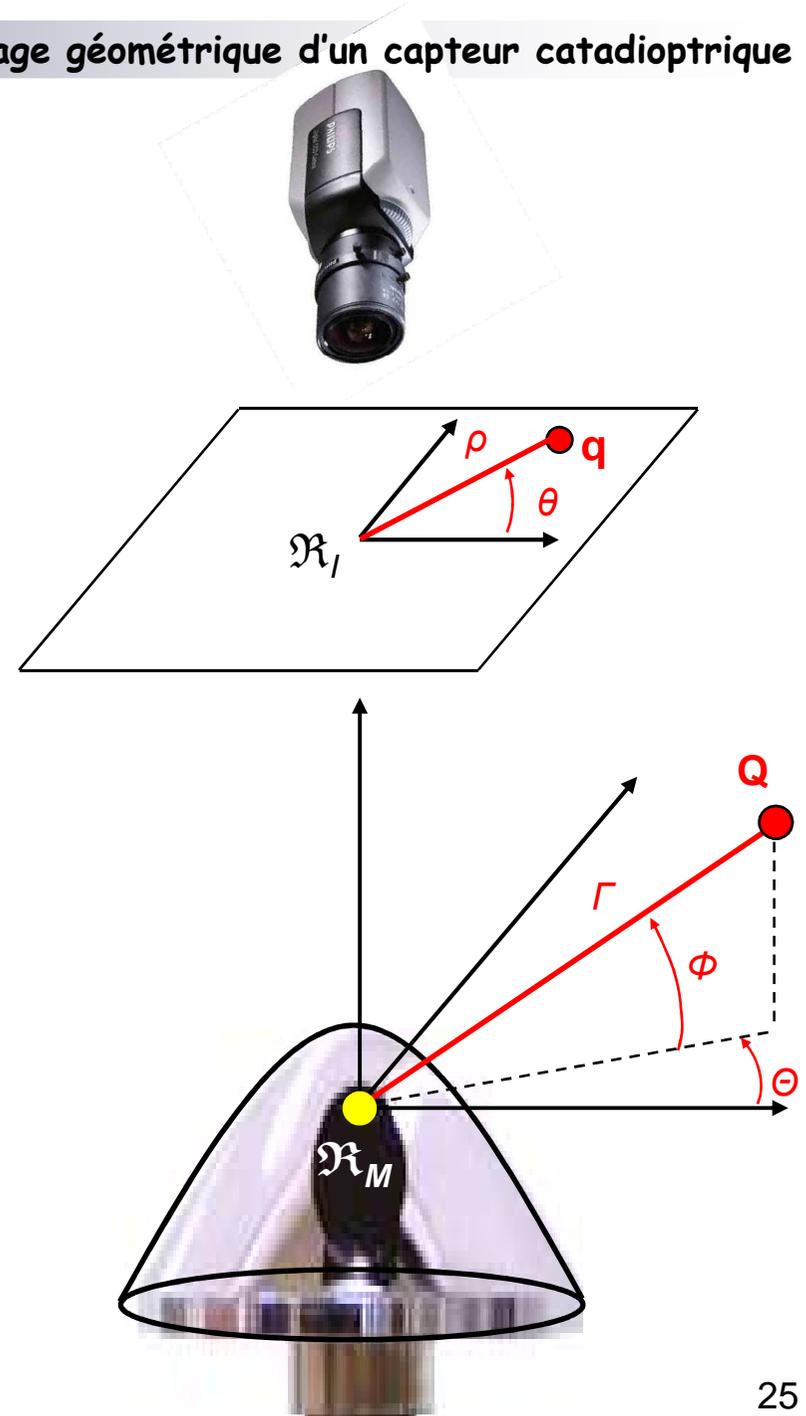


Formulation du problème (1)

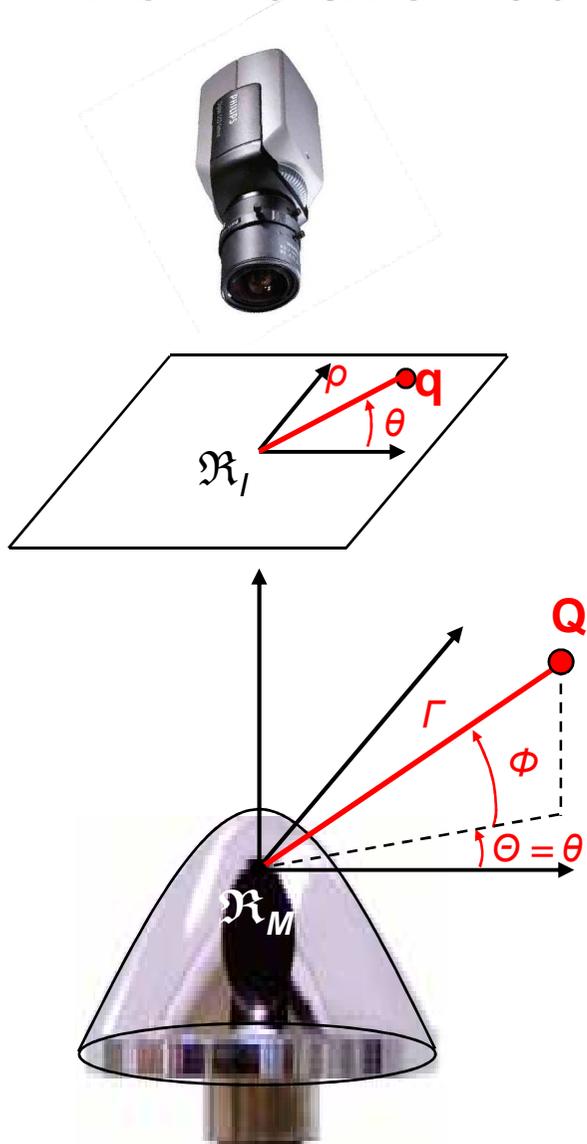
Postulat

→ $\mathbf{Q} = (\Theta, \Phi, \Gamma)^T$: un **point 3D** en **sphérique**
dans \mathcal{R}_M

→ $\mathbf{q} = (\theta, \rho)^T$: un **point 2D** en **polaire**
dans \mathcal{R}_l



Formulation du problème (2)



Fonctions de projection et rétro-projection

$$\text{Projection } g : \mathcal{Q} \rightarrow \mathfrak{q} \quad g : \rho = g(\theta, \Phi)$$

$$\text{Rétro-projection } g^* : \mathfrak{q} \rightarrow \mathcal{L} \quad g^* : \Phi = g^*(\theta, \rho)$$

- g et g^* fonctions d'un nouvel **espace de représentation** paramétré par le **triplet de variables** (θ, Φ, ρ) :

$$(\mathcal{Q}, \mathfrak{q}) \longrightarrow \mathbf{V}(\theta, \Phi, \rho)$$

- g et g^* sont connues en un **nombre fini de points**
→ Définition d'un **maillage** sur le ce nouvel espace :

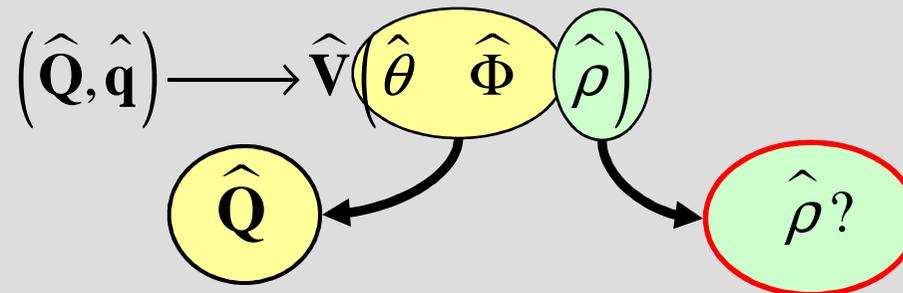
$$\forall i \in \{1, \dots, I\} \quad (\mathcal{Q}_i, \mathfrak{q}_i) \longrightarrow \mathbf{V}_i(\theta_i, \Phi_i, \rho_i)$$

Comment **projeter** et **rétro-projeter**
dans ce nouvel espace discret ?

Projection pour l'étalonnage non-paramétrique (1)**Formulation du problème**

- $\hat{\mathbf{Q}} = (\hat{\theta}, \hat{\Phi}, \hat{\Gamma})^T$: un point 3D connu dans \mathfrak{R}_M
- $\hat{\mathbf{q}} = (\hat{\theta}, \hat{\rho})^T$: approximation de $\hat{\mathbf{Q}}$ dans \mathfrak{R}_l

Le problème : $\hat{\mathbf{q}} = g(\hat{\mathbf{Q}})$?



→ **Interpolation numérique locale**
aux voisinages des points connus

→ **Méthode linéaire** par une
triangulation de Delaunay

Projection pour l'étalonnage non-paramétrique (2)

$$1. \quad (\mathbf{Q}, \mathbf{q}) \longrightarrow \mathbf{V}(\theta, \Phi, \rho)$$

$$(\hat{\mathbf{Q}}, \hat{\mathbf{q}}) \longrightarrow \hat{\mathbf{V}}(\hat{\theta}, \hat{\Phi}, \hat{\rho})$$

2. Projection des points \mathbf{V} dans le plan $(\Theta\Phi)$

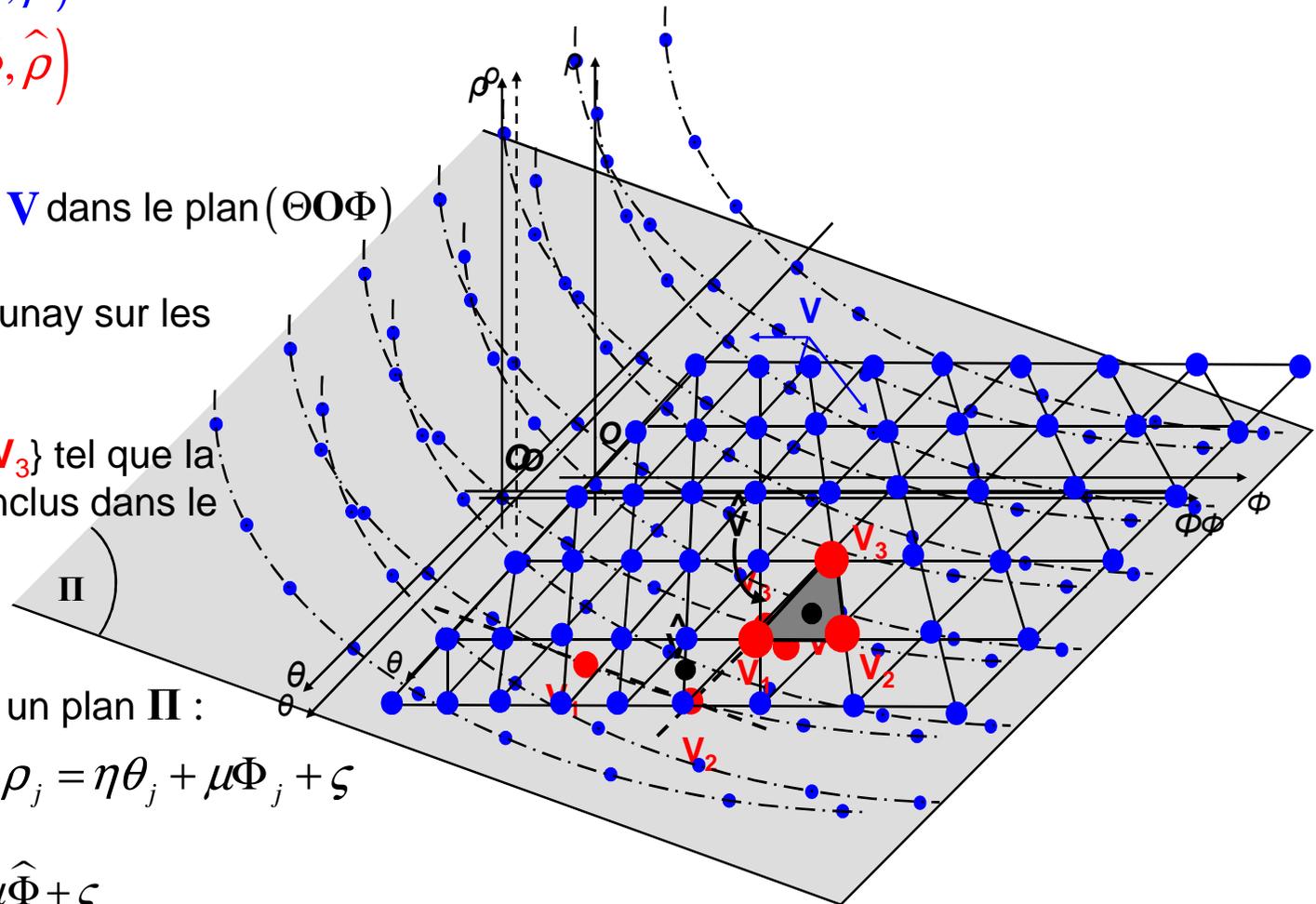
3. Triangulation de Delaunay sur les points projetés

