
Conception et modélisation d'un microrobot nageur

Guillaume J. Laurent — Emmanuel Piat

*Laboratoire d'Automatique de Besançon
UMR CNRS 6596
25, rue Alain Savary
25000 Besançon, France
glaurent@ens2m.fr
epiat@ens2m.fr*

RÉSUMÉ. Cet article présente la conception et la modélisation d'un microrobot nageur. Le microrobot nageur est propulsé par les battements de deux palmes. Les microactionneurs choisis pour la propulsion sont des matériaux composites transducteurs appelés IPMC (Ionic polymer metal composite). Les résultats expérimentaux sont encourageants et permettent de valider le modèle mécanique du microrobot. Une étude énergétique plus approfondie des modes de propulsion aquatique à l'échelle millimétrique montre que des mouvements ondulatoires permettraient d'obtenir de meilleurs rendements. Nous proposons donc des perspectives pour augmenter les performances du microrobot.

ABSTRACT. This paper presents the design and the realization of a swimming microrobot. The microrobot is propelled by the beating of two fins. The chosen propeller actuators are transducer composite material called IPMC (Ionic polymer metal composite). The experimental results allow us to check our theoretical model of the microrobot. Lastly, a power study of the fish-like propulsion shows that undulatory motions are more efficient than oscillatory motions. So, we propose an improved microrobot which would have a better efficiency.

MOTS-CLÉS : microrobot nageur; micro-actionneur; IPMC.

KEYWORDS: Swimming Microrobot, Micro-actuator, IPMC.

1. Introduction

Les êtres vivants fascinent par leur adaptation parfaite à tous les milieux. Dans le milieu liquide, les poissons atteignent des performances inégalées par les machines. Certains sont capables de nager à des vitesses impressionnantes vis-à-vis de leur force musculaire (paradoxe de Gray), d'autres d'exécuter des changements de direction rapides et des accélérations foudroyantes. Ces performances font rêver : rendements énergétiques excellents, grandes manœuvrabilités, fortes accélérations, discrétion acoustique, etc.

Pour étudier le mode de propulsion des poissons, plusieurs robots de taille réelle ondulant comme les poissons ont été réalisés. On peut citer notamment Jalbert [JAL 95] et Ijspeert [IJS 99] pour leurs travaux sur les robots anguilles, Triantafyllou [TRI 98] pour son robot brochet et Kato [KAT 98] qui a étudié l'effet des nageoires pectorales des bars.

En microrobotique, l'intérêt des modes de propulsion des poissons est double. Premièrement, si le microrobot doit être autonome, l'énergie doit être exploitée au maximum. Les excellents rendements énergétiques de ce mode de propulsion permettraient d'accroître le rayon d'action du microrobot. Deuxièmement, la rotation d'une hélice est difficile à réaliser à de très petites dimensions. Par contre, des mouvements de flexions ou de battements sont envisageables.

Jusqu'à présent tous les microrobots qui ont été développés sont propulsés à l'aide de palmes comme par exemple ceux de Fukuda [FUK 94, FUK 95], Guo [GUO 98] au Japon et ceux de Mojarrad et Shahinpoor [MOJ 96, MOJ 97, SHA 92] aux États-Unis.

Notre objectif est de développer des robots nageurs de tailles centimétriques au plus, utilisant les avantages du mode de propulsion des poissons. Cet objectif se traduit par deux études : d'abord la recherche d'un microactionneur de propulsion ayant les caractéristiques les mieux adaptées, puis une modélisation mécanique afin d'optimiser les performances.

Dans cet article, nous développons tout d'abord le modèle théorique que nous avons utilisé pour évaluer les forces engendrées par un mouvement dans l'eau à une échelle millimétrique.

Puis, nous présentons le choix du microactionneur, les caractéristiques techniques et un modèle cinématique du microactionneur retenu.

Nous exposons ensuite le premier prototype de microrobot nageur réalisé ainsi que ses résultats expérimentaux.

Enfin, nous étudions plusieurs mouvements pour déterminer les plus efficaces afin d'envisager des possibles améliorations à apporter au microrobot pour augmenter le rendement de sa propulsion.

2. Modèle mécanique

Depuis longtemps, de nombreux chercheurs travaillent à la modélisation du mode de propulsion des poissons, en particulier à grande vitesse où se manifeste le paradoxe de Gray¹.

Rosen [ROS 59] fut l'un des premiers à proposer une explication : à grande vitesse, la force de propulsion est créée par l'évolution de vortex (ou tourbillons) générés par les deux tiers arrières du corps du poisson.

A l'échelle millimétrique, les vitesses d'évolution sont très faibles et ce modèle ne convient pas. Nous avons donc choisi le modèle de Webb et Weihs [WEB 83] valable à cette échelle. Celui-ci permet de calculer les forces résultantes du mouvement de n'importe quel poisson se déplaçant à très faible vitesse.

Les calculs doivent être effectués dans un cadre précis défini par les hypothèses suivantes :

- 1) le fluide est incompressible et non visqueux ;
- 2) la vitesse moyenne U du fluide par rapport au poisson est faible et constante ;
- 3) l'épaisseur du poisson est négligeable par rapport à sa longueur L ;
- 4) les vitesses des mouvements normaux au plan du poisson sont faibles ;
- 5) l'angle α du corps du poisson par rapport à l'axe du flux est faible en tout point.

