



**TP - Sens Électrique**

## **Robotique Bio Inspirée (ROBIO)**

Carlos SANTOS SEISDEDOS

Date d'édition : 19 mars 2022  
Version : 1.0



**IMT Atlantique**  
Bretagne-Pays de la Loire  
École Mines-Télécom

## Sommaire

<b>1. Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2. Démarche de Modélisation</b>	<b>4</b>
2.1. Le robot poisson	4
2.2. La méthode des réflexions	4
2.2.1. Cas d'un petit objet	7
2.2.2. Cas d'un mur isolant	8
2.3. Résultats obtenus - Essai représentatif	10
2.3.1. Cas d'un petit objet conducteur	10
2.3.2. Cas d'un petit objet isolant	12
<b>3. Démarche de commande</b>	<b>14</b>
3.1. Loi de contrôle et comportements	14
3.2. Résultats obtenus - Essai représentatif	15
<b>4. Conclusion</b>	<b>16</b>
<b>Références</b>	<b>17</b>

## Liste des figures

1.	Photo du poisson <i>Gnathonemus petersii</i> (a) et champ électrique autour du corps du poisson (b), image extraite de [4]. . . . .	3
2.	Représentation du robot poisson et des capteurs dans le simulateur MATLAB . . . . .	4
3.	Schéma des trois premières réflexions de la Méthode des Réflexions, image de [5] . . . . .	6
4.	Schéma représentant la macro-électrode $\varepsilon_\alpha$ du capteur perturbée par une sphère $\mathbf{p}$ . . . . .	7
5.	Schéma représentant le capteur $A$ et les images virtuelles $A_{W_1}^*$ et $A_{W_2}^*$ symétriques aux murs $W_1$ et $W_2$ , respectivement, et l'image virtuelle $A_C^*$ symétrique par rapport au coin $C$ . . . . .	8
6.	Réflexions du robot poisson par rapport aux murs et aux coins. . . . .	9
7.	Représentation de la trajectoire suivi par le robot poisson (à gauche) et graphiques du courant axial $\delta I_{ax}$ et latéral $\delta I_{lat}$ en fonction de la distance parcourue dans l'axe $X$ (à droite). . . . .	10
8.	Représentation de la trajectoire suivi par le robot poisson (à gauche) et graphiques du courant axial $\delta I_{ax}$ et latéral $\delta I_{lat}$ en fonction de la distance parcourue dans l'axe $X$ (à droite). . . . .	11
9.	Représentation de la trajectoire suivi par le robot poisson (à gauche) et graphiques du courant axial $\delta I_{ax}$ et latéral $\delta I_{lat}$ en fonction de la distance parcourue dans l'axe $X$ (à droite). . . . .	12
10.	Représentation de la trajectoire suivi par le robot poisson (à gauche) et graphiques du courant axial $\delta I_{ax}$ et latéral $\delta I_{lat}$ en fonction de la distance parcourue dans l'axe $X$ (à droite). . . . .	13
11.	Robot poisson attiré par un conducteur isolant lorsque $k < 0$ (3.1.b). . . . .	15
12.	Robot poisson attiré par un conducteur isolant lorsque $k < 0$ (3.1.b). . . . .	15

## Liste des tableaux

1.	Propriétés des courants axiaux $\delta I_{ax}$ et latéraux $\delta I_{lat}$ perturbées, de [6] . . . . .	7
----	--	---

## 1. Introduction

D'après Wikipedia [1], «la *bio-inspiration* est un changement de paradigme qui conduit des concepteurs à s'inspirer de la nature pour développer de nouveaux systèmes». Il s'agit d'une branche de la robotique en plein essor et émergente, qui, dans certains cas, elle peut être considérée en opposition au concept de l'intelligence artificielle (IA), le paradigme qui s'inspire du cerveau humain pour développer des méthodes d'apprentissage mais qui est aujourd'hui assez limité pour être embarqué du point de vue technologique (autonomie, capacités de calcul, etc.). À partir de cela, la *bio-inspiration* se réoriente vers une nouvelle approche qui essaie de reproduire la nature (mouvements ou comportements) pour repousser les limites de la technologie actuelle. En particulier, la *bio-inspiration* consiste à s'inspirer des animaux pour doter de capacités d'autonomie aux robots, c'est-à-dire donner aux robots des capacités de perception, d'interprétation, de décision et d'action sur son environnement sans intervention externe.

Dans ce rapport, nous aborderons une technologie bio-inspirée : la détection électrique, le sens électrique ou l'électrolocation. Cette approche vient des poissons électriques tels que les *Gymnotiformes* ou les *Mormyridés*, et d'après [2], «les décharges électriques chez ces animaux [...] sont utilisées pour la navigation, la détection et la capture de proies, principalement la nuit, ainsi que dans les eaux turbides». De ce fait nous retrouvons deux modes de perception par le sens électrique : l'électrolocation active, que nous retrouvons chez des poissons qui génèrent des décharges électriques par des muscles spécialisés (myogénie) ou par des cellules nerveuses (neurogénie), ou passive, que nous retrouvons chez de poissons qui ne génèrent pas des décharges électriques mais par une source externe. En particulier, dans ce rapport, nous traiterons l'électrolocation active avec une simulation en Matlab. La Figure 1.(a) montre une photo du poisson-éléphant *Gnathonemus petersii*, un poisson qui a une mauvaise vue, et utilise un champ électrique généré par des contractions musculaires pour trouver de la nourriture, se repérer dans l'obscurité ou la turbidité des eaux, et même trouver un partenaire, d'après [3]. À côté, la Figure 1.(b) montre le champ électrique simulé autour du corps d'un poisson doté du sens électrique que je présente ici.

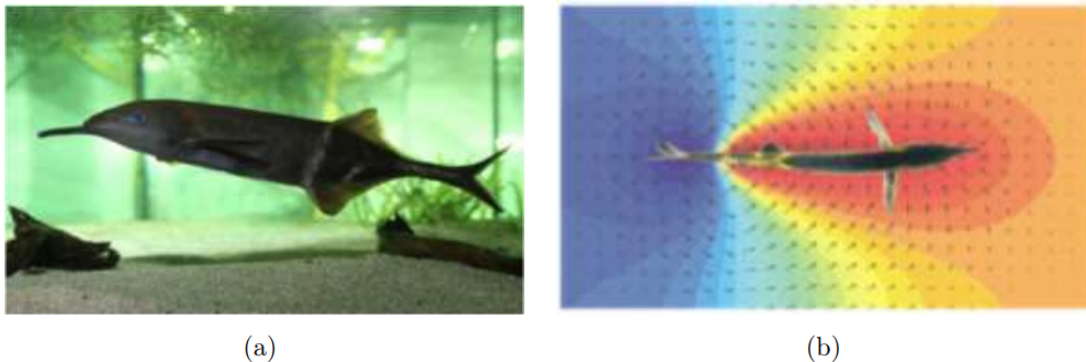


FIGURE 1 – Photo du poisson *Gnathonemus petersii* (a) et champ électrique autour du corps du poisson (b), image extraite de [4].