4. Sélection des $\{\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3\}$ tel que la projection de $\hat{\mathbf{V}}$ soit inclus dans le triangle de Delaunay

5. $\{\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3\}$ définissent un plan Π :

$$\{\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3\} \in \Pi \text{ ssi : } \rho_j = \eta\theta_j + \mu\Phi_j + \zeta$$

6. $\hat{\mathbf{V}} \in \Pi$ ssi : $\hat{\rho} = \eta\hat{\theta} + \mu\hat{\Phi} + \zeta$

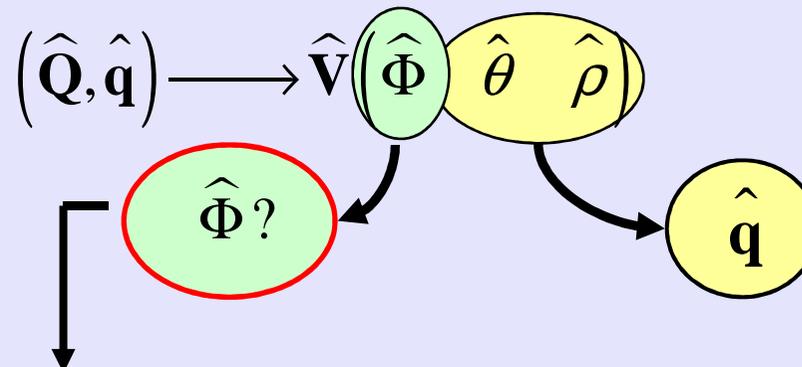


Rétro-projection pour l'étalonnage non-paramétrique

→ $\hat{\mathbf{q}} = (\hat{\theta}, \hat{\rho})^T$: un point 2D connu dans \mathcal{R}_I

→ $\hat{\mathbf{d}} = (\hat{\theta}, \hat{\Phi})^T$: approximation du vecteur directeur de la ligne de vue $\hat{\mathcal{L}}$ dans \mathcal{R}_M

Le problème : $\hat{\mathbf{d}} = g^*(\hat{\mathbf{q}})$?



→ Principe d'**estimation similaire** au processus de **projection**

- Interpolation locale sur le modèle discret
- Méthode linéaire utilisant une triangulation de Delaunay



Plan

1. Conception du capteur

- A. Systèmes pour la numérisation de scènes 3D
- B. Solution matérielle

2. Etalonnage géométrique d'un capteur catadioptrique

- A. Etalonnage paramétrique
- B. Etalonnage non-paramétrique
- C. Méthode de pré-dimensionnement de la mire d'étalonnage**

3. Reconstruction 3D par vision stéréoscopique omnidirectionnelle

- A. Reconstruction 3D volumétrique *statique*
- B. Reconstruction 3D volumétrique *dynamique*

4. Conclusions générales et perspectives

Conception d'une mire adaptée : *principe*

Position du problème

- g et g^* sont connues pour un **nombre fini de points**
- La précision de l'étalonnage dépendant :
 - du **nombre de correspondances 3D/2D**
 - **répartition** des points d'intérêt sur la mire

*Distribution verticale
des cercles sur le
cylindre d'étalonnage*

**Nombre de points d'intérêt
par cercle directeur**

Nombre de points d'intérêt par cercle

Objectif

Re-crée des couples **point 3D-point 2D** supplémentaires

1. Estimation des équations des projections des cercles de mire
2. Sur-échantillonnage iso-angulaire des projections estimées

Méthodologie

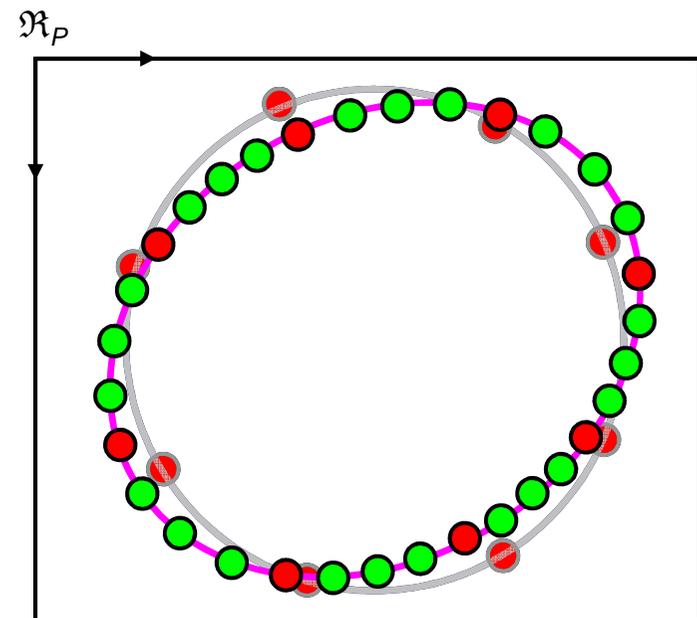
- Projection d'un cercle 3D : un **cercle en 2D**
- Si désalignement : une **ellipse**
- Estimation d'une **conique** ω : pb de **minimisation**

$$\begin{matrix}
 \overbrace{\begin{matrix} x_1^2 & 2x_1y_1 & y_1^2 & 2x_1 & 2y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i^2 & 2x_iy_i & y_i^2 & 2x_i & 2y_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_I^2 & 2x_Iy_I & y_I^2 & 2x_I & 2y_I & 1 \end{matrix}}^A & \overbrace{\begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix}}^{\omega} & \neq \mathbf{0}_{I \times 6}
 \end{matrix}
 \begin{cases}
 \omega^* = \min_{a,b,c,d,e,f} J(\omega) \\
 J(\omega) = \omega^T A^T A \omega \\
 \omega^T \omega = 1
 \end{cases}$$

ω^* : vecteur propre normé de $A^T A$ correspondant à la plus petite des valeurs propres

→ **Echantillonnage iso-angulaire** : $(q_j, q_{j+1}) \in \omega : \begin{cases} \rho_{j+1} = \rho_j \\ \theta_{j+1} = \theta_j + \Delta\theta \end{cases}$

→ Aux points 2D nouvellement créés correspondent des points 3D qui appartiennent au cercle 3D préalablement projeté



Conception d'une mire adaptée : *principe*

Position du problème

- g et g^* sont connues pour un **nombre fini de points**
- La précision de l'étalonnage dépendant :
 - du **nombre de correspondances 3D/2D**
 - **répartition** des points d'intérêt sur la mire

*Distribution verticale
des cercles* sur le
cylindre d'étalonnage

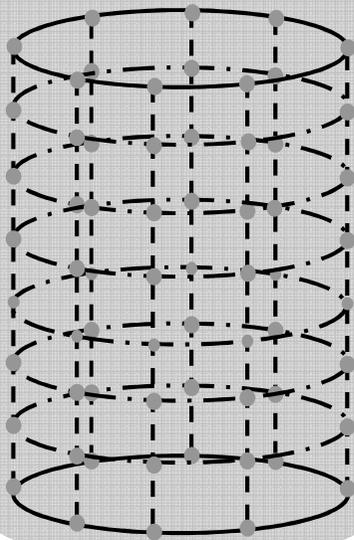
*Nombre de points d'intérêt
par cercle directeur*

Distribution verticale des cercles

Objectif

Définir une **distribution verticale adaptée des cercles** sur la mire

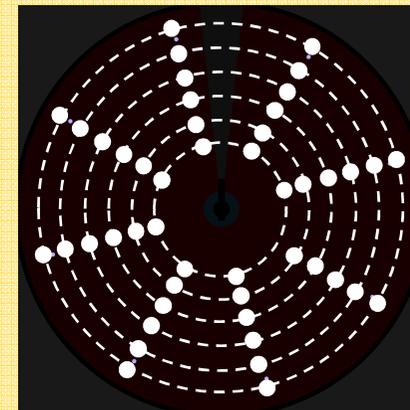
Maillage uniforme en 3D :
répartition uniforme des
points 3D d'intérêt



Données d'étalonnage du
maillage uniforme en 3D

Maillage uniforme en 2D :

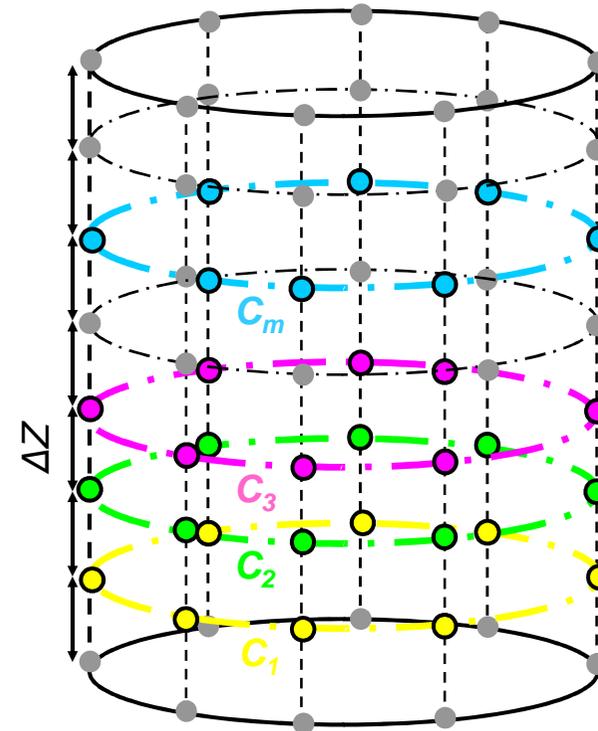
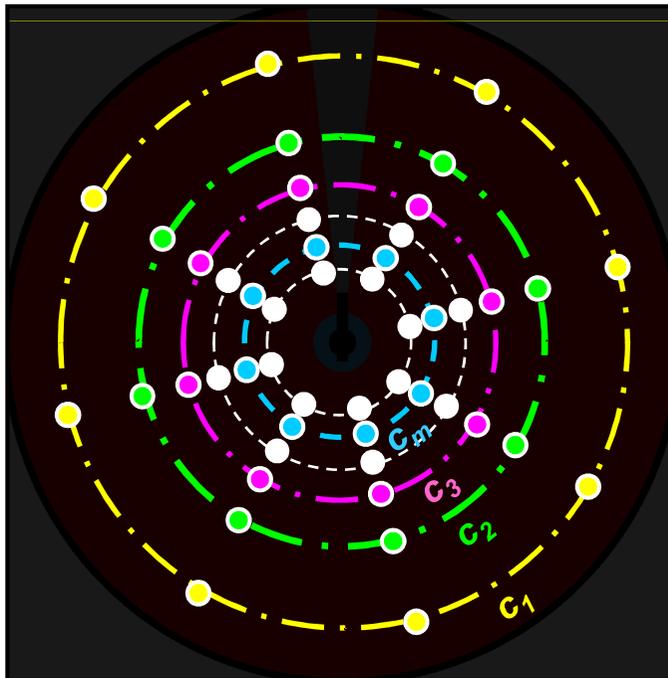
→ Nouvelle répartition des
cercles sur la mire



