

# CONTRIBUTION A LA STEREOVISION OMNIDIRECTIONNELLE ET AU TRAITEMENT DES IMAGES CATADIOPTRIQUES : APPLICATION AUX SYSTEMES AUTONOMES

Omar EL KADMIRI

8 Septembre 2014

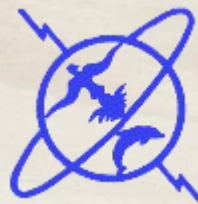
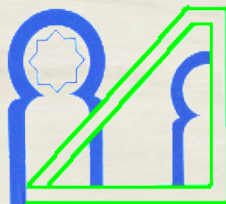
Soutenance de thèse de doctorat

Université Mohammed V-Agdal, Faculté Des Sciences Rabat

Laboratoire d'Electronique et de Traitement du

Signal/Géomatique (LETS/Geomat)

omar.elkadmiri@gmail.com



## Introduction, contexte et problématique

La stéréovision omnidirectionnelle

Traitement des images omnidirectionnelles

La vision omnidirectionnelle pour les systèmes autonomes

## Introduction

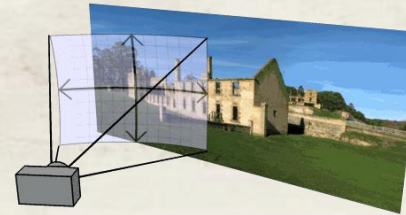
Contexte

Problématique



## Historique

- Cadre général: Vision artificielle et traitement d'image.

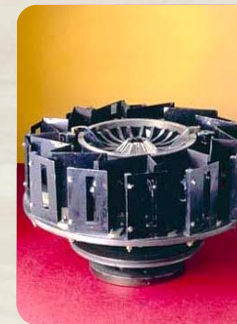


Le champ de vision  
limité d'une caméra  
ordinaire

- 1900 : Louis Lumière invente le premier procédé permettant d'obtenir une prise de vue à 360°.



L'appareil  
panoramique  
Péripote



Le projecteur  
panoramique  
Photorama

## Introduction, contexte et problématique

La stéréovision omnidirectionnelle

Traitement des images omnidirectionnelles

La vision omnidirectionnelle pour les systèmes autonomes

## Introduction

Contexte

Problématique



## La vision à large champ dans la nature

Le hibou



L'araignée  
sautante



Le poisson



Gigantocypris  
d'ostracodes



# Introduction, contexte et problématique

La stéréovision omnidirectionnelle

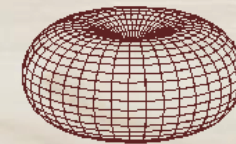
Traitement des images omnidirectionnelles

La vision omnidirectionnelle pour les systèmes autonomes

# Introduction

Contexte

Problématique



## Les capteurs de vision omnidirectionnelle



Caméra rotative



Multi-Capteurs



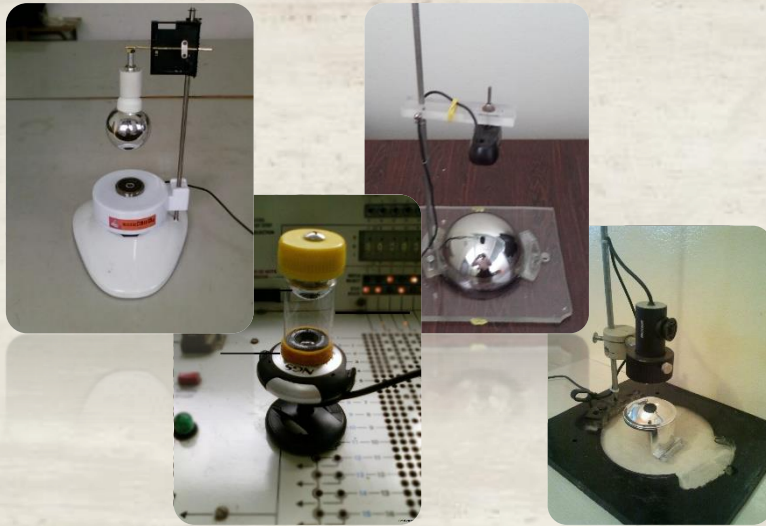
Lentilles  
spéciales



Caméra  
catadioptrique



## Etude des systèmes de vision et des images catadioptriques



☑ Les avantages des caméras catadioptriques :

- la prise de vue omnidirectionnelle instantanée
- Une bonne résolution
- Coût de production modéré
- Compacité



# Introduction, contexte et problématique

La stéréovision omnidirectionnelle

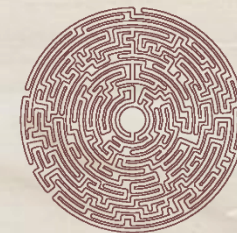
Traitement des images omnidirectionnelles

La vision omnidirectionnelle pour les systèmes autonomes

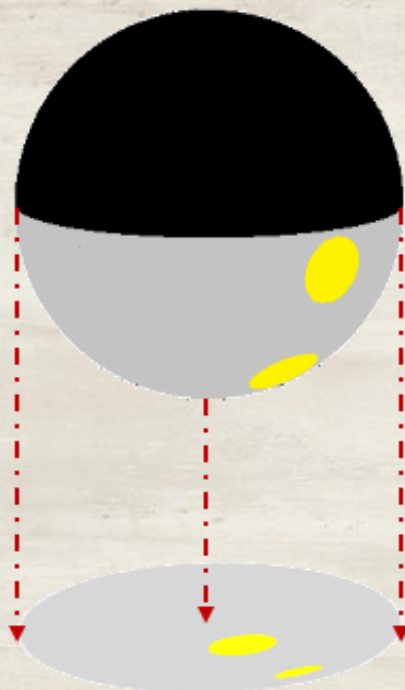
Introduction

Contexte

**Problématique**



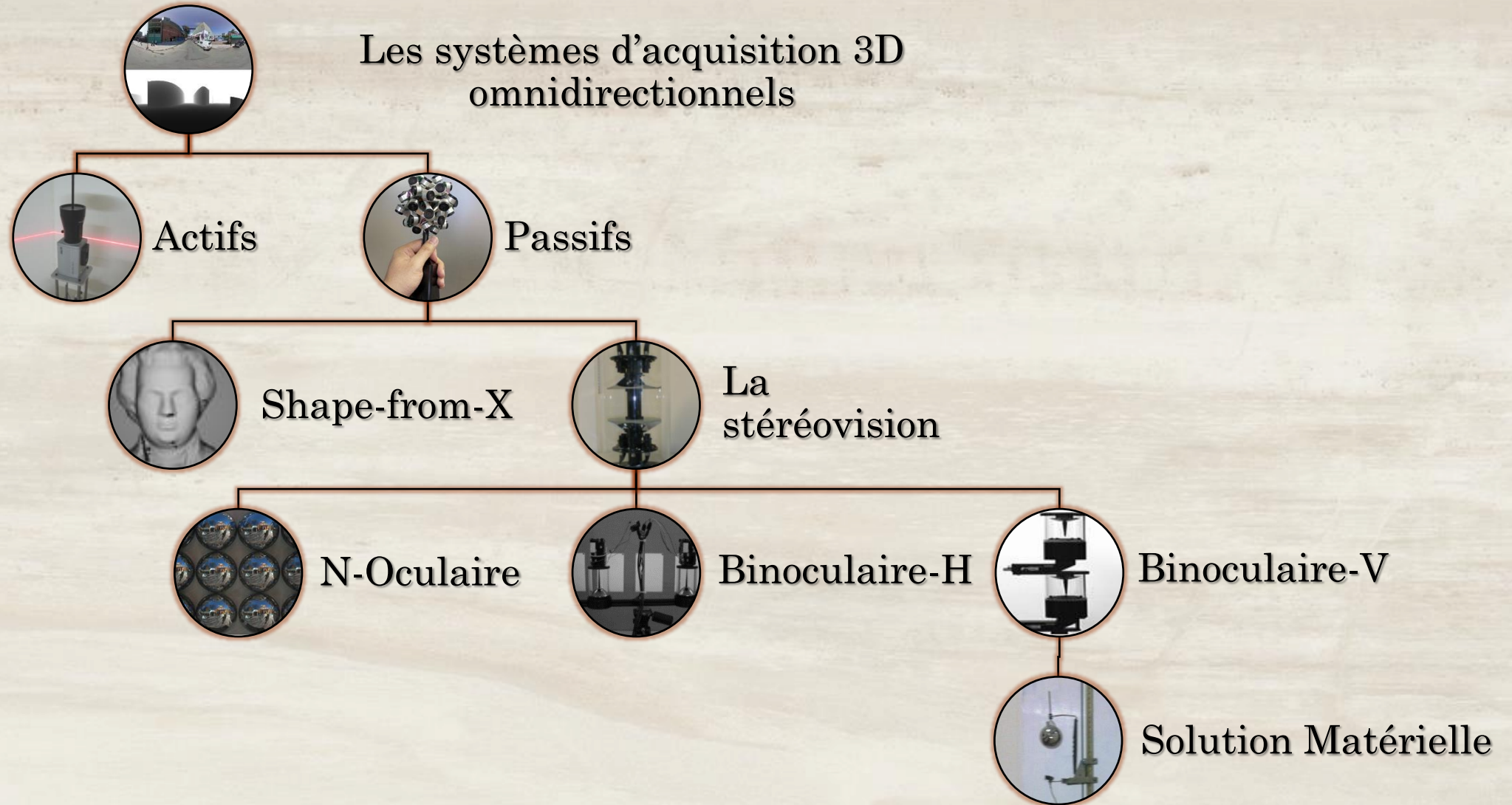
## La résolution non-uniforme



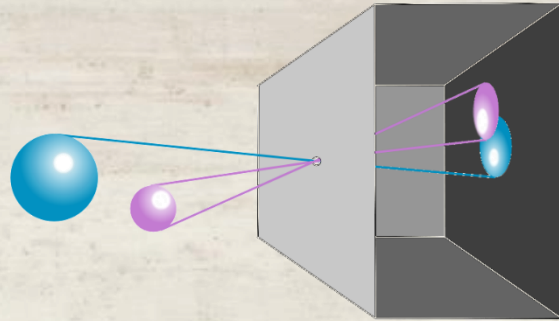
Formation d'une image  
catadioptrique par projection  
orthographique.

## Les distorsions radiales





Introduction, contexte et problématique  
**La stéréovision omnidirectionnelle**  
 Traitement des images omnidirectionnelles  
 La vision omnidirectionnelle pour les systèmes autonomes



3D → 2D

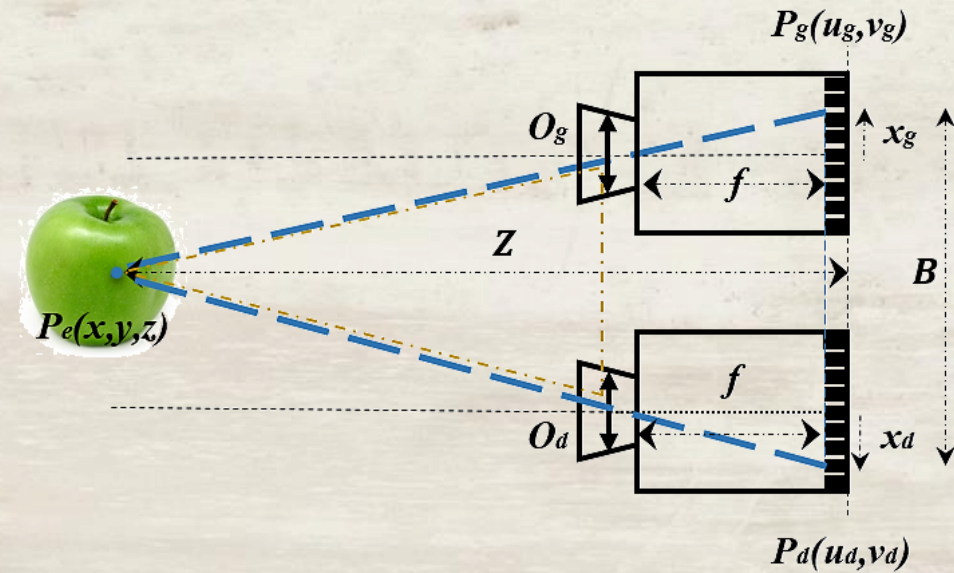


Illusion d'optique due au manque d'information sur la profondeur

**Les systèmes d'acquisition 3D passifs**  
 Solution matérielle



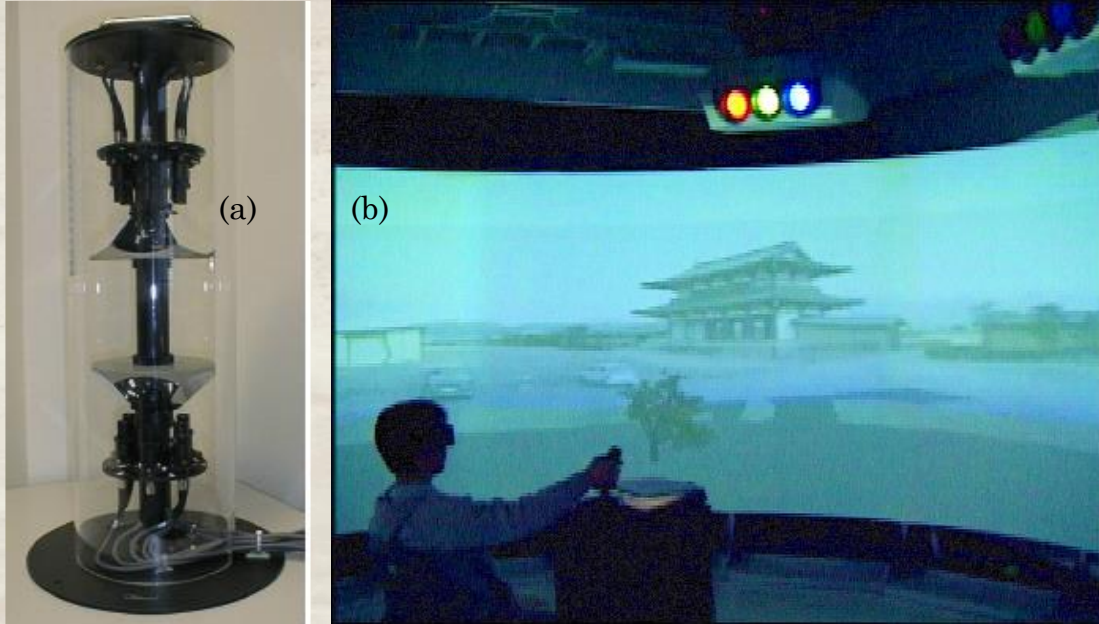
● **Shape-from-stereo**



$$Z = f \frac{B}{d}$$

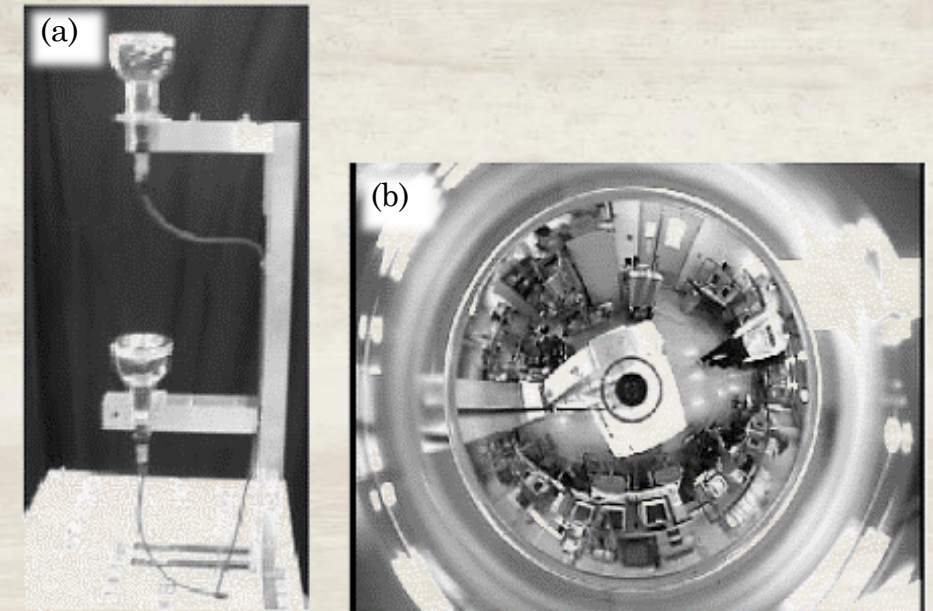
$$d = x_g - x_d$$





(a) Capteur d'image stéréo omnidirectionnel. (b)  
Système de projection 3D immersive  
**CYLINDRA.**

