

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
MOULOU MAMMERI  
TIZI OUZOU



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique  
Département d'Automatique

**Mémoire de MASTER**

Spécialité : Automatique

Option : Commande des Systèmes

*Thème*

**Modélisation et simulation d'un robot nageur**

Présenté par : **DEBIANE Tassadit**

Soutenu le : 09/07/2017

Proposé par **Mr. Karim Belharet** Professeur à l'école HEI en France.

Dirigé par **Mr. Ahmed Maldi** Professeur à l'UMMTO.

Jury:

**Mr R.Mellah** Professeur à l'UMMTO

**Mr R.Kara** Professeur à l'UMMTO

**Mr M.Ali bei** MCB à l'UMMTO

Promotion: 2016/2017

# *Remerciements*

*Je remercie tout particulièrement Mr Karim Belharet Enseignant-chercheur à l'Ecole des Hautes Etudes d'Ingénierie en me proposant un sujet très intéressant et qui n'a cessé de me motiver malgré toutes les difficultés que j'ai rencontré au cours du déroulement de ma thèse.*

*Je voudrais remercier aussi Mr Ahmed Maida Maître de conférences A à l'Université de Tizi-Ouzou qui m'a dirigé tout au long de cette thèse. Il a toujours été disponible, à l'écoute de mes nombreuses questions, et s'est toujours intéressé à l'avancée de ma thèse. Sa capacité d'analyser m'a montré que la robotique pouvait être un univers passionnant.*

*Je remercie également tous les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.*

*J'adresse mes remerciements aux enseignants de la faculté de génie électrique et d'informatique qui ont contribué à ma formation et à tous ceux qui m'ont accompagné ces dernières années.*

*Mes pensées se tournent plus particulièrement vers mes parents, que je remercie pour leur amour, leurs présence et de m'avoir offerts les meilleurs conditions pour réussir.*

Index des figures et des tableaux

**Introduction générale..... 1**

**Chapitre I: Généralités sur la modélisation**

I.1	Introduction .....	3
I.2	Système dynamique .....	3
I.2.1	Définition .....	3
I.2.2	Représentation d'un système.....	4
I.2.3	Variables physiques.....	4
I.2.3.1	Variables indépendantes .....	4
I.2.3.2	Variables dépendantes .....	4
I.3	Modèle mathématique .....	5
I.3.1	Définition .....	5
I.3.2	Classes de modèles .....	7
I.3.2.1	Modèle de connaissance .....	7
I.3.2.2	Modèle de représentation.....	7
I.3.3	Obtention d'un modèle mathématique .....	7
I.4	Conclusion .....	8

**Chapitre II: Les robots manipulateurs et les robots nageurs**

II.1	Introduction .....	9
II.2	Robot .....	9
II.2.1	Définition .....	9
II.2.2	Fonctionnement d'un robot .....	9
II.2.3	Types de robots .....	9
II.2.3.1	Robots manipulateurs.....	9
II.2.3.2	Robot mobile.....	10
II.2.4	Notion de degré de liberté .....	10
II.2.5	Notion d'articulation .....	10
II.2.5.1	Articulation rotoïde .....	10
Articulation prismatique.....		11
II.2.6	Coordonnées généralisées .....	11
II.3	Robots manipulateurs .....	11
II.3.1	Définition .....	11

II.3.2	Composants du robot manipulateur.....	12
II.3.2.1	Système mécanique articulé.....	12
II.3.2.2	Actionneurs ou organes de motorisation.....	12
II.3.2.3	Effecteur ou organe de préhension.....	12
II.3.2.4	Capteurs ou organes de perception .....	12
II.3.2.5	Système de traitement .....	13
II.4	Robots nageurs .....	14
II.4.1	Principe de nage des poissons .....	14
II.4.1.1	Nage Périodique : est caractérisée par la répétition cyclique d'un même mouvement de propulsion et utilisée par les poissons pour parcourir de grande distance à une vitesse constante. ....	15
II.4.1.2	Nage Transitoire : est utilisée pour chasser une proie ou pour échapper à un prédateur, et incluant les départs rapides, les virages, et les plongées. ....	15
II.4.2	Différentes catégories de poissons .....	15
II.4.3	Robots nageurs existants et leurs applications .....	16
II.4.4	L'intérêt des robots nageurs dans l'exploitation sous marine .....	18
II.5	Micro-robot.....	18
II.6	Micro-robots nageurs.....	19
II.6.1	Types de micro-robots nageurs .....	19
II.6.2	Présentation de micro-nageurs naturels.....	19
II.6.3	Présentation de micro-nageurs artificiels .....	20
II.6.4	Fonctionnement des micro-robots nageurs .....	21
II.6.5	Micro-robots nageurs pour des applications médicales .....	21
II.7	Conclusion .....	22

