

# Asservissement référencé capteurs d'une cordée de robots sous-marins autonomes

Le 21 juin 2016

Matheus Laranjeira

*Directeur de thèse : Vincent Hugel*

*Encadrante : Claire Dune*

# Systèmes à ombilic

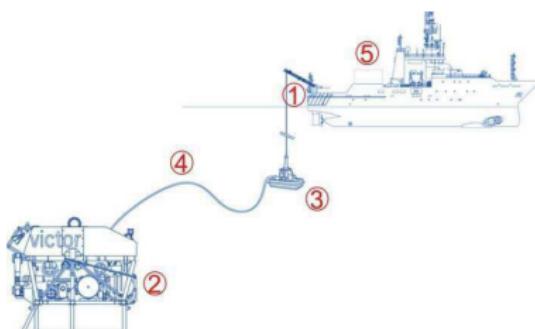
Typiquement utilisés par robots sous-marins télé-opérés en missions de longue durée

Les avantages de la laisse :

- Échange de données
- Autonomie énergétique
- Missions plus longues

Les désavantages de la laisse :

- Perte de manœuvrabilité
- Exploitation difficile d'espaces confinés



# Systèmes à ombilic

Typiquement utilisés par robots sous-marins télé-opérés en missions de longue durée

Les avantages de la laisse :

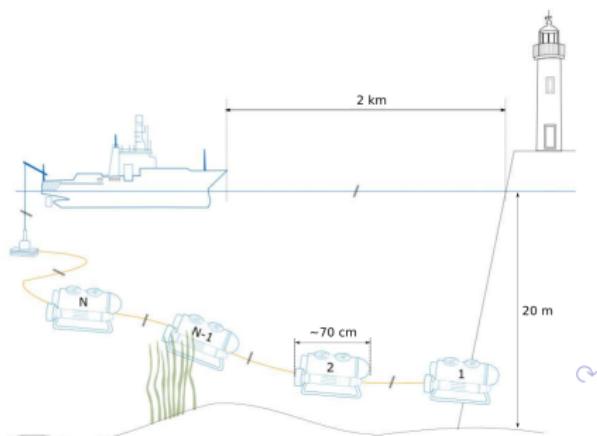
- Échange de données
- Autonomie énergétique
- Missions plus longues

Cordée de robots

- Couverture de zone plus étendue
- Perception distribuée
- Stabilisation

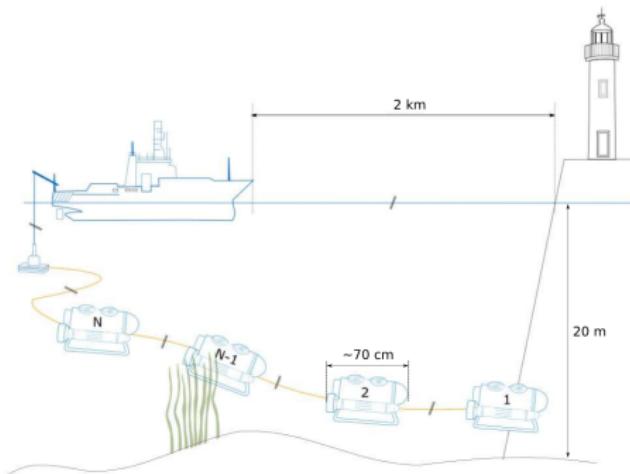
Les désavantages de la laisse :

- Perte de manœuvrabilité
- Exploitation difficile d'espaces confinés



## Asservissement référencé capteur d'une cordée de robots sous-marins autonomes

- Surveillance des zones côtières, ports et chenaux
  - Eaux peu profondes – Petits robots
  - Navigation coordonnée
  - Stabilisation de la laisse



## Conséquences attendues sur le plan scientifique

- Repérage d'amers dans l'environnement
- Fusion de données proprio- et extéroceptives
- Système de navigation coordonnée
- Capacité d'auto-organisation des robots au sein de la cordée
- Remplir des missions de surveillance et de reconnaissance de zones côtières en mode quasi-autonome

# Conséquences attendues sur le plan scientifique

- **Repérage d'amers dans l'environnement**
- Fusion de données proprio- et extéroceptives
- **Système de navigation coordonnée**
- Capacité d'auto-organisation des robots au sein de la cordée
- Remplir des missions de surveillance et de reconnaissance de zones côtières en mode quasi-autonome

# Ocean Systems Laboratory

- Systèmes autonomes : planification de trajectoire, évitement d'obstacles et asservissement visuel pour robots sous-marins
- Modélisation et analyse de capteurs : algorithmes de fusion d'information et de détection basé modèle