Le principe du modèle est basé sur la force exercée par un fluide en mouvement sur un solide. On appelle cette force la force de traînée. Pour une plaque mince normale au flux, la force de traînée est définie par :

$$\vec{F} = \frac{1}{2} C_n \rho S \vec{U} \|\vec{U}\| \quad [1]$$

où :

- ρ est la masse volumique du fluide,
- S est l'aire de la plaque,
- U est la vitesse relative du fluide par rapport à la plaque,
- C_n est le coefficient de traînée.

Le coefficient de traînée C_n dépend du nombre de Reynolds Re , de la forme géométrique du solide et de son inclinaison par rapport au flux. Le nombre de Reynolds Re dépend de la vitesse relative U du fluide par rapport à la plaque, de la hauteur l de la plaque et de la viscosité cinématique ν du fluide. Il est défini par :

$$Re = \frac{Ul}{\nu} \quad [2]$$

1. Le paradoxe de Gray désigne le fait que les poissons, notamment le thon, ne semblent pas avoir la puissance musculaire nécessaire pour atteindre les vitesses observées.

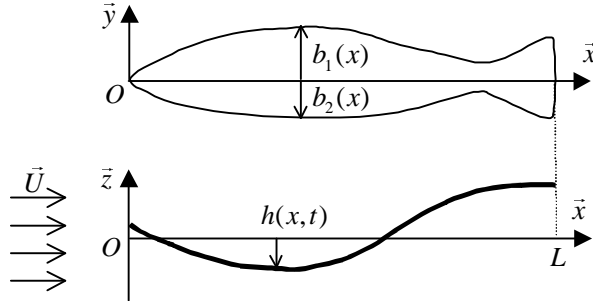


Figure 1. Définition du profil et du mouvement du poisson

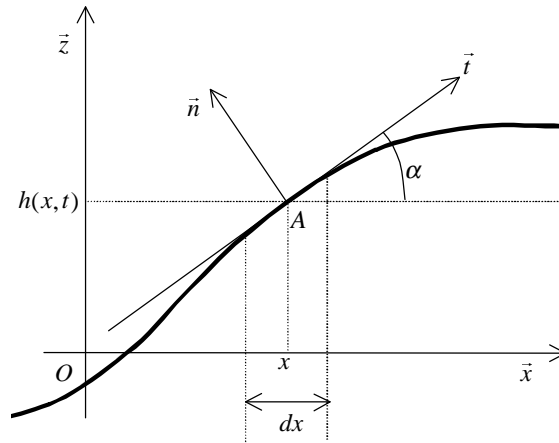


Figure 2. Définition du repère (A, \vec{t}, \vec{n}) lié à un petit élément de surface

Le profil du poisson (ou de la nageoire) étudié est défini par les fonctions $b_1(x)$ et $b_2(x)$. Sa longueur totale vaut L . La fonction $h(x, t)$ décrit son mouvement dans le plan Oxz en fonction du temps t (cf. figure 1). Pour une abscisse x donnée, le mouvement est le même pour chaque ordonnée y .

Soit $b(x)$ la hauteur du profil en x :

$$b(x) = b_1(x) - b_2(x) \quad [3]$$

La base du modèle consiste à calculer la force de réaction du fluide sur de petits éléments de surface, puis à intégrer sur la longueur du profil.

Le fluide se déplace à la vitesse U selon l'axe Ox dans le repère (O, \vec{x}, \vec{z}) . Dans le repère (A, \vec{x}, \vec{z}) dont l'origine est lié à un petit élément de surface, le fluide se déplace avec la vitesse définie par :

$$\begin{cases} V_{Ax} &= U \\ V_{Az} &= -\frac{\partial h}{\partial t} \end{cases} \quad [4]$$

puisque $\frac{\partial h}{\partial t}$ est la vitesse du point A selon l'axe Oz dans le repère (O, \vec{x}, \vec{z}) (cf. figure 2).

La vitesse du fluide dans le repère (A, \vec{t}, \vec{n}) lié à l'élément de surface est :

$$\begin{cases} V_{At} &= V_{Ax} \cos(\alpha) + V_{Az} \sin(\alpha) = U \cos(\alpha) - \frac{\partial h}{\partial t} \sin(\alpha) \\ V_{An} &= -V_{Ax} \sin(\alpha) + V_{Az} \cos(\alpha) = -U \sin(\alpha) - \frac{\partial h}{\partial t} \cos(\alpha) \end{cases} \quad [5]$$

avec :

$$\alpha(x, t) = \frac{\partial h}{\partial x} \quad [6]$$

Comme nous supposons que le fluide a une viscosité nulle, la force tangentielle exercée par le fluide sur la plaque est nulle. La force du fluide sur la plaque (ou traînée) peut alors être calculée à l'aide de l'équation [1]. Nous cherchons la force exercée par la plaque sur le fluide soit l'opposé de la force de traînée :

$$\begin{cases} dF_{At} &= 0 \\ dF_{An} &= -\frac{1}{2} C_n \rho V_{An} |V_{An}| dS \end{cases} \quad [7]$$