Distribution verticale des cercles : **maillage uniforme** en 3D

Principe

- Deux cercles 3D contigus : $C_{m+1} \rightarrow C_m + \Delta Z$
- Avec ΔZ **petit** :
 - Maillage **dense**
 - Garantie une **précision importante** de l'étalonnage



Distribution verticale des cercles : **maillage uniforme** en 2D

Principe

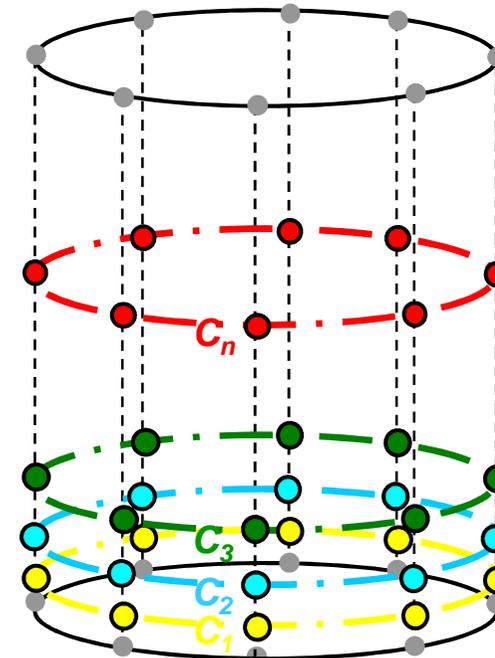
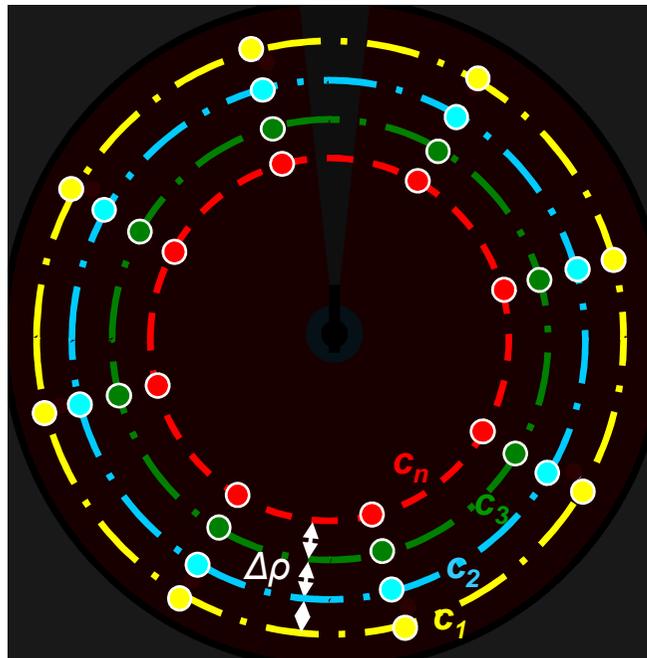
- **Deux cercles 2D contigus :**

$$c_{n+1} \rightarrow c_n + \Delta\rho \quad \text{et} \quad (q_n, q_{n+1}) \in \ell : \begin{cases} \rho_{n+1} = \rho_n + \Delta\rho \\ \theta_{n+1} = \theta_n \end{cases}$$

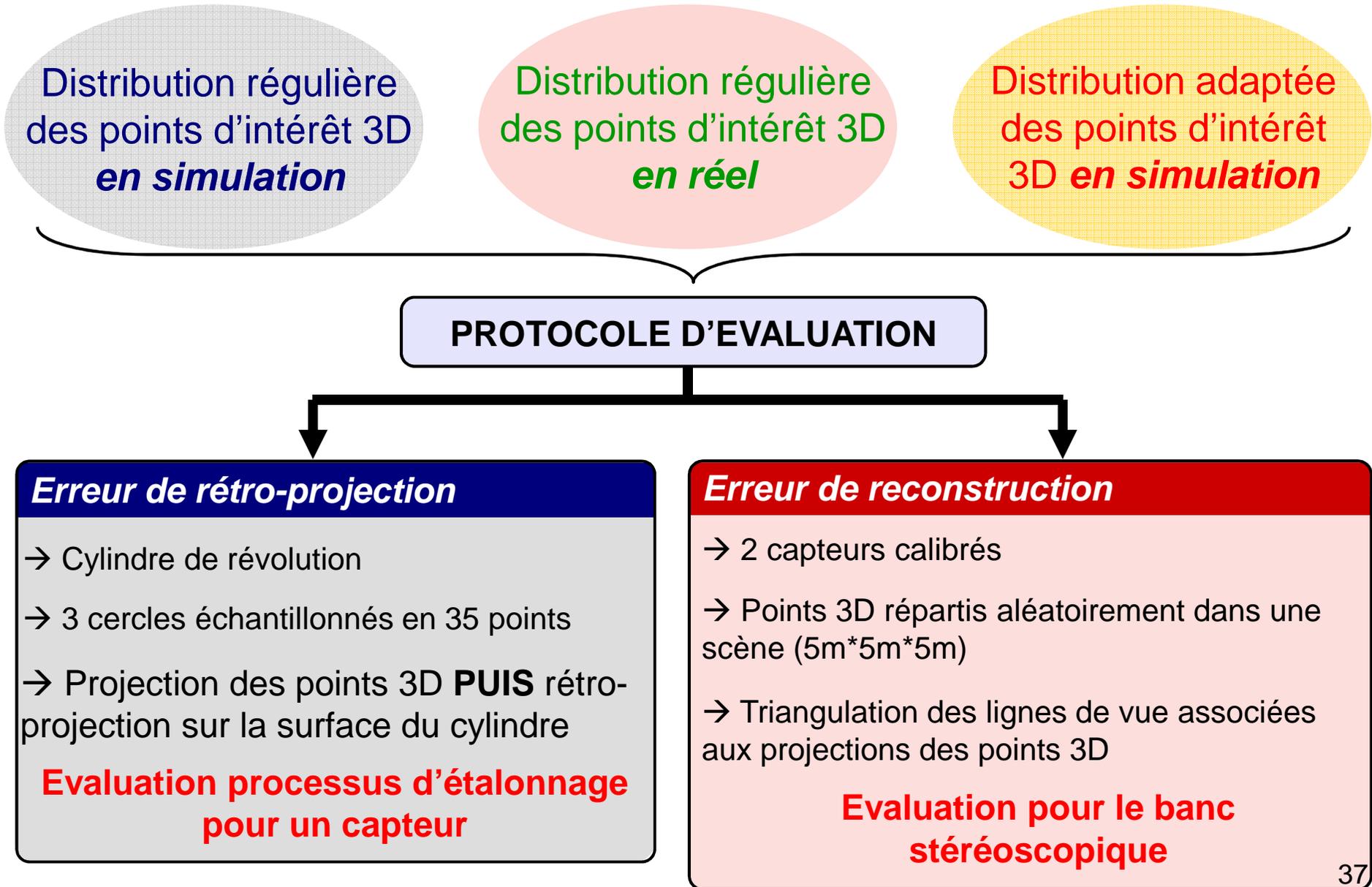
- **Lignes de vue associées à q_n :** $\mathcal{L}_n = \mathbf{O}_M + \lambda (\sin \Phi_n \quad 0 \quad \cos \Phi_n)^T$

→ Possible grâce aux données d'étalonnage obtenues précédemment (cf. répartition uniforme en 3D)

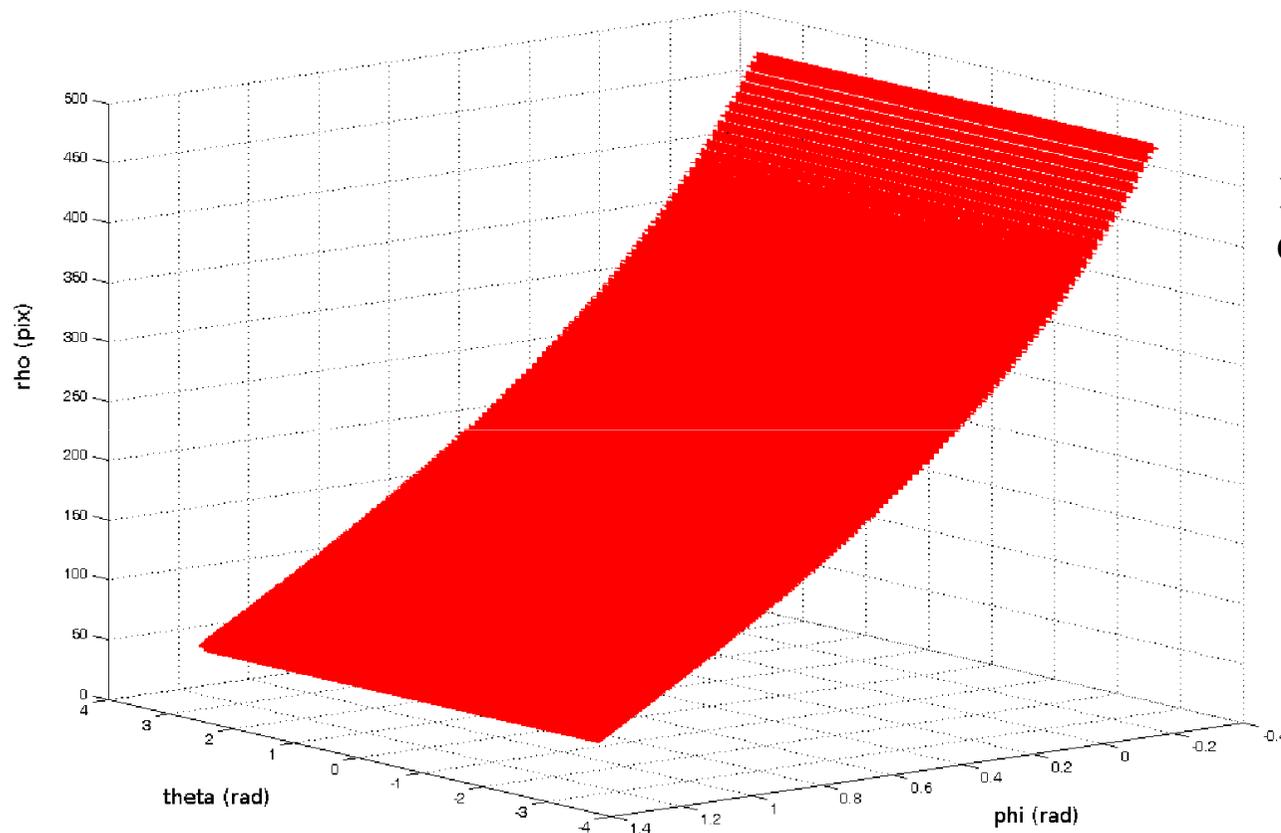
- **Intersection avec le cylindre :** $\{C_1, \dots, C_n, \dots, C_N\}$