Edimbourg, Ecosse - UK

# Ocean Systems Laboratory



Piscine d'essais

# Ocean Systems Laboratory



Piscine d'essais



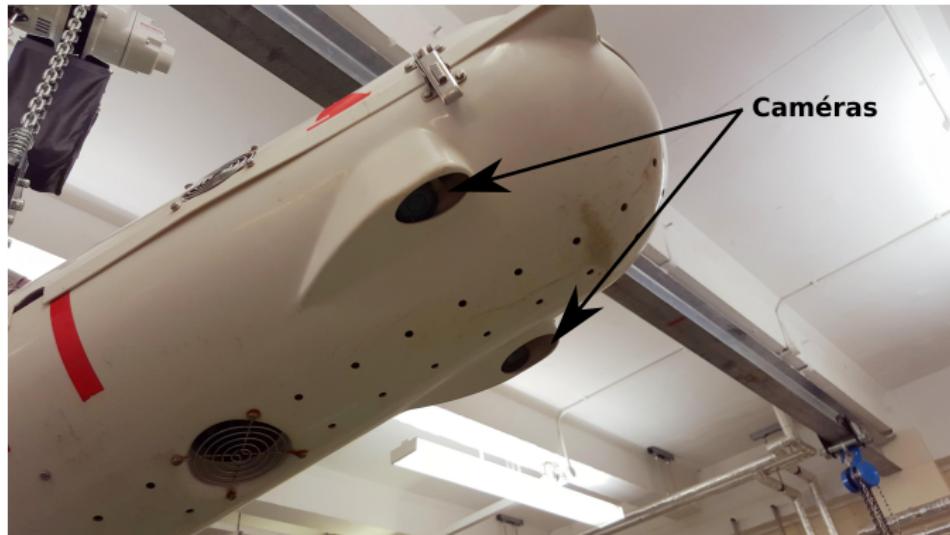
Nessie, un robot sous-marin autonome

# Ocean System Laboratory

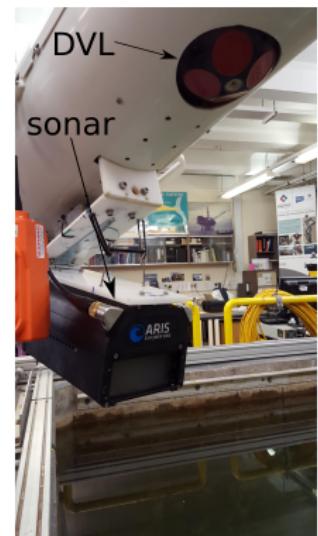
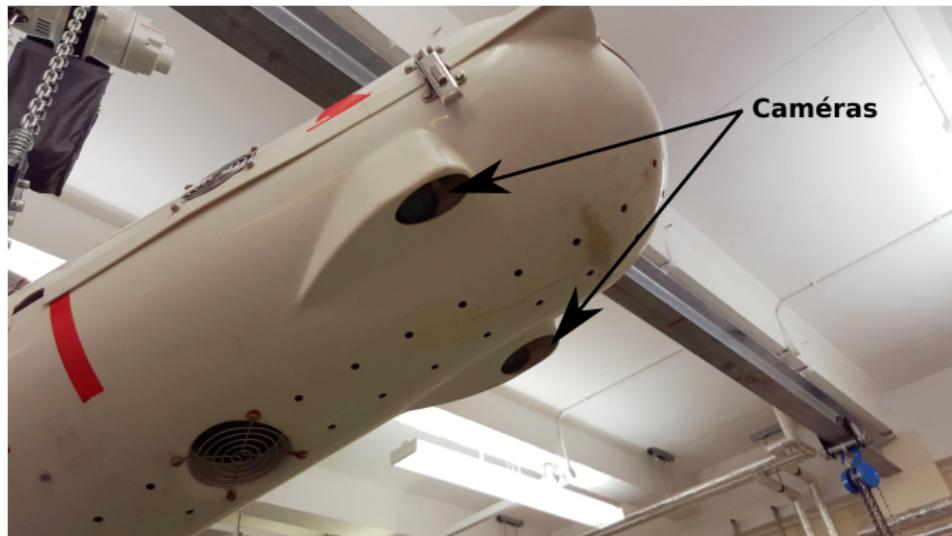


5 DDL (degrés de liberté), charge utile variable

# Ocean System Laboratory



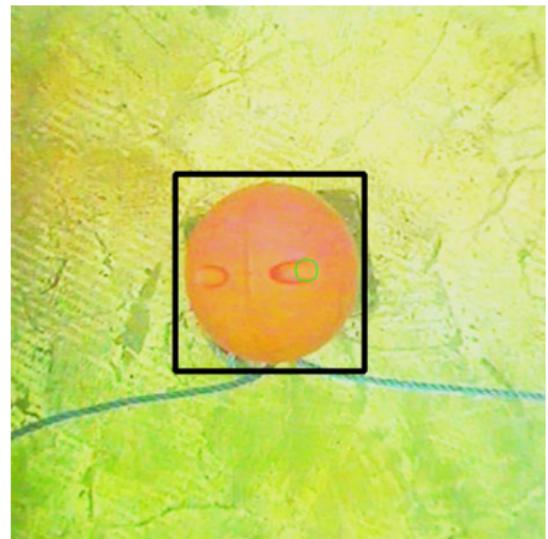
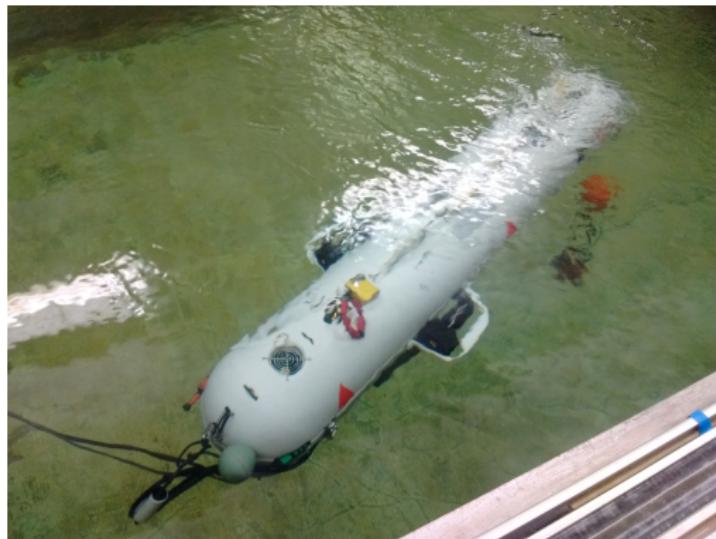
# Ocean System Laboratory



## Objectifs

Tester une boucle de commande en vision

Centrer la bouée orange dans l'image à une profondeur constante



# Les moyens

## Capteurs

- Un DVL (Doppler Velocity Log) pour mesurer la vitesse du robot par rapport au fond du bassin
- Un profondimètre
- Un compas
- Une camera couleur 640x480

## Commande

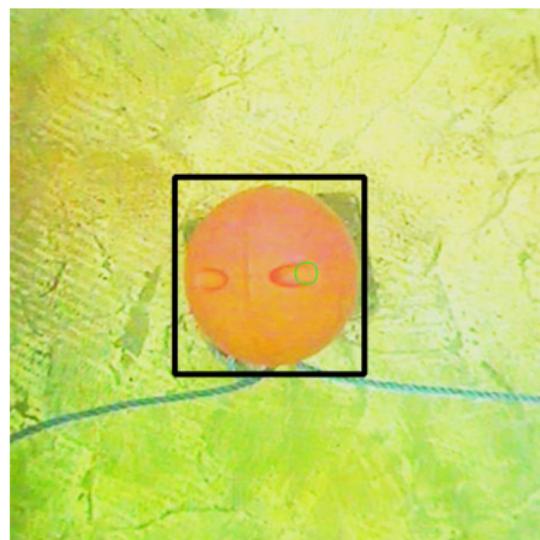
- Une commande haut-niveau qui calcule la vitesse du robot à partir des informations visuelles
- Une commande bas-niveau qui contrôle les propulseurs à partir de la consigne vitesse <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>C. Barbalata, V. De Carolis, M. W. Dunnigan, Y. Pétillot and D. Lane, "An adaptive controller for autonomous underwater vehicles", IROS, 2015.

# Procédure de détection de la bouée orange

Premier pas pour la mise en œuvre de l'asservissement : détection de la bouée



# Procédure de détection de la bouée orange

- Détection de contours avec le filtre de Canny<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup>J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Nov. 1986.

<sup>3</sup>S. D. Gajbhiye and P. P. Gundewar, "A real-time color-based object tracking and occlusion handling using ARM cortex-A7" 2015 INDICON

# Procédure de détection de la bouée orange

- Détection de contours avec le filtre de Canny<sup>2</sup>
- Détection de la couleur dans l'espace HSV (teinte, saturation, brillance)<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup>J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Nov. 1986.