L'objectif de ce TP est de créer un simulateur pour la navigation 2D d'un poisson dans un aquarium, qui intègre une loi de contrôle pour l'évitement d'obstacles (peu importe si isolant ou conducteur) en cinématique. Ce rapport comprend 3 chapitres à la suite de cette introduction. Dans le premier chapitre, nous présenterons le robot poisson simulé, une résolution au problème d'électrolocation active dite « méthode des réflexions » utilisée dans le simulateur, et les résultats obtenus pour des petits objets conducteurs et isolants. Le deuxième chapitre présente la démarche de commande utilisée pour simuler le mouvement d'un poisson en évitant les obstacles, puis les résultats obtenus pour cette loi de commande.

## 2. Démarche de Modélisation

### 2.1. Le robot poisson

Le robot (robot poisson ou poisson) simulé est inspirée du robot *aFish* du projet *Subcultron* et il est composé de 5 électrodes pour faire de l'*électrolocation active*, c'est-à-dire pour générer un champ électrique qui réagit à l'environnement. La suivante figure en deux dimension (le 5-ième capteur n'est pas représenté) montre le robot poisson simulé, ainsi que l'emplacement des électrodes.

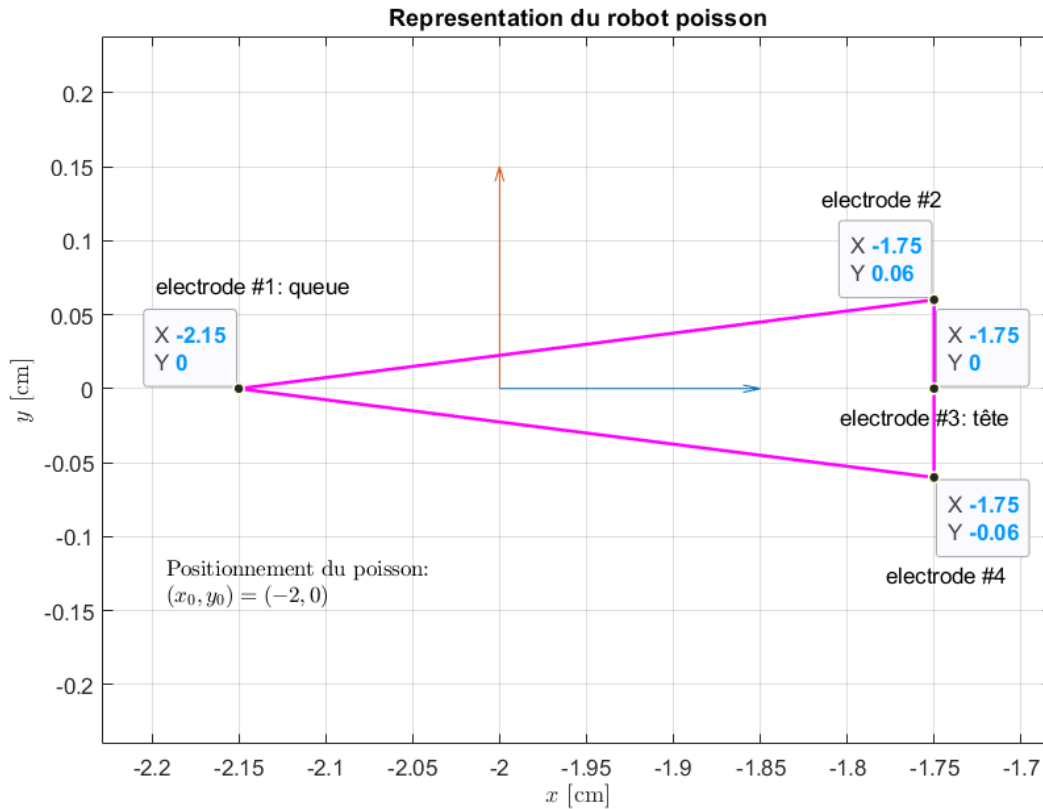


FIGURE 2 – Représentation du robot poisson et des capteurs dans le simulateur MATLAB

Jackson2012

### 2.2. La méthode des réflexions

La « méthode des réflexions » est une solution au problème d'électrolocation directe, présentée dans [5]. Cette technique consiste à résoudre l'équation de Laplace  $\Delta\phi = 0$  dans un scénario avec plusieurs objets autour du capteur et avec certaines conditions imposées aux objets (capteur inclus). En appliquant le principe de superposition présenté, dû la rapide atténuation des réflexions  $\phi_i$  avec la distance, le vecteur de courants total peut être évalué en considérant jusqu'à la deuxième réflexion :

$$\mathbf{I} \approx \mathbf{I}^{(0)} + \mathbf{I}^{(1)} + \mathbf{I}^{(2)} \quad (1)$$

où,  $\mathbf{I}^{(0)}$  représente les courants mesurés en absence d'objet dans la scène,  $\mathbf{I}^{(1)}$  représente les courants réfléchis par l'objet (en absence de capteur dans la scène) et  $\mathbf{I}^{(2)}$  représente la réponse électrique que le capteur génère afin de retrouver son équilibre électrique sous l'excitation de la première réflexion, d'après [6]. La Figure 3 résume bien le principe de cette méthode itérative. Chaque potentiel  $\phi_i$  représente la réponse à la somme des potentiels  $\phi_0 + \phi_1 + \dots + \phi_{i-1}$  réfléchis par les objets qui entourent le capteur, et le

capteur. Par conséquent, le problème se réduit à trouver les courants associés au potentiel de base  $\phi_0$ , la première et la seconde réflexion :  $\mathbf{I}^{(0)}$ ,  $\mathbf{I}^{(1)}$  et  $\mathbf{I}^{(2)}$ .