En projetant cette force dans le repère (A, \vec{x}, \vec{z}) , on obtient :

$$\begin{cases} dF_{Ax} &= -\sin(\alpha) dF_{An} = \frac{1}{2} C_n \rho b V_{An} |V_{An}| \tan \alpha dx \\ dF_{Az} &= \cos(\alpha) dF_{An} = -\frac{1}{2} C_n \rho b V_{An} |V_{An}| dx \end{cases} \quad [8]$$

On suppose le corps du poisson infiniment rigide, l'effort résultant est alors la somme de tous les efforts élémentaires. On intègre sur la longueur du poisson, et on a :

$$\begin{cases} F_x &= \frac{1}{2} C_n \rho \int_0^L b V_{An} |V_{An}| \tan \alpha dx \\ F_z &= -\frac{1}{2} C_n \rho \int_0^L b V_{An} |V_{An}| dx \end{cases} \quad [9]$$

F_x est appelée force de propulsion et F_y force latérale.

3. Actionneurs

3.1. *Choix du microactionneur*

Parmi les différents microactionneurs qui existent à l'heure actuelle, plusieurs peuvent prétendre à la constitution d'un micro-propulseur aquatique.

Les actionneurs piézo-électriques ont pour avantages une grande densité d'énergie ainsi qu'une bande passante exceptionnelle qui leur permettraient de produire des mouvements rapides. Fukuda [FUK 95, FUK 94] a d'ailleurs réalisé des microrobots propulsés par des palmes vibrantes. Mais ces actionneurs ont deux inconvénients majeurs : les déformations engendrées sont très faibles ($< 0,1$ %) et les tensions d'alimentation se situent entre 60 à 100 V, rendant la réalisation d'un robot autonome très difficile.

Une autre grande catégorie d'actionneurs est la famille des alliages à mémoire de forme (AMF). Ces actionneurs permettent d'obtenir de grandes déformations (≈ 10 %) tout en développant des efforts importants. Leur temps de réponse dans l'eau est acceptable (de l'ordre du Hz). Ils ont été notamment utilisés par Ayers [JAL 95] pour actionner un robot anguilliforme d'environ 30 cm de long. Malheureusement, les actionneurs AMF nécessitent d'être chauffés à environ 70°C (le plus souvent par effet Joule). Le milieu extérieur doit pouvoir absorber cet important apport calorifique. Enfin, leur rendement énergétique est déplorable (< 1 %) et leur consommation électrique est très élevée.

De nouveaux actionneurs ont vu le jour ces dernières années. Ils sont encore en cours de développement et font l'objet de nombreuses recherches au Japon [OGU 99, GUO 95] et aux États-Unis [SHA 98, SHA 99].

Ces actionneurs sont des matériaux composites métal-polymère qui transforment directement l'énergie électrique en énergie mécanique grâce à un phénomène électrochimique interne. Ils sont connus sous l'appellation IPMC (Ionic polymer metal composite) ou ICPF (Ionic conducting polymer gel film).

Ces actionneurs produisent des déformations importantes sous de petites tensions (10 % sous 2 V). Leur consommation est faible. Ils se présentent sous forme de lamelles directement exploitables pour actionner des palmes. De plus, ils fonctionnent parfaitement dans l'eau (la présence de molécules d'eau est même indispensable). En revanche, la fréquence maximale d'utilisation est faible, de l'ordre de 2 Hz. Les efforts qu'ils développent sont de beaucoup inférieurs à ceux des actionneurs piézo-électrique ou AMF, mais suffisants pour mouvoir des palmes dans l'eau.

Ces actionneurs commencent à être utilisés en microrobotique, notamment aux États-Unis et au Japon où quelques prototypes de robots aquatiques les utilisant ont été réalisés [MOJ 96, MOJ 97, SHA 92, GUO 98].

L'inconvénient majeur de ces actionneurs est leur comportement très complexe : ils sont non linéaires, hystériques et non stationnaires. Il n'en existe actuellement

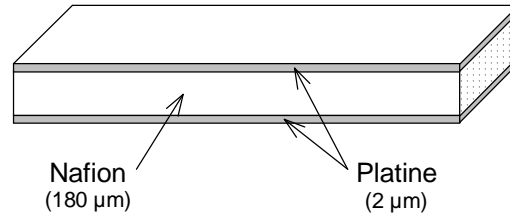


Figure 3. *Vue en coupe d'un actionneur IPMC*

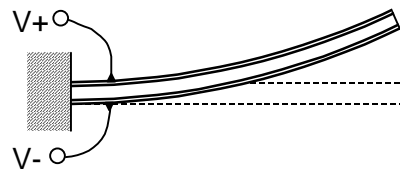


Figure 4. *Déformation d'un actionneur IPMC soumis à une tension constante*

aucun modèle complet. Cependant, certaines caractéristiques isolées peuvent être calculées notamment en régime sinusoïdal, ce qui rend possible leur utilisation pour des applications spécifiques.

Notre application nécessite un micro-actionneur capable de générer de grandes déformations, fonctionnant dans l'eau et ayant une consommation énergétique faible. Par contre, les mouvements peuvent être lents et ne nécessitent pas des forces importantes.