<sup>3</sup>S. D. Gajbhiye and P. P. Gundewar, "A real-time color-based object tracking and occlusion handling using ARM cortex-A7" 2015 INDICON

# Procédure de détection de la bouée orange

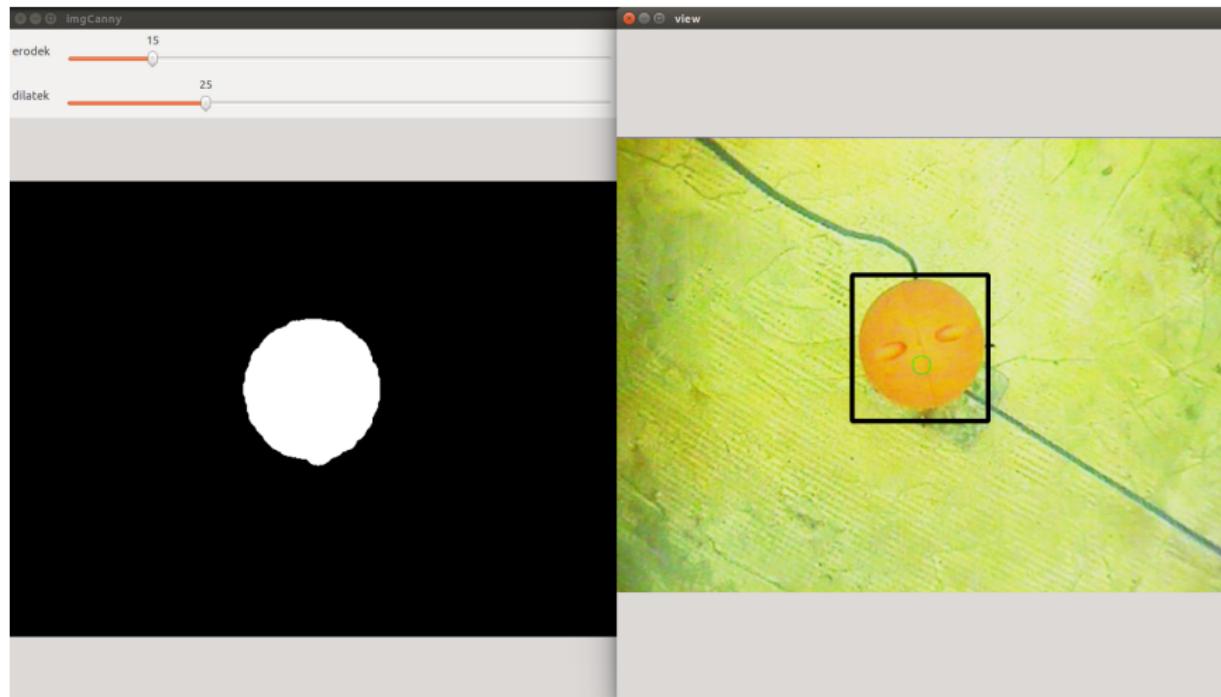
- Détection de contours avec le filtre de Canny<sup>2</sup>
- Détection de la couleur dans l'espace HSV (teinte, saturation, brillance)<sup>3</sup>
- Opérations morphologiques pour filtrer le bruit

---

<sup>2</sup>J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Nov. 1986.

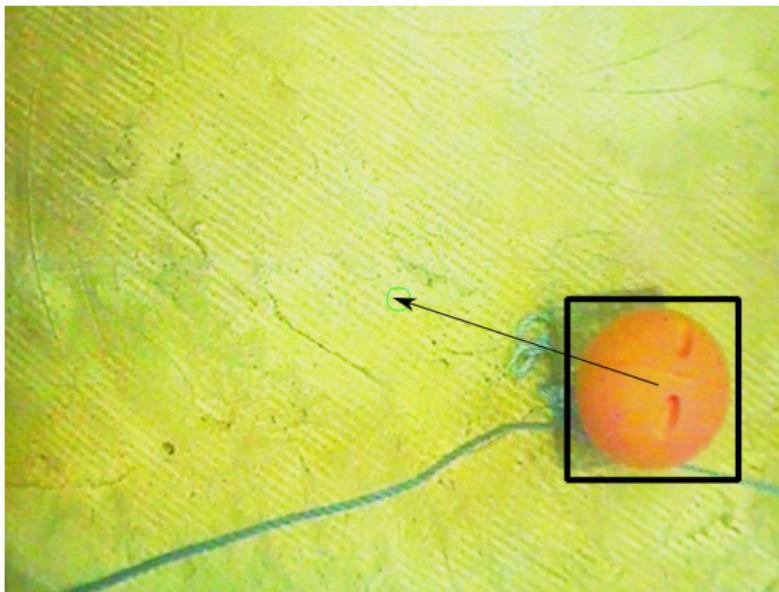
<sup>3</sup>S. D. Gajbhiye and P. P. Gundewar, "A real-time color-based object tracking and occlusion handling using ARM cortex-A7" 2015 INDICON

# Résultat de la détection



# Commande proportionnelle en translation

**Objectif :** centrer la bouée dans l'image à une profondeur constante



# Commande proportionnelle en translation

Contrôle de 3 DDL basé sur les moments d'ordre 0 et 1<sup>4</sup> en utilisant une version simplifiée de la **matrice d'interaction**

$$\begin{cases} e_x = P_x^* - P_x \\ e_y = P_y^* - P_y \\ e_z = A^* - A \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

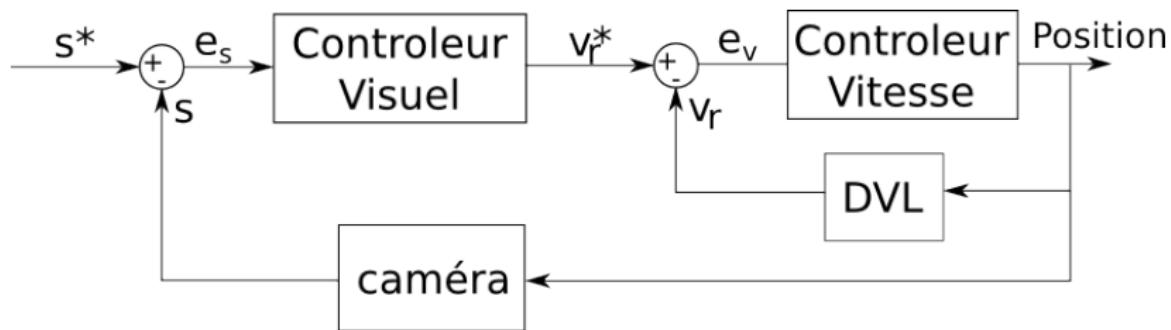
$$\mathbf{v}_c = \mathbf{K} \cdot \mathbf{e}_{img}$$

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{J}_c^r \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{e}_{img}$$

---

<sup>4</sup>O. Tahri and F. Chaumette, "Point-based and region-based image moments for visual servoing of planar objects" in IEEE Transactions on Robotics, Dec. 2005.