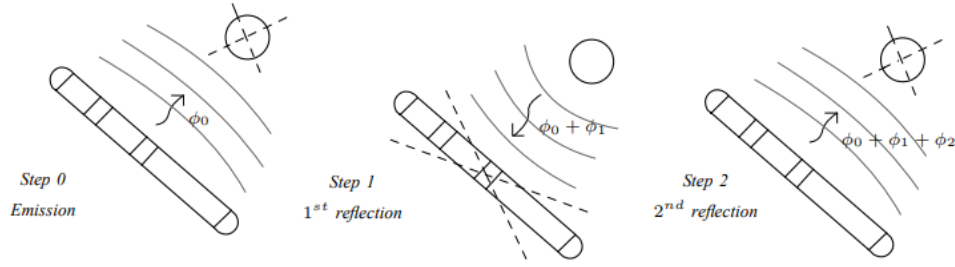


FIGURE 3 – Schéma des trois premières réflexions de la Méthode des Réflexions, image de [5]

D'après [7], le courant  $\mathbf{I}^{(0)}$  peut être obtenu en utilisant un simulateur numérique et s'écrit :

$$\mathbf{I}^{(0)} = \bar{\mathbf{C}}^{(0)} \cdot \mathbf{U} \quad (2)$$

avec  $\mathbf{U}$  étant le vecteur tension des électrodes, dans notre cas  $\mathbf{U} = [1, 0, 0, 0, 0]$  car seulement l'électrode à la queue est alimentée, et  $\bar{\mathbf{C}}^{(0)}$  étant la matrice de conductances à vide entre chaque électrode et ayant la suivante forme dans notre cas :

$$\bar{\mathbf{C}}^{(0)} = \gamma \cdot \begin{pmatrix} 0.2557 & -0.0639 & -0.0639 & -0.0639 & -0.063 \\ -0.0639 & 0.1218 & -0.0203 & -0.0173 & -0.0203 \\ -0.0639 & -0.0203 & 0.1218 & -0.0203 & -0.0173 \\ -0.0639 & -0.0173 & -0.0203 & 0.1218 & -0.0203 \\ -0.0639 & -0.0203 & -0.0173 & -0.0203 & 0.1218 \end{pmatrix}$$

avec  $\gamma$  la conductivité de l'eau (en  $\frac{S}{cm}$ ).

Les courants  $\mathbf{I}^{(1)}$  et  $\mathbf{I}^{(2)}$  doivent être calculés en temps réel car ils dépendent de la position du capteur et du reste des objets. Nous divisons le courant généré par les réflexions en une composante axiale et une composante latérale. D'après [5], « la composante axiale  $\mathbf{I}_{ax}$  traduit la réaction du capteur aux différences de potentiel réfléchies par l'objet et évaluées le long de l'axe du capteur, et la composante latérale  $\mathbf{I}_{lat}$  traduit la polarisation latérale du capteur générée par le flux latéral du champ renvoyé par l'objet » :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{ax} + \mathbf{I}_{lat} \quad (3)$$

avec

$$\mathbf{I}_{ax} = \left(1 - \bar{\mathbf{C}}^{(0)} \cdot \mathbf{K}\right) \cdot \mathbf{P}_+ \cdot \mathbf{I}^{(0)} \quad (4)$$

et

$$\mathbf{I}_{lat} = \mathbf{P}_\perp \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{P}_+ \cdot \mathbf{I}^{(0)} \quad (5)$$

où, la matrice  $\mathbf{P}_+$  projette les courants à travers chaque électrode, en additionnant les courants de la même électrode, la matrice diagonale  $\mathbf{P}_\perp$  dépend de la géométrie du capteur, et les matrices  $\mathbf{K}$  et  $\mathbf{L}$  dépendent de la géométrie de l'objet et de sa position et orientation par rapport au capteur.

Dans le simulateur, nous utilisons la suivante formule pour le calcul des courants mesurées :

$$\mathbf{I} = \bar{\mathbf{C}}^{(0)} \cdot \mathbf{U} \left(1 - \bar{\mathbf{C}}^{(0)} \cdot \mathbf{K}\right) \quad (6)$$

Ensuite, nous définissons les composantes perturbées des courants  $\delta I$  induits par la présence d'un objet proche pour les électrodes à la gauche et la droite de la tête du robot poisson, comme suit :

$$\delta I_2 = I_2 - I_{02} \quad ; \quad \delta I_4 = I_4 - I_{04} \quad (7)$$

avec  $I_2$  et  $I_4$  les courants mesurées dans un instant donnée et  $I_{02}$  et  $I_{04}$  les courants mesurées en absence d'objet proche.

Et, dans le cas de notre configuration d'électrodes, nous pouvons paramétrer les courants perturbés  $\delta I$  par sa composante axiale et sa composante latérale :

$$\delta I_{ax} = \frac{\delta I_1 + \delta I_2}{2} \quad ; \quad \delta I_{lat} = \frac{\delta I_1 - \delta I_2}{2} \quad (8)$$

Le scalaire axial  $\delta I_{ax}$  nous permet savoir si la scène est composée d'un objet isolant ou conducteur à partir de son signe, tandis que le scalaire latéral  $\delta I_{lat}$  nous donne une idée de la position de l'objet par rapport au capteur à partir de son signe. La suivante table regroupe ces idées :

$\delta I_{ax}$	$> 0$	pour un objet conducteur
	$< 0$	pour un objet isolant
$\delta I_{lat}$	$> 0$	pour un objet conducteur à la gauche du capteur <b>ou</b> pour un objet isolant à la droite du capteur
	$< 0$	pour un objet conducteur à la droite du capteur <b>ou</b> pour un objet isolant à la gauche du capteur

TABLE 1 – Propriétés des courants axiaux  $\delta I_{ax}$  et latéraux  $\delta I_{lat}$  perturbées, de [6]

Nous utiliserons cette table pour vérifier notre simulateur plus tard, dans la Section 2.3, et pour définir une loi de contrôle, dans la Section 3.1.

Dans ce qui suit, nous devons calculer la matrice  $\mathbf{K}$  pour les différents objets que le capteur peut rencontrer. Nous allons considérer uniquement le cas d'un petit objet qui peut être isolant ou conducteur, et le cas d'un mur isolant. Notre simulateur placera des objets dans l'aquarium composé de 4 murs isolants.

### 2.2.1. Cas d'un petit objet

Pour le calcul de la matrice  $\mathbf{K}$  dans le cas d'un petit objet, nous prenons en compte le scénario composé d'un capteur (ou une électrode  $\varepsilon_\alpha$ ), qui a pour centre  $x_\alpha$ , et d'un petit objet  $\mathbf{p}$ , qui lui a pour centre  $y_c$ . Il est