Pour ces raisons, nous pensons que les actionneurs IPMC sont les meilleurs candidats à l'heure actuelle. Par ailleurs, nous les utiliserons en régime sinusoïdal et dans ce cas, leur comportement est stable.

3.2. Actionneurs IPMC

Les IPMC sont composés d'un polymère échangeur d'ions et de métal noble.

Dans notre cas, nous avons utilisé des composites Nafion-Platine. Le Nafion® est un polymère échangeur d'ions (le polytétrafluorethylène) développé par l'entreprise Dupont de Nemours.

Les actionneurs IPMC sont fabriqués à partir d'une membrane de Nafion sur laquelle est déposé du platine par un procédé chimique (*cf.* figure 3). La particularité de ce dépôt chimique est la diffusion des ions platine dans le polymère, créant ainsi des micro-électrodes à l'intérieur du matériau. Ces micro-électrodes ou dendrites sont à l'origine de la propriété transductrice des IPMC. Quand les électrodes de platine sont soumises à une tension, le film se courbe vers l'anode (*cf.* figure 4).

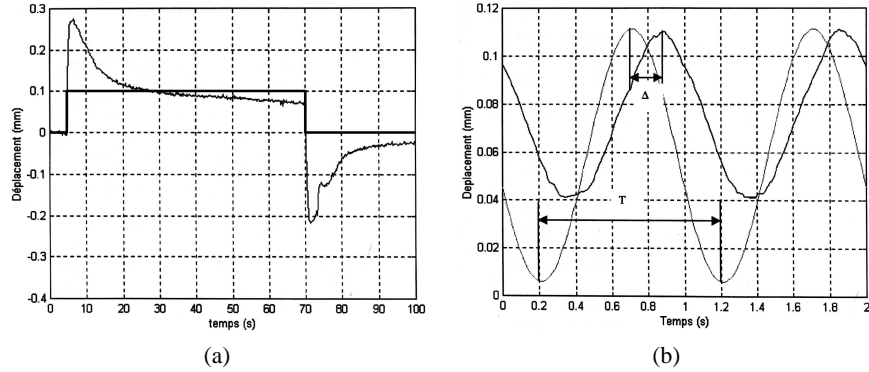


Figure 5. Réponse d'un actionneur IPMC soumis à un échelon unitaire (a) et à un régime sinusoïdal (b)

La bande passante des IPMC est faible puisque le gain chute considérablement au delà de 2 Hz . Le comportement complexe des IPMC apparaît nettement à l'étude de la réponse indicielle (cf. figure 5). Par contre, en régime sinusoïdal, les actionneurs sont facilement utilisables (cf. figure 5). Nous exploitons dans la suite cette caractéristique.

3.3. Modèle cinématique

Pour modéliser le microrobot nageur, nous avons besoin d'un modèle cinématique de la déformée d'un actionneur IPMC. Avec un télémètre laser, nous avons étudié le déplacement d'un actionneur de 10×2 mm. La déformée de l'IPMC est pratiquement circulaire sur une dizaine de millimètres puis linéaire. Elle peut donc être modélisée sur 10 mm par un arc de cercle (cf. figure 6). Le rayon R du cercle est déterminé par interpolation sur une série de mesures (cf. figure 7).

$$R = \frac{35.64 + d^2}{2d^2} \quad [10]$$

avec :

$$d = -0.019037 u^3 + 0.12011 u^2 - 0.026596 u \quad [11]$$

et u la tension d'alimentation de l'actionneur (pour des signaux de fréquence inférieure à 2 Hz). On pourra prendre par exemple :

$$u = A \sin \omega t \quad [12]$$

La déformée est donc modélisée par l'équation suivante :

$$h(x, u) = R - \sqrt{R^2 - x^2} \quad [13]$$

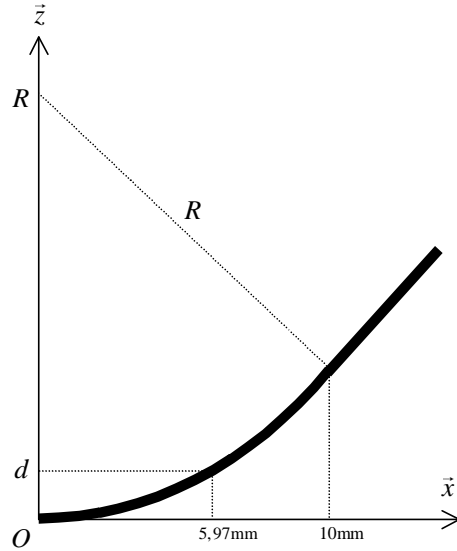


Figure 6. Modélisation de la déformée d'un IPMC

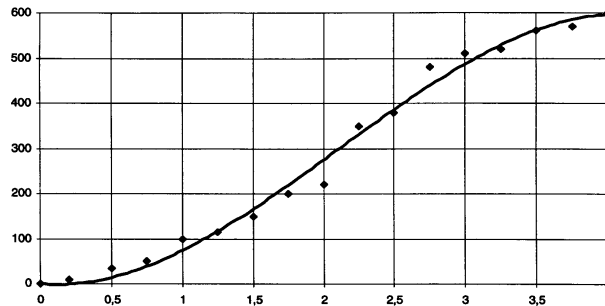


Figure 7. Interpolation de la position du point de la déformée situé à 5.97 mm de la base

Ce modèle sera par la suite employé pour le calcul des forces de propulsion dans la conception du microrobot.