### **Chapitre III: La modélisation dynamique d'un robot manipulateur**

III.1	Introduction .....	23
III.2	Formalisme de Lagrange .....	23
III.3	Modélisation dynamique d'un robot manipulateur .....	25
III.4	Exemple d'application .....	26
III.4.1	Calcul de l'énergie cinétique.....	27
III.4.2	Calcul de l'énergie potentielle.....	28
III.4.3	Calcul du lagrangien.....	28
III.4.4	Développement d'Euler Lagrange .....	28
III.5	Résultats de la simulation du modèle .....	32

III.6	Conclusion .....	35
<b>Chapitre IV: La modélisation dynamique d'un robot nageur</b>		
IV.1	Introduction .....	36
IV.2	Caractéristiques du poisson carangiforme .....	36
IV.3	Présentation du robot carangiforme.....	37
IV.4	Modélisation du robot poisson carangiforme .....	38
IV.4.1	Calcul de l'énergie cinétique du système .....	39
IV.4.2	Calcul de l'énergie potentiel du système.....	40
IV.4.3	Calcul du Lagrangien .....	40
IV.4.4	Calcul des dérivées partielles .....	40
IV.5	Résultats de la simulation du modèle .....	45
<b>Conclusion général</b> .....		48
Bibliographie.....		49

## Index des figures

<b>Figure I.1</b> Représentation d'un système dynamique. ....	4
<b>Figure I.2</b> Circuit électrique. ....	6
<b>Figure II.1</b> Articulation rotoïde .....	10
<b>Figure II.2</b> Articulation prismatique .....	11
<b>Figure II.3</b> Chaîne d'asservissement pour un robot manipulateur .....	13
<b>Figure II.4</b> Définitions des différents organes du poisson .....	14
<b>Figure II.5</b> Illustration des différents types de nage ondulatoire chez les poissons .....	16
<b>Figure II.6</b> Le robot REEL2 : Anguille à 5 corps. ....	17
<b>Figure II.7</b> Robot Potuna (laboratoire POSTECH, Corée) .....	17
<b>Figure II.8</b> Robot G9 de l'université Essex (Angleterre) .....	17
<b>Figure II.9</b> Le prototype RoboTuna du MIT .....	18
<b>Figure II.10</b> L'échelle micro et nano .....	19
<b>Figure II.11</b> Quelques micro-nageurs biologiques et leur stratégie de locomotion .....	19
<b>Figure II.12</b> Locomotion des micro-organismes: (a) Des Cils ; (b) Des flagelles eucaryotes; (c) Propulsion rotative en tire-bouchon.....	20
<b>Figure II.13</b> Méthodes de natation magnétiques.....	21
<b>Figure III.1</b> Système a un degré de liberté .....	24
<b>Figure III.2</b> Représentation des entrées-sorties du Robot.....	26
<b>Figure III.3</b> les coordonnées généralisées d'un robot .....	26
<b>Figure III.4</b> Variation de $p_1$ et $p_2$ en fonction du temps.....	30
<b>Figure IV.1</b> Les morphologies de deux poissons osseux : la truite en haut et l'anguille en bas .....	34
<b>Figure IV.2</b> Structure d'un robot nageur à quatre articulations. ....	35
<b>Figure IV.3</b> Variation de $\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4$ en fonction du temps.....	43

## Index des tableaux

<b>Tableau 1</b> les valeurs des angles en radian à des instants différents. ....	33
<b>Tableau 2</b> Les valeurs des angles en radian a des instants différents.....	46

## Introduction Générale

La science de nos jours n'a pas de limites, l'homme essaie à chaque fois de résoudre les problèmes quotidiens tout en utilisant des moyens toujours plus performants. Avec l'évolution du domaine informatique, l'homme a pu répondre à l'examen de vie en créant des machines et des mécanismes de toutes dimensions qui sont inspirés du mystère de la nature.