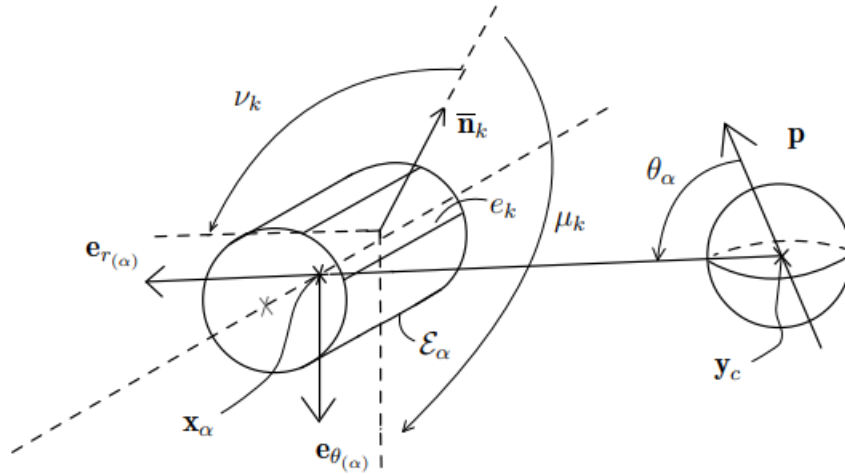


FIGURE 4 – Schéma représentant la macro-électrode  $\varepsilon_\alpha$  du capteur perturbée par une sphère  $\mathbf{p}$ .

prouvé dans [5] que la matrice  $\mathbf{K}$  de réponse à cet objet suit l'expression suivante :

$$\mathbf{K}_{\text{objet}} = -\frac{1}{4\pi \cdot \gamma} \cdot \frac{\mathbf{r}_\alpha \cdot \mathbf{P}_r \cdot \mathbf{r}_\beta}{\|\mathbf{r}_\alpha\|^3 \cdot \|\mathbf{r}_\beta\|^3} \quad (9)$$

où,  $\mathbf{r}_\alpha = y_c - x_\alpha$ , c'est-à-dire la distance entre l'objet et le capteur considéré,  $\mathbf{r}_\beta = y_c - x_\beta$ , c'est-à-dire la distance entre l'objet et un autre capteur, et  $\mathbf{P}$  le tenseur de polarisation qui dépend de la géométrie de l'objet et du caractère conducteur/isolant. Pour une sphère,  $\mathbf{P} = \chi \cdot a^3 \cdot \mathbf{I}_3$  avec  $\mathbf{I}_3$  la matrice identité de 3



dimensions,  $a$  le rayon de la sphère et  $\chi$  le facteur de contraste : 1 pour un objet totalement conducteur et  $-0.5$  pour un objet totalement isolant.

Lors de la révision des résultats, vous trouverez la forme des courants lorsque le robot poisson s'approche à un objet totalement isolant et un objet totalement conducteur.

### 2.2.2. Cas d'un mur isolant

Pour le cas des murs, nous utilisons la méthode présentée dans [8] pour des objets de grande taille. Comme illustré dans la Figure 5, cette méthode consiste à créer une image virtuelle du robot placée symétriquement au mur, qui a pour centre  $x_\beta^*$  et, dans le cas d'approximation à un coin, une troisième image placée symétriquement au coin  $C$ .

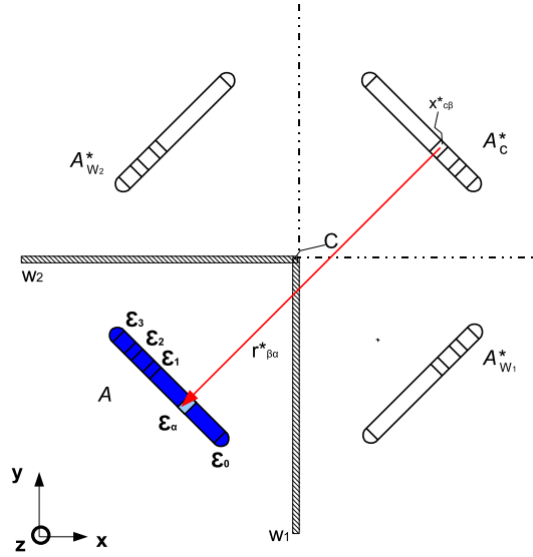


FIGURE 5 – Schéma représentant le capteur  $A$  et les images virtuelles  $A_{W1}^*$  et  $A_{W2}^*$  symétriques aux murs  $W1$  et  $W2$ , respectivement, et l'image virtuelle  $A_C^*$  symétrique par rapport au coin  $C$ .

En considérant le potentiel généré par le mur comme la superposition du champ du robot et le champ de son image, nous obtenons la matrice  $\mathbf{K}$  de réponse aux murs suivante :

$$\mathbf{K}_{\text{murs}} = -\frac{1}{4\pi \cdot \gamma} \cdot \frac{1}{\|\mathbf{r}_{\beta\alpha}^*\|^3} \quad (10)$$

où,  $\mathbf{r}_{\beta\alpha}^* = x_\alpha - x_\beta^*$  pour chaque combinaison d'électrode réel et électrode image. Du fait que notre aquarium porte 4 murs, nous avons 8 réflexions au total (4 réflexions provenant des murs et 4 réflexions provenant des coins). Dans la Figure 6 nous pouvons voir une représentation des 8 images virtuelles du robot poisson par rapport aux murs et aux coins.

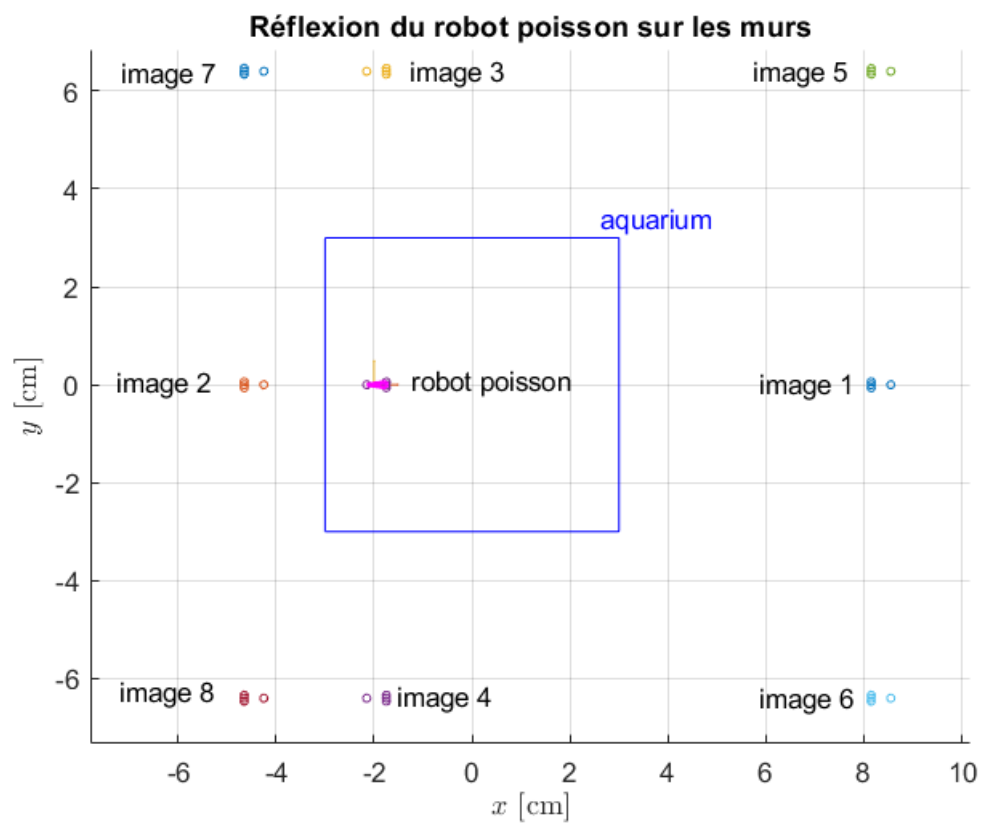


FIGURE 6 – Réflexions du robot poisson par rapport aux murs et aux coins.