4. Conception du microrobot

Les contraintes techniques à l'échelle millimétrique sont importantes notamment au niveau de l'usinage et de l'assemblage des pièces. La réalisation d'un microrobot nécessite de faire des compromis entre la théorie et la faisabilité technique. Pour

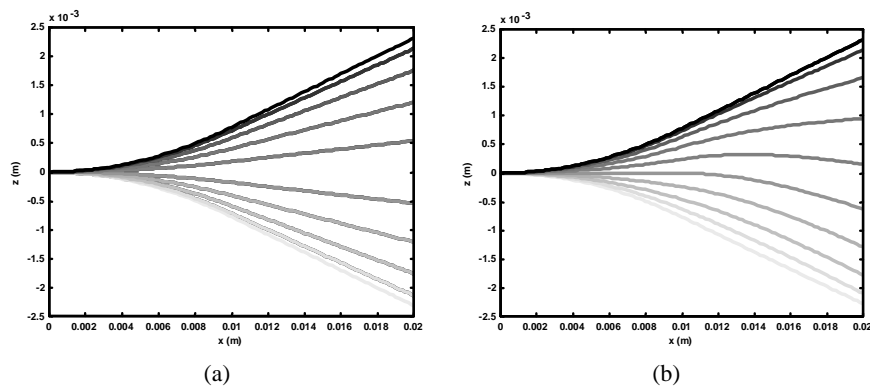


Figure 8. Demi-mouvement de la nageoire avec une palme rigide (a) et avec une palme souple (b)

cette raison, nous avons choisi dans un premier temps de réaliser un prototype dont la réalisation technique sera aisée au détriment de ses performances.

Notre choix s'est porté sur un prototype constitué d'un corps flottant à la surface et propulsé par deux nageoires battant à l'arrière. Chaque nageoire est constituée d'une palme mue par un actionneur IPMC. Le microrobot pourra être dirigé en faisant varier l'intensité de la propulsion de chaque nageoire.

4.1. Système de propulsion

Nous avons choisi d'utiliser des actionneurs de 12×2 mm car des morceaux plus longs ne se déforment pas davantage. Les actionneurs sont alimentés par une tension sinusoïdale de 2 V à 1 Hz. Ils sont modélisés par l'équation [13].

Le mouvement des IPMC ressemble à celui décrit par la figure 8a. Nous avons observé que ce mouvement fait autant reculer le robot qu'il le fait avancer. Pour augmenter l'efficacité de ces propulseurs, nous avons choisi d'ajouter aux extrémités des actionneurs des palmes très souples. La déformation de ces palmes flexibles crée un léger mouvement ondulatoire (cf. figure 8b). La flexion des palmes est modélisée par une poutre soumise à des efforts transversaux linéiques. Nous avons déterminé par le calcul que des palmes réalisées à partir d'un film polyéthylène d'épaisseur $10 \mu\text{m}$ et mesurant 20×10 mm produisent l'effet recherché.

En utilisant l'équation [13] et le modèle d'une palme dans l'équation [9], nous avons calculé la force de propulsion au cours d'un cycle de nage (cf. figure 9). La force moyenne de propulsion au démarrage est de $1.8 \cdot 10^{-7}$ N (cf. figure 11).

Nous notons ici que la force de propulsion génère successivement une accélération puis une décélération parce que son signe change au cours d'un cycle de nage. Le bilan

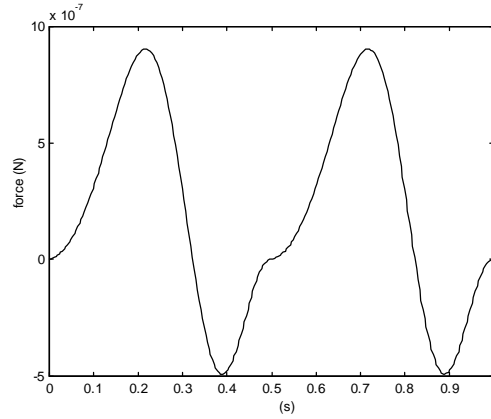


Figure 9. Force de propulsion au cours d'un cycle de nage

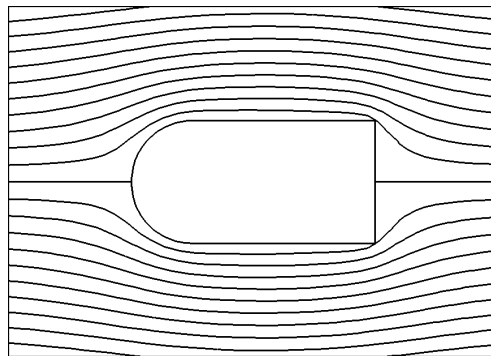


Figure 10. Écoulement laminaire autour du corps du microrobot pour $Re = 10$

des forces est positif mais le mouvement du microrobot sera saccadé avec une phase d'avance suivie d'une phase de recul.