Résultats



Résultats : distribution régulière en simulation

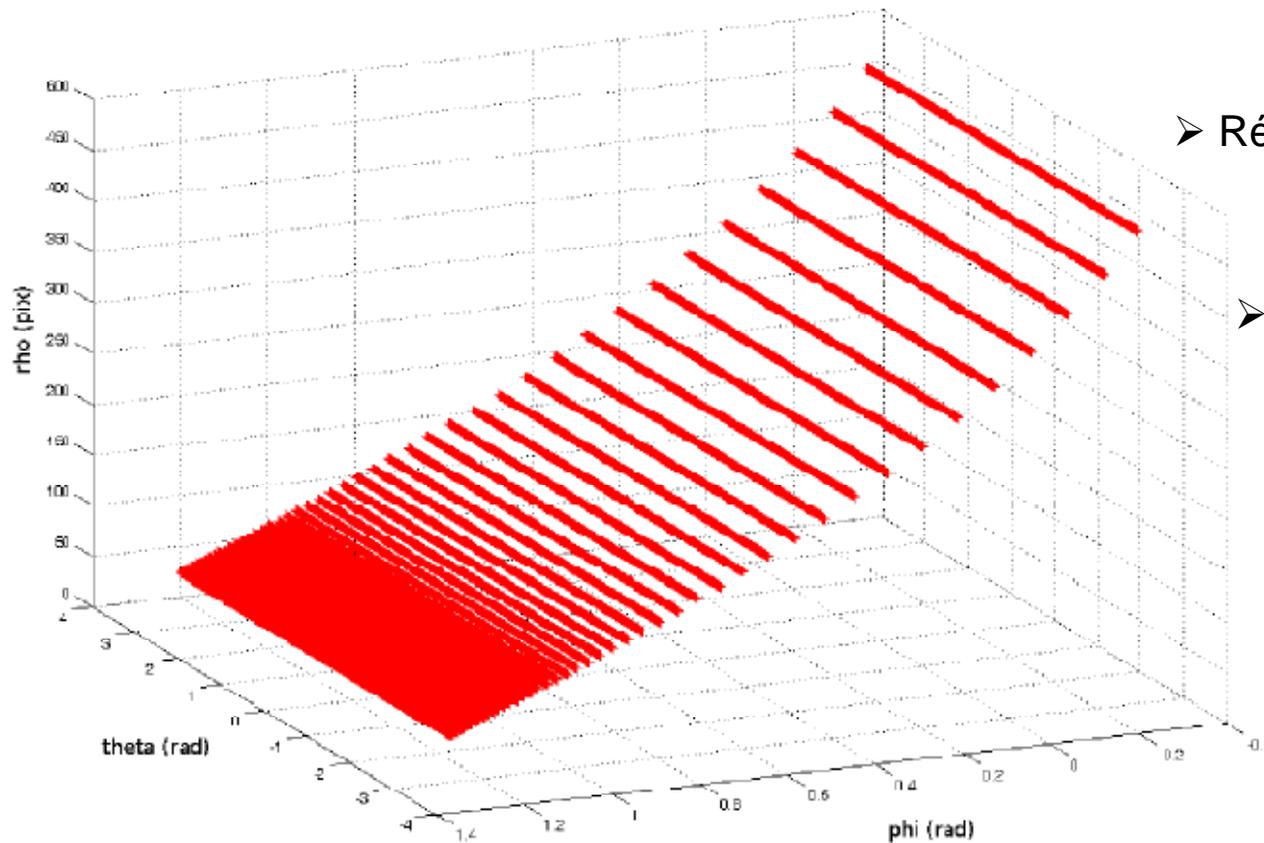


➤ 221 cercles d'étalonnage
espacés de $\Delta Z=5mm$

➤ Pas d'échantillonnage $\Delta\theta=1^\circ$

**1768 points d'intérêt +
79560 re-crées**

Résultats : distribution régulière pour le système réel

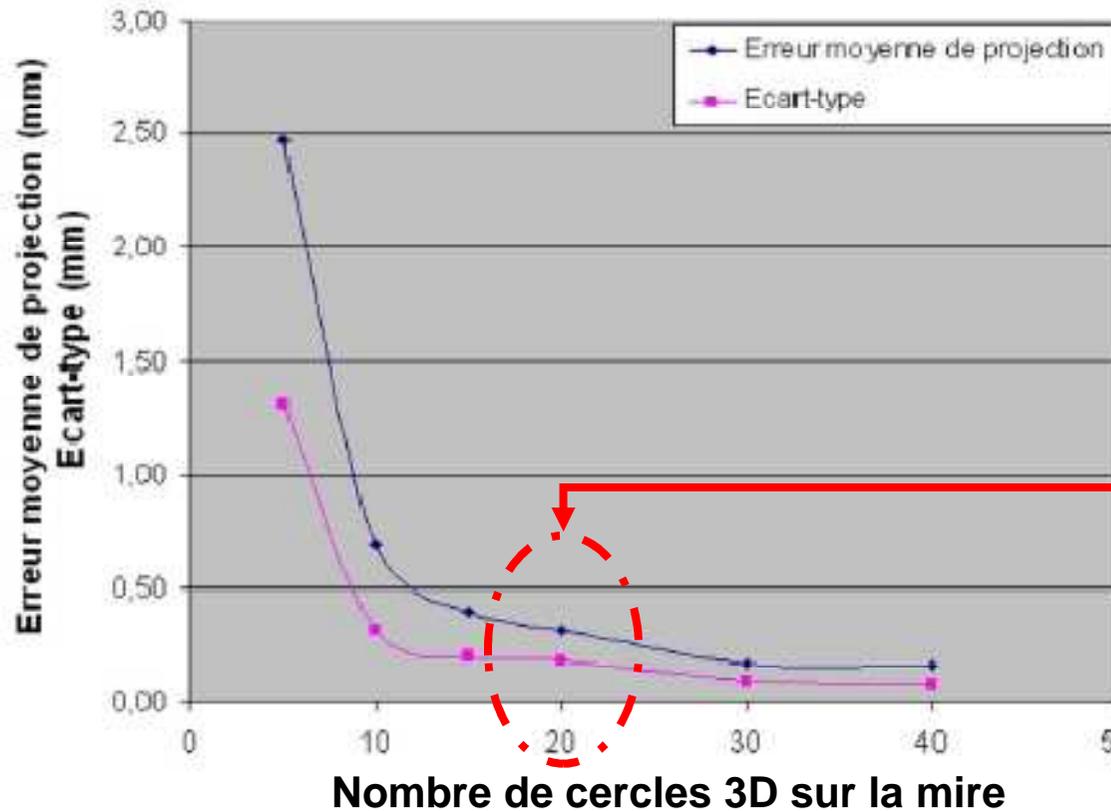


➤ Répartition des cercles $\Delta Z=25mm$

➤ Pas d'échantillonnage : $\Delta\theta=1^\circ$

**360 points d'intérêt +
16200 re-crées**

Résultats : distribution adaptée en simulation (1)

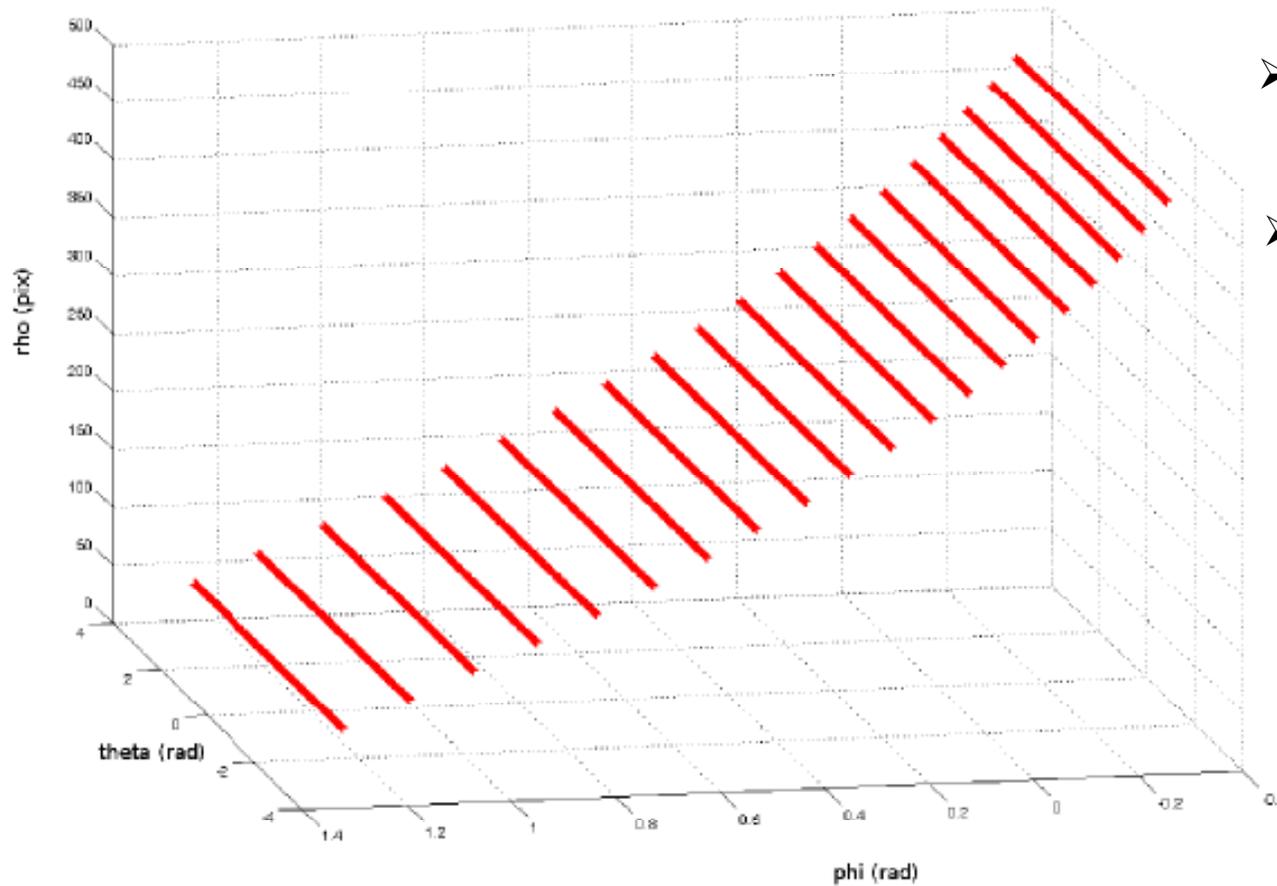


➤ Erreur moyenne de projection évaluée **29 points test**

Compromis entre complexité de la réalisation de la mire et précision de l'étalonnage

| Nombre de cercles sur la mire 3D | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Erreur moyenne de projection + Ecart type $\bar{\varepsilon} \pm \sigma$ (pix) | 2.47 ± 1.31 | 0.69 ± 0.32 | 0.40 ± 0.20 | 0.32 ± 0.19 | 0.17 ± 0.10 | 0.16 ± 0.10 |

Résultats : distribution **adaptée en simulation** (2)