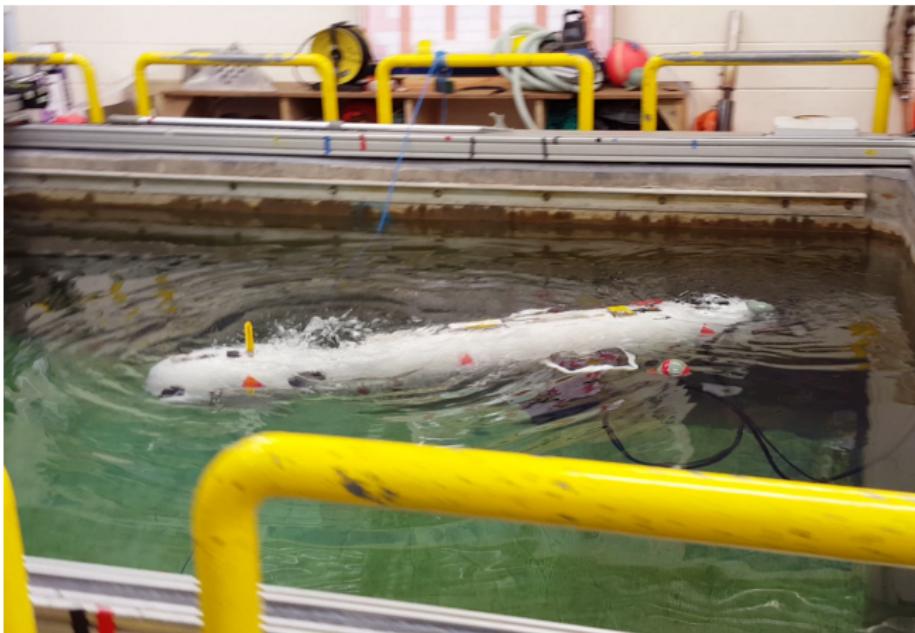
# Boucle de contrôle



# Validation en simulation



# Validation expérimentale



# Gestion de la laisse à partir de la vision

- Deux robots terrestres liés par une corde passive
- Le robot de tête se déplace librement et le deuxième robot doit le suivre en analysant l'image de la corde

# La plateforme d'expérimentation

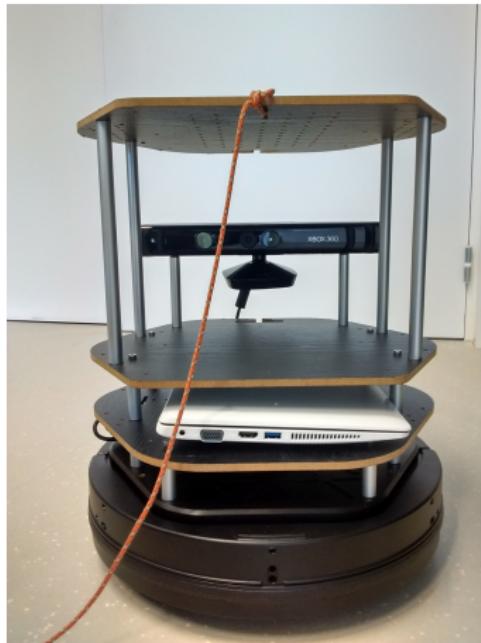
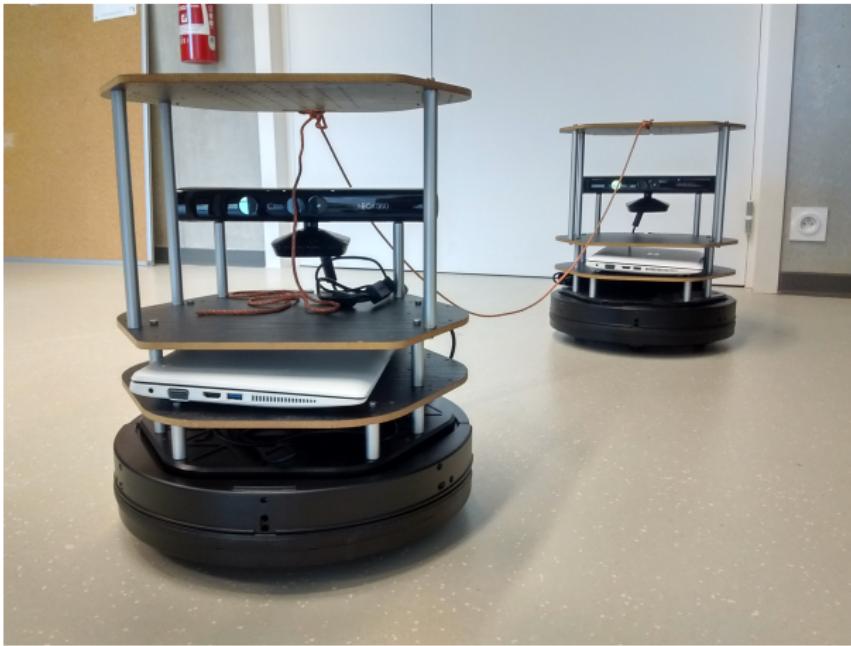


Figure : Le turtlebot

# Le scénario d'expérimentation



# Recherche bibliographique

- Les systèmes à ombilic sont utilisés depuis longtemps en robotique pour fournir de la puissance et servir de moyen de communication et de support mécanique à des robots qui opèrent en milieux sévères

---

<sup>5</sup>Tsai, D.; Nesnas, I. A. D.; Zarzhitsky D. Autonomous vision-based tethered-assisted rover docking. IROS 2013

<sup>6</sup>Iqbal, J.; Heikkila, S.; Halme, A. Tether tracking and control of ROSA robotic rover. ICARCV 2008

<sup>7</sup>Cai, J.; Huang, P.; Wang, D. Novel dynamic template matching of visual servoing for tethered space robot IEEE International Conference on Information Science and Technology, 2014

# Recherche bibliographique

- Les systèmes à ombilic sont utilisés depuis longtemps en robotique pour fournir de la puissance et servir de moyen de communication et de support mécanique à des robots qui opèrent en milieux sévères
- Les robots à laisse sont utilisés en exploration planétaire afin de pouvoir accéder à des terrains irréguliers et inconnus. La laisse peut être très utile dans le processus de docking<sup>5</sup> et aussi ramener le robot à la station d'atterrissement<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup>Tsai, D.; Nesnas, I. A. D.; Zarzhitsky D. Autonomous vision-based tethered-assisted rover docking. IROS 2013

<sup>6</sup>Iqbal, J.; Heikkila, S.; Halme, A. Tether tracking and control of ROSA robotic rover. ICARCV 2008

<sup>7</sup>Cai, J.; Huang, P.; Wang, D. Novel dynamic template matching of visual servoing for tethered space robot IEEE International Conference on Information Science and Technology, 2014