4.2. Assemblage

Un corps en polyéthylène maintient le microrobot en surface. L'assemblage des différents éléments actionneurs, palmes et corps, est obtenu par collage.

Pour déterminer la vitesse moyenne théorique de notre microrobot, nous avons calculé la force de traînée du corps dans l'eau à l'aide d'un logiciel de mécanique des fluides (cf. figure 10). Nous avons ensuite tracé sur un même graphique les courbes de la force de propulsion et de la force de traînée. La vitesse du microrobot est déterminée

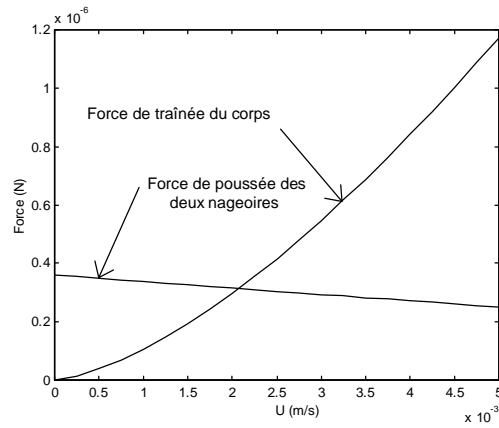


Figure 11. Calcul de la vitesse moyenne

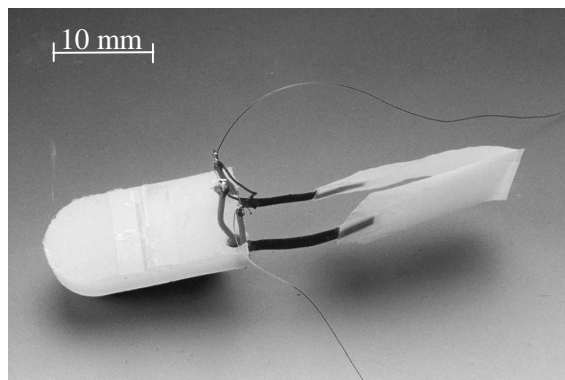


Figure 12. Le microrobot réalisé

par l'intersection de ces courbes. Comme le montre la figure 11, la vitesse théorique du microrobot est d'environ 2,1 mm/s.

5. Résultats expérimentaux

La photo de la figure 12 montre le microrobot réalisé. On peut voir en blanc à gauche le corps du microrobot, en blanc à droite les deux palmes souples et en noir les deux actionneurs IPMC

Le tableau 1 résume les caractéristiques générales du microrobot. Nous remarquons que la vitesse réelle est proche de la vitesse théorique. Le microrobot atteint presque les 2 mm/s prévus (les mesures donnent environ 1,8 mm/s).

Dimensions	50×10×10 mm
Poids	0,69 g
Corps	Polyéthylène (20×10×3 mm)
Actionneur	IPMC (12×2 mm)
Palmes	Polyéthylène (20×10×0.01 mm)
Alimentation	2 V, 1 Hz
Vitesse	1,8 mm/s

Tableau 1. *Caractéristiques du microrobot*

De plus, le mouvement du microrobot est saccadé² comme on pouvait l'imaginer en étudiant la figure 9. Nous n'avons pas pu mesurer précisément les forces engendrées faute de capteur d'effort assez sensible (les forces sont de l'ordre de 10^{-7} N).

Enfin, le microrobot peut être légèrement dirigé en diminuant l'amplitude de la nageoire du côté choisi ; cette commande reste néanmoins peu précise.

Grâce à ces observations, nous pouvons conclure que le modèle théorique du microrobot est proche de la réalité. Cela nous permet d'envisager la réalisation d'un autre microrobot dont nous pourrions optimiser les performances.

6. Perspectives

6.1. Etude énergétique

Grâce au modèle, nous allons pouvoir étudier le rendement de d'autres mouvements. En utilisant les équations [4] et [8], on déduit la puissance instantanée dans chaque direction³ :

$$\begin{cases} P_x &= \int_0^L -V_{Ax} dF_{Ax} = -\frac{1}{2} C_n \rho \int_0^L b V_{An} |V_{An}| \tan \alpha U dx \\ P_z &= \int_0^L -V_{Az} dF_{Az} = -\frac{1}{2} C_n \rho \int_0^L b V_{An} |V_{An}| \frac{\partial h}{\partial t} dx \end{cases} \quad [14]$$

P_x est la puissance utile. $P_x + P_z$ est la puissance totale dissipée. On pose :

$$\eta = \frac{P_x}{P_x + P_z} \quad [15]$$

2. Une vidéo disponible sur notre site web www.lab.ens2m.fr montre très bien ce mouvement
3. Le signe moins est nécessaire car (V_{Ax}, V_{Az}) correspondent à la vitesse du fluide par rapport à la plaque et c'est la vitesse par rapport au fluide qui est utilisée dans le calcul de la puissance.