*J. Shimamura, N. Yokoya, H. Takemura et K. & Yamazawa, «Construction of an immersive mixed environment using an omnidirectional stereo image sensor.» Omnidirectional Vision, 2000. Proceedings. IEEE Workshop on (pp. 62-69). IEEE, 2000.*

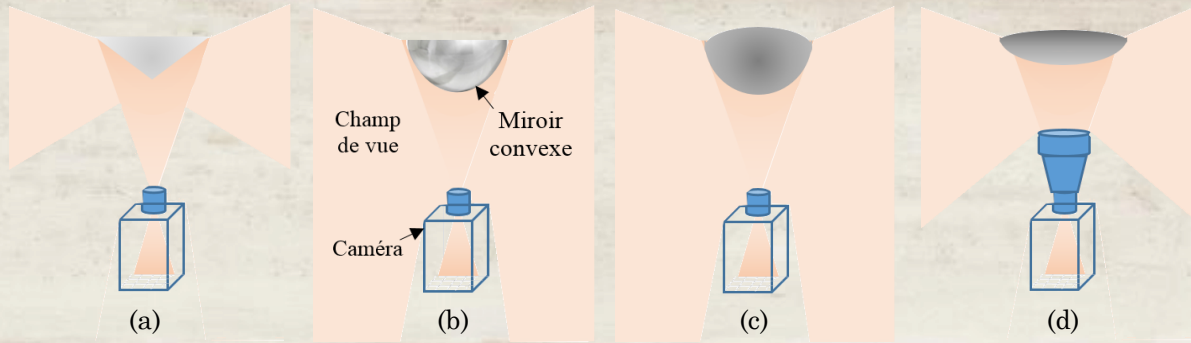


Système stéréo omnidirectionnel à miroirs  
hyperboliques. (a) configuration du système. (b)  
exemple d'image.

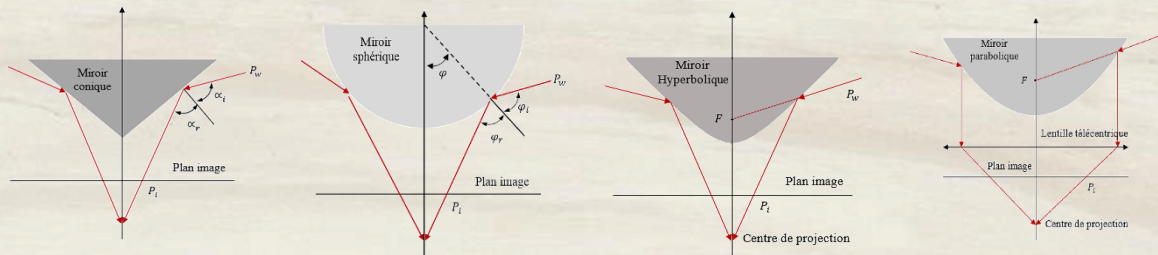
*Koyasu, Hiroshi, Jun Miura, and Yoshiaki Shirai. "Real-time omnidirectional stereo for obstacle detection and tracking in dynamic environments." Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on. Vol. 1. IEEE, 2001.*



## Choix du miroir



Miroirs convexes pour caméras catadioptriques. (a) Miroir conique (b) Miroir sphérique (c) Miroir hyperbolique (d) Miroir parabolique.

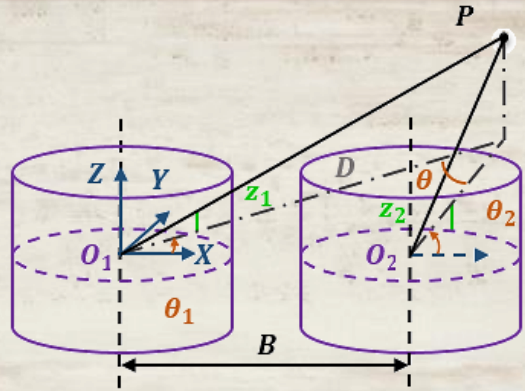


## Miroir sphérique

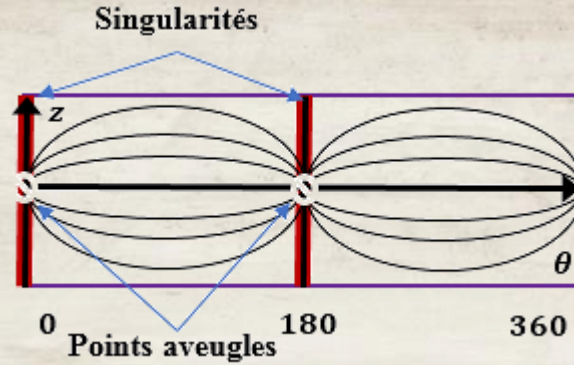
- **Symétrie centrale → Facilité d'étalonnage**
- **Facile à manufacturer**
- **Faible astigmatisme notamment au centre**
- **Distance focale nécessaire pour faire converger les rayons relativement faible**
- **Caméra non-centrale**
- **Fortes distorsions sur la périphérie de l'image**



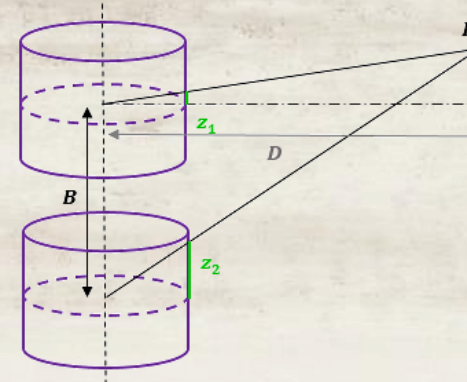
## Choix de la configuration



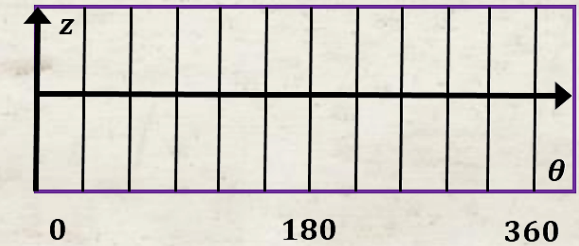
Configuration omnistéréo horizontale



Les lignes épipolaires



Configuration verticale



Les lignes épipolaires

- Occlusions mutuelles
- Des lignes épipolaires courbées
- La précision sur la profondeur est anisotropique

$$\partial D = \frac{D^2}{B \sin \theta_2} \partial \theta$$

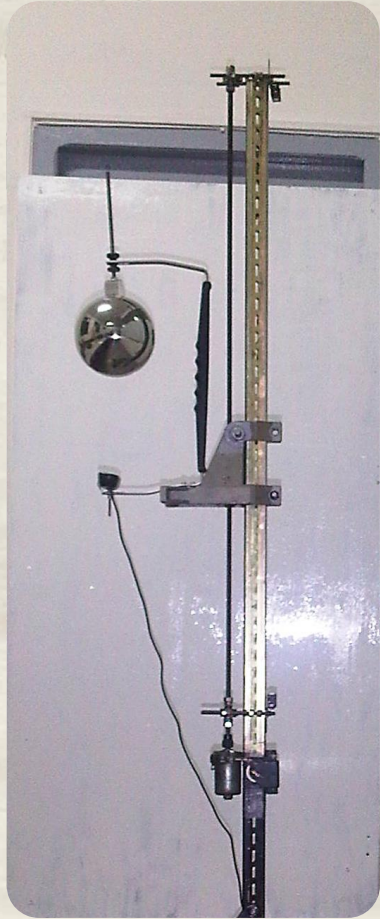
- Lignes épipolaires verticales
- Occlusions minimales
- Précision isotropique

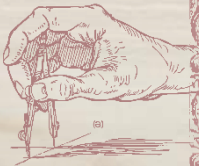
Introduction, contexte et problématique  
**La stéréovision omnidirectionnelle**

Traitement des images omnidirectionnelles

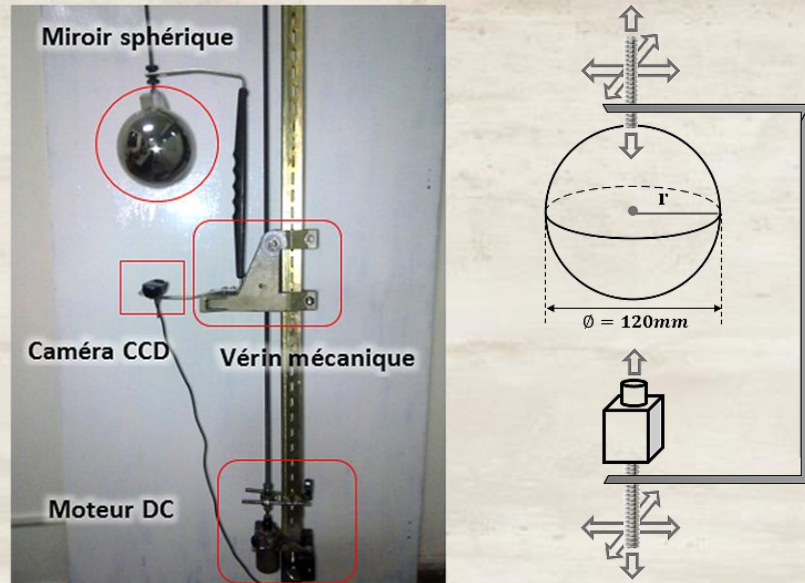
La vision omnidirectionnelle pour les systèmes autonomes

Les systèmes d'acquisition 3D actifs  
Les systèmes d'acquisition 3D passifs  
**Solution matérielle**





## Architecture matérielle du capteur proposé

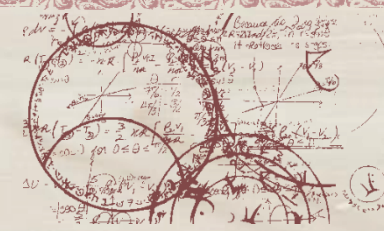


- **Capteur : Caméra CCD**
- **Interface : USB 2.0 à 30 fps**
- **Résolution : 1280 x 720**
- **Champ de vision : 360° x 200°**

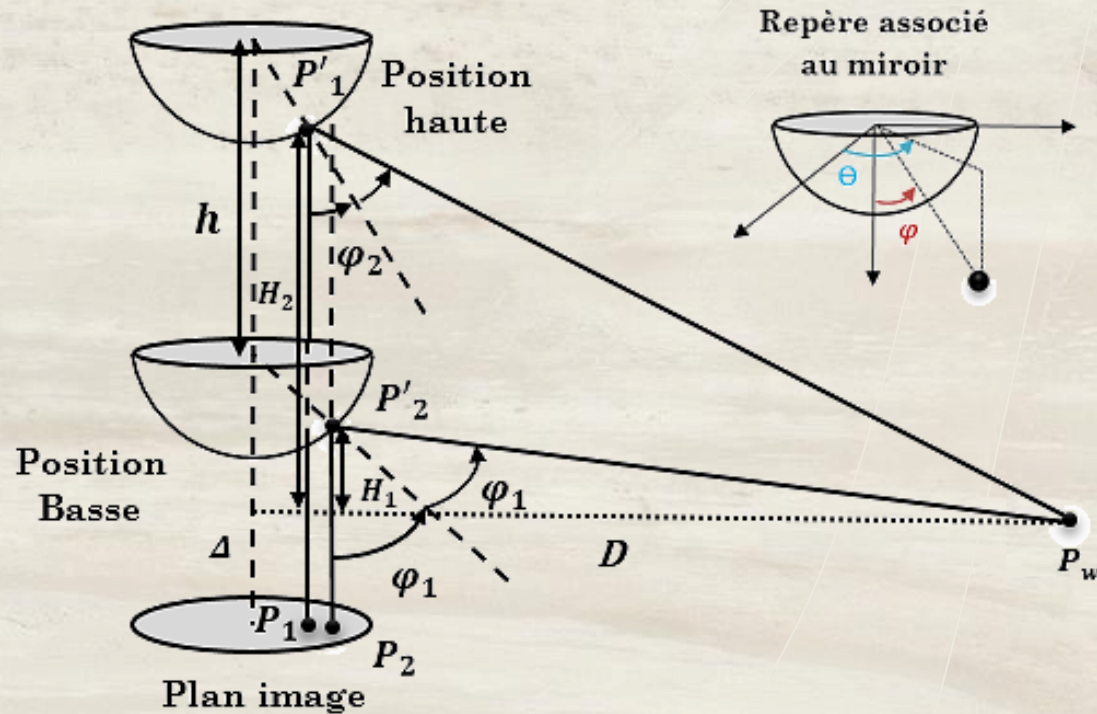
## Étalonnage du capteur



- **Alignement de l'axe optique caméra / Centre miroir**
- **Réglage de l'agencement caméra miroir**
- **Ajustement de la distance focale**



## Estimation de la profondeur par triangulation passive



- L'expression de la profondeur

$$D = \varepsilon + \frac{(h - \lambda) \times \tan(2\varphi_1) \times \tan(2\varphi_2)}{\tan(2\varphi_1) - \tan(2\varphi_2)}$$

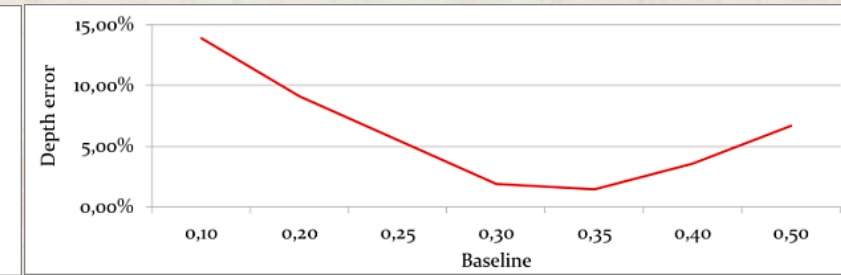
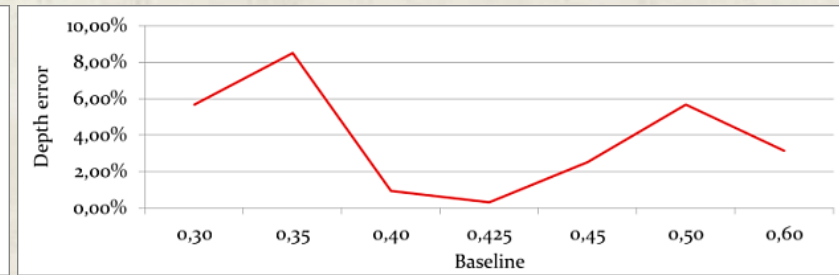
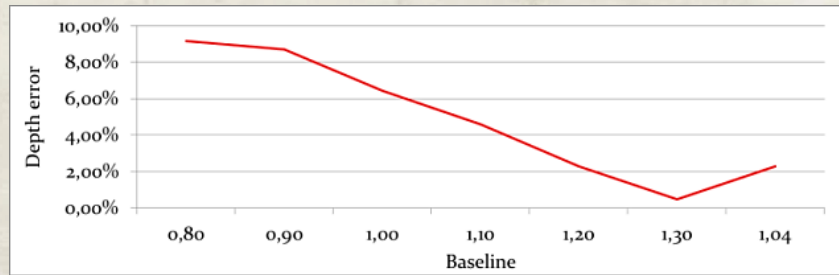
- L'expression général e de l'erreur

$$\delta D \approx \frac{D^2}{h \sin(2\varphi_1) \sin(2\varphi_2)} \delta \varphi$$