# Recherche bibliographique

- Les systèmes à ombilic sont utilisés depuis longtemps en robotique pour fournir de la puissance et servir de moyen de communication et de support mécanique à des robots qui opèrent en milieux sévères
- Les robots à laisse sont utilisés en exploration planétaire afin de pouvoir accéder à des terrains irréguliers et inconnus. La laisse peut être très utile dans le processus de docking<sup>5</sup> et aussi ramener le robot à la station d'atterrissement<sup>6</sup>
- Dans l'espace, ce type de robot est utilisé en opérations de maintenance en orbite, assemblage et nettoyage de débris<sup>7</sup>

---

<sup>5</sup>Tsai, D.; Nesnas, I. A. D.; Zarzhitsky D. Autonomous vision-based tethered-assisted rover docking. IROS 2013

<sup>6</sup>Iqbal, J.; Heikkila, S.; Halme, A. Tether tracking and control of ROSA robotic rover. ICARCV 2008

<sup>7</sup>Cai, J.; Huang, P.; Wang, D. Novel dynamic template matching of visual servoing for tethered space robot IEEE International Conference on Information Science and Technology, 2014

# Tethered-assisted rover docking

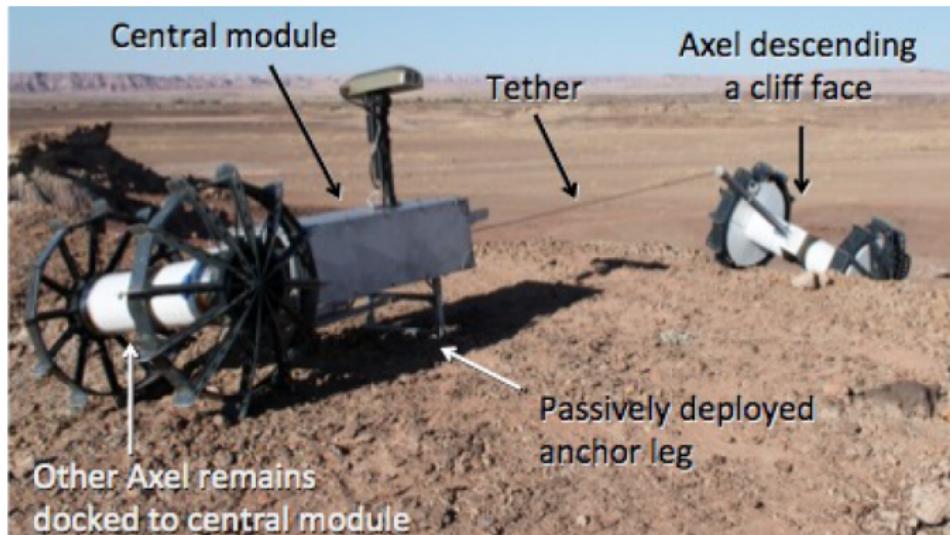


Figure : Le rover axe

<sup>5</sup>Tsai, D.; Nesnas, I. A. D.; Zarzhitsky D. Autonomous vision-based tethered-assisted rover docking. IROS 2013

# Tethered-assisted rover docking

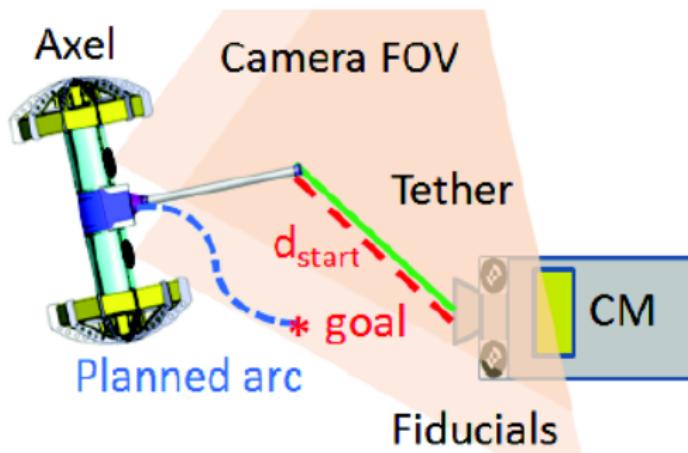
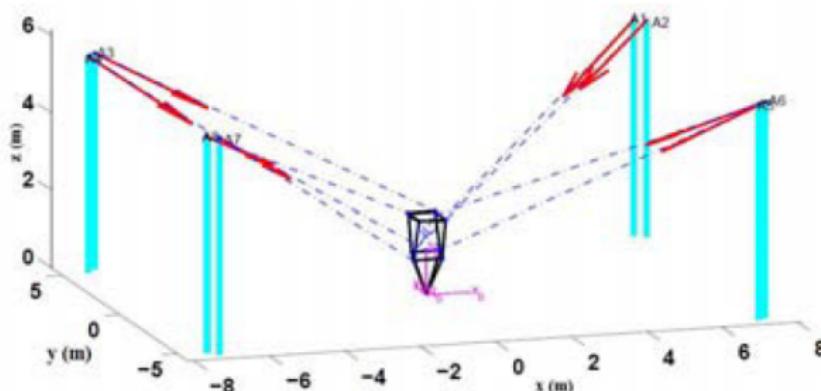


Figure : La procédure de dockage

<sup>5</sup>Tsai, D.; Nesnas, I. A. D.; Zarzhitsky D. Autonomous vision-based tethered-assisted rover docking. IROS 2013

# Recherche bibliographique

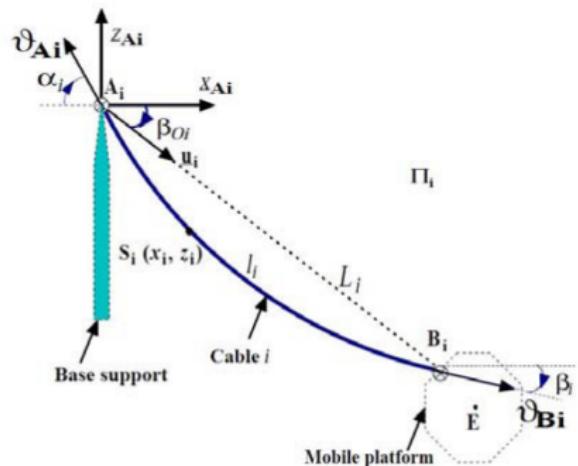
Récemment une méthode d'asservissement visuel a été proposée pour les robots à câbles parallèles<sup>8</sup>



<sup>8</sup>Dallej, T.; Gouttefarde, M.; Andreff, N.; Dahmouche, R.; Martinet, P.  
Vision-based modeling and control of large-dimension cable-driven parallel robots.  
IROS 2012.

# Recherche bibliographique

Récemment une méthode d'asservissement visuel a été proposée pour les robots à câbles parallèles<sup>8</sup>



<sup>8</sup>Dallej, T.; Gouttefarde, M.; Andreff, N.; Dahmouche, R.; Martinet, P.  
Vision-based modeling and control of large-dimension cable-driven parallel robots.  
IROS 2012.