➤ **20 cercles** d'étalonnage

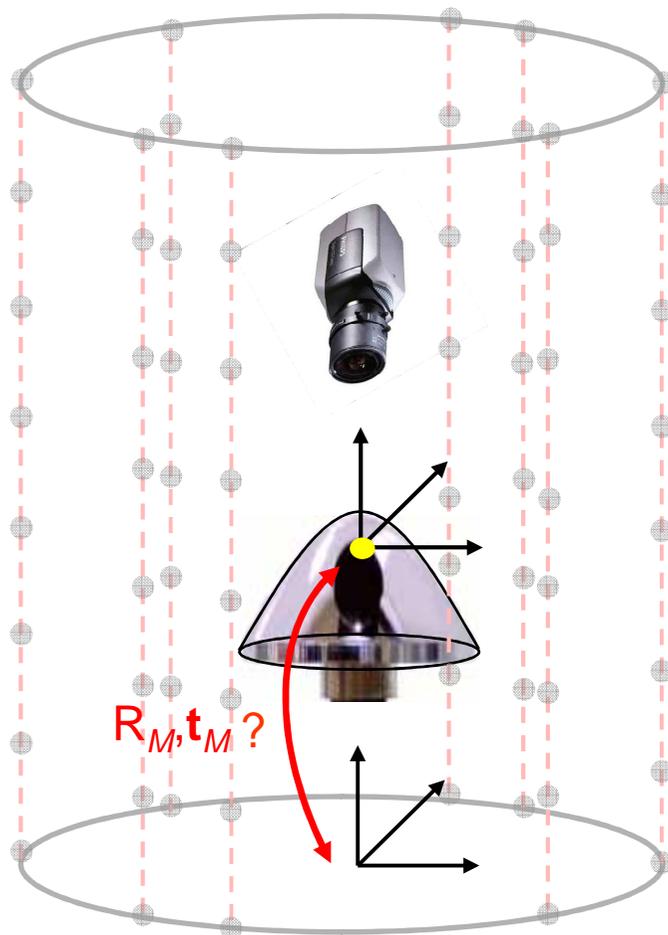
➤ Pas d'échantillonnage $\Delta\theta=1^\circ$

**160 points d'intérêt +
7200 re-crés**

Résultats : **synthèse**

| | Erreur moyenne de rétro-projection | Erreur moyenne de reconstruction en mm | Erreur moyenne de reconstruction en % de la distance aux points test |
|--|---|--|--|
| Distribution régulière des points d'intérêt | | | |
| Simulation | $\bar{\epsilon} = 1.77 \pm 1.27 \text{ mm}$ | $\bar{\epsilon} = 14.93 \pm 12.45 \text{ mm}$ | $\bar{\epsilon}_{\%} = 0.46\%$ |
| Cas réel | $\bar{\epsilon} = 2.08 \pm 2.01 \text{ mm}$ | Pas d'erreur de reconstruction correspondante car impossible de connaître avec exactitude les coordonnées de points 3D | |
| Distribution adaptée des points d'intérêt | | | |
| Simulation | $\bar{\epsilon} = 1.70 \pm 1.17 \text{ mm}$ | $\bar{\epsilon} = 90.25 \pm 16.08 \text{ mm}$ | $\bar{\epsilon}_{\%} = 2.74\%$ |

Remarques



Position du problème

→ Hypothèse **contraignante** de la méthode d'étalonnage proposée :

Pose mire-capteur supposée connue : $R_M, t_M?$

→ Problème d'**estimation de pose délicat** du fait du caractère non-paramétrique de l'étalonnage

Méthode

→ Projection d'un **cercle 3D** en une **ellipse en 2D**

→ **Modification itérative** des coordonnées des points 3D pour qu'un cercle 3D se projette en un **cercle 2D**

Conclusions : « étalonnage non-paramétrique et méthode de pré-dimensionnement de la mire »

- **Méthode d'étalonnage non-paramétrique** pour des capteurs catadioptriques
 - Nouvel espace de représentation
 - Maillage : aspect discret
 - Interpolation numérique aux voisinages des points de référence
- **Pré-dimensionnement** d'une mire 3D adaptée à la **résolution du capteur**
 - Utilisation des spécificités des projections des points de mire
- Résultats :
 - Approche empirique
 - **Validation de la méthode**





Plan

1. Conception du capteur

- A. Systèmes pour la numérisation de scènes 3D
- B. Solution matérielle

2. Etalonnage géométrique d'un capteur catadioptrique

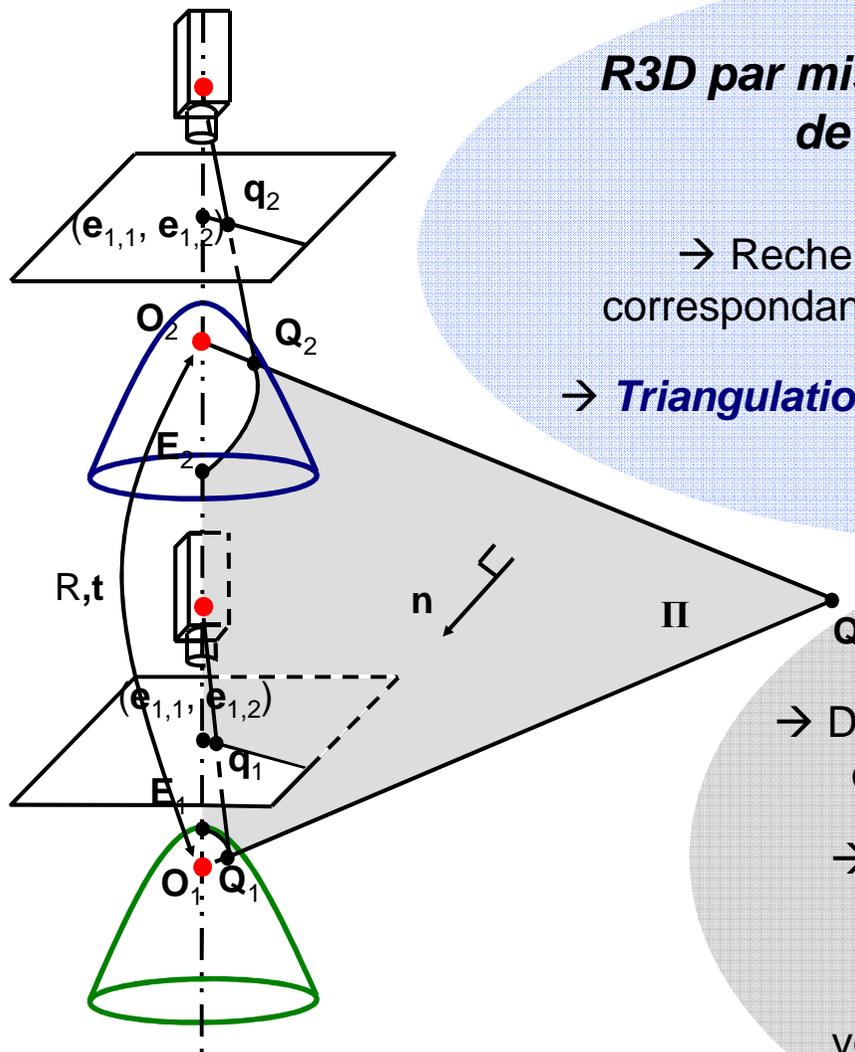
- A. Etalonnage paramétrique
- B. Etalonnage non-paramétrique
- C. Méthode de pré-dimensionnement de la mire d'étalonnage

3. Reconstruction 3D par vision stéréoscopique omnidirectionnelle

- A. Reconstruction 3D volumétrique *statique*
- B. Reconstruction 3D volumétrique *dynamique*

4. Conclusions générales et perspectives

Principes et méthodes de reconstruction 3D



R3D par mise en correspondances de primitives 2D :

2D → 3D

→ Recherche des pixels stéréo-correspondants : **Géométrie épipolaire**

→ **Triangulation** des primitives 2D appariées

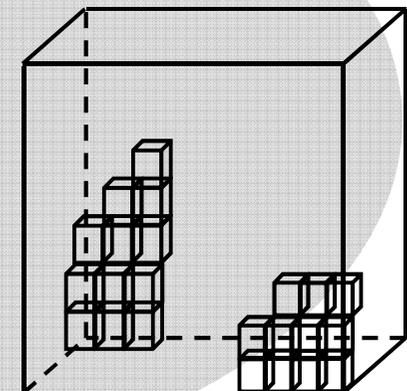
R3D Volumétrique :

3D → 2D

→ Discrétisation d'une zone d'espace en volumes élémentaires (voxels)