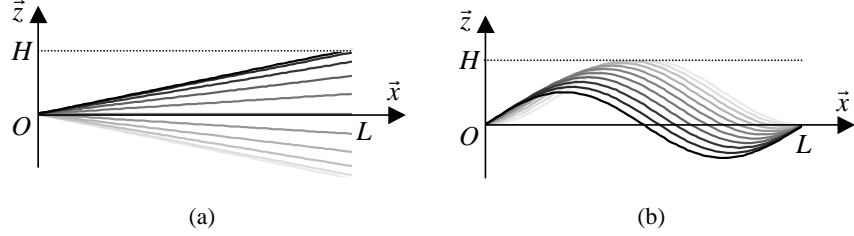


Figure 13. Tracé de la fonction h à différents instants t et avec γ proche de zéro (a) et $\gamma = 1$ (b)

η est le rendement mécanique instantané de la nage du poisson. Nous avons maintenant le moyen de calculer le rendement de n'importe quel mouvement. Nous avons choisi de comparer deux types de mouvement : un mouvement oscillatoire et un mouvement ondulatoire.

Dans ce but, nous avons utilisé la fonction $h(x, t)$ suivante :

$$h(x, t) = H \frac{g(x, t)}{\max_{(x,t)} |g(x, t)|} \quad [16]$$

Avec H l'amplitude du mouvement et $g(x, t)$ définie par :

$$g(x, t) = \cos \left(\omega t - \gamma \frac{2\pi}{L} x \right) - \cos \omega t \quad [17]$$

γ permet de définir le type de mouvement : quand γ tend vers zéro, le mouvement est oscillatoire (cf. figure 13a), quand γ vaut 1, le mouvement est ondulatoire (cf. figure 13b). La fonction max permet de normaliser $g(x, t)$ de manière à obtenir la même amplitude H quelle que soit la valeur de γ .

Le profil étudié est un rectangle. La fonction $b(x)$ est donc constante sur $[0, L]$.

6.2. Analyse des résultats

La figure 14 représente le rendement η en fonction du coefficient γ . Le rendement est calculé à la vitesse U qui permet d'atteindre la puissance maximale. La courbe montre une augmentation significative du rendement avec la valeur de γ . Le rendement maximal obtenu reste modeste par rapport à ce que l'on pouvait imaginer.

Cependant, les dimensions et les vitesses d'évolution peuvent modifier quantitativement le rendement, mais ce n'est pas l'objectif de cette étude.

Le but de cette courbe est de montrer, dans un cas proche de notre application, la supériorité de la nage ondulatoire sur la nage oscillatoire. Une ondulation complète n'est d'ailleurs pas nécessaire car pour $\gamma > 2/3$, la nage est quasi optimale.

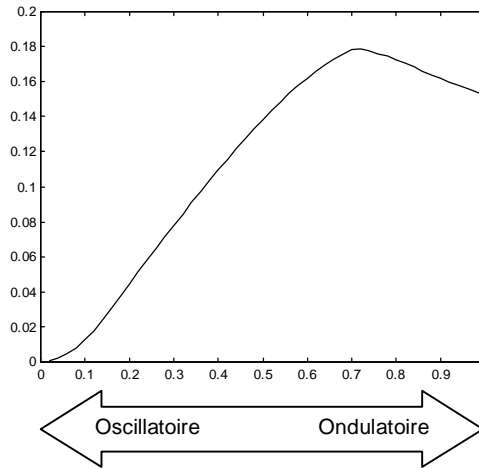


Figure 14. Rendement de la nage à puissance maximum en fonction de γ

Pour obtenir les meilleures performances, un microrobot nageur doit produire un mouvement le plus ondulatoire possible. Le mouvement purement oscillatoire, pourtant plus facile à générer, ne peut être utilisé en raison de son rendement nul.

Nomenclature :

- $L = 40$ mm
- $H = 10$ mm
- $\rho = 1000$ Kg/m³
- $b = 10$ mm
- $\omega = 2\pi$ rad/s
- $R_e = 10$
- $C_n = 0.87$
- $\nu = 10^{-6}$ m²/s

6.3. Nouvelle conception

Pour augmenter les rendements et les performances, il est nécessaire de créer un mouvement plus ondulatoire. Ceci pourrait être réalisé en mettant bout à bout plusieurs actionneurs formant une nageoire ondulant comme une anguille (*cf.* figure 15).

La figure 16 montre les rendements théoriques d'une nageoire de 50×10 mm en fonction du nombre d'actionneurs qui la constitue. Le modèle prévoit de bien meilleurs rendements avec plus de trois actionneurs à la suite. Les actionneurs sont plus efficaces quand ils sont plus nombreux.

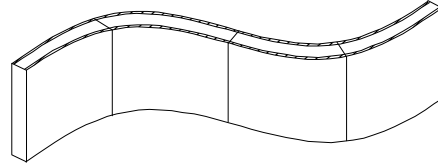


Figure 15. Nageoire constituée de 4 actionneurs

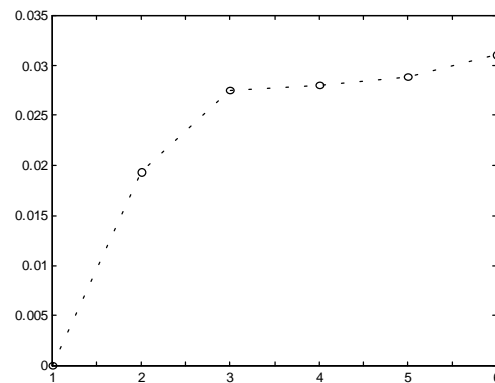


Figure 16. Rendement en fonction du nombre d'actionneurs

Un microrobot constitué de trois actionneurs pourrait atteindre une vitesse de 30 à 40 mm/s.