## Recherche bibliographique

La forme de la chaînette a été prise en compte pour le transport aérien d'objets déformables afin de répartir équitablement le poids de l'objet parmi les robots<sup>9</sup>



---

<sup>9</sup>Estevez, J.; Graña, M. Robust Control Tuning by PSO of Aerial Robots Hose Transportation. Bioinspired Computation in Artificial Systems: IWINAC\_2015

# Recherche bibliographique

- Même si les systèmes à ombilic sont présents dans plusieurs domaines, la gestion de la laisse n'a pas été assez étudié dans la littérature jusqu'à présent

# Recherche bibliographique

- Même si les systèmes à ombilic sont présents dans plusieurs domaines, la gestion de la laisse n'a pas été assez étudié dans la littérature jusqu'à présent
- Il y a un manque d'algorithmes basés vision pour gérer la laisse et réduire les perturbations environnantes

# Recherche bibliographique

- Même si les systèmes à ombilic sont présents dans plusieurs domaines, la gestion de la laisse n'a pas été assez étudié dans la littérature jusqu'à présent
- Il y a un manque d'algorithmes basés vision pour gérer la laisse et réduire les perturbations environnantes
- Le concept de la cordée de robots peut être appliqué dans la robotique terrestre et aérienne pour le transport de matériaux déformables et l'exploration de milieux sévères

# Procédure de détection de la corde orange

- Détection de contours avec le filtre de Canny
- Détection de la couleur dans l'espace HSV (teinte, saturation, brillance)
- Opérations morphologiques pour filtrer le bruit

# Procédure de détection de la corde orange

- Détection de contours avec le filtre de Canny
- Détection de la couleur dans l'espace HSV (teinte, saturation, brillance)
- Opérations morphologiques pour filtrer le bruit
- Transformée de Hough pour la détection de lignes

# Résultat de la détection



# Les paramètres de la chaînette

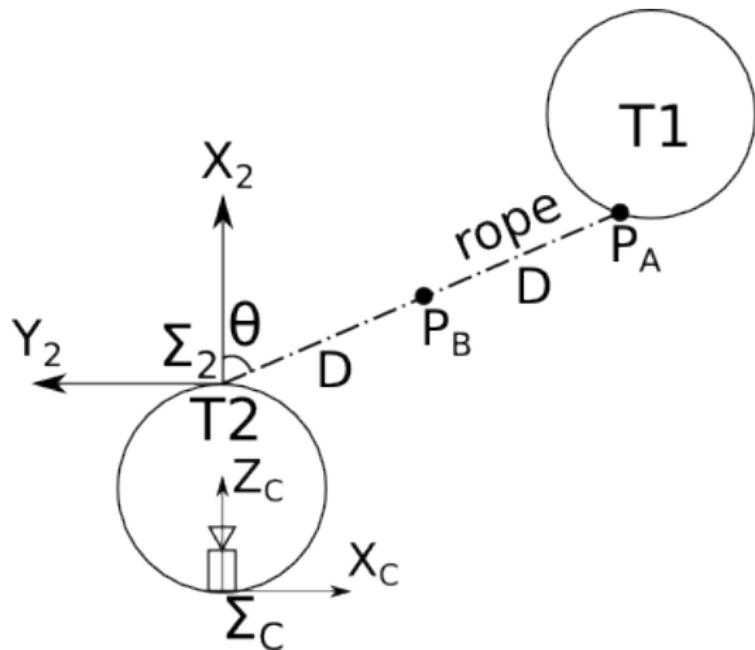
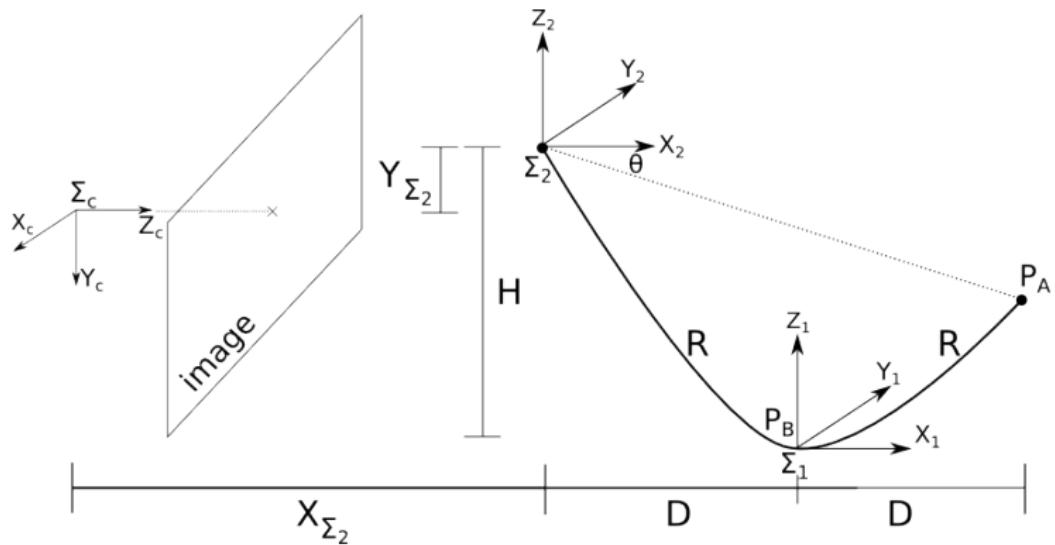
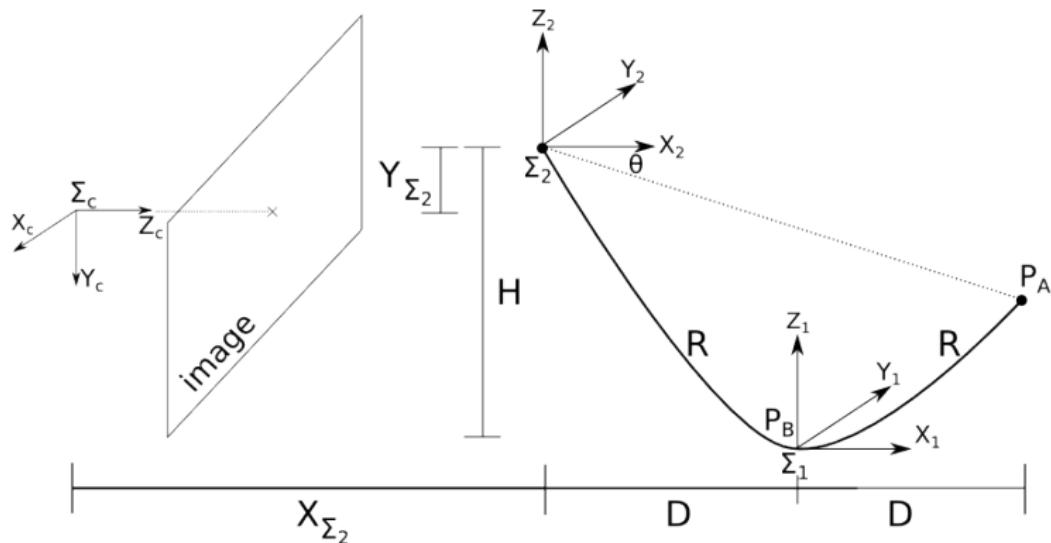