### 2.3. Résultats obtenus - Essai représentatif

Cette section montre les résultats obtenus lors de certaines simulations, et comme avancé précédemment, nous permettent de vérifier le calcul des courants avec la Table 1.

L'allure de certaines courbes peuvent être endommagées par la présence de l'objet (isolant ou conducteur) à la position  $(x, y) = (2.5, 2.5)$ , mais le simulateur crée a besoin d'un objet isolant et d'un objet conducteur pour que les matrices  $\mathbf{K}$  calculées soient pas égales à 0.

#### 2.3.1. Cas d'un petit objet conducteur

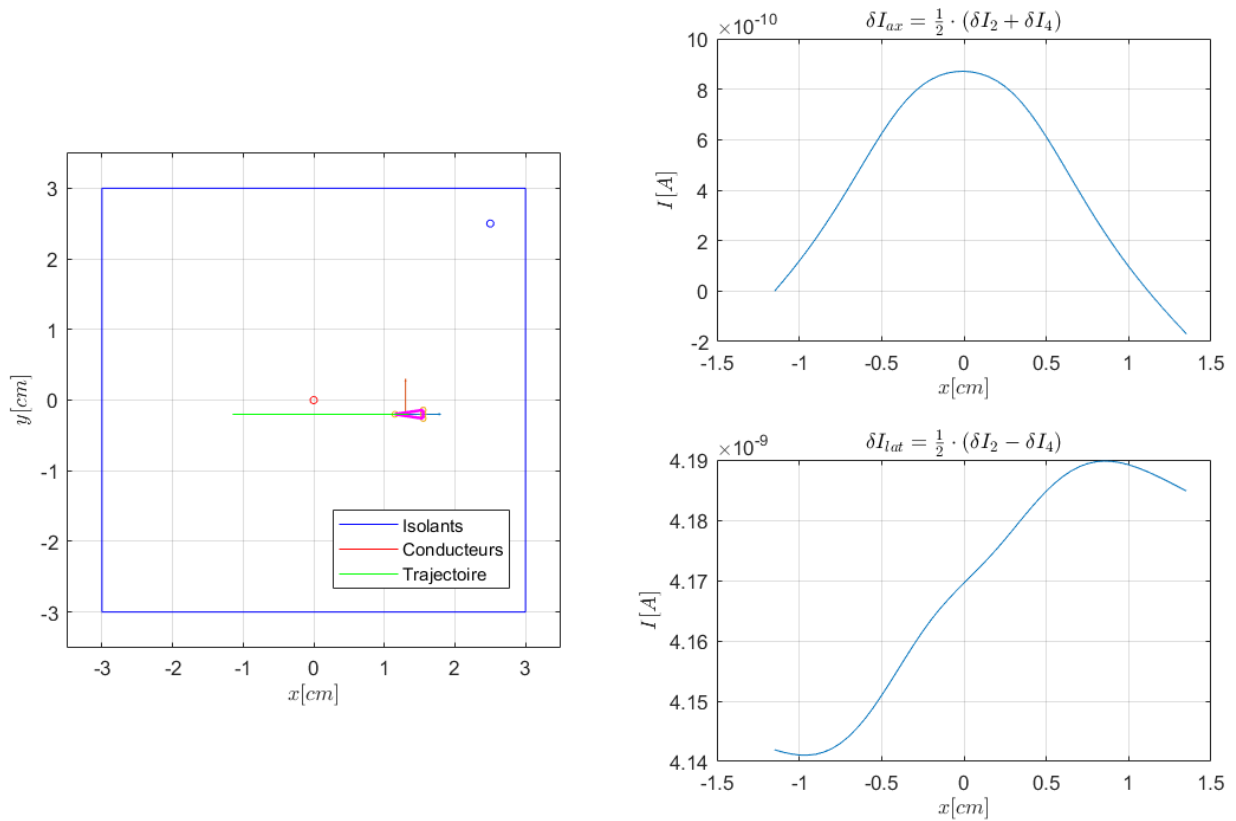


FIGURE 7 – Représentation de la trajectoire suivi par le robot poisson (à gauche) et graphiques du courant axial  $\delta I_{ax}$  et latéral  $\delta I_{lat}$  en fonction de la distance parcourue dans l'axe  $X$  (à droite).