## Résultats expérimentaux

$$\delta D \approx \frac{D^2}{h \sin(2\varphi_1) \sin(2\varphi_2)} \delta\varphi$$



Real Depth (m)	2.18						
Baseline h (m)	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.04
Estimated Depth (m)	2.38	2.37	2.32	2.28	2.23	2.19	2.13
Depth error (m)	0.2	0.19	0.14	0.1	0.05	0.01	-0.05
Depth error (%)	9.17	8.72	6.42	4.59	2.29	0.46	2.29

Real Depth (m)	3.18						
Baseline h (m)	0.30	0.35	0.40	0.425	0.45	0.50	0.60
Estimated Depth (m)	3	2.91	3.15	3.17	3.1	3	3.08
Depth error (m)	-0.18	-0.27	-0.03	-0.01	-0.08	-0.18	-0.1
Depth error (%)	5.66	8.49	0.94	0.31	2.52	5.66	3.14

Real Depth (m)	4.18						
Baseline h (m)	0.10	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.50
Estimated Depth (m)	4.76	4.56	3.95	4.26	4.12	4.03	3.9
Depth error (m)	0.58	0.38	-0.23	0.08	-0.06	-0.15	-0.28
Depth error (%)	13.88	9.09	5.50	1.91	1.44	3.59	6.70

\* \* \*

Introduction, contexte et problématique

La stéréovision omnidirectionnelle

## Traitement des images omnidirectionnelles

La vision omnidirectionnelle pour les systèmes autonomes

## Propriétés des images catadioptriques

Déballage des images catadioptriques

Un détecteur de contours adapté

Un détecteur de coins adapté



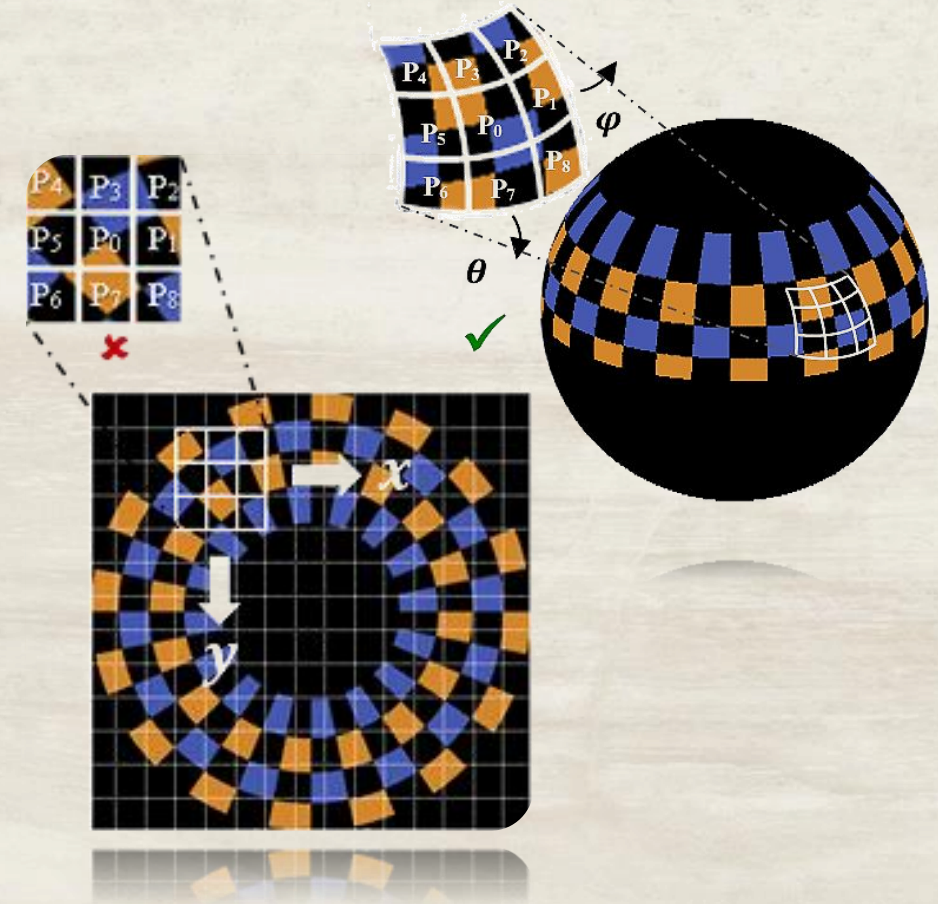
Fortes distorsions radiales



Echantillonnage non-uniforme



Disposition sphérique du voisinage pixellique



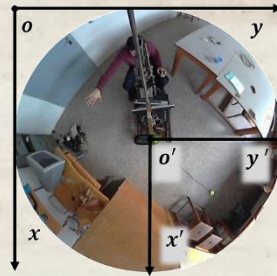


**Traitement des images omnidirectionnelles**

La procédure de déballage <sup>1</sup>proposée se déroule en quatre étapes :

- Translation de repère vers le centre de l'image

$$(x', y') = (x - x_c, y - y_c)$$

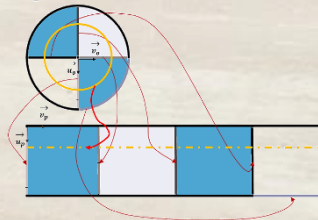


- Changement de système de coordonnées : Cartésien → Polaire

$$(\rho, \theta) = (\sqrt{x'^2 + y'^2}, \text{atan2}(y'/x'))$$

- Remappage des pixels

$$(x_p, y_p) = (\alpha(R_{max} - \rho), \beta(\theta \cdot R_{max}))$$



- Interpolation par plus proche voisin

<sup>1</sup> El Kadmiri, Omar, and Lhoussaine Masmoudi. "An omnidirectional image unwrapping approach." (ICMCS), 2011 International Conference on Multimedia Computing and Systems. IEEE, 2011.

**Déballage des images catadioptriques**

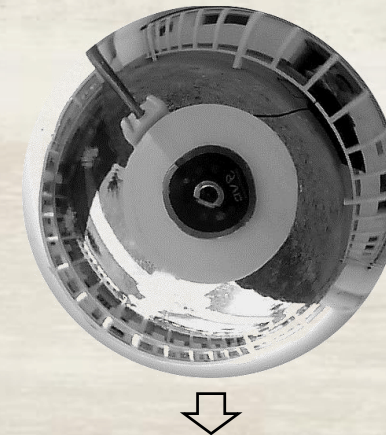
Un détecteur de contours adapté

Un détecteur de coins adapté



La résolution de l'image d'entrée	Les facteurs d'échelle ( $\alpha, \beta$ )	La résolution de l'image de sortie	Temps d'exécution
64 X 64	(1, 0.5)	17 X 100	16,021 ms
128 X 128	(1, 0.5)	35 X 204	62,509 ms
256 X 256	(1, 0.5)	67 X 409	240,115 ms
473 X 482	(1, 0.5)	130 X 769	944,725 ms
1683 X 1689	(1, 0.5)	669 X 2642	19.781 s

Temps d'exécution de l'algorithme du déballage



Introduction, contexte et problématique

La stéréovision omnidirectionnelle

**Traitement des images omnidirectionnelles**

La vision omnidirectionnelle pour les systèmes autonomes

Propriétés des images catadioptriques

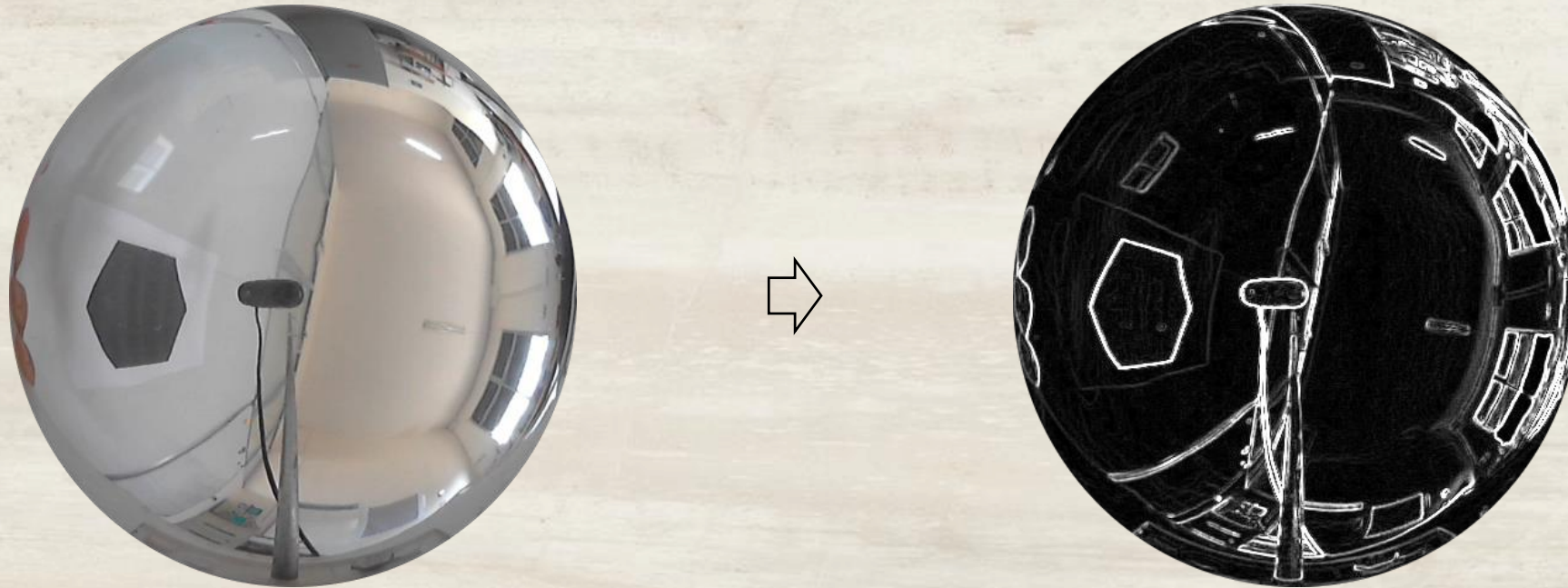
Déballage des images catadioptriques

**Un détecteur de contours adapté**

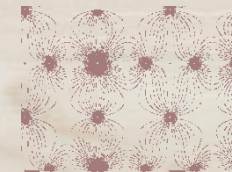
Un détecteur de coins adapté



## Détection de contours

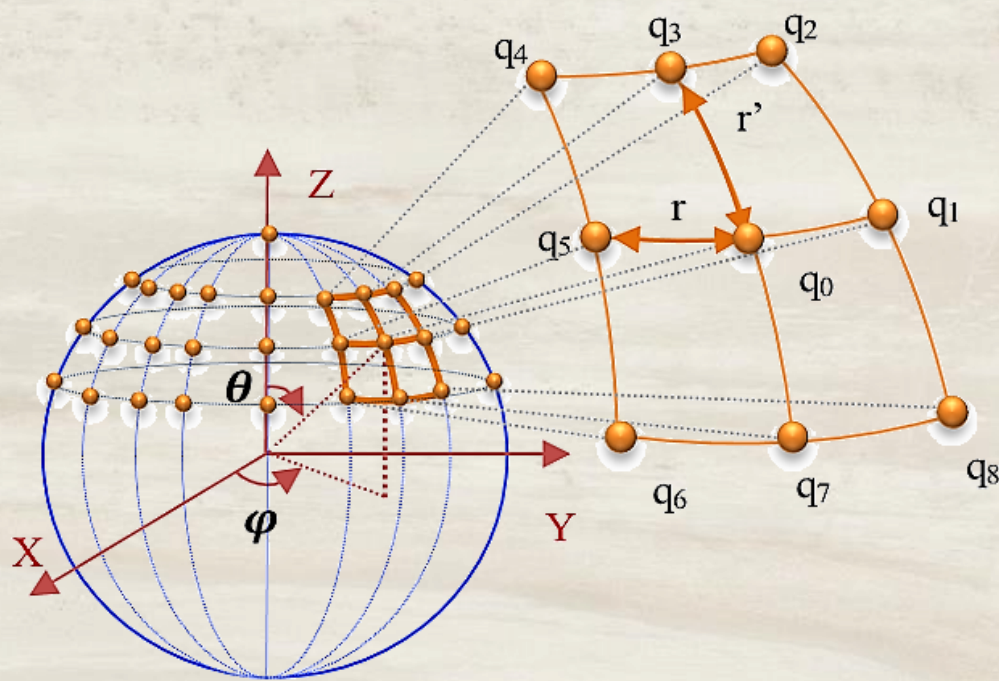


Contour : Ensemble de points indiquant un changement brutale de l'intensité de l'image



## Modèle sphérique de charges électriques virtuelles

Analogie : l'intensité de chaque pixel correspond à la charge électrique associée à ce pixel.



Condition d'équilibre :

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$$

Expression de l'ensemble des forces :

$$\vec{T}_\varphi = k \frac{q_0}{(R \sin \theta d\varphi)^2} (q_5 - q_1) \vec{e}_\varphi$$

$$\vec{L}_\theta = k \frac{q_0}{(R \sin \theta d\varphi)^2} (q_3 - q_7) \vec{e}_\theta$$

$$\vec{F}D_1 = k' \frac{q_0 \sqrt{2}}{4(\sin(\theta) d\varphi)^2} (q_6 - q_2) (\vec{e}_\varphi - \vec{e}_\theta)$$

$$\vec{F}D_2 = k' \frac{q_0 \sqrt{2}}{4(\sin(\theta) d\varphi)^2} (q_4 - q_8) (\vec{e}_\varphi + \vec{e}_\theta)$$



## Algorithme de détection des contours

Finalement

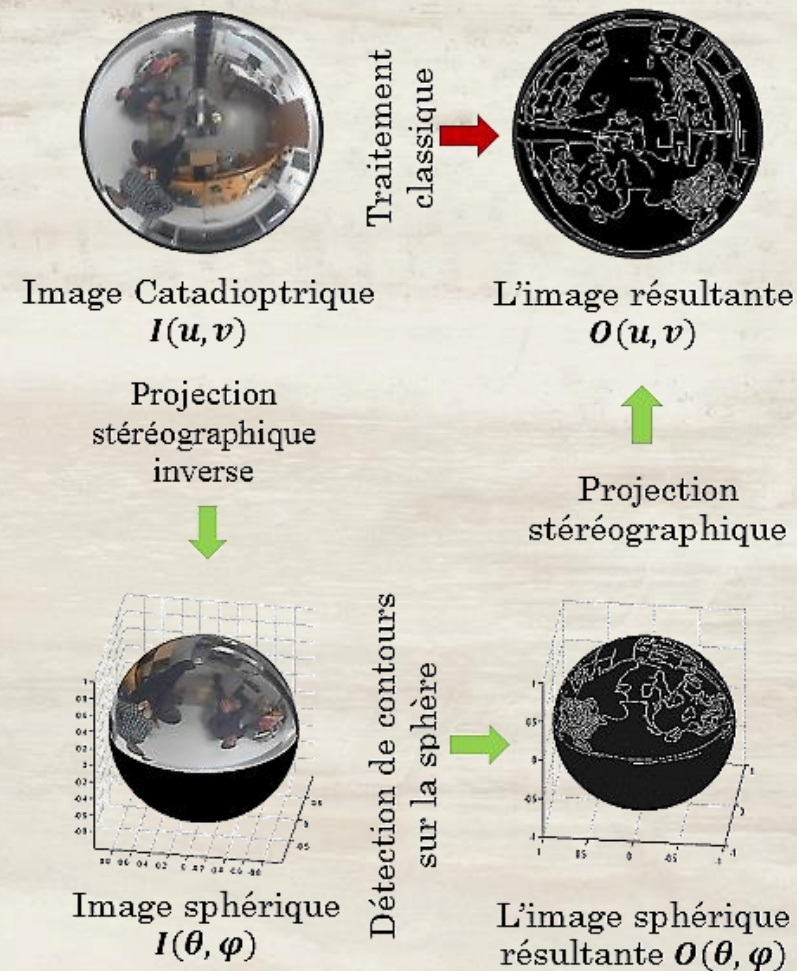
$$\vec{F}_\varphi = k'q_0 \frac{1}{(\sin(\theta)d\varphi)^2} [q_5 - q_1 + \frac{\sqrt{2}}{4}(q_6 - q_2 + q_4 - q_8)] \vec{e}_\varphi$$