La robotique est l'une des sciences qui a donné un autre sens à cet univers, elle est la récolte du génie humain. En fait, il s'agit d'un domaine multidisciplinaire : on y trouve des aspects concernant la mécanique, l'informatique, l'électronique, l'automatique, etc.

Le terme robot est apparu pour la première fois vers 1920 dans une pièce de théâtre du tchèque K. Tschapek où il désignait de petits êtres artificiels anthropomorphes répondant parfaitement aux ordres de leur maître ("robota" signifie travail en tchèque) [3].

Un robot est une machine pouvant manipuler des objets en réalisant des mouvements variés dictés par un programme aisément modifiable. Programmer un robot consiste, dans un premier temps, à lui spécifier la séquence des mouvements qu'il devra réaliser. Certains robots sont dotés de "sens" ; c'est-à-dire d'un ensemble plus ou moins important d'instruments de mesure (caméra, thermomètre, télémètre, ...) permettant au programme du robot de décider du mouvement le mieux adapté aux conditions extérieures. Par exemple un robot mobile muni d'une caméra pour lui permettre de se déplacer dans un milieu inconnu, on peut le programmer pour qu'il contourne tout obstacle qui entraverait sa route. On essaie également de doter des robots d'un dispositif d'intelligence artificielle afin qu'ils puissent faire face à des situations imprévues et nouvelles (le robot pourrait acquérir une certaine "expérience").

A quoi servent les robots ? Ils sont principalement utilisés dans l'industrie pour effectuer des manipulations répétitives, surtout lorsque le processus de fabrication est fréquemment soumis à des modifications. Par exemple la soudure des composantes sur les circuits imprimés, dans l'industrie électronique.

L'avantage d'un robot sur l'homme est sa régularité : il peut exécuter le même mouvement des milliers de fois sans ressentir la moindre lassitude ou fatigue. De plus, les robots peuvent être construits de manière à pouvoir résister à des conditions qui seraient dangereuses, voire

mortelles pour l'homme (gaz nocifs, fortes chaleurs, froid intense, radiations, ...). Par exemple : l'utilisation de robots pour peindre les châssis de voiture avec des revêtements contenant du plomb.

Cependant, jusqu'ici nous avons parlé des robots en général, qu'ils soient mobiles ou bien manipulateurs. Les chercheurs ont pu créer des robots nageurs en s'inspirant des principes de la nage des poissons et ils ont même miniaturisés l'étude en inventant les micro-robots nageurs [14].

Notre étude consiste à modéliser un robot nageur en utilisant le formalisme d'Euler-Lagrange, d'établir le modèle d'état et de simuler son comportement à l'aide du logiciel MATLAB.

La thèse est structurée en quatre chapitres:

Dans le premier chapitre de notre travail, nous avons rappelé des généralités sur la modélisation et en particulier les notions suivantes : système, modèle, types de modèles et l'obtention d'un modèle.

Le deuxième chapitre s'étale sur la présentation des robots manipulateurs et les robots nageurs.

Dans le troisième chapitre nous avons décrit le formalisme d'Euler Lagrange tout en l'illustrant par la modélisation dynamique d'un robot manipulateur à deux articulations ainsi qu'une simulation de ce dernier.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons appliqué la méthode d'Euler Lagrange afin de modéliser un robot nageur de type carangiforme et simuler son comportement. Nos résultats numériques sont obtenus à l'aide des programmes que nous avons élaborés sous MATLAB.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et les perspectives envisagées.