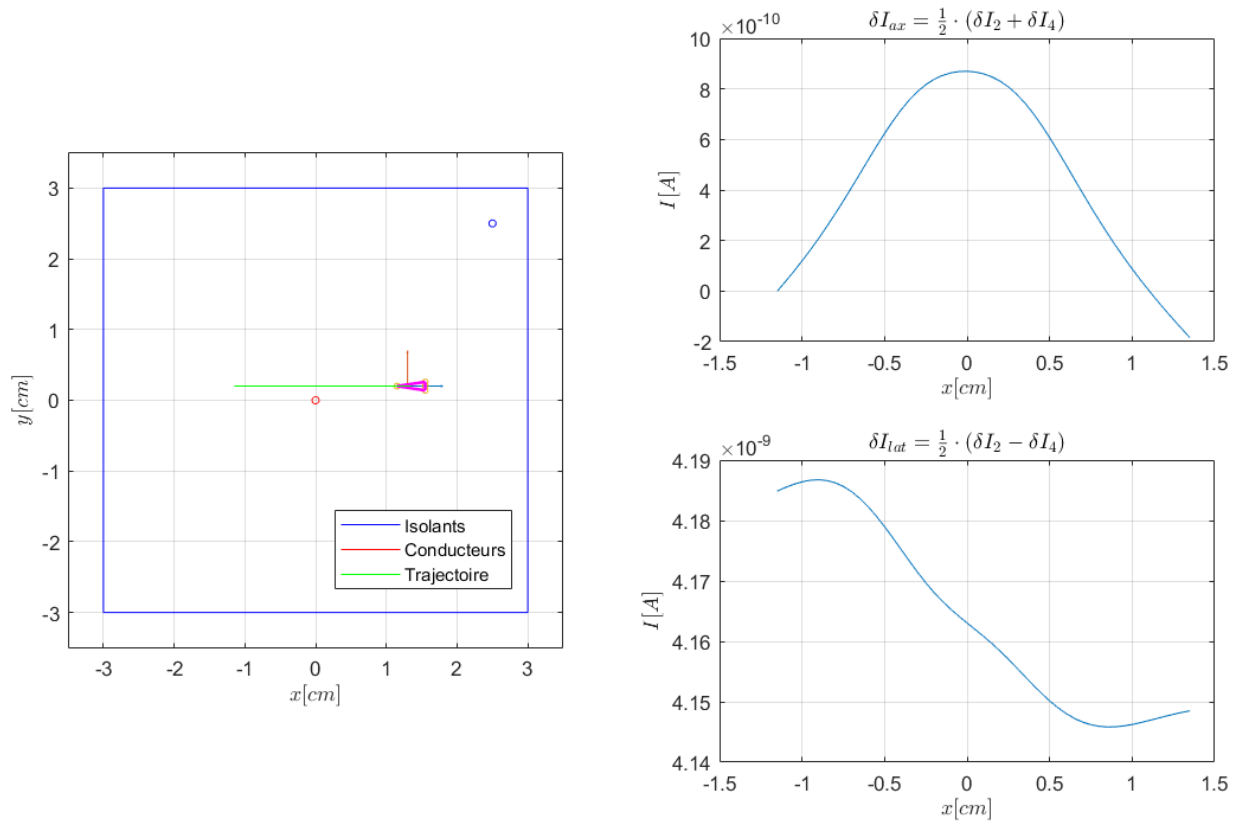


FIGURE 8 – Représentation de la trajectoire suivi par le robot poisson (à gauche) et graphiques du courant axial  $\delta I_{ax}$  et latéral  $\delta I_{lat}$  en fonction de la distance parcourue dans l'axe  $X$  (à droite).

### 2.3.2. Cas d'un petit objet isolant

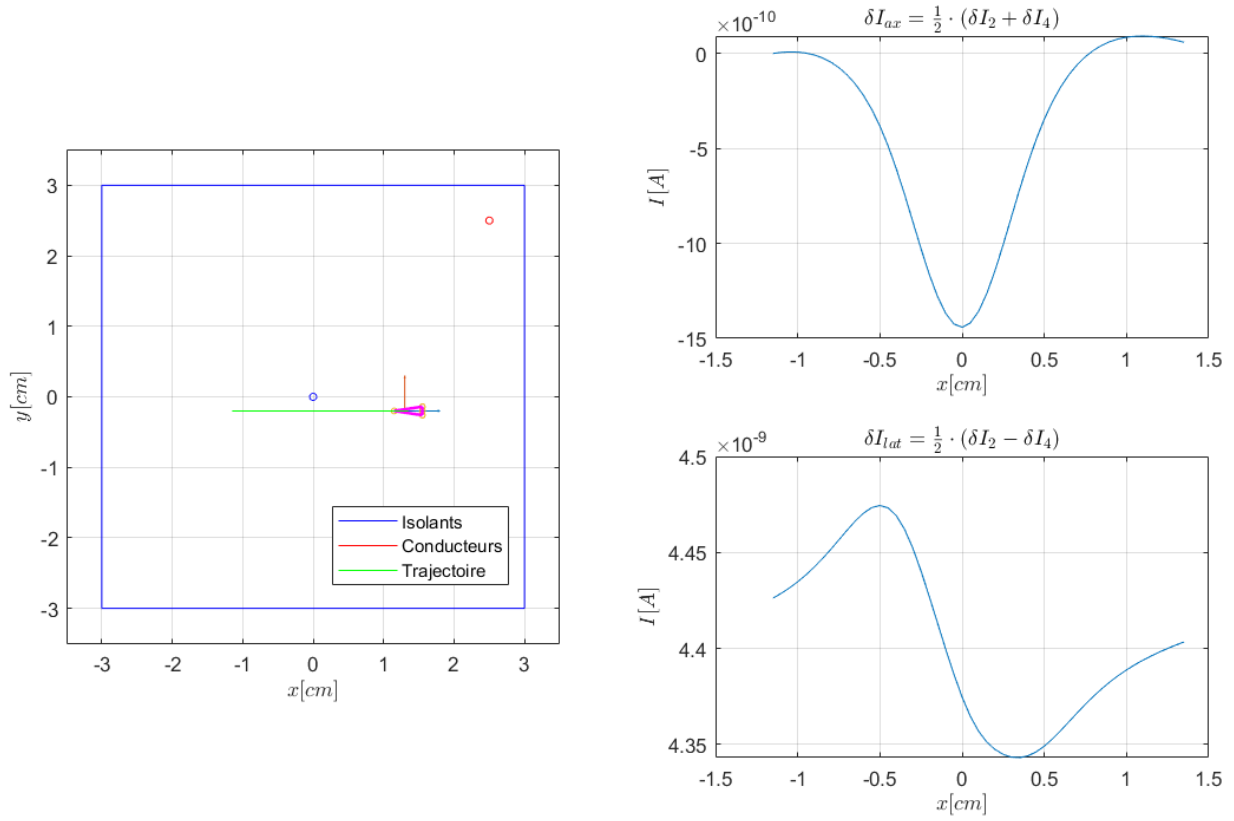


FIGURE 9 – Représentation de la trajectoire suivi par le robot poisson (à gauche) et graphiques du courant axial  $\delta I_{ax}$  et latéral  $\delta I_{lat}$  en fonction de la distance parcourue dans l'axe  $X$  (à droite).