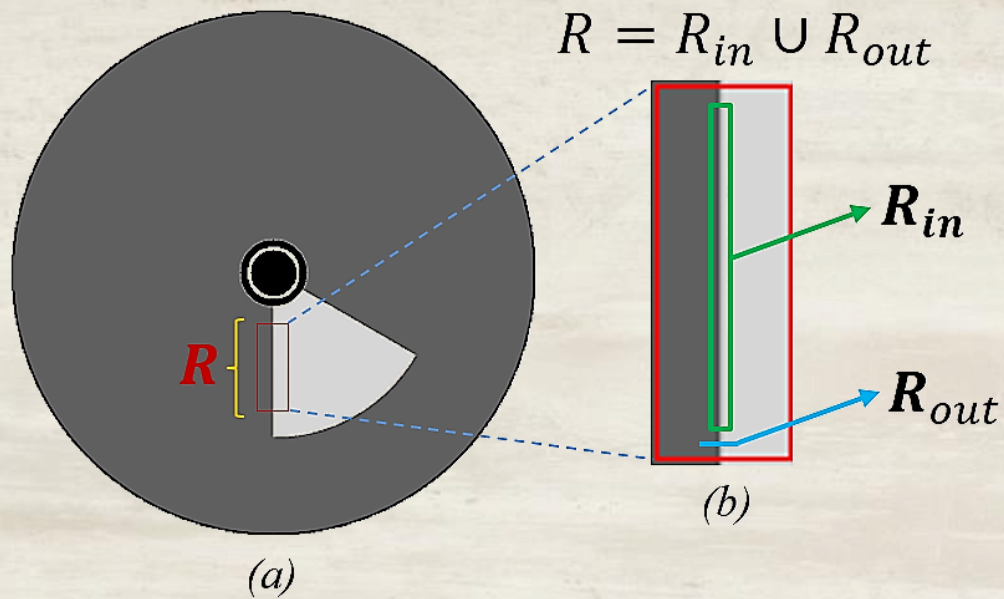
$$\vec{F}_\theta = k'q_0 \frac{1}{(\sin(\theta)d\varphi)^2} [q_3 - q_7 + \frac{\sqrt{2}}{4}(q_2 - q_6 + q_4 - q_8)] \vec{e}_\theta$$

→ Deux filtres  $G_\varphi$  et  $G_\theta$

$$G_\varphi = 1/(\sin(\theta) d\varphi)^2 \begin{pmatrix} \sqrt{2}/4 & 0 & -\sqrt{2}/4 \\ 1 & 0 & -1 \\ \sqrt{2}/4 & 0 & -\sqrt{2}/4 \end{pmatrix}$$

$$G_\theta = 1/(\sin(\theta) d\varphi)^2 \begin{pmatrix} \sqrt{2}/4 & 1 & \sqrt{2}/4 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\sqrt{2}/4 & -1 & -\sqrt{2}/4 \end{pmatrix}$$

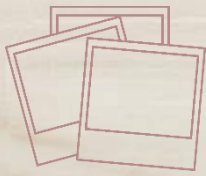


**Méthode d'évaluation**

(a) L'image synthétique générée pour l'évaluation quantitative de la détection de contours, avec un contour verticale à  $0^\circ$  et un contour diagonale à  $60^\circ$ . (b) Une des régions de contour considérée.

$$P_1 = \frac{n_{sig}^e}{n_{sig}^e + (n_{noise}^e + n^0) \frac{n_{in}}{f n_{tot}}}$$

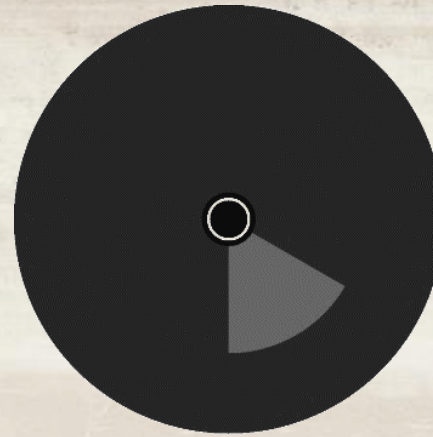
$$P_2 = \frac{\frac{n_r}{w_2} - \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{n_{noise}^e}{n_{in}} \right]^{w_1^e} \right\}}{\left[ 1 - \frac{n_{noise}^e}{n_{in}} \right]^{w_1^e}}$$



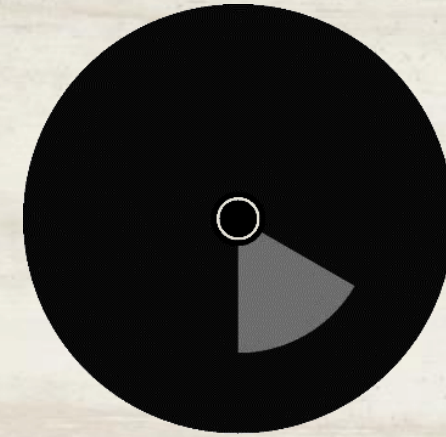
## Le jeu d'images de synthèses utilisé



Image synthétique avec un saut de 50 niveaux de gris



Saut de 100 niveaux de gris

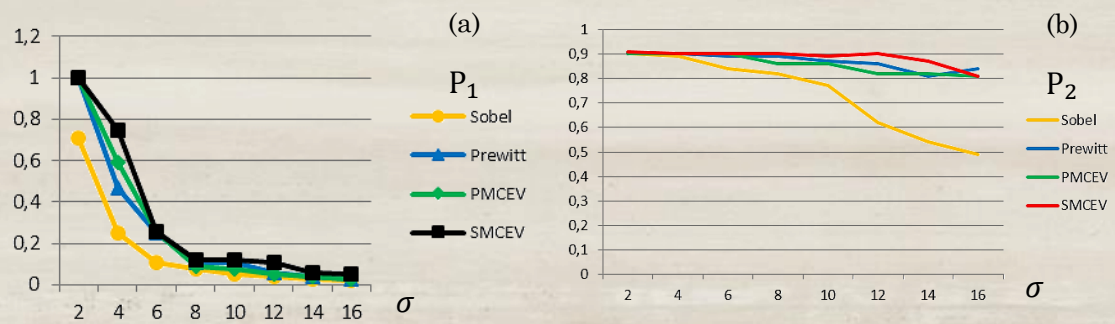


Saut de 150 niveaux de gris

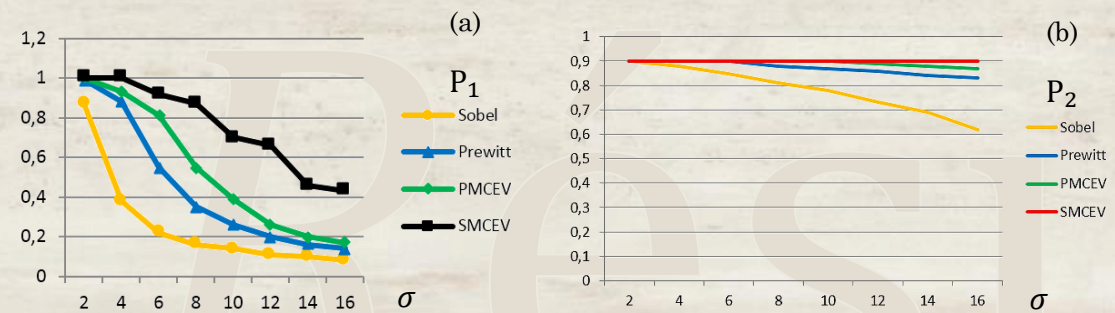
- Les détecteurs évalués : Prewitt, Sobel, \*PMCEV, \*\*SMCEV
- Type de bruit : Gaussien

\*PMECV : Modèle de charges électriques virtuelles (Planaire)

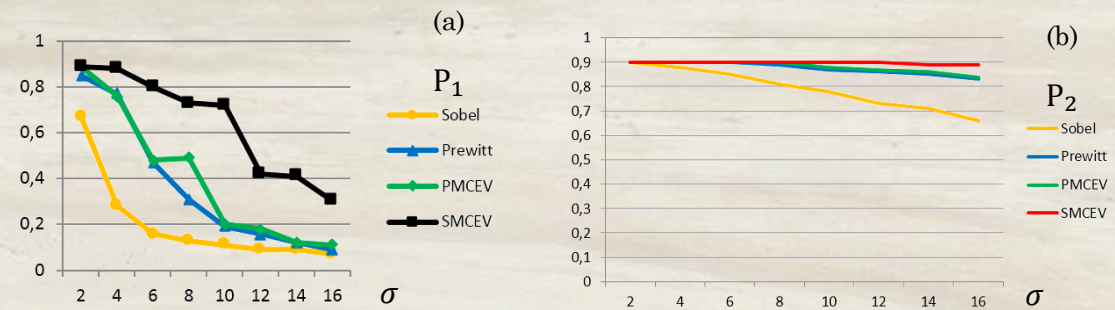
\*\*SMECV : Modèle de charges électriques virtuelles (Sphérique)



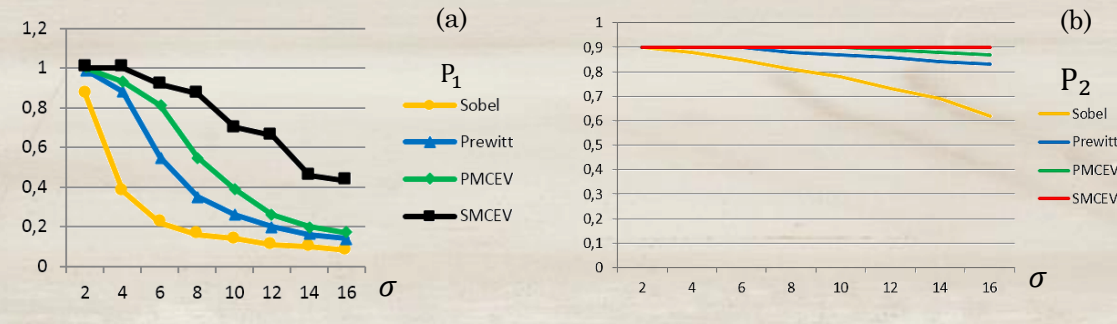
(a) Valeurs de  $P_1$  avec bruit gaussien de variance croissante (contour vertical, un saut de 50 niveaux de gris). (b) Valeurs de  $P_2$ .



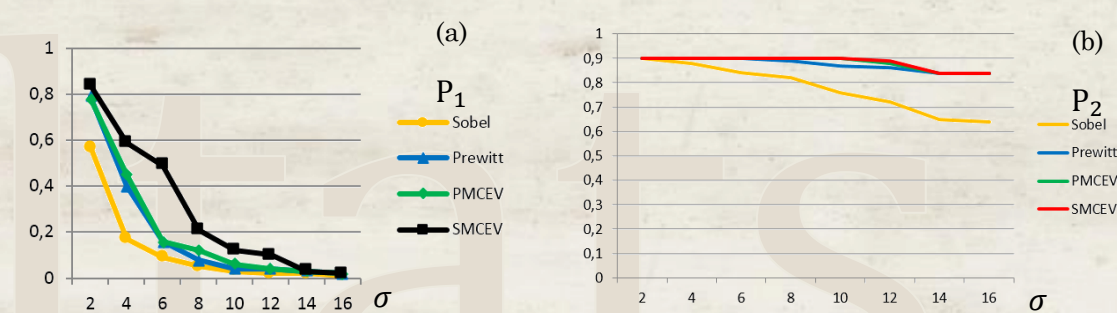
(a) Valeurs de  $P_1$  avec bruit gaussien de variance croissante (contour vertical, un saut de 100 niveaux de gris). (b) Valeurs de  $P_2$ .



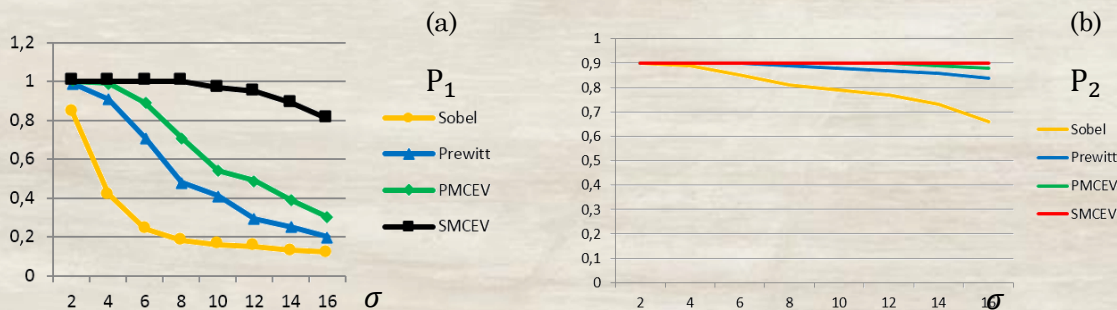
(a) Valeurs de  $P_1$  avec bruit gaussien de variance croissante (contour diagonal, un saut de 100 niveaux de gris). (b) Valeurs de  $P_2$ .



(a) Valeurs de  $P_1$  avec bruit gaussien de variance croissante (contour vertical, un saut de 100 niveaux de gris). (b) Valeurs de  $P_2$ .



(a) Valeurs de  $P_1$  avec bruit gaussien de variance croissante (contour diagonal, un saut de 50 niveaux de gris). (b) Valeurs de  $P_2$ .



(a) Valeurs de  $P_1$  avec bruit gaussien de variance croissante (contour vertical, un saut de 150 niveaux de gris). (b) Valeurs de  $P_2$ .