→ Mesure de la similarité entre les images : **photo-consistance**

→ Décision quant à la nature du voxel : **transparent, vide, opaque**

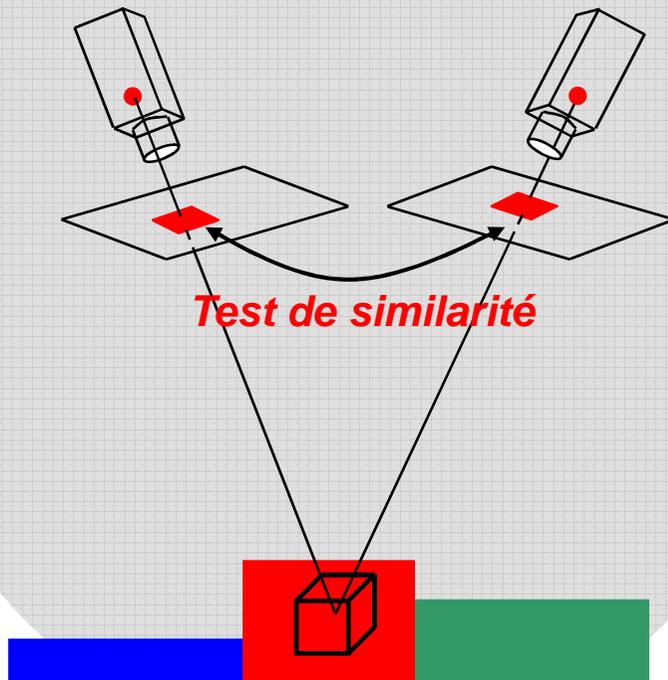


Notion de photo-consistance

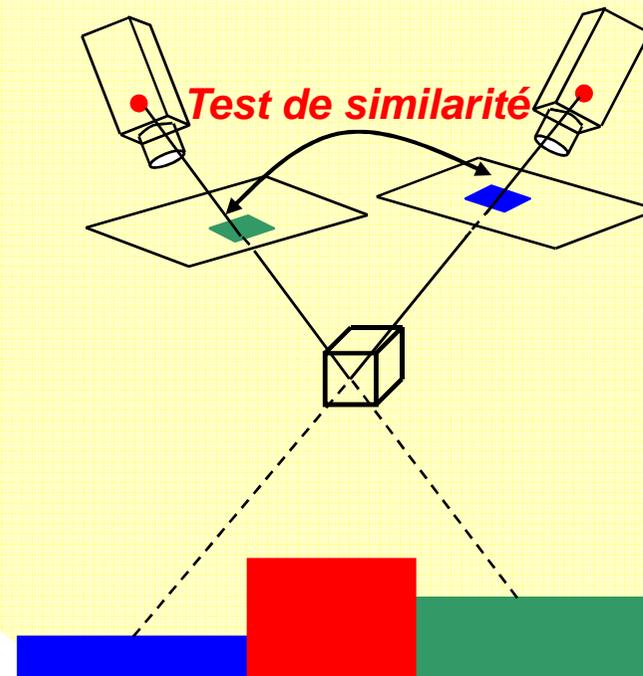
Définition

Similarité colorimétrique des projections d'objets dans les images

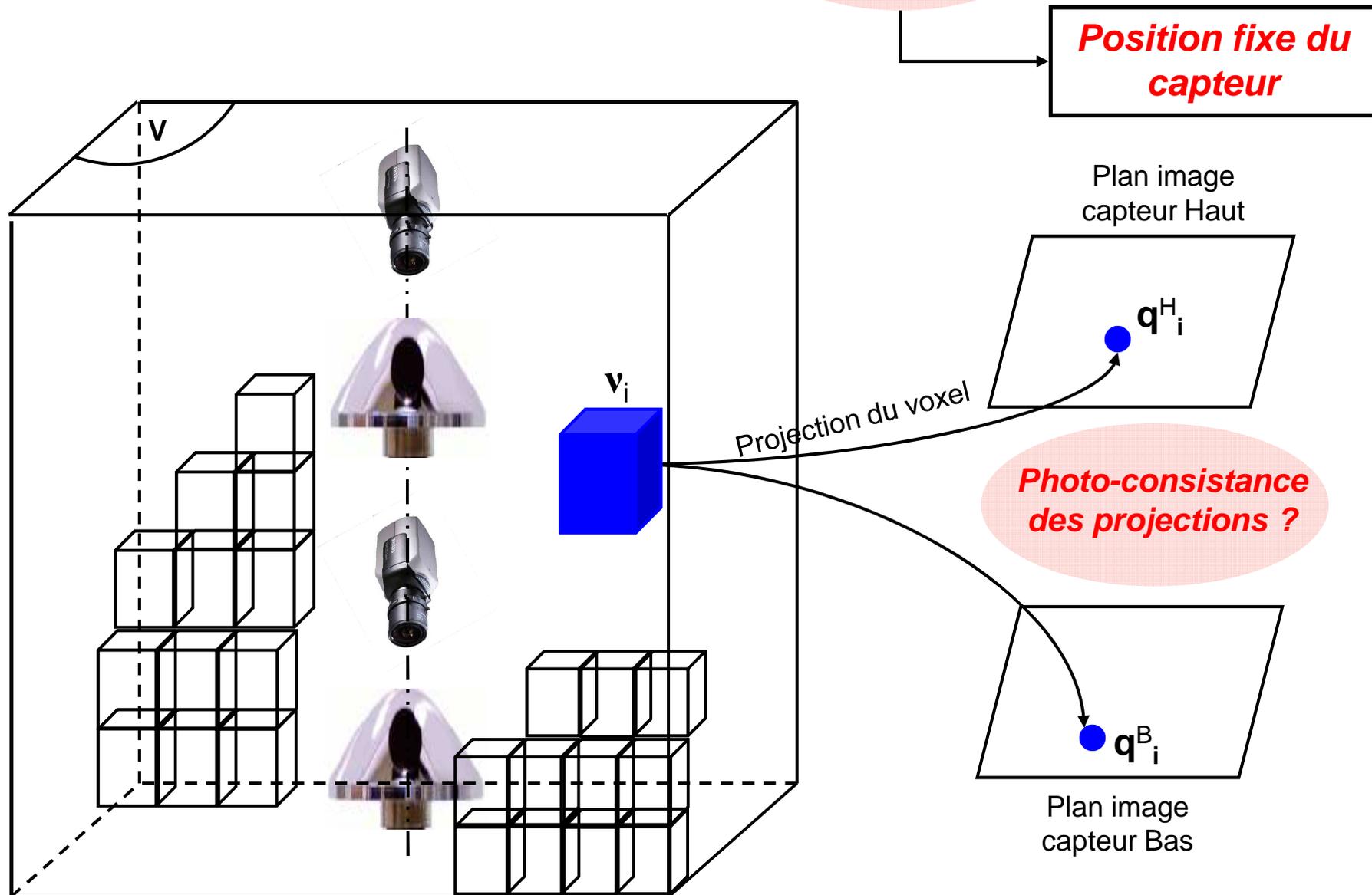
Voxel photo-consistant



Voxel non-photo-consistant



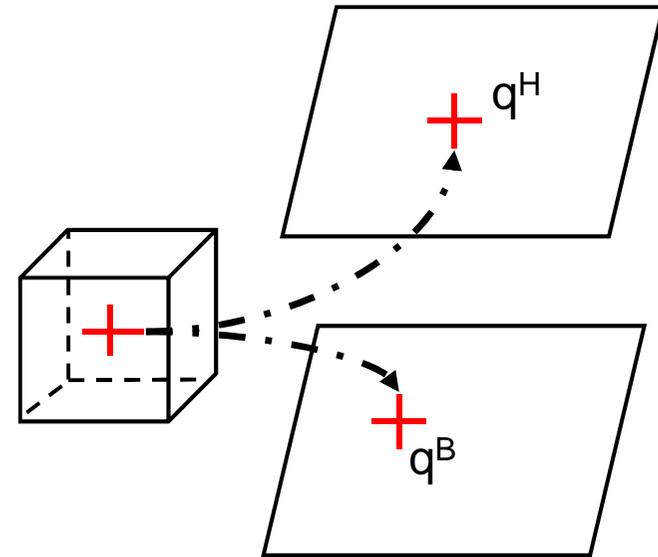
Reconstruction volumétrique **statique** (1)



Reconstruction volumétrique statique (2)

Projection d'un voxel

- Projection voxel en une surface \ll surface pixel
→ projection du **centre de gravité**
- Projection voxel en une surface \gg surface pixel
→ projection des **8 sommets**
→ approximation par un **rectangle englobant**

**Mesure de photo-consistance associée**

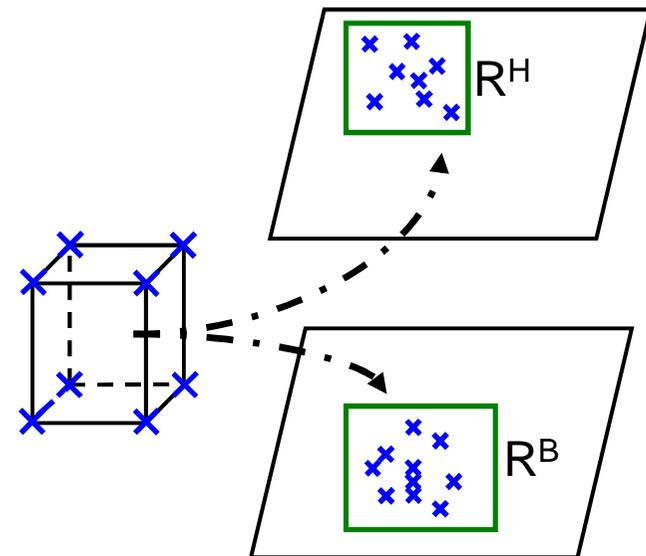
- $d(\mathbf{q}^B, \mathbf{q}^H)$ dans l'espace RGB

$$\sqrt{(R^B - R^H)^2 + (G^B - G^H)^2 + (B^B - B^H)^2} < s$$

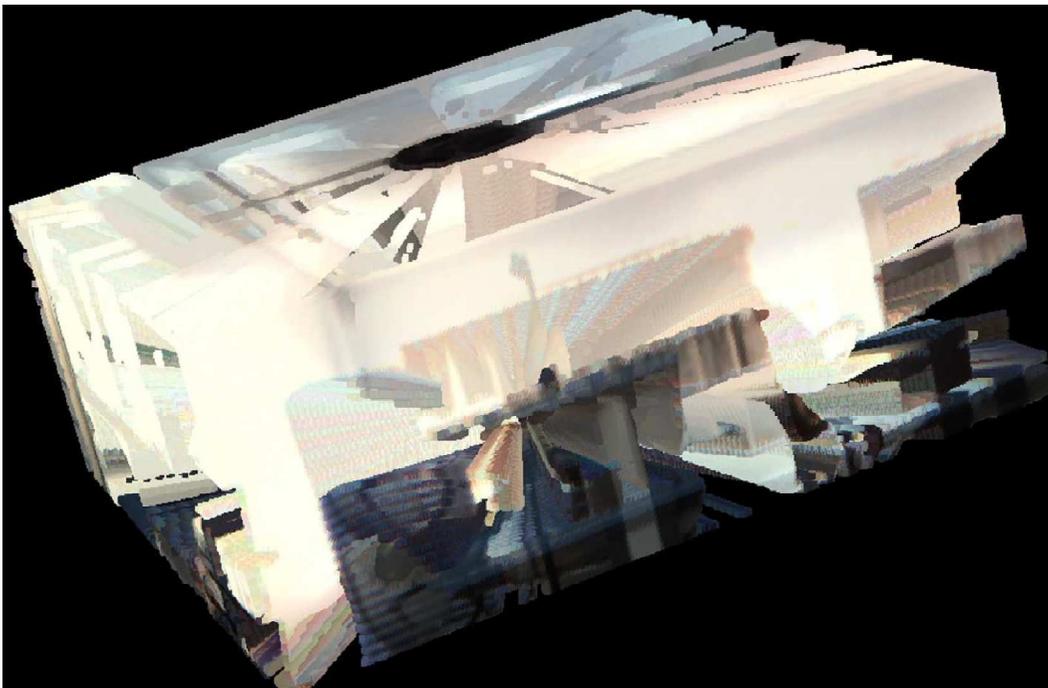
- Ecart-type d'un ensemble colorimétrique $\{c_1, \dots, c_i, \dots, c_I\}$ des rectangles R^B et R^H

$$\frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} < s$$

(σ_0 Ecart-type d'une surface homogène)



Résultats (1)



➤ Volume de reconstruction :
500*500*200 voxels

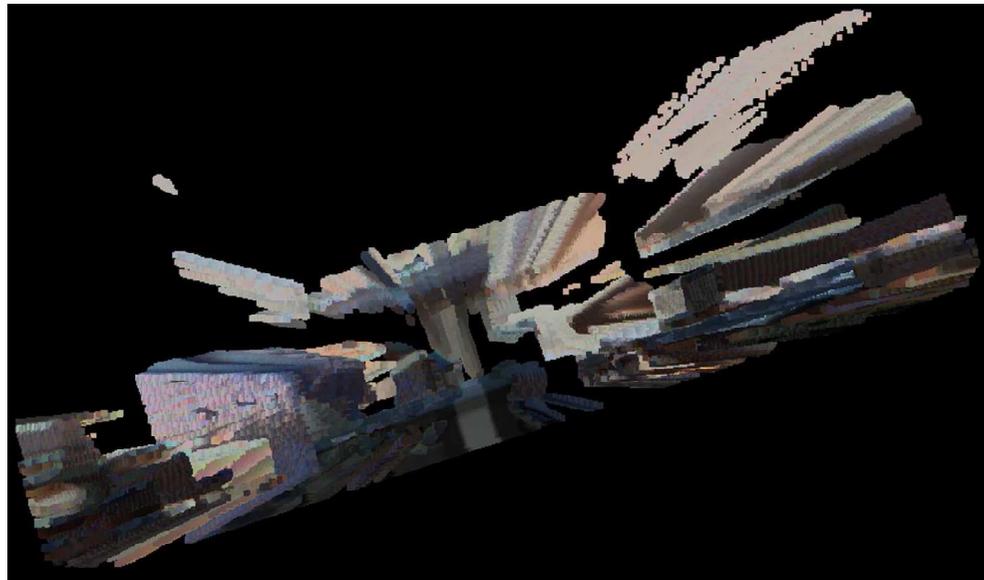
➤ Voxel : cellule 3D *infinitésimale*
 $10*10*10\text{mm}^3$ approximé par son
centre de gravité