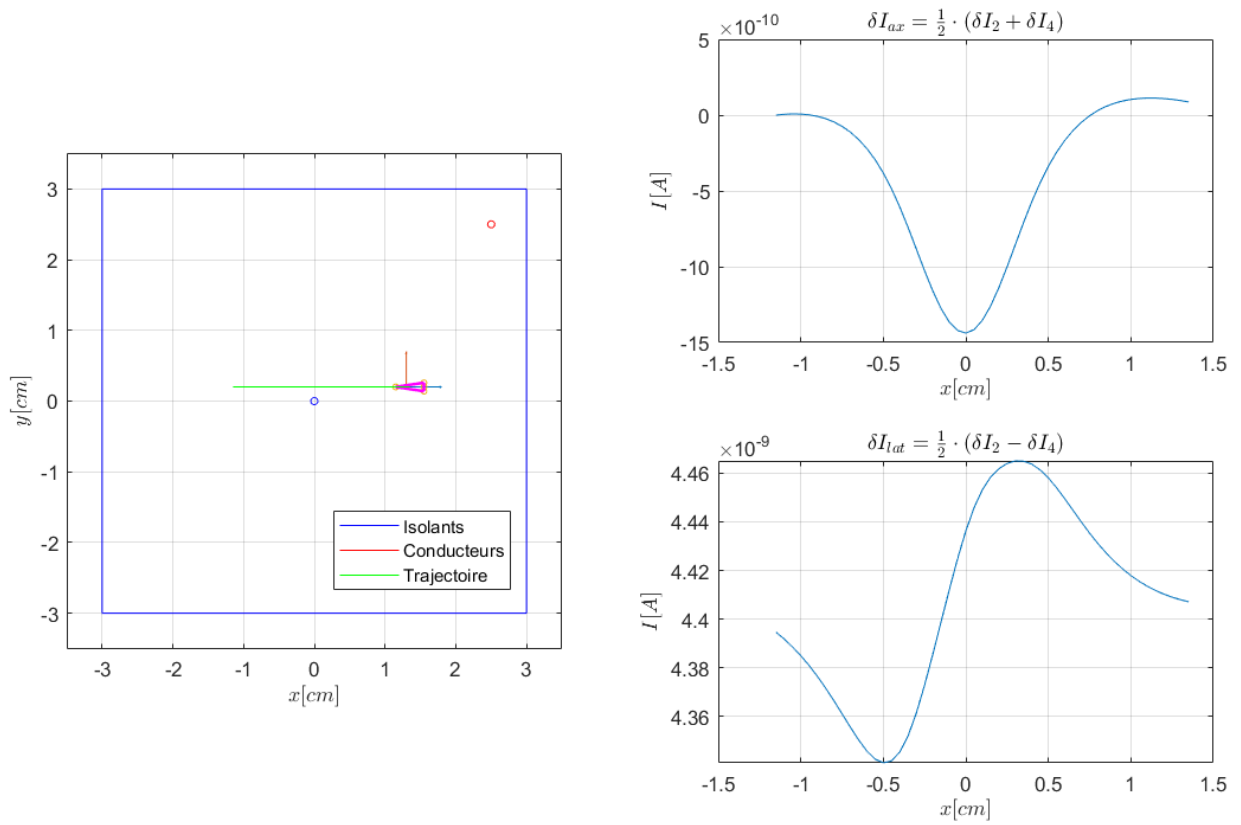


FIGURE 10 – Représentation de la trajectoire suivi par le robot poisson (à gauche) et graphiques du courant axial  $\delta I_{ax}$  et latéral  $\delta I_{lat}$  en fonction de la distance parcourue dans l'axe X (à droite).

### 3. Démarche de commande

#### 3.1. Loi de contrôle et comportements

Afin d'étendre la stratégie bio-inspirée présentée précédemment au cas actif, nous considérons que les composantes perturbatrices  $\delta \mathbf{I}$ , en concret les scalaires axial  $\delta I_{ax}$  et latéral  $\delta I_{lat}$  présentés dans l'équation (8).

La Table 1 suggère d'appliquer la loi de contrôle suivante, d'après [6] :

$$v = C \quad ; \quad \omega = k \cdot \delta I_{lat} \quad (11)$$

où  $C$  est une constante positive qui permet au robot d'avancer vers l'avant, et  $k$  est un gain pour contrôler la vitesse angulaire du robot poisson  $\omega$ .

À partir de la Table 1, nous pouvons modifier le comportement dynamique du robot poisson :

- (a) Si  $k > 0$ , cette loi de contrôle force **le capteur à être attiré par tout objet conducteur** et garantit que le capteur est repoussé par un objet isolant.
  - De ce fait, lorsqu'un objet conducteur se trouve à droite (ou à gauche, respectivement), le capteur se tourne vers la droite (ou la gauche, respectivement). Et lorsqu'un objet conducteur se trouve devant le capteur, le capteur avance sans changer d'orientation.
  - En revanche, lorsqu'un objet isolant est situé à droite (ou à gauche, respectivement), cette loi de contrôle fait réagir le robot poisson comme s'il y avait un objet conducteur symétrique sur la gauche (ou sur la droite, respectivement).
- (b) Si  $k < 0$ , cette loi force **le capteur à être attiré par tout objet isolant** et repoussé par les objets conducteurs.
- (c) Si nous multiplions  $k$  par le signe de  $\delta I_{ax}$ , nous obtenons les mêmes comportements pour des objets conducteurs ou isolants, ce qui assure au capteur, pour  $k > 0$  d'être **attiré par tout objet**, et pour  $k < 0$  d'être **repoussé par tout objet non transparent électriquement**.

### 3.2. Résultats obtenus - Essai représentatif

Personnellement, le cas (3.1.a) ne marche pas très bien, mais les cas (3.1.b) et (3.1.c) marchent bien.

Pour le cas (3.1.b), où  $k < 0$ , nous pouvons voir dans la Figure 12 comment le robot poisson est attiré par l'objet isolant, indépendamment de la position de ce dernier. Pour ce comportement, j'ai donné des poids différents aux tenseurs de polarisation en fonction de s'il s'agit d'un objet conducteur, isolant ou un mur :

Listing 1 – Extrait du fichier `f_currents.m`

```
77 K = k_cond*0.9 - k_isol*0.9 + k_murs*0.6;
```

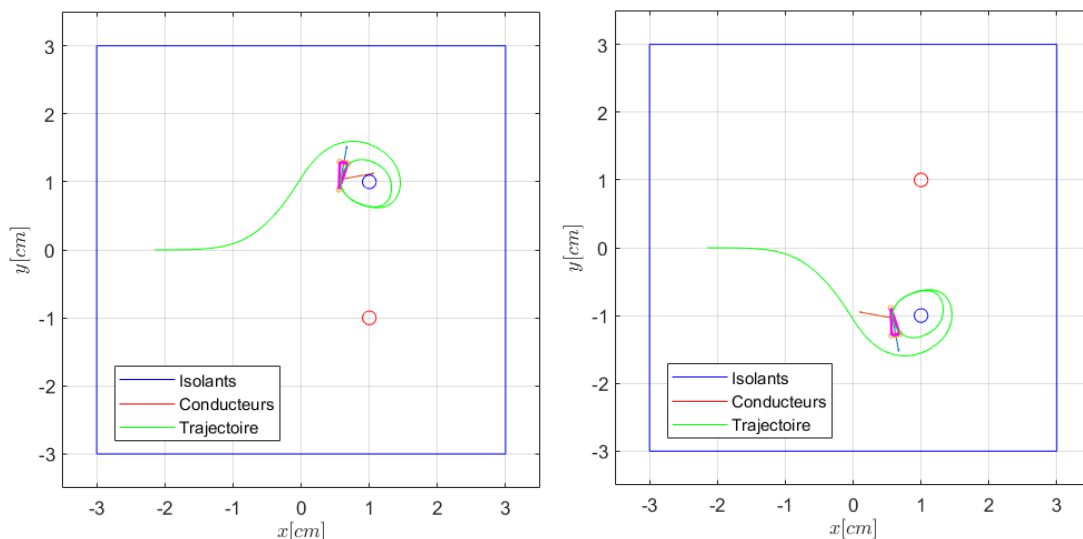


FIGURE 11 – Robot poisson attiré par un conducteur isolant lorsque  $k < 0$  (3.1.b).