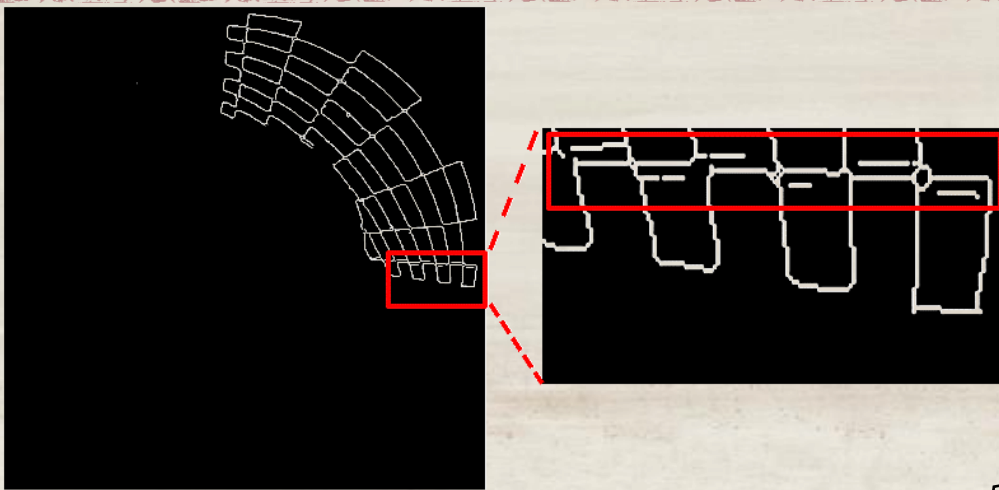


Image réelle filtrée avec l'opérateur de Sobel

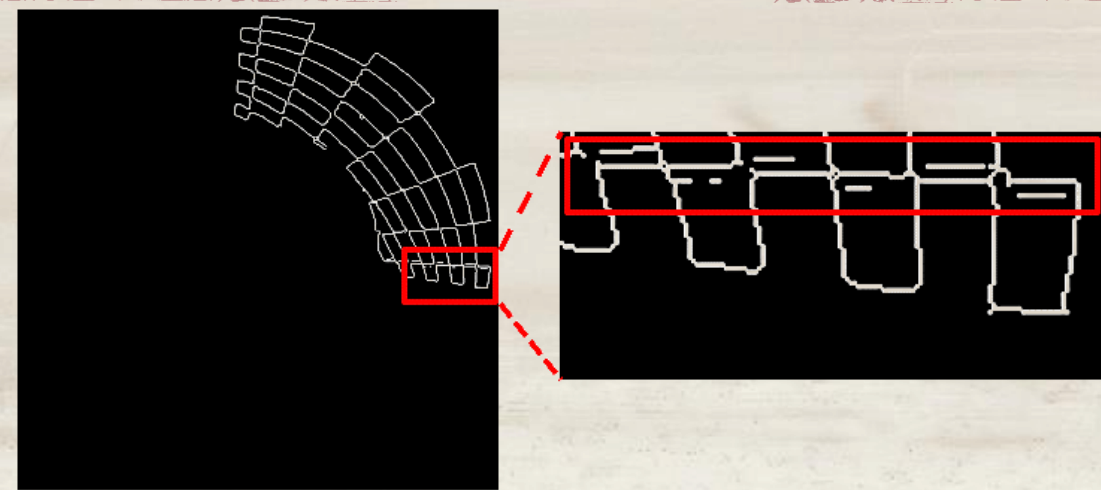


Image réelle filtrée avec l'opérateur de Prewitt

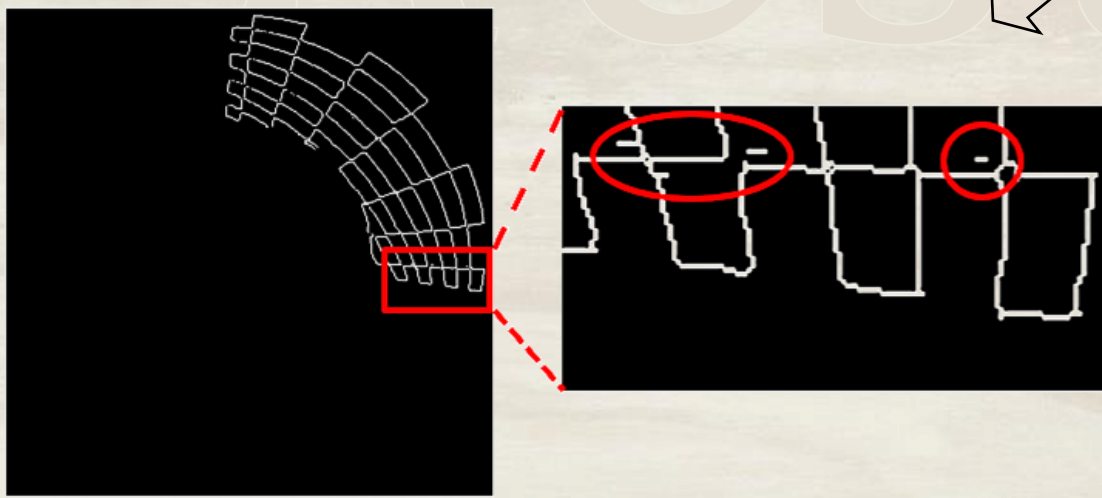


Image réelle filtrée avec l'opérateur PMCEV

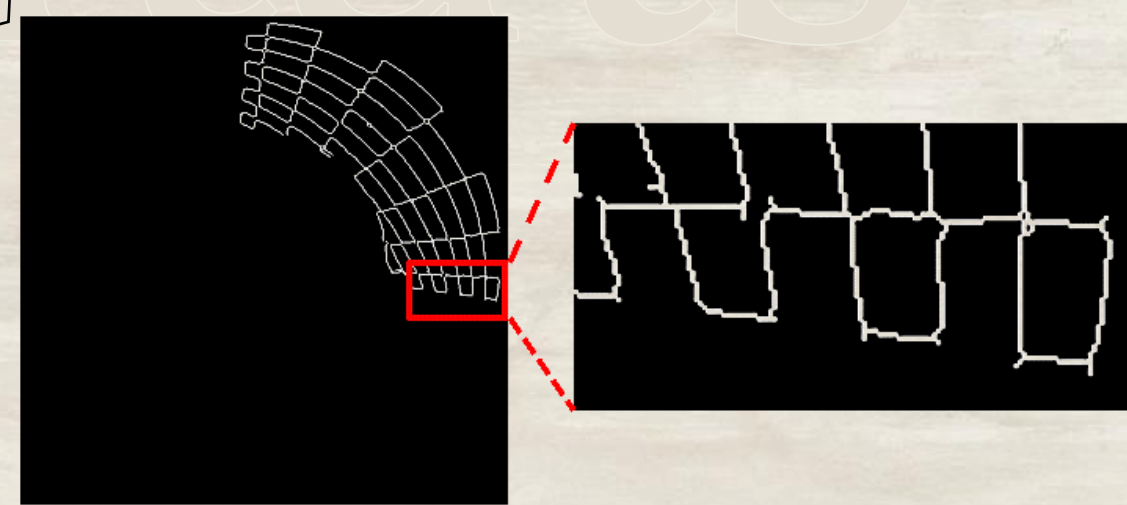


Image réelle filtrée avec l'opérateur SMCEV





## La détection des points d'intérêt



Exemple d'extraction des points d'intérêt. (a) Image catadioptrique acquise avec un miroir parabolique. (b) Image panoramique correspondante. (c) Extraction de points d'intérêt.



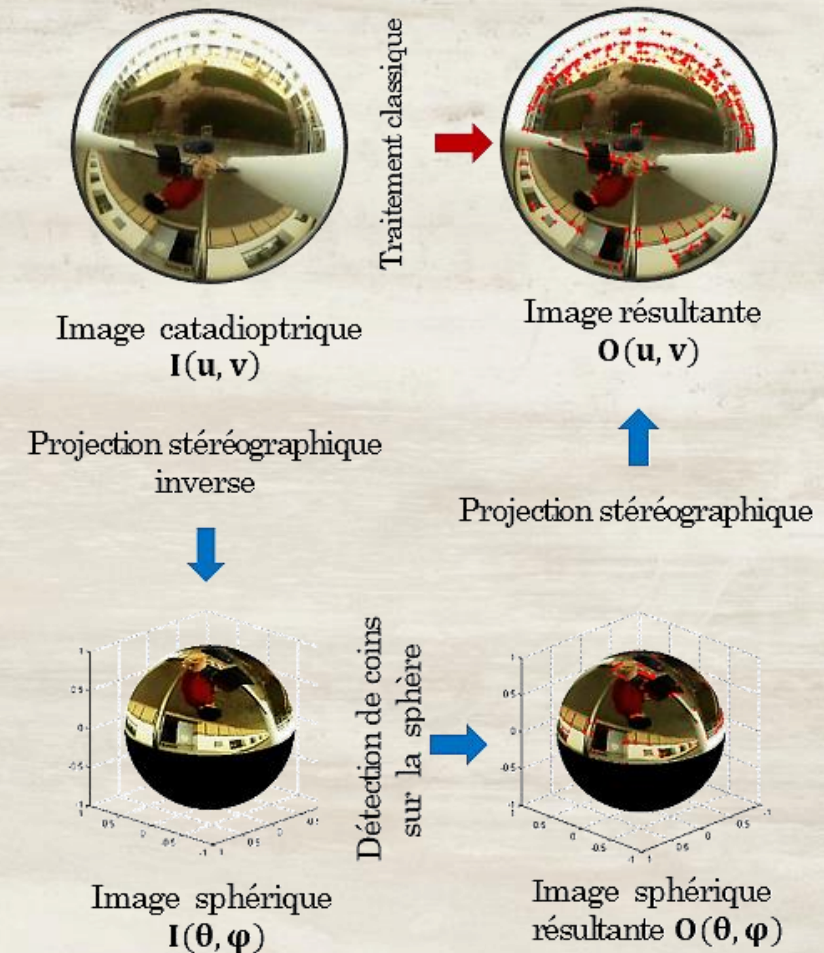
## Algorithme de détection des points d'intérêt

L'algorithme :

- Projection de l'image sur la sphère via projection stéréographique inverse
- Détection des contours par le filtre  $G_s(\theta, \varphi)$
- Calcul de la matrice d'autocorrélation  $M$  à chaque pixel d'image :

$$M = \begin{bmatrix} I_{\theta\theta} & I_{\theta\varphi} \\ I_{\varphi\theta} & I_{\varphi\varphi} \end{bmatrix}$$

- Re-projection stéréographique de l'image sur le plan



Calcul des matrices  $I_\theta$  et  $I_\varphi$  représentatives des contours de l'image.

$$I_\theta = G_\theta \otimes I(\theta, \varphi) \quad I_\varphi = G_\varphi \otimes I(\theta, \varphi)$$

Calcul du produit des matrices représentatives à chaque pixel.

$$I_{\theta\theta} = I_\theta \cdot I_\theta \quad I_{\varphi\varphi} = I_\varphi \cdot I_\varphi \quad I_{\theta\varphi} = I_\theta \cdot I_\varphi$$

Application du filtre gaussien

$$G = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-d/2\sigma^2} \quad (\sigma = 1.5)$$

$$I_{\theta\theta} = G \otimes I_{\theta\theta} \quad I_{\varphi\varphi} = G \otimes I_{\varphi\varphi} \quad I_{\theta\varphi} = G \otimes I_{\theta\varphi}$$

Définition à chaque pixel de la matrice :

$$M = \begin{bmatrix} I_{\theta\theta} & I_{\theta\varphi} \\ I_{\varphi\theta} & I_{\varphi\varphi} \end{bmatrix}$$

Calcul de la réponse du détecteur à chaque pixel :

$$R = \det(M) - k(\text{trace}(M))^2 \quad (k = 0.04)$$

Seuillage de  $R$  et suppression des non-maximas.

Propriétés des images catadioptriques  
Déballage des images catadioptriques  
Un détecteur de contours adapté  
Un détecteur de coins adapté



Filtre de lissage gaussien :

$$G = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-d/2\sigma^2}$$

Selon une métrique sphérique  $d$  est définie ainsi:

$$d = \arccos(\sin \varphi_c \sin \varphi_n + \cos \varphi_c \cos \varphi_n \cos(\theta_n - \theta_c))$$



## Méthode d'évaluation

Les critères d'évaluation :

- La bonne détection
- La bonne localisation

Évaluation quantitative par calcul de trois scores:

- Le taux des faux rejets

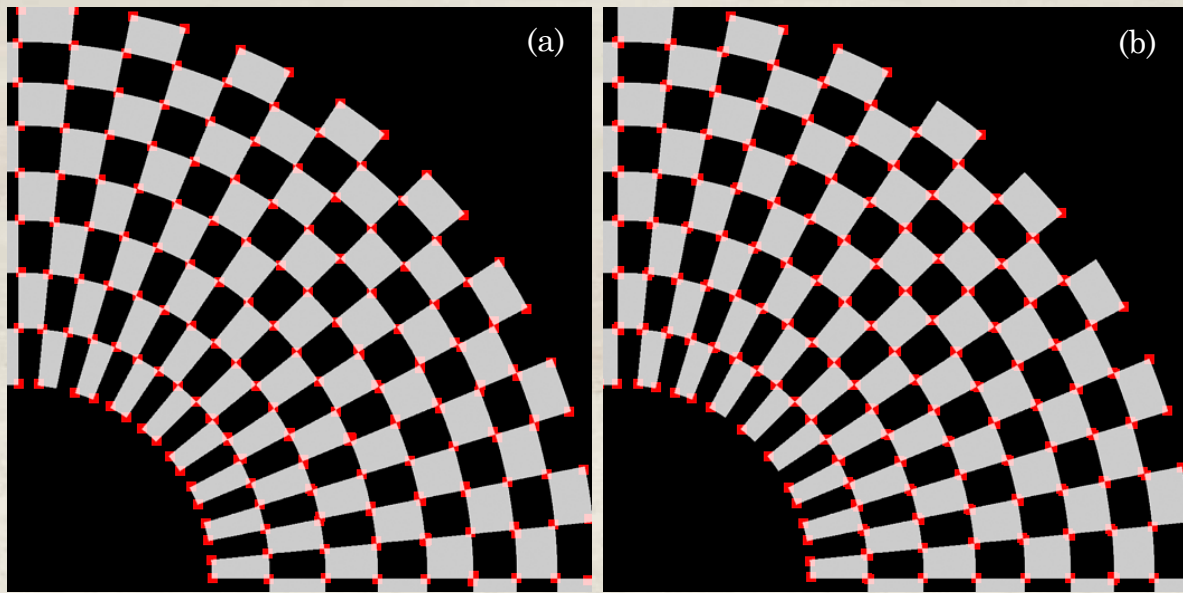
$$FRR = \frac{u_c}{t_c}$$

- Le taux des fausses acceptations

$$FAR = \frac{f_c}{t_p}$$

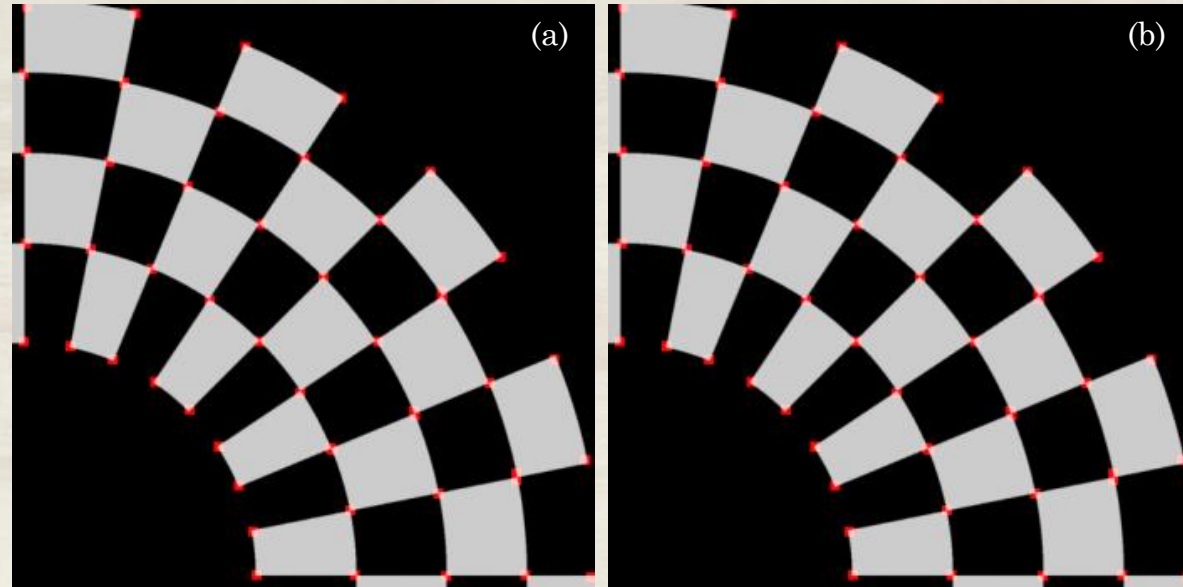
- Le taux global de l'erreur

$$TER = \frac{u_c + f_c}{t_c + t_p}$$



Résultat de détection de coins dans la première image synthétique. (a) L'algorithme proposé. (b) Harris standard.