Figure : Vue de dessus du scénario d'expérimentation

## Les paramètres de la chaînette

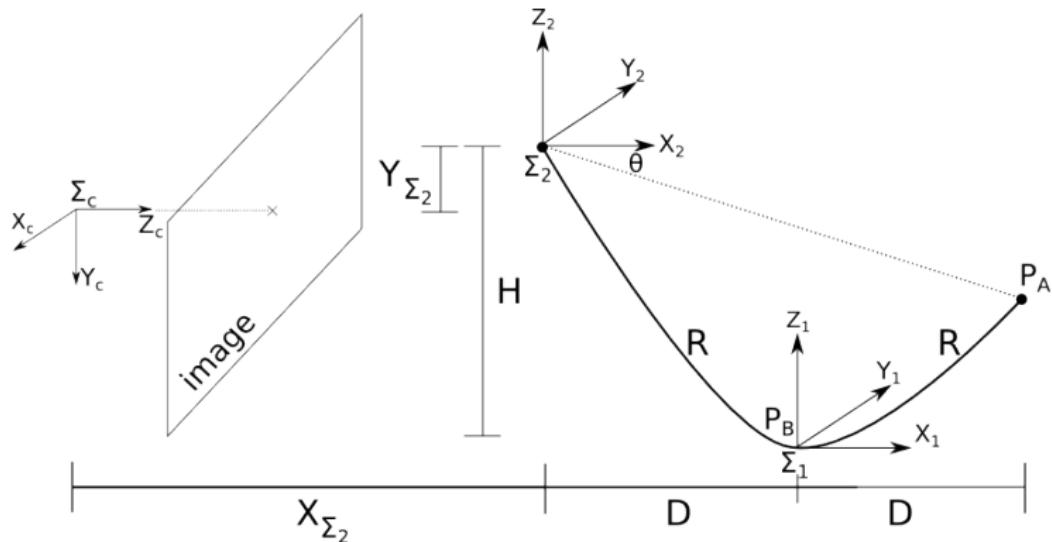


# Les paramètres de la chaînette



$$\Sigma_C : Y = -\frac{1}{C} \left[ \cosh \left( C \left( -\frac{X}{\sin \theta} - D \right) \right) - 1 \right] + H + Y_{\Sigma 2}$$

# Les paramètres de la chaînette



$$\Sigma_C : Y = -\frac{1}{C} \left[ \cosh \left( C \left( -\frac{X}{\sin \theta} - D \right) \right) - 1 \right] + H + Y_{\Sigma 2}$$

# Estimation des paramètres de la chaînette

L'équation de la chaînette est composée de deux paramètres,  $H$  et  $\sin \theta$ , puisque  $C = f(H)$  et  $D = g(H)$ . Donc, nous pouvons affirmer que

$$Y = f(X, a, b, Y_{\Sigma 2}),$$

où  $Y_{\Sigma 2}$  est une constante et  $a = \frac{H}{H_{max}}$  et  $b = \sin \theta$ .

# Estimation des paramètres de la chaînette

L'équation de la chaînette est composée de deux paramètres,  $H$  et  $\sin \theta$ , puisque  $C = f(H)$  et  $D = g(H)$ . Donc, nous pouvons affirmer que

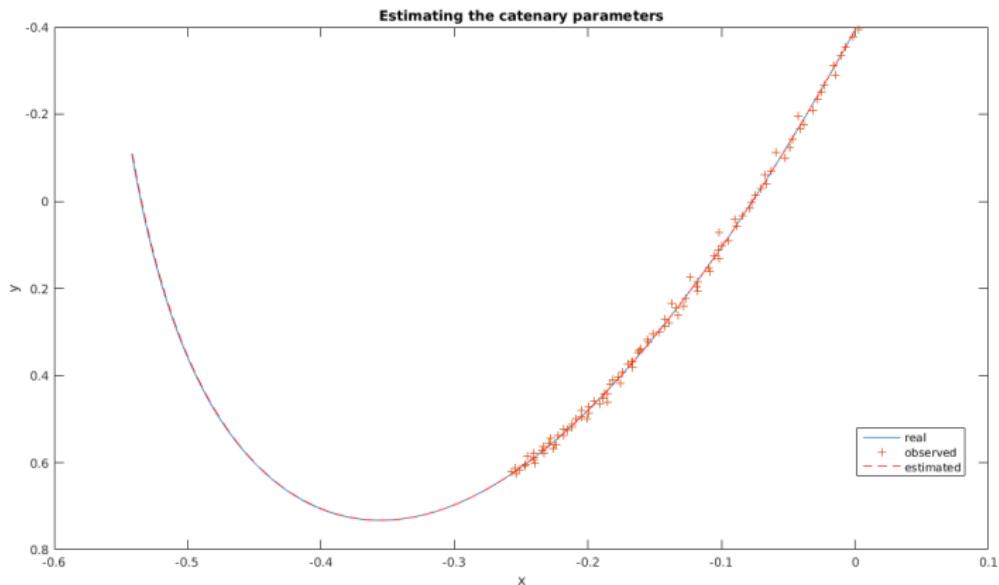
$$Y = f(X, a, b, Y_{\Sigma 2}),$$

où  $Y_{\Sigma 2}$  est une constante et  $a = \frac{H}{H_{max}}$  et  $b = \sin \theta$ .

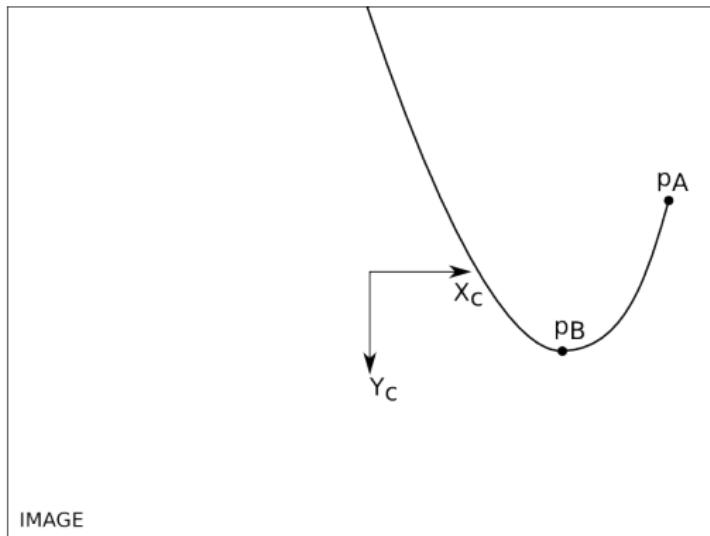
## Estimation

Après la projection de l'équation dans le plan image, nous pouvons utiliser une méthode d'optimisation, comme l'algorithme de Gauss-Newton, pour estimer les paramètres  $a$  et  $b$