Résultats (2)

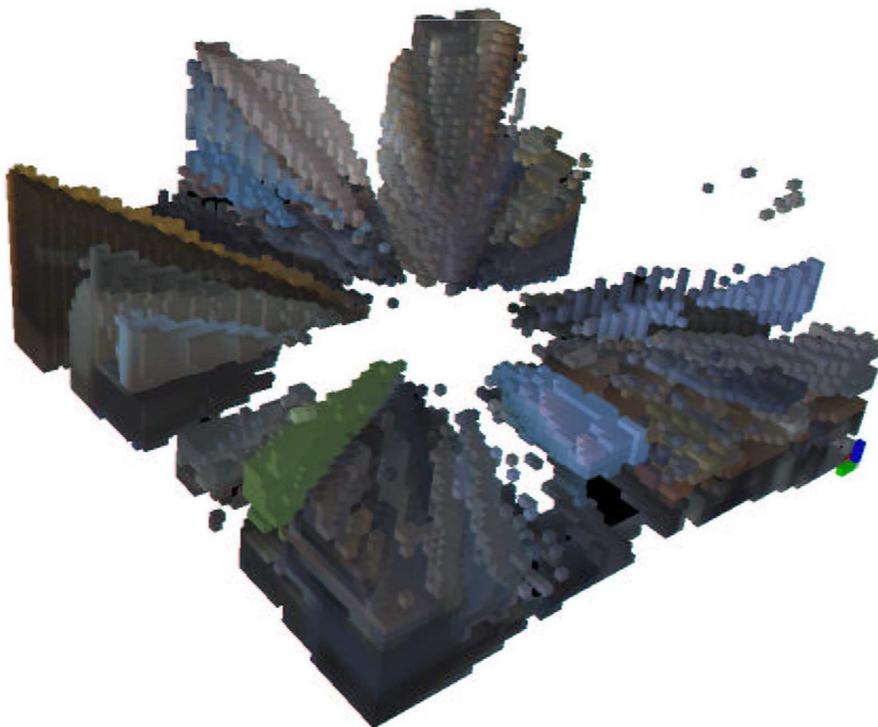
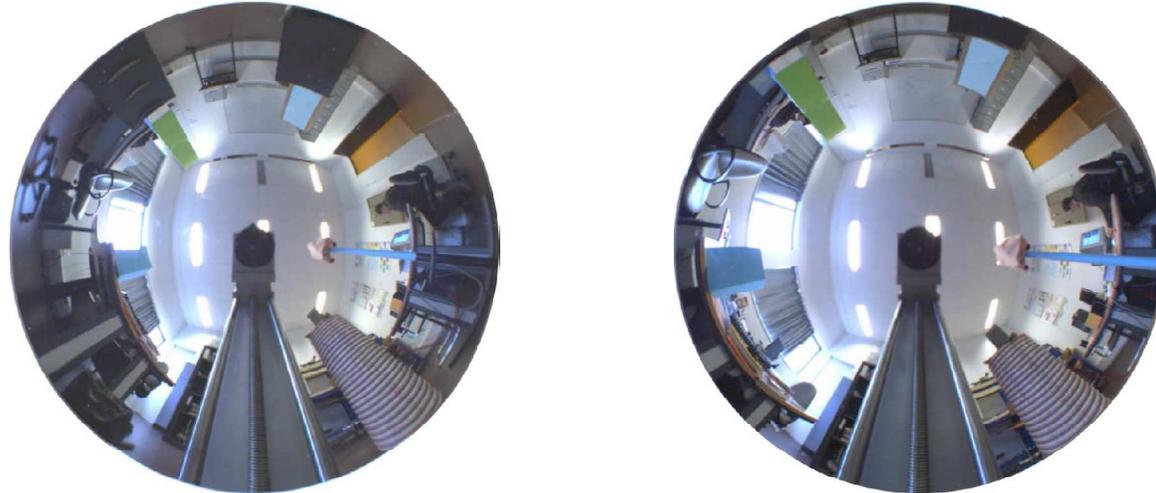


➤ Suppression des voxels de luminance élevée

➤ Vue en coupe dans le plan YOZ



Résultats (3)



➤ Volume de reconstruction :
200*200*100 voxels

➤ Voxel : cellule 3D *non-infinitésimale*
50*50*50mm³ approximé par ses **8**
sommets

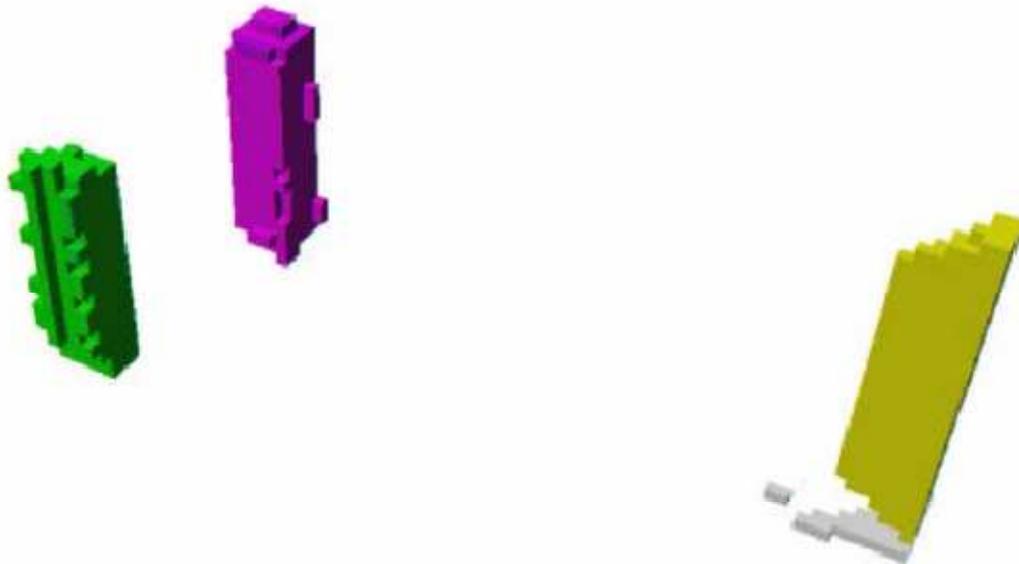
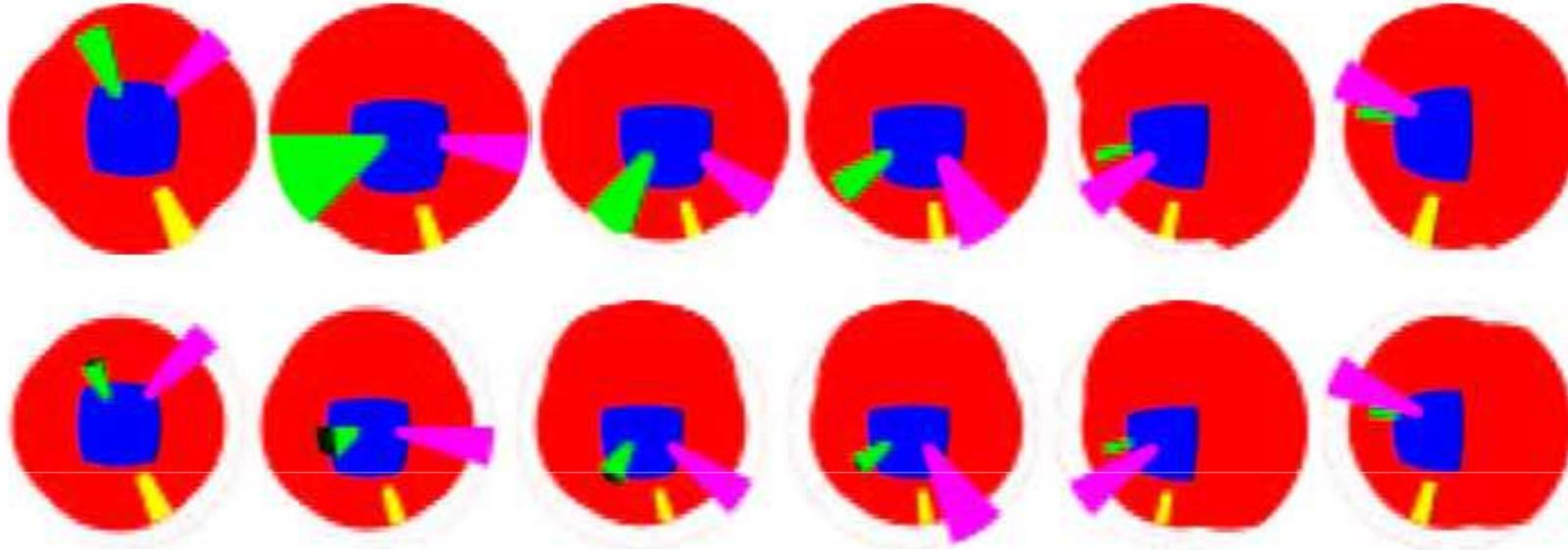
Principe d'une reconstruction 3D volumétrique dynamique

Définition

➤ Intersection des reconstructions volumétriques statiques obtenues aux instants $\{t, \dots, t + n\Delta t, \dots, t + N\Delta t\}$

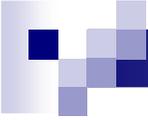
$$R3D_{\text{dyn}}(t) : \bigcap_{n=0}^N R3D_{\text{stat}}(t + n\Delta t)$$

Résultats



➤ Volume de reconstruction :
200*200*100 voxels

➤ Voxel : cellule 3D *non-infinitesimale*
50*50*50mm³ approximé par ses **8**
sommets



Conclusions : « reconstruction 3D par vision stéréoscopique omnidirectionnelle »

- **Méthode alternative** de reconstruction 3D pour des capteurs catadioptriques
- Reconstruction 3D **statique**
 - Volume de reconstruction **peu creusé** car **peu de points de vue**
 - Reconstruction des objets sous forme de **cônes dans l'espace 3D**
- Reconstruction 3D **dynamique**
 - Evaluation sur un cas simple : déplacements élémentaires
 - Silhouettes des **objets reconstruits** sont **affinées**



Plan

1. Conception du capteur

- A. Systèmes pour la numérisation de scènes 3D
- B. Solution matérielle

2. Etalonnage géométrique d'un capteur catadioptrique

- A. Etalonnage paramétrique
- B. Etalonnage non-paramétrique
- C. Méthode de pré-dimensionnement de la mire d'étalonnage

3. Reconstruction 3D par vision stéréoscopique omnidirectionnelle

- A. Reconstruction 3D volumétrique *statique*
- B. Reconstruction 3D volumétrique *dynamique*

4. Conclusions générales et perspectives

Conclusions générales (1)



→ **Solution** pertinente car elle permet de reconstruire en 3D à un *instant t* et pour des *environnements dynamiques*