	Approche proposée	Harris standard
FRR	0.65%	6.63%
FAR	18.71%	44.78%
TER	10.58%	30.58%



Seconde image synthétique originale. (a) L'algorithme proposé. (b) Harris standard.

	Approche proposée	Harris standard
FRR	0%	11.11%
FAR	8.16%	42.02%
TER	4.25%	29.82%

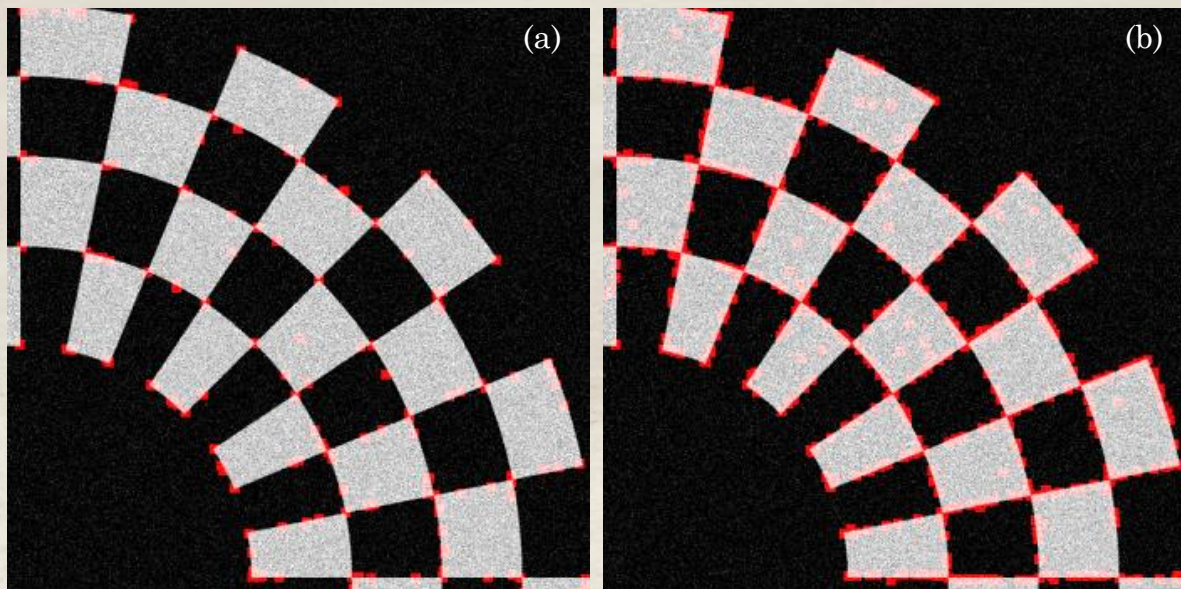


Image synthétique bruitée. (a) L'algorithme proposé.  
(b) Harris standard.

	Approche proposée	Harris standard
FRR	0%	6.66%
FAR	68.53%	92.02%
TER	52.12%	85.28%

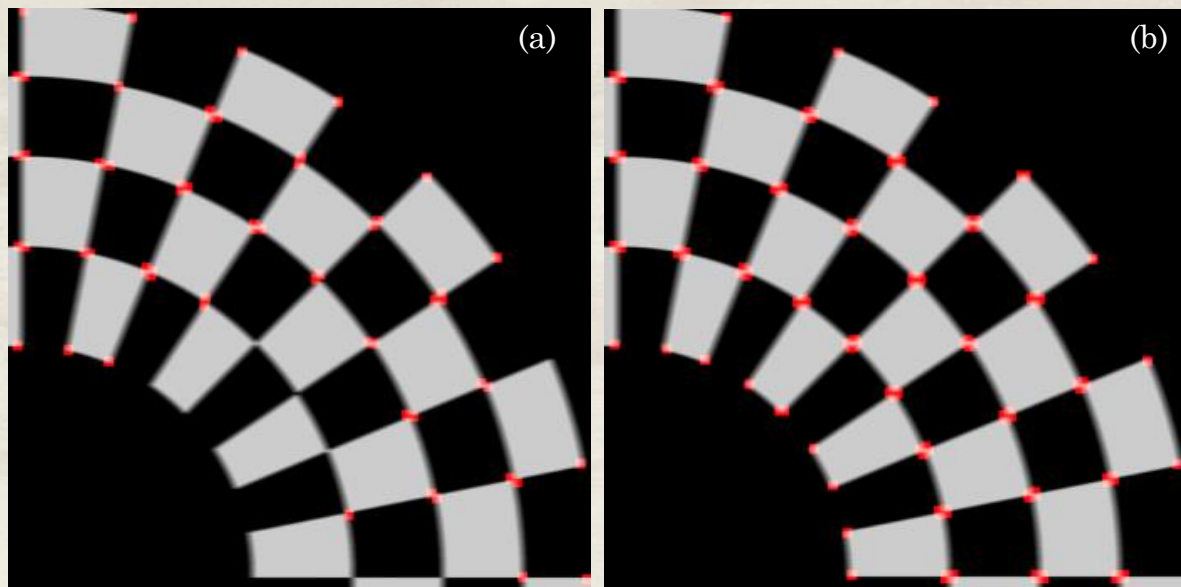
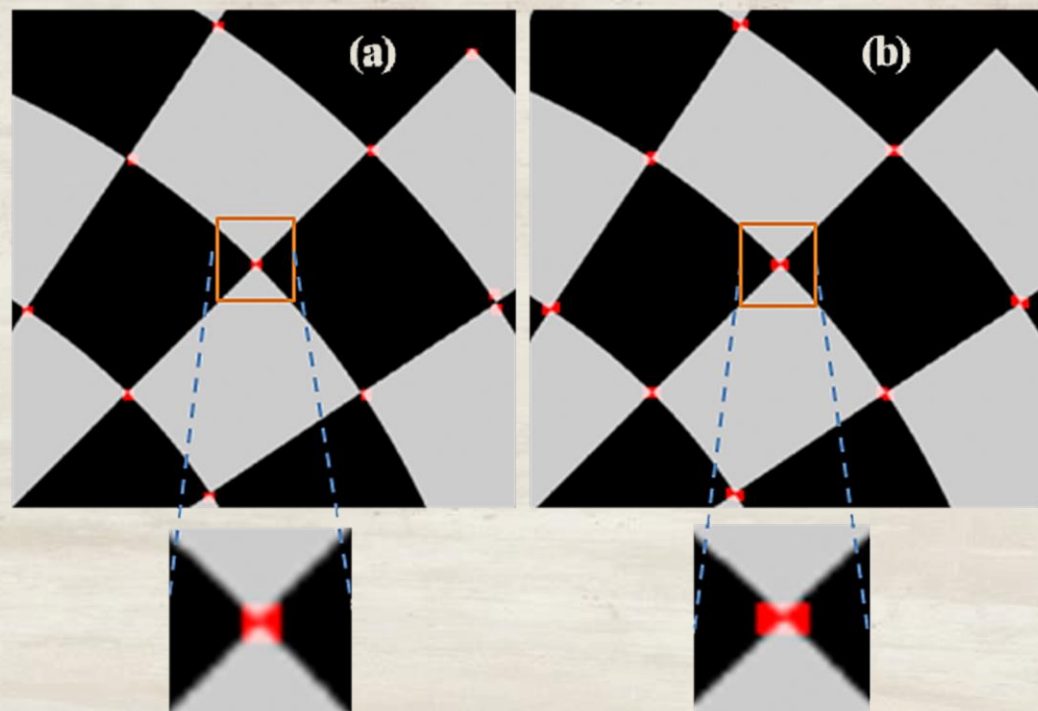


Image synthétique floue. (a) L'algorithme proposé.  
(b) Harris standard

	Approche proposée	Harris standard
FRR	24.44%	4.44%
FAR	44.26%	67.18%
TER	35.84%	51.13%



## Évaluation selon le critère de la bonne localisation



Résultats d'évaluation de la localisation des coins détectés. (a) L'approche proposée. (b) Harris standard.

$$d = \sqrt{(u_p - u_q)^2 + (v_p - v_q)^2}$$

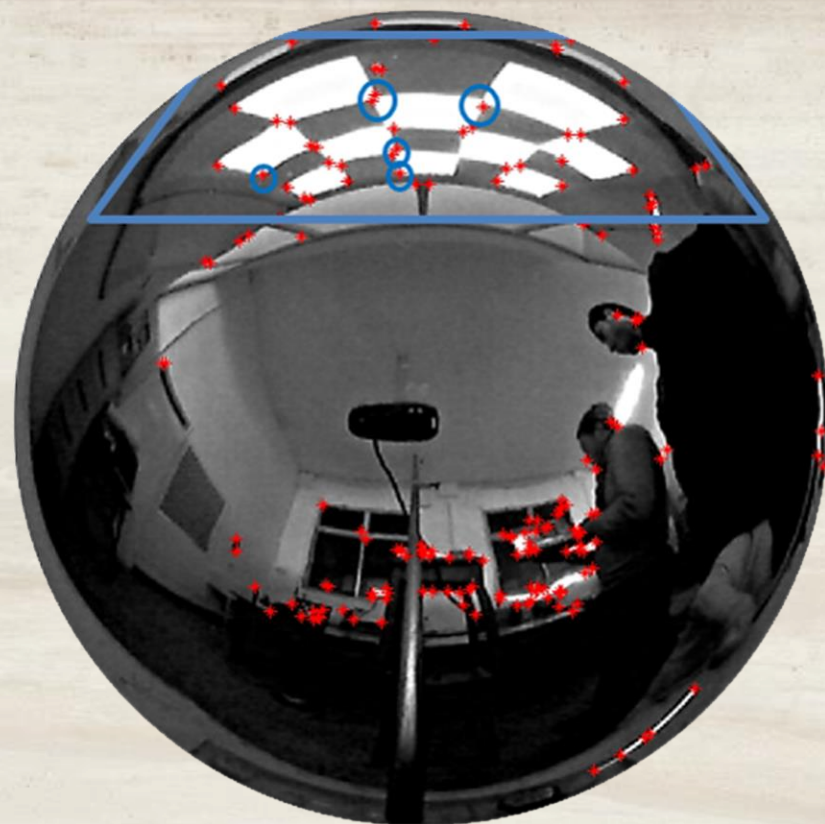
	Approche proposée	Harris standard
$d$	2.15	2.96

Introduction, contexte et problématique  
La stéréovision omnidirectionnelle  
**Traitement des images omnidirectionnelles**  
La vision omnidirectionnelle pour les systèmes autonomes

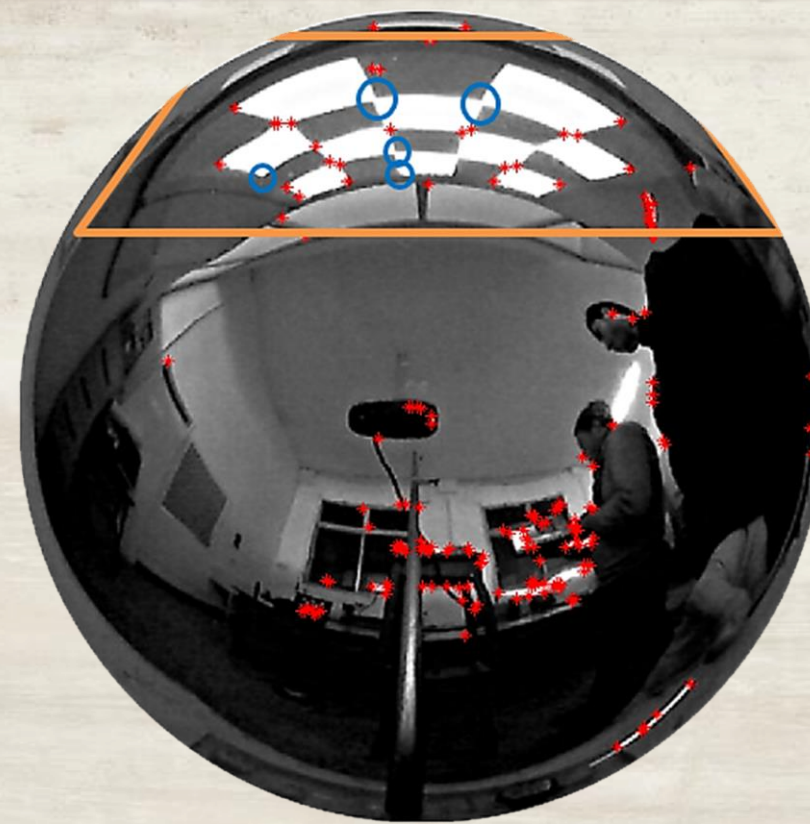
Propriétés des images catadioptriques  
Déballage des images catadioptriques  
Un détecteur de contours adapté  
Un détecteur de coins adapté



## Conditions réelles d'utilisation



Résultats de détection de coins sur une image réelle en utilisant l'algorithme proposé



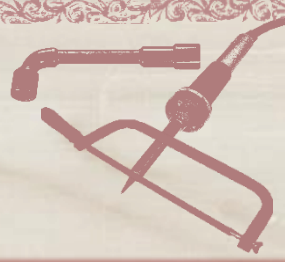
Résultats de détection de coins sur une image réelle en utilisant l'algorithme standard de Harris

\*\*\*

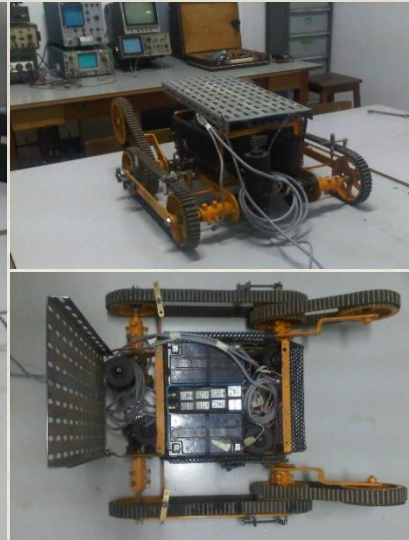


Introduction, contexte et problématique  
La stéréovision omnidirectionnelle  
Traitement des images omnidirectionnelles  
La vision omnidirectionnelle pour les systèmes autonomes