Pour le cas (3.1.c), nous observons dans la Figure comment le robot est repoussé par n'importe quel type d'objet, et comment les commandes reviennent et font le poisson tourner en cercles, tout en évitant les obstacles. Les poids choisis pour cette simulation sont les suivants :

Listing 2 – Extrait du fichier `f_currents.m`

```
77 K = k_cond*0.9 + k_isol*0.9 + k_murs*0.6;
```

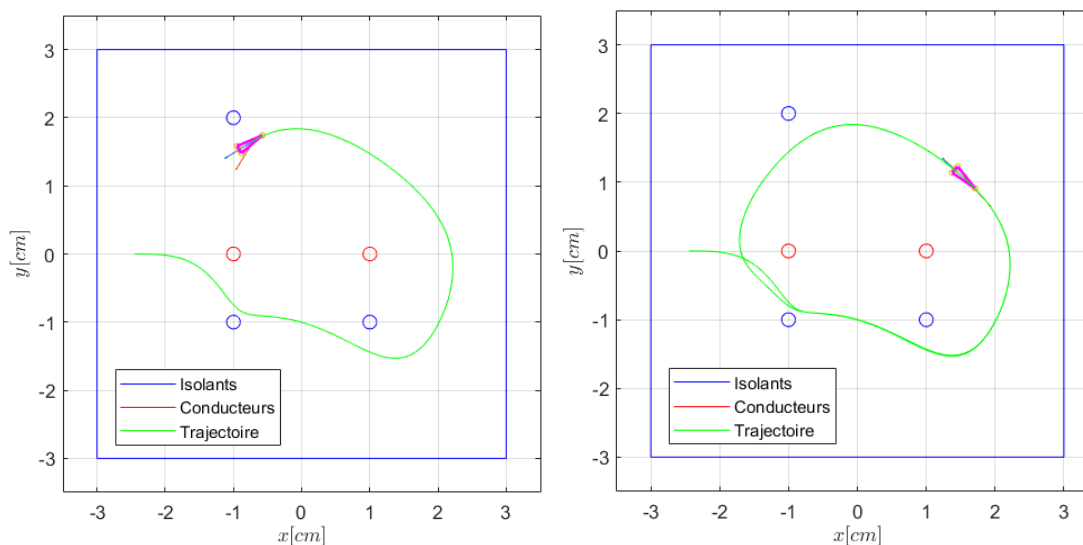


FIGURE 12 – Robot poisson attiré par un conducteur isolant lorsque  $k < 0$  (3.1.b).



## 4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié le sens électrique *bio-inspiré* de certains poissons, en particulier le mode de perception active, ou électrolocation active, utilisé notamment pour la navigation. Nous avons développé une loi de commande qui utilise le modèle d'électrolocation « méthode des réflexions » pour simuler le mouvement d'un poisson dans un aquarium qui évite toute sorte d'obstacles (objets isolants, conducteurs et murs) : il s'agit d'une loi de contrôle (simple) proportionnelle aux courants perçus par les électrodes du robot qui agit sur la vitesse angulaire du robot.

Par la suite, nous pourrions étudier la cohabitation des poissons électriques en groupe, traité dans [4], ou porter notre loi de commande à un environnement réel.

## Références

- [1] *Bio-inspiration*, Wikipedia, 19/03/2022, URL : [fr.wikipedia.org/wiki/Bio-inspiration](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bio-inspiration)
- [2] Rigoberto González Gutiérrez, *Los peces eléctricos (orden Gymnotiformes) de Panamá*, Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI), Laboratorio de Naos, Panamá, ©EDUNACHI, 2014
- [3] *Poisson-éléphant*, Wikipedia, 19/03/22, URL : [fr.wikipedia.org/wiki/Poisson-éléphant](https://fr.wikipedia.org/wiki/Poisson-éléphant)
- [4] Mohammed-Rédha Benachenhrou, *Électrolocation dans un contexte multi-robots : théorie et expérimentations*, Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes, 2014.
- [5] Frédéric Boyer, Pol Bernard Gossiaux, Brahim Jawad, Vincent Lebastard and Mathieu Porez, *Model for a sensor inspired by electric fish*, JOURNAL OF IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, 2012.
- [6] Frédéric Boyer, Vincent Lebastard, Christine Chevallereau, and Noël Servagen, *Underwater Reflex Navigation in Confined Environment Based on Electric Sense*, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 29, NO. 4, AUGUST 2013
- [7] Mohammed-Rédha Benachenhrou, Frédéric Boyer, Christine Chevallereau, Vincent Lebastard, *Fast simulator of the electric sense for complex scene*.
- [8] John David Jackson, *Classical Electrodynamics*, John Wiley & Sons, 1962.



OUR WORLDWIDE PARTNERS UNIVERSITIES - DOUBLE DEGREE AGREEMENTS

3 CAMPUS, 1 SITE



IMT Atlantique Bretagne-Pays de la Loire – <http://www.imt-atlantique.fr/>

**Campus de Brest**

Technopôle Brest-Iroise  
CS 83818  
29238 Brest Cedex 3  
France  
T +33 (0)2 29 00 11 11  
F +33 (0)2 29 00 10 00

**Campus de Nantes**

4, rue Alfred Kastler  
CS 20722  
44307 Nantes Cedex 3  
France  
T +33 (0)2 51 85 81 00  
F +33 (0)2 99 12 70 08

**Campus de Rennes**

2, rue de la Châtaigneraie  
CS 17607  
35576 Cesson Sévigné Cedex  
France  
T +33 (0)2 99 12 70 00  
F +33 (0)2 51 85 81 99

**Site de Toulouse**

10, avenue Édouard Belin  
BP 44004  
31028 Toulouse Cedex 04  
France  
T +33 (0)5 61 33 83 65



**IMT Atlantique**

Bretagne-Pays de la Loire  
École Mines-Télécom

© IMT Atlantique, 2021  
Imprimé à IMT Atlantique  
Dépôt légal : Septembre 2017  
ISSN : 2556-5060