## I.1 Introduction

La modélisation d'un système consiste à écrire un modèle mathématique décrivant un processus physique dans un domaine d'étude spécifié par un cahier des charges [1].

Donc, elle est l'un des outils les plus efficaces pour la résolution du problème d'ingénierie. Des hypothèses clairement formulées adoptées pour la modélisation des systèmes de différentes classes.

Dans ce premier chapitre, nous présentons des notions générale sur la modélisation particulièrement les notions en rapport avec la dynamique du système et la classe de modèles.

## I.2 Système dynamique

### I.2.1 Définition

Un système dynamique est un ensemble d'éléments interconnectés qui fonctionnent en coopération pour réaliser une tâche bien déterminée. Il est caractérisé par un ensemble de variables qui sont [2]:

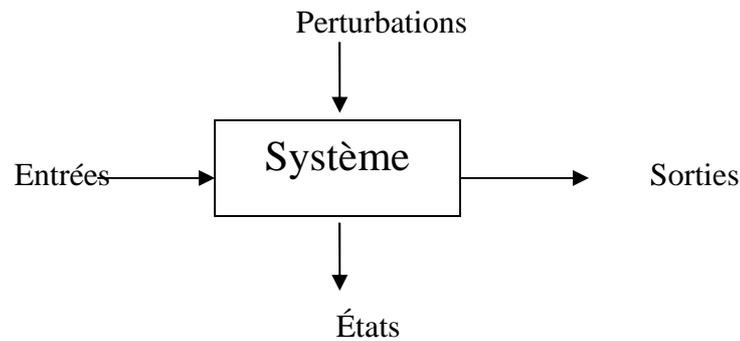
1. les variables de commande : appelés aussi les entrées, ce sont des variables physiques à commander (varier) pour changer le comportement du système.
2. les variables de sorties : ce sont les observations qui nous permettent d'analyser le comportement d'un système, ou bien ce sont les variables physiques qu'on veut changer en agissant sur les commandes.
3. Les perturbations : ce sont des variables physiques qui agissent aléatoirement et affectent le fonctionnement du système.
4. Les états : ce sont les variables physiques internes du système qui sont influencées par les commandes et les perturbations.

Par exemple un moteur électrique est composé des éléments suivants : rotor, stator, balai etc. Ces éléments qui sont en interaction réalisent un mouvement rotationnel. Les différentes variables sont:

- La tension d'alimentation comme variable d'entrée pour changer sa vitesse de rotation.
- La vitesse de rotation comme variable de sortie.
- Le couple résistant perturbe son fonctionnement.
- Le courant engendré par l'application de la tension est un état.

### I.2.2 Représentation d'un système

Le système est généralement représenté par un bloc sur lequel on précise les différentes variables du système. Comme indiqué sur (figure I.1)



**Figure I.1 Représentation d'un système dynamique.**

### I.2.3 Variables physiques

On distingue deux types de variables physiques, les variables indépendantes et les variables dépendantes :

#### I.2.3.1 Variables indépendantes

Ce sont les variables temps et espace (position).

#### I.2.3.2 Variables dépendantes

Ce sont les variables mesurées ou enregistrées, généralement elles sont en fonction du temps et de la position.

Les variables dépendantes sont classées comme suit :

- 1) Variables homogènes : elles dépendent que de la variable temps (t) ( $F(t)$ )
- 2) Variables non homogènes : dépendent du temps et de l'espace  $F(t, x, y, z)$

Cependant si les variables du système sont homogènes, la modélisation conduit à des équations aux dérivées ordinaires, par contre si les variables sont non homogènes, la modélisation conduit à des équations aux dérivées partielles.

### I.3 Modèle mathématique

#### I.3.1 Définition

Un modèle est une représentation d'un objet ou d'un phénomène dans un cadre idéalisé par les hypothèses et les règles qui ont servi à sa construction. Il simplifie la réalité et ne garde que les caractéristiques essentielles par rapport aux objectifs auxquels il cherche à répondre.

C'est une représentation abstraite du système dynamique, elle donne les différentes relations mathématiques existantes entre les différentes variables caractéristiques du système elle fait aussi intervenir les paramètres.