**Le robot mobile**  
Le suiveur solaire



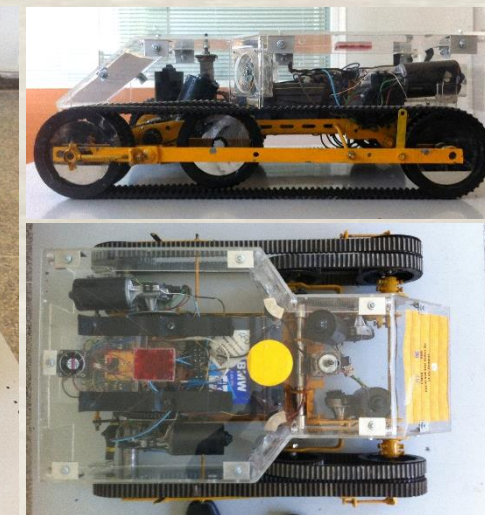
Le robot ESCALADE360 v1.0



ESCALADE360 v2.0



ESCALADE360 v3.0



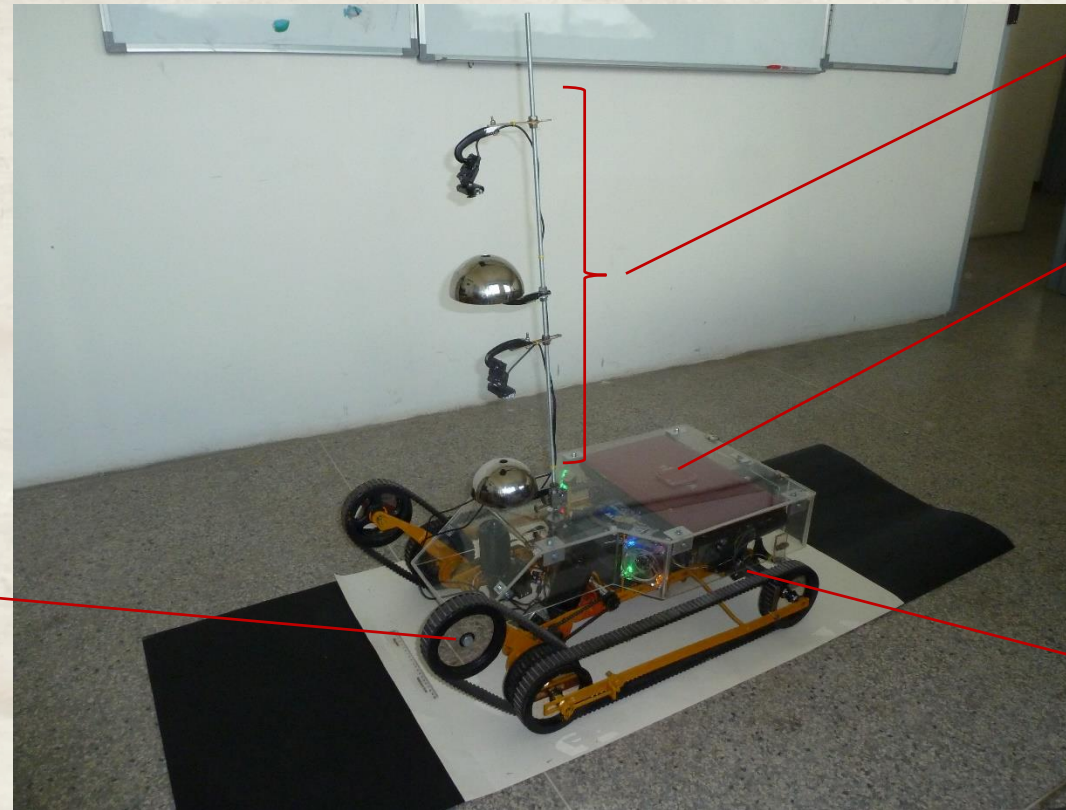
Introduction, contexte et problématique  
La stéréovision omnidirectionnelle  
Traitement des images omnidirectionnelles  
La vision omnidirectionnelle pour les systèmes autonomes

## Le robot mobile

Le suiveur solaire

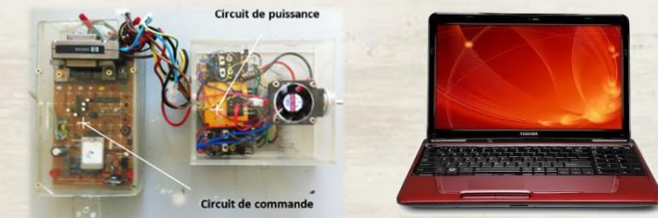


## Concept



Système de vision  
omnidirectionnel

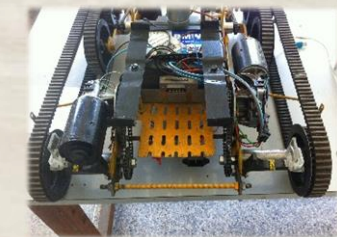
Unité de traitement &  
système de contrôle



Le flippers



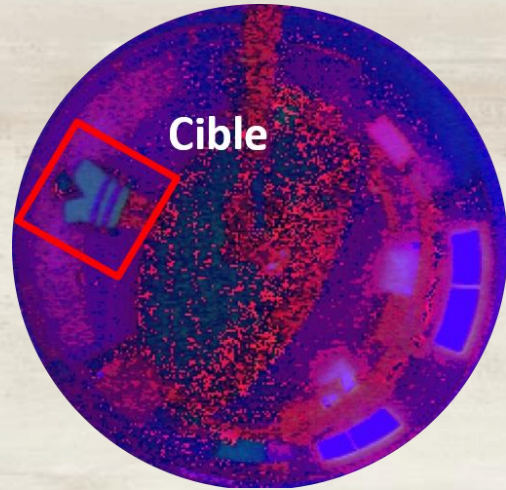
Actionneurs mécaniques



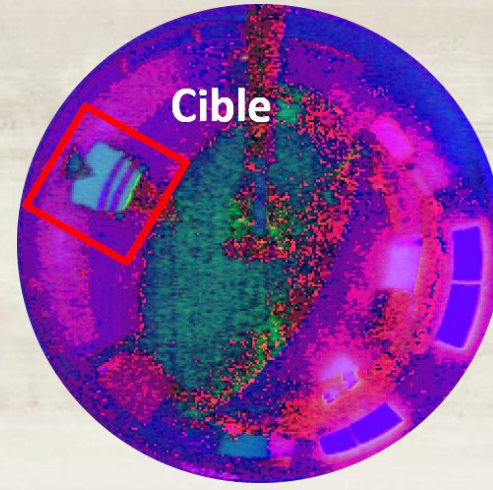
# Application : suivi d'une cible en mouvement

## 👉 Représentation colorimétrique de la cible

$$\left\{ \begin{array}{l} T'_1 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{h_i}{S_i * v_i} \\ T'_2 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{S_i}{h_i * v_i} \\ T'_3 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{v_i}{S_i * h_i} \end{array} \right.$$



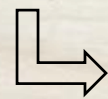
$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = \frac{h}{S * v} \\ T_2 = \frac{S}{h * v} \\ T_3 = \frac{v}{S * h} \end{array} \right.$$



(a) Image catadioptrique HSV à faible éclairage.

(b) Image catadioptrique HSV à fort éclairage.

$$\left\{ \begin{array}{l} T''_1 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{H_i}{S_i * V_i} \\ T''_2 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{S_i}{H_i * V_i} \\ T''_3 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{V_i}{S_i * H_i} \end{array} \right.$$



$$T_1 = (T'_1 + T''_1)/2$$

$$T_2 = (T'_2 + T''_2)/2$$

$$T_3 = (T'_3 + T''_3)/2$$

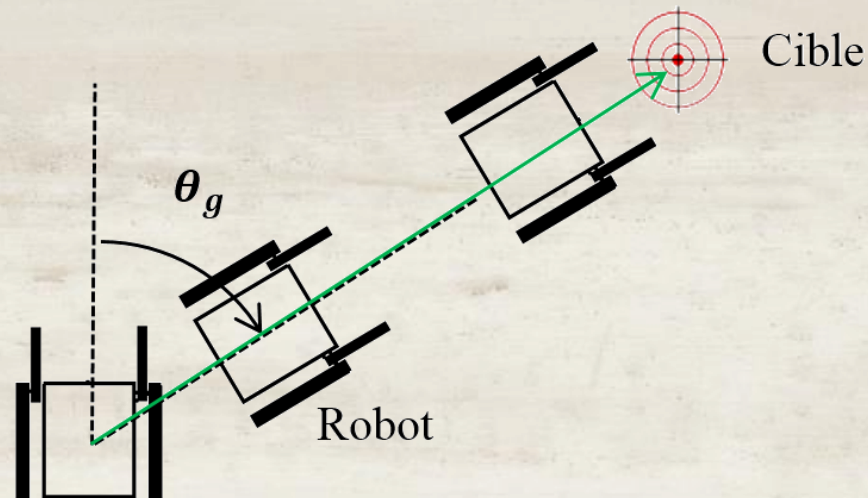
# Application : suivi d'une cible en mouvement

## 👉 Détection de la cible

$$\lambda_{i1} = \frac{h_i}{s_i \cdot v_i}, \lambda_{i2} = \frac{s_i}{h_i \cdot v_i}, \lambda_{i3} = \frac{v_i}{s_i \cdot h_i}$$

$$\begin{cases} |\lambda_{i1} - T_1| < \alpha \\ |\lambda_{i2} - T_2| < \beta \\ |\lambda_{i3} - T_3| < \gamma \end{cases}$$

$$\alpha = |T_1' - T_1''| ; \beta = |T_2' - T_2''| ; \gamma = |T_3' - T_3''|$$



$$\theta_g = \sum_{i=1}^n \theta_i$$

$$D = \varepsilon + \frac{(h - \lambda) \times \tan(2\varphi_1) \times \tan(2\varphi_2)}{\tan(2\varphi_1) - \tan(2\varphi_2)}$$

$h$ (m)	0.425			
Profondeur réelle (m)	1	1.97	2.95	3.97
Profondeur estimée (m)	0.92	2.05	2.96	3.91
Erreur (m)	0.08	0.08	<b>0.01</b>	0.06
Erreur (%)	8.00	4.05	<b>0.33</b>	1.51
Erreur moyenne (%)	3.47			

**Variation de l'erreur en fonction de D, h=0.425m**

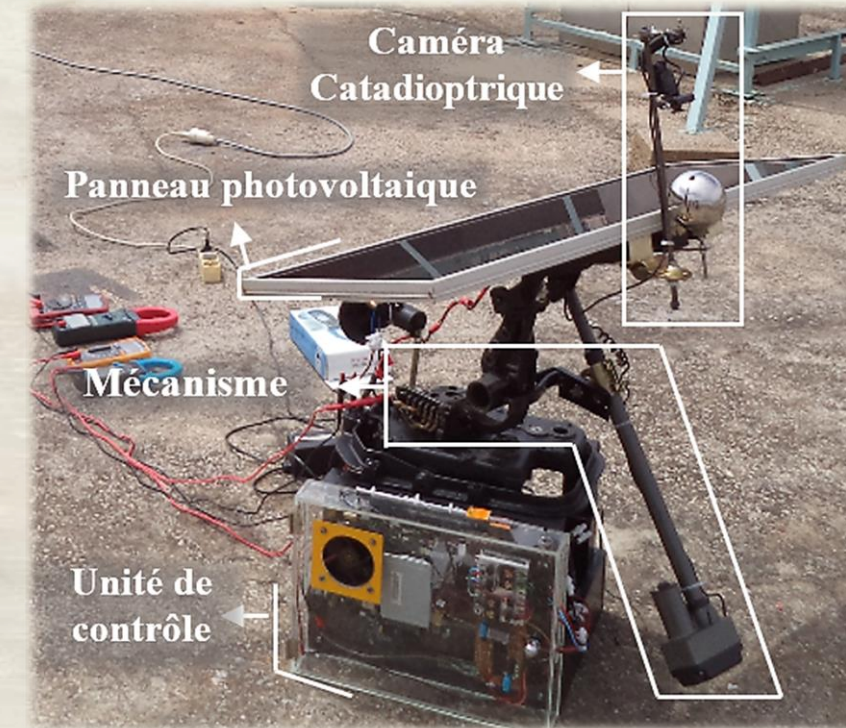




## Concept

Le concept proposé est constitué de quatre module principaux:

- Module d'acquisition
- Unité de contrôle
- Module mécanisme
- Panneau photovoltaïque



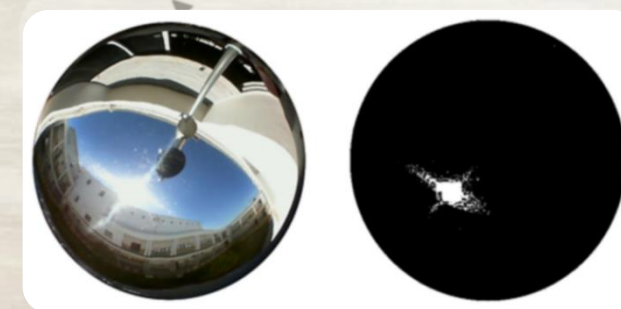
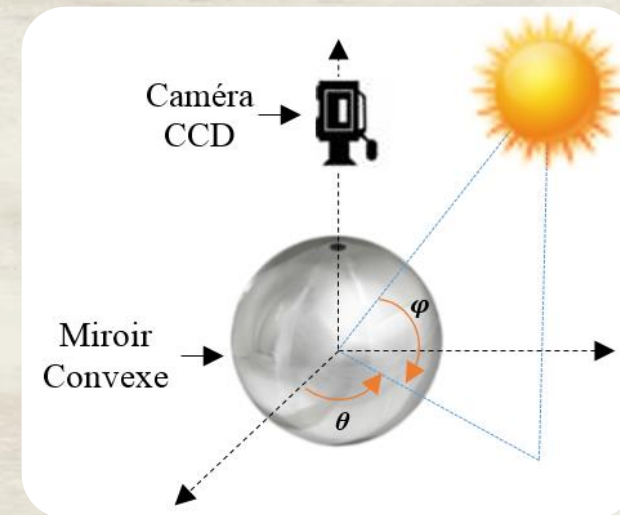


## Module d'acquisition

Caméra catadioptrique = camera standard CCD + miroir sphérique.

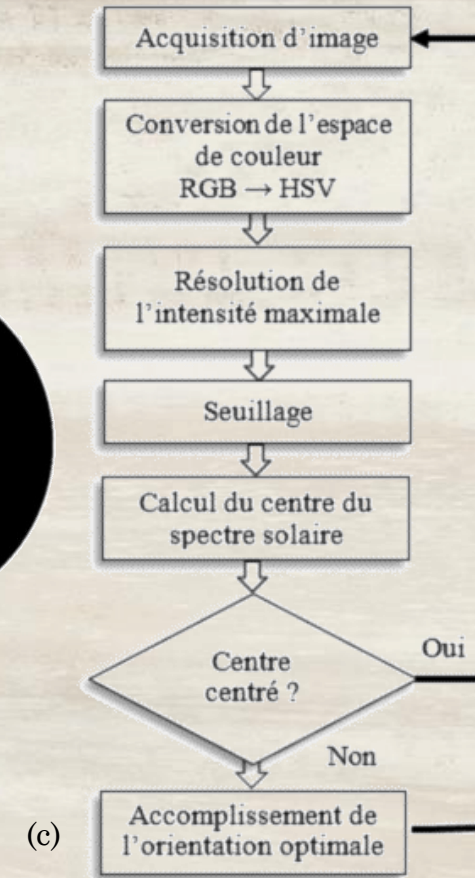
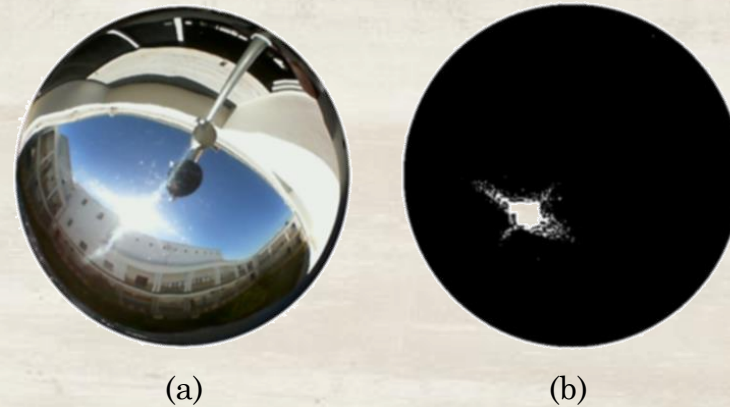
Champ de vision omnidirectionnel :  
360° horizontal x 200° vertical.

La position du soleil est repérée avec deux angles  
( $\theta$ ,  $\varphi$ ).