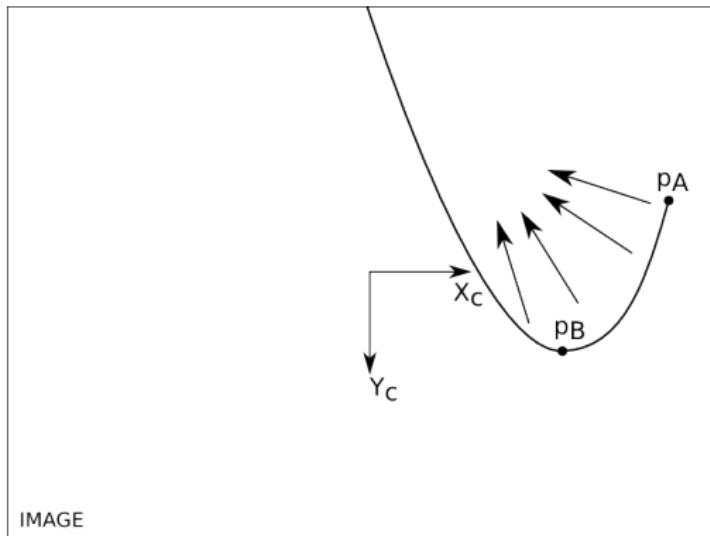
# Résultat de l'estimation des paramètres



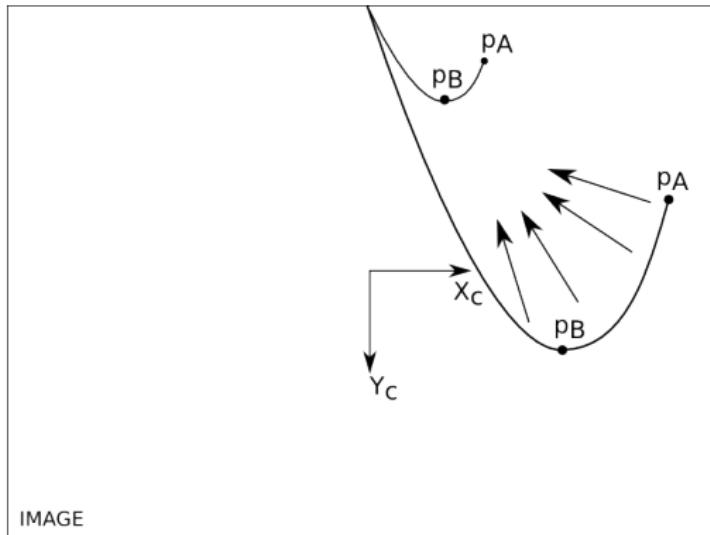
# Asservissement visuel



# Asservissement visuel



# Asservissement visuel



# Asservissement visuel

Le rapport entre le mouvement du robot et l'évolution des caractéristiques visuelles est donné par une matrice d'interaction<sup>10</sup> :

$$\dot{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \end{bmatrix} = \mathbf{L} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \end{bmatrix}.$$

À partir de la différence entre les valeurs courantes et désirées des paramètres, nous pouvons calculer la commande en vitesse :

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \cdot \mathbf{L}^\dagger \cdot \mathbf{e},$$

où  $\mathbf{v}_c$  est la vitesse de la caméra,  $\lambda$  est un gain positif,  $\mathbf{L}^\dagger$  est la pseudo-inverse de  $\mathbf{L}$  et  $\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}_d$

---

<sup>10</sup>F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual servo control. I. Basic approaches," in IEEE Robotics and Automation Magazine, Dec. 2006

# Asservissement visuel

Le rapport entre le mouvement du robot et l'évolution des caractéristiques visuelles est donné par une matrice d'interaction :

$$\dot{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \end{bmatrix} = \mathbf{L} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\Omega} \end{bmatrix}.$$

À partir de la différence entre les valeurs courantes et désirées des paramètres, nous pouvons calculer la commande en vitesse :

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \cdot \mathbf{L}^\dagger \cdot \mathbf{e},$$

où  $\mathbf{v}_c$  est la vitesse de la caméra,  $\lambda$  est un gain positif,  $\mathbf{L}^\dagger$  est la pseudo-inverse de  $\mathbf{L}$  et  $\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}_d$

## Prochaine étape

Valider expérimentalement le calcul de la matrice d'interaction  $\mathbf{L}$  et la loi de commande

# Conclusions

- Maîtrise de l'environnement de simulation et de l'architecture de contrôle
- Validation expérimentale d'un algorithme d'identification d'objet par sa couleur
- Réalisation d'un asservissement visuel d'un robot sous-marin dans un environnement contrôlé
- Validation en simulation de l'algorithme d'estimation de paramètres de la chaînette

# Perspectives de développement

- Valider expérimentalement l'estimation de paramètres de la chaînette et la loi de commande en vision
- Publier un premier article
- Généraliser la loi de commande pour contrôler un robot sous-marin à 6 DDL
- Validation expérimentale en mer
- Tenir compte de l'hydrodynamique du système
- Utiliser des câbles enroulables

# Prochaine plateforme d'expérimentation

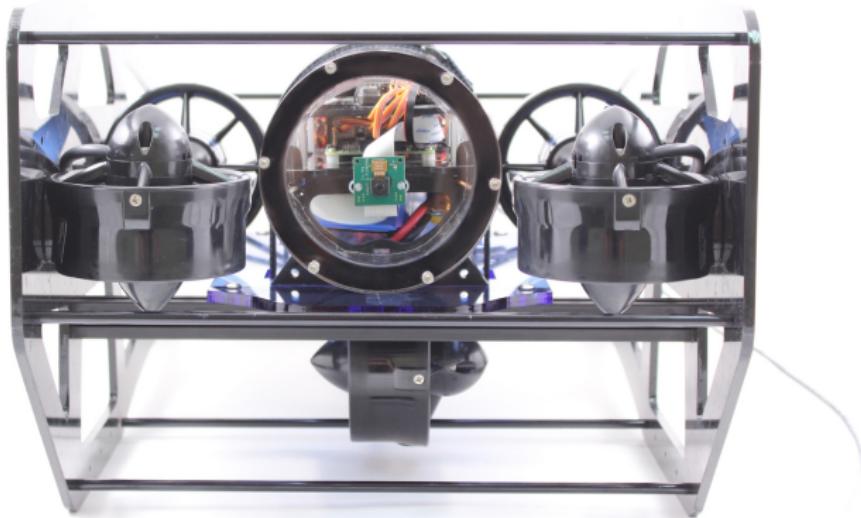


Figure : Le BlueROV