Les équations mathématiques sont classées comme suit :

1) Equation algébrique :

$$x(t) + 2y(t) = 0 \quad (\text{I.1})$$

2) Equation différentielle :

$$\frac{dy}{dt} + x(t)y(t) = t \quad (\text{Ordinaire}) \quad (\text{I.2})$$

$$\frac{\delta y(t)}{\delta t} + \frac{\delta y^2(t)}{\delta x^2} = f(t) \quad (\text{Partielles}) \quad (\text{I.3})$$

3) Equation intégrale :

$$\int_0^t x(t) dt + \int_0^t x^2(t) dt = 0 \quad (\text{I.4})$$

En général un modèle est constitué à base de ces équations, et on peut trouver celles qui sont sur des formes combinées comme :

Algèbro-différentielles :

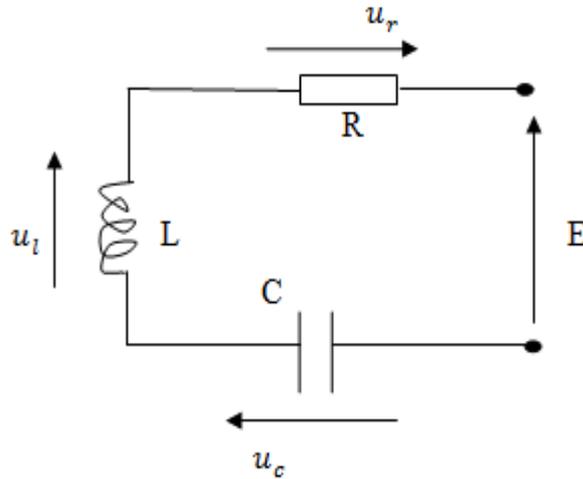
$$\begin{cases} \dot{x}(t) - \dot{y}(t) + x(t) = 0 & (\text{I.5}) \\ x(t) - y(t) = 0 & (\text{I.6}) \end{cases}$$

Intégré – différentielles :

$$\dot{x}(t) + \int_0^t x(t) dt = 0 \quad (\text{I.7})$$

Cependant il n'existe pas un modèle unique d'un système réel, pour chaque problème à étudier, il y a des hypothèses qui conduisent à l'établissement d'un modèle qui n'est valable que dans ses conditions.

Comme illustration, on considère le circuit de la figure I.2



**Figure I.2 Circuit électrique.**

En appliquant la loi des mailles, on obtient le modèle suivant :

$$E = u_r + u_l + u_c = Ri + l \frac{di}{dt} + u_c$$

En introduisant la relation caractéristique du condensateur :

$$i_c = i = c \frac{du_c}{dt}$$

On obtient l'équation différentielle du second ordre :

$$E = LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c \quad (I.8)$$

On déduit de cette relation le lien existant entre la force électromotrice du générateur  $E$  et la tension aux bornes du condensateur  $u_c$ , et l'apparition des paramètres  $R$ ,  $L$  et  $C$  dans le modèle. On déduit la relation suivante :

Modèle = équations + paramètres

### **I.3.2 Classes de modèles [2]**

On distingue deux classes de modèles :

#### **I.3.2.1 Modèle de connaissance**

Ce modèle mathématique est basé sur les lois physiques gouvernant le comportement du système considéré. Les paramètres d'un tel modèle ont alors une interprétation physique directe (température, pression, courant, accélération, force etc.). Ils sont beaucoup plus riches de signification que les modèles de représentation. Il est déterminé en écrivant les lois physiques (lois de Kirchhoff, loi de Newton, lois de Bernoulli, etc.). Ce modèle décrit toutes les relations (équations) entre toutes les variables caractéristiques du système (boite blanche). Néanmoins sa mise en œuvre est généralement complexe.

#### **I.3.2.2 Modèle de représentation**

Il est obtenu expérimentalement à partir des mesures entrée-sortie.

Il donne la relation existante entre les entrées et les sorties, et entre les perturbations et les sorties (boite noire). D'une autre manière on se limite à trouver une structure  $M(p)$  qui reproduit un comportement donné du système.