7. Conclusion

Le premier prototype réalisé est propulsé par deux palmes mues par des actionneurs IPMC. Ces actionneurs ont été sélectionnés pour leurs caractéristiques particulièrement bien adaptées à notre application. Le modèle de la déformée de l'actionneur et les équations mécaniques établis au début nous ont permis de modéliser entièrement le microrobot. Les résultats expérimentaux sont en accord avec les prévisions théoriques. Ces résultats valident donc la modélisation du microrobot.

Cette application nous permet de penser que ces nouveaux types d'actionneurs ont un avenir très prometteur dans le domaine de la microrobotique aquatique. D'autre part, l'étude énergétique montre que les mouvements ondulatoires imitant les poissons ont des rendements nettement supérieurs aux mouvements oscillatoires. Nous envisageons donc la conception de nouveaux prototypes utilisant au mieux les avantages du mode de propulsion ondulatoire comme par exemple un microrobot anguilliforme à actionneurs multiples.

8. Bibliographie

- [FUK 94] FUKUDA T., KAWAMOTO A., ARAI F., MATSUURA H., « Mechanism and Swimming Experiment of Micro Mobile Robot in Water », *Proc. of the IEEE Conf. on Robotics and Automation*, San Diego, California, Mai 1994, p. 814-819.
- [FUK 95] FUKUDA T., KAWAMOTO A., ARAI F., MATSUURA H., « Steering Mechanism of Underwater Micro Mobile Robot », *Proc. of the IEEE Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, Nagoya, Japan, Mai 1995, p. 363-368.
- [GUO 95] GUO S., FUKUDA T., KOSUGE K., ARAI F., OGURO K., NEGORO M., « Micro Catheter System with Active Guide Wire », *Proc. of the IEEE Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, Nagoya, Japan, Mai 1995, p. 79-84.
- [GUO 98] GUO S., FUKUDA T., KATO N., OGURO K., « Development of Underwater Microrobot Using I.C.P.F. Actuator », *Proc. of the IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, Mai 1998, p. 1829-1834.
- [IJS 99] IJSPEER A., KODJABACHIAN J., « Evolution and Development of a Central Pattern Generator for the Swimming of a Lamprey », *Artificial Life*, vol. 5, 1999, p. 247-269.
- [JAL 95] JALBERT J., KASHIN S., AYERS J., « A Biologically-based Undulatory Lamprey-like AUV », *Proc. of the Autonomous Vehicles in Mine Countermeasures Symposium*, 1995, p. 39-52, Naval Postgraduate School.
- [KAT 98] KATO N., INABA T., « Guidance and Control of Fish Robot with Apparatus of Pectoral Fin Motion », *Proc. of the IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, Mai 1998, p. 446-451.
- [MOJ 96] MOJARRAD M., SHAHINPOOR M., « Noiseless Propulsion for Swimming Robotic Structures Using Polyelectrolyte Ion-Exchange Membranes », *Proc. of the North American Conf. on Smart Structures and Materials*, vol. 2716, San Diego, California, 1996, p. 183-192.
- [MOJ 97] MOJARRAD M., SHAHINPOOR M., « Biomimetic Robotic Propulsion Using Polymeric Artificial Muscles », *Proc. of the IEEE Conf. on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, Avril 1997, p. 2152-2157.
- [OGU 99] OGURO K., FUJIWARA N., ASAKA K., ONISHI K., SEWA S., « Polymer Electrolyte Actuator with Gold Electrode », *Proc. of the SPIE Conf. on Electroactive Polymer Actuators and Devices*, vol. 3669, Newport Beach, California, Mars 1999, p. 64-71.
- [ROS 59] ROSEN M. W., « Water Flow About a Swimming Fish », Master's thesis, UCLA, Mai 1959.
- [SHA 92] SHAHINPOOR M., « Conceptual Design, Kinematics and Dynamics of Swimming Robotic Structures using Ionic Polymeric Gel Muscles », *Smart Materials and Structures*, vol. 1, 1992, p. 91-94.
- [SHA 98] SHAHINPOOR M., BAR-COHEN Y., SIMPSON J., SMITH J., « Ionic Polymer-Metal Composites (IPMCs) as Biomimetic Sensors, Actuators and Artificial Muscles – A Review », *Smart Materials and Structures*, vol. 7, 1998, p. 15-30.
- [SHA 99] SHAHINPOOR M., « Electro-Mechanics of Iono-Elastic Beams as Electrically-Controllable Artificial Muscles », *Smart Materials and Structures Conference*, vol. 3669, n° 12, 1999, New Port Beach, California.
- [TRI 98] TRIANTAFYLLOU M., KUMPH J., « A Fast-Starting and Maneuvering Vehicle : the ROBOPIKE », *Proc. of the International Seawater Drag Reduction Symposium*, 1998.

18 Publié dans JESA.

[WEB 83] WEBB P., WEIHS D., *Fish Biomechanics*, Praeger Publishers, New York, 1983.

Soumis le : 18 janvier 2002

Accepté le : 9 septembre 2002