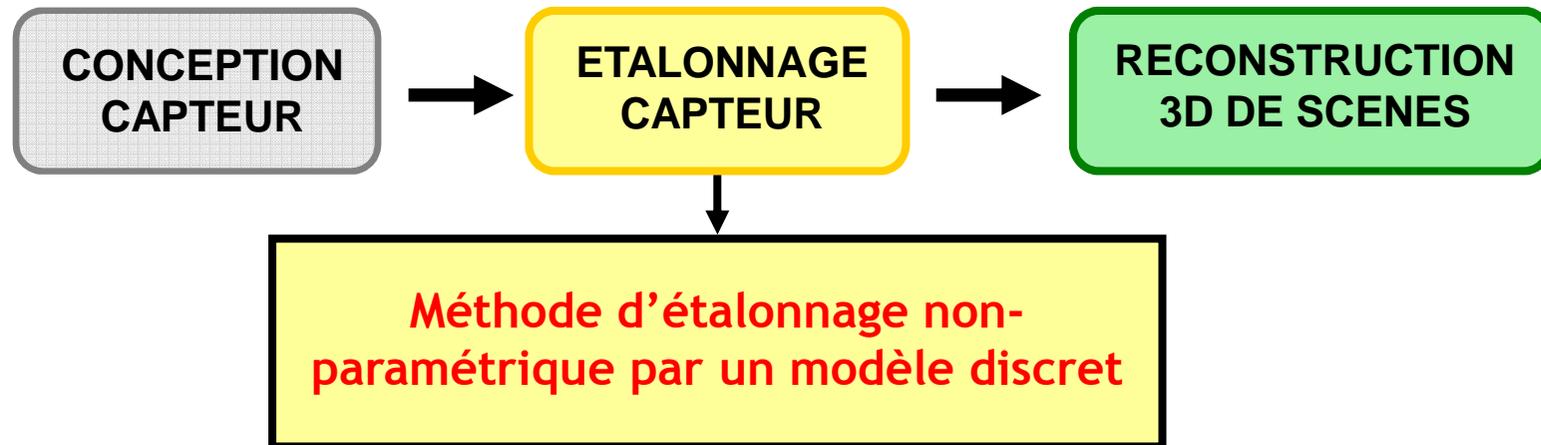
→ **Solution** pertinente pour des applications nécessitant :

- **Un champ d'observation important**

(ex. navigation de robots mobiles autonomes

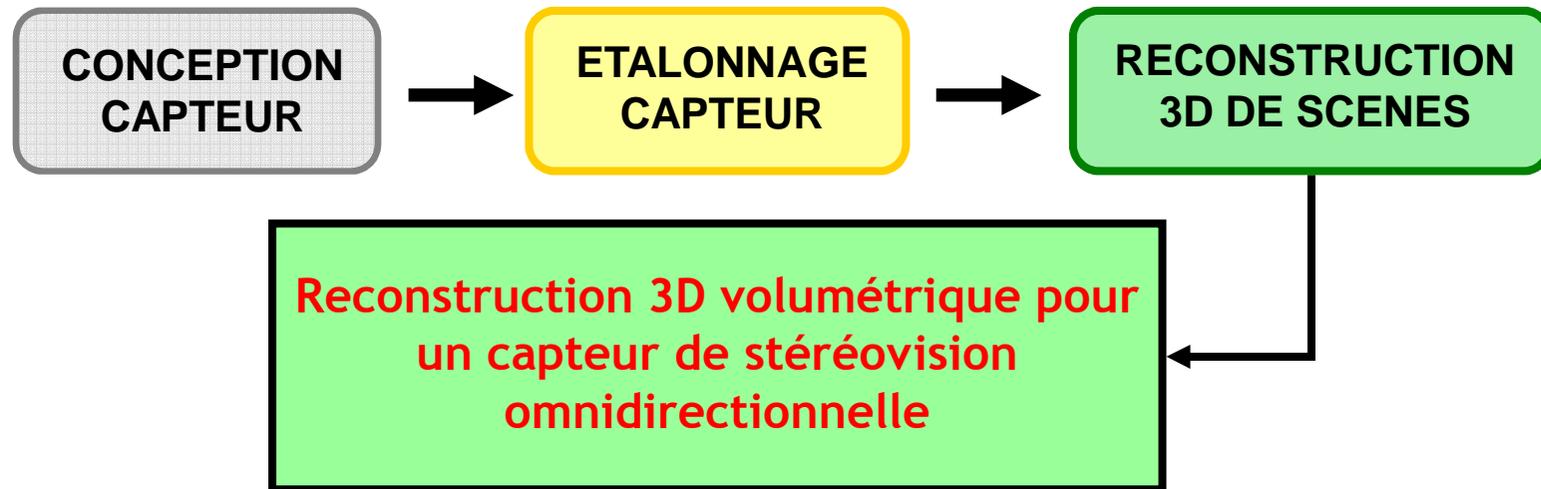
Thèse de Rémi Boutteau depuis septembre 2006)

Conclusions générales (2)



- Solution permettant de **relâcher les contraintes** inhérentes aux modèles
- Résultats pertinents qui permettent de **valider l'approche**
- Ajustement faisceaux, etc. sont **délicats à mettre en œuvre**

Conclusions générales (3)

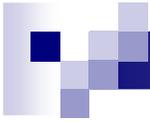


- Méthode permettant de pallier les **problèmes d'appariement de points 2D**
- En statique : volume **peu creusé** car pas assez de points de vue
- En dynamique : **résultats concluants... mais** pour des déplacements simples

- **Production scientifique** : 1 article revue
 - 4 articles de conférences internationales
 - 2 participations à des journées GdR

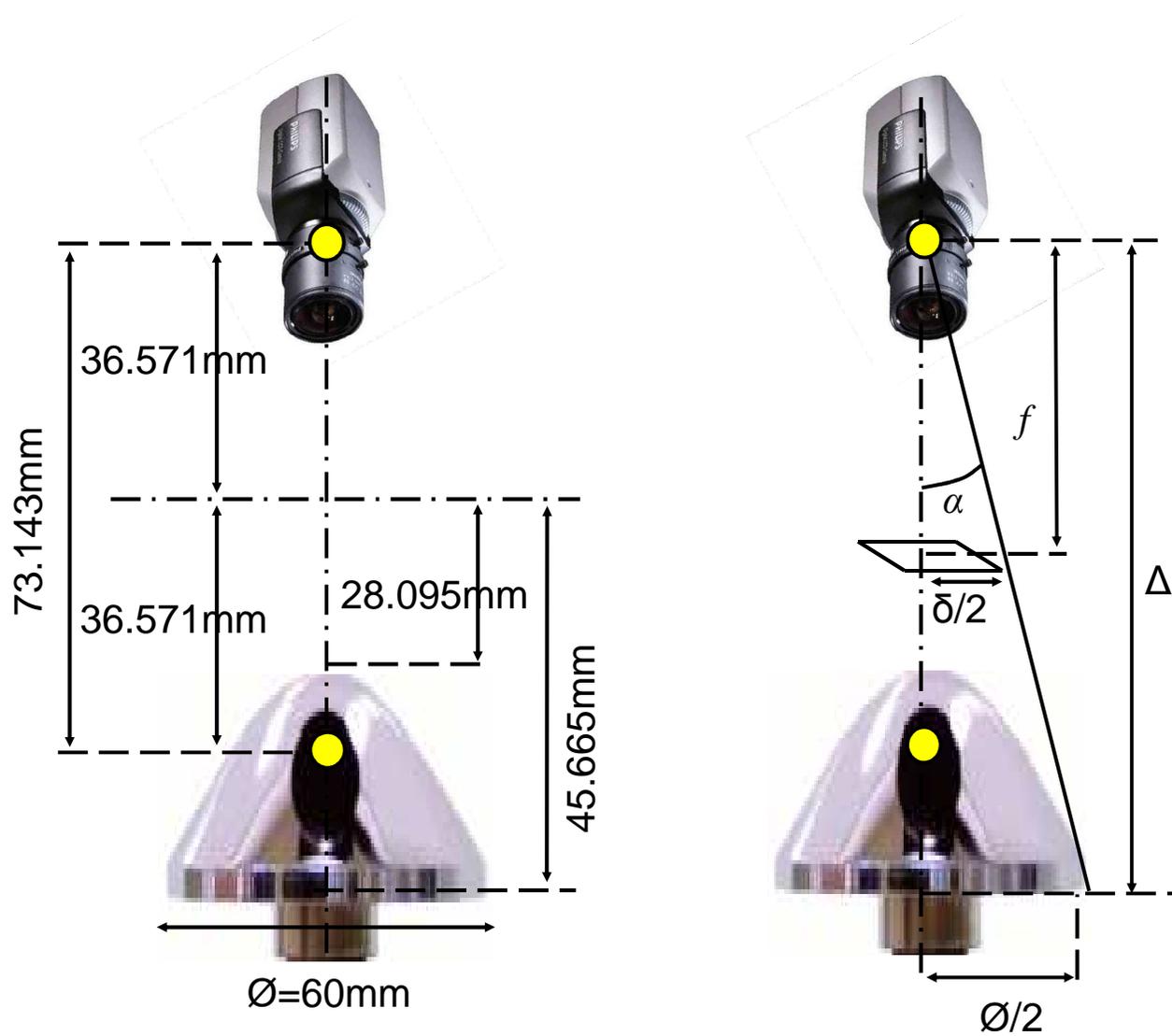
Perspectives

- Vérification de la pertinence de la **procédure d'estimation de pose mire-capteur** pour l'étalonnage non-paramétrique
- Evaluation de la méthode d'**étalonnage non-paramétrique** pour des systèmes présentant **des défauts d'usinage**, des miroirs dont les **équations ne sont pas connues** ou encore des **systèmes caméra-miroir désalignés**
- Réalisation d'un **banc d'essai** des **méthodes d'étalonnage** (paramétrique, non-paramétrique, modèle ad hoc, unifié, etc.)
- Généralisation de la méthode volumétrique dynamique et implémentation sur des **architectures temps-réel dédiées** (Thèse de Romain Rossi depuis septembre 2006)



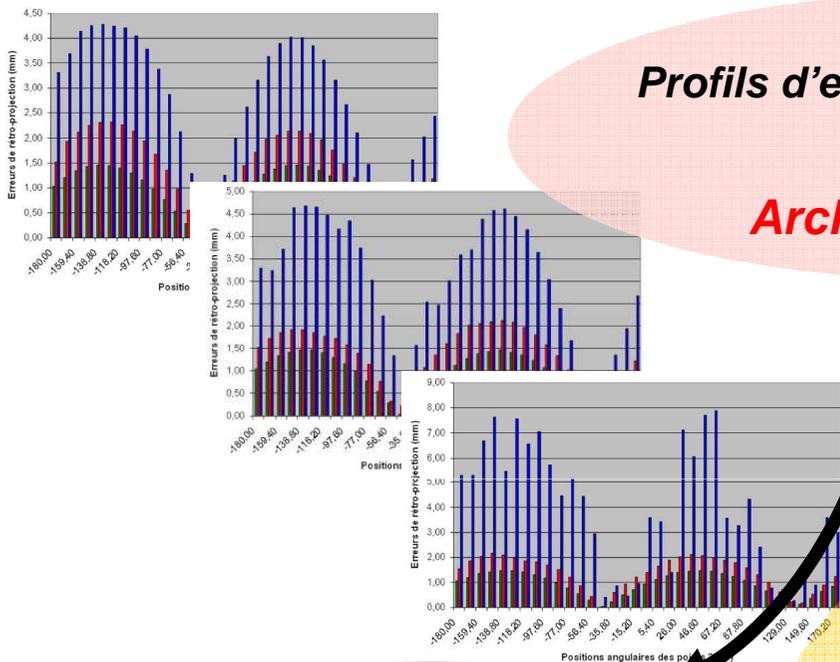
Merci pour votre attention

Calcul de la focale



$$f = \frac{\delta\Delta}{\phi} = 6.579\text{mm}$$

Erreurs de rétro-projection



Profils d'erreur de rétro-projection spécifiques :

Arches de sinusoïde

Points test proche des points de référence du maillage

Variations entre les diamètres des projections 2D opposées

Cercle → Ellipse