### **I.3.3 Obtention d'un modèle mathématique**

Il existe deux approches permettant de déterminer un modèle mathématique :

#### **a. Modélisation**

Elle consiste à traduire les phénomènes qui se produisent dans les systèmes par une représentation mathématique. Cependant le système est considéré comme étant une boite blanche. Elle se résume par les étapes suivantes :

- La définition des différentes variables caractéristiques du système.
- La schématisation synoptique en précisant toutes les variables caractéristiques.
- La Modélisation du système : à ce niveau on doit préciser le ou les phénomènes à prendre en considération.

#### **b. Identification**

Elle constitue une phase importante dans la définition du modèle. Elle s'effectue le plus souvent en optimisant un critère de qualité qui caractérise l'écart entre le comportement du

processus (repérer par un ensemble de mesures) et celui de son modèle (étudié par simulation) pour un ensemble de sollicitations données [1].

Cependant le système est considéré comme étant une boîte noire. On considère deux étapes :

1. Validation : la validation du modèle se fait par simulation (comparaison des mesures aux résultats de simulations) ou par test.
2. C'est une étude mathématique pure qui consiste à étudier l'existence, l'unicité, la régularité des solutions des équations du modèle.

### **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons abordé les méthodes de description des différents types de système dynamique sous leurs formes mathématiques quantitatives, cela nous facilite leur étude.

Par ailleurs, l'obtention d'un modèle s'effectue par deux approches: la modélisation et l'identification. L'objectif de la modélisation c'est d'avoir le modèle mathématique du système pour bien comprendre et maîtriser son comportement.

Parmi les méthodes de modélisation mathématique, on retrouve le formalisme de Lagrange qui fera l'objet du chapitre 3.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation des robots manipulateurs et particulièrement des robots nageurs qui font l'objet de ce mémoire.

## II.1. Introduction

Les premières apparitions de la robotique datent du début du XX<sup>e</sup> siècle, l'une de ses premières conceptions remonte en 1915, en fabriquant le chien électrique conçu par Hammond et Miessner.

Vu l'importance de la robotique, les scientifiques ont fait appel à ce domaine pendant la seconde guerre mondiale en créant le Goliath qui est une mine filoguidée pouvant être actionné à distance.

La robotique en générale est l'ensemble des techniques permettant la conception et la réalisation de machines automatiques ou de robots. Parmi les applications on peut citer :

- La robotique industrielle
- La robotique domestique
- La robotique médicale
- La robotique militaire
- La robotique scientifique

## II.2 Robot

### II.2. 1 Définition

Un robot est un système mécanique poly-articulé, alimenté en énergie, qui évolue dans un environnement statique ou dynamique. Il est mis en fonctionnement par des actionneurs et commandé par un ordinateur qui est destiné à effectuer une grande variété de tâches [3].

### II.2. 2 Fonctionnement d'un robot

La conception d'un robot se base sur son cahier des charges. Elle comprend l'analyse du comportement souhaité pour le robot et sa synthèse théorique, à l'aide notamment des théories d'asservissement, ainsi que l'implémentation logicielle et matérielle du robot.

Le contrôle de la structure d'un robot inclut trois phases distinctes qui se répètent en boucle : la perception, le traitement et l'action. Il fonctionne par l'exécution d'un programme informatique constitué d'algorithmes. Ce programme est écrit dans un langage de programmation dont la nature est choisie par le constructeur [3].

### II.2. 3 Types de robots

Il existe deux structures principales de robots :

#### II.2. 3.1 Robots manipulateurs

Sont des robots à base fixe permettant de manipuler des objets.

### II.2. 3.2 Robot mobile

Sont des robots permettant de se déplacer, parfois ils transportent sur leur plateforme un robot manipulateur. Parmi ces robots mobiles on cite les robots nageurs [3].