## Algorithme



$$\theta_c = \sum_{i=1}^n \theta_i / n$$

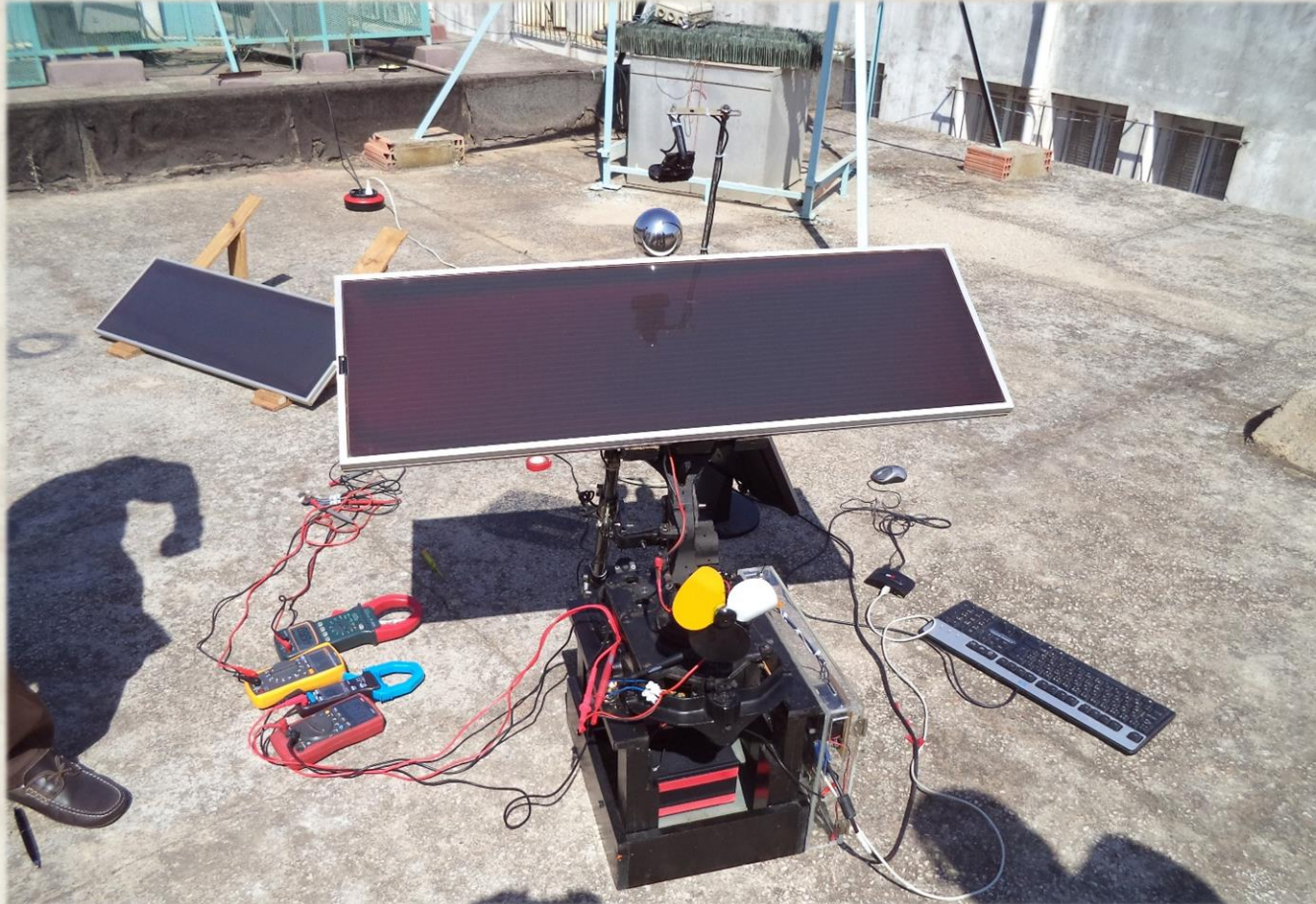
$$\varphi_c = \sum_{i=1}^n \varphi_i / n$$

Image omnidirectionnelle échantillon d'un ciel partiel. (b) L'image omnidirectionnelle après seuillage.  
(c) Schématisation de la procédure de suivi du soleil.





## Validation expérimentale



Le gain de production d'énergie  $E_h$  du suiveur solaire étudié est donné par :

$$E_h = \frac{P_h - P_f}{P_f}$$

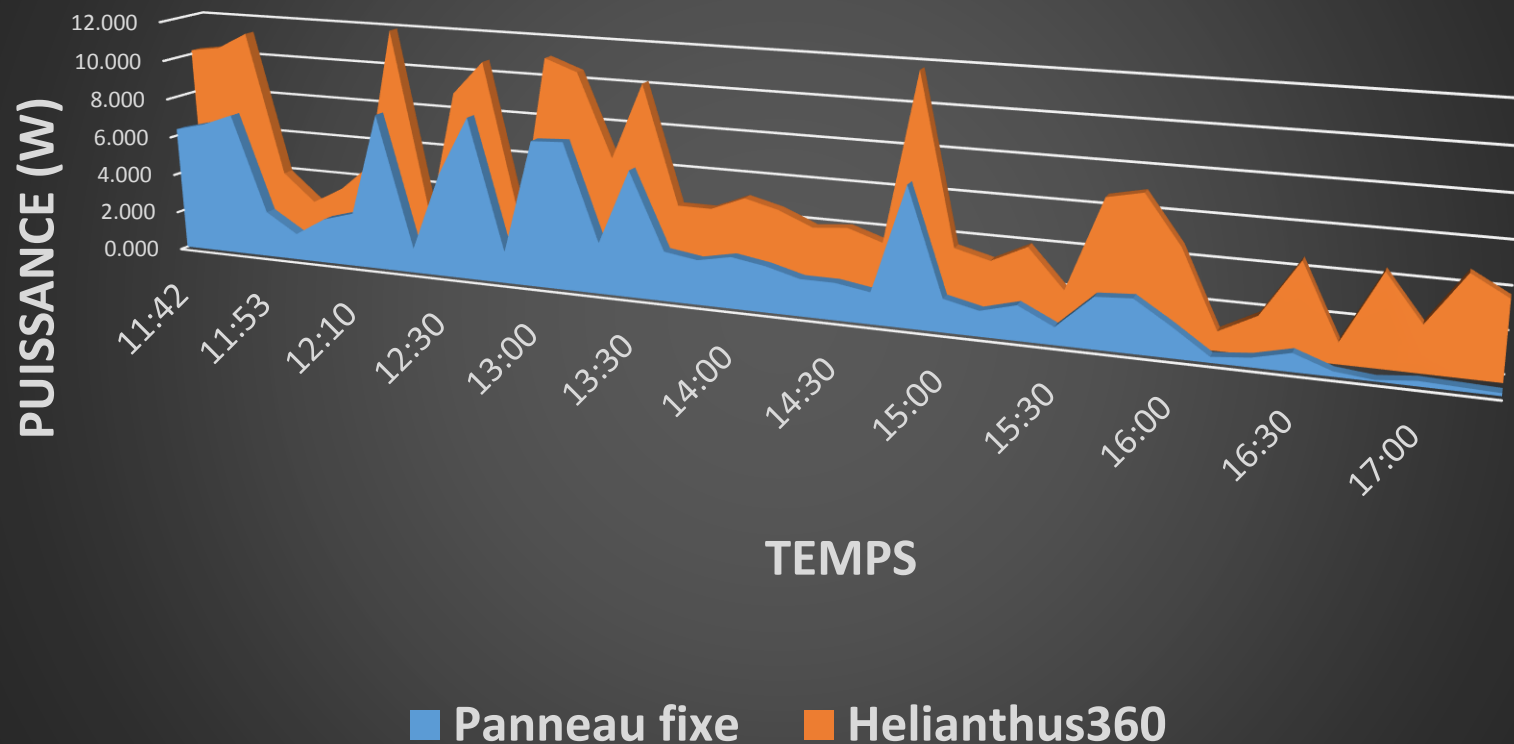
$P_h$  : Puissance générée par le suiveur.

$P_f$  : Puissance générée par le panneau fixe.



## Résultats

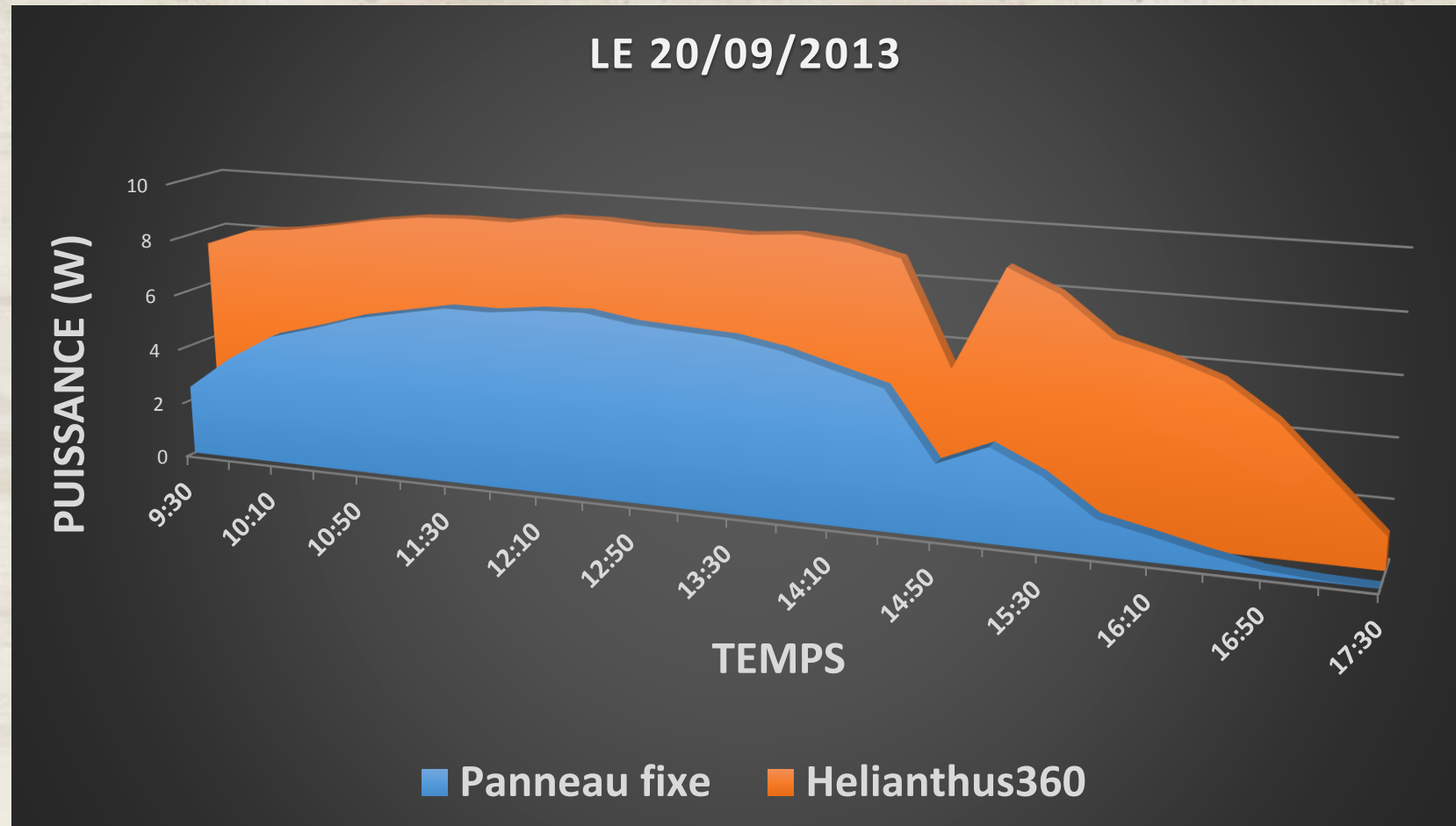
LE 17/07/2013



Gain moyen journalier :  
92%



## Résultats



Gain moyen journalier :  
94%

Introduction, contexte et problématique

La stéréovision omnidirectionnelle

Traitement des images omnidirectionnelles

La vision omnidirectionnelle pour les systèmes autonomes

Le robot mobile

Le suiveur solaire

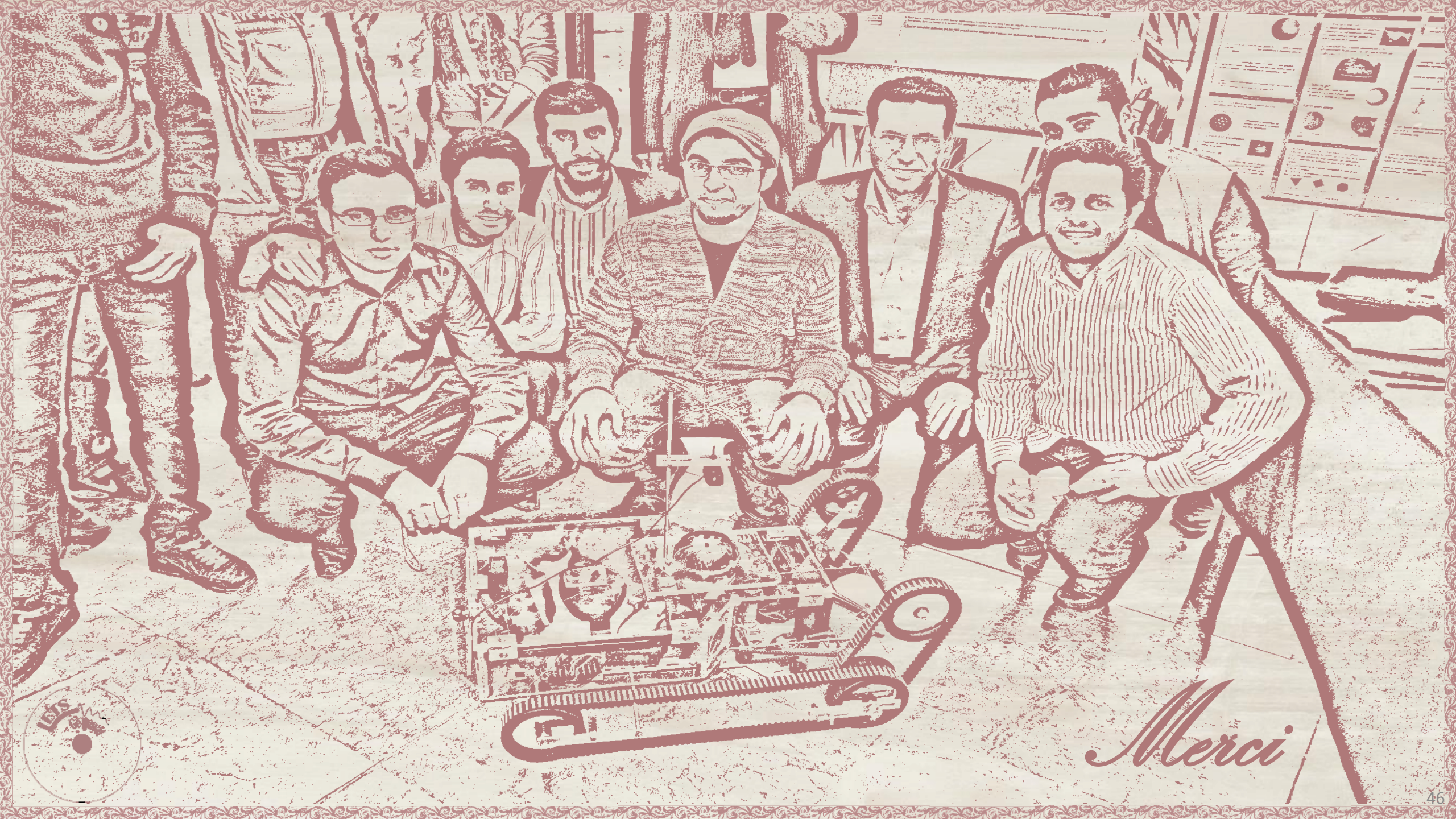


## Démonstration



Speed 2X

# Conclusion et perspectives



*Merci*