### II.2. 4 Notion de degré de liberté

Manipuler un objet consiste donc à le placer par rapport à un repère de référence, considéré comme fixe. Un objet indéformable va posséder six possibilités de mouvement par rapport à ce repère : 3 qui lui permettront de se déplacer (Il s'agit de trois translations) et trois qui lui permettront de s'orienter (Il s'agit de trois rotations), ce sont les 6 degrés de liberté. Tout mouvement peut être décrit par une combinaison appropriée de déplacements selon les degrés de liberté [4].

### II.2. 5 Notion d'articulation

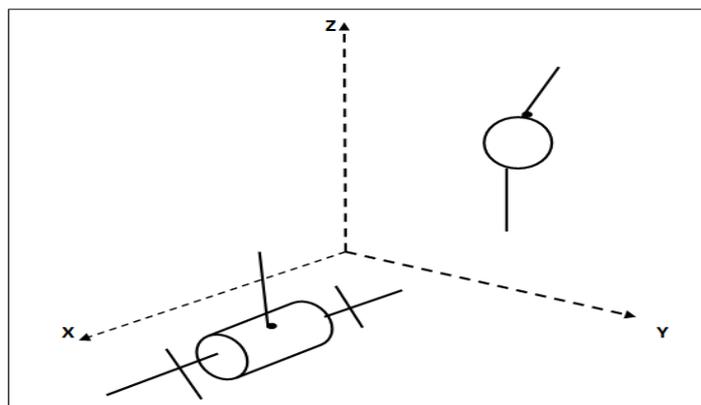
Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit  $m$  le nombre de degré de liberté résultant, encore appelé mobilité de l'articulation. La mobilité d'une articulation est telle que [4] :

$$0 < m < 6 \quad (\text{II.1})$$

Lorsque  $m = 1$  ; ce qui est fréquemment le cas en robotique, l'articulation est dite simple : soit rotoïde, soit prismatique.

#### II.2. 5.1 Articulation rotoïde

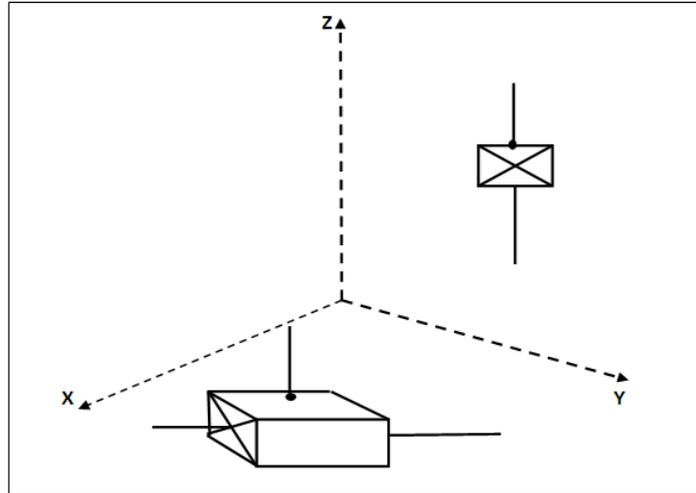
Il s'agit d'une articulation de type pivot, notée R, réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe qui leur est commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe (voir **Figure II. 1**).



**Figure II. 1 : Articulation rotoïde [4].**

### II.2.5.2 Articulation prismatique

Il s'agit d'une articulation de type glissière, notée P, réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe (voir **Figure II. 2**).



**Figure II. 2 : Articulation prismatique [4].**

### II.2.6 Coordonnées généralisées

On appelle coordonnées généralisées d'un système physique un ensemble de variables réelles, qui ne correspondent pas toutes à des coordonnées cartésiennes (par exemple : angles, positions relatives), et permettant de décrire ce système, en particulier, dans le cadre de la mécanique lagrangienne [4].

## II.3 Robots manipulateurs

### II.3.1 Définition

Selon la RIA (Robot Institute of America) un robot manipulateur doit être reprogrammable multifonctionnel conçu pour déplacer des matériaux, des pièces, des outils ou tout autre dispositif spécialisé au moyen d'une série de mouvements programmés et d'accomplir une variété d'autres tâches.

L'ISO (International Standard Organization) a défini le robot manipulateur comme étant une machine dotée d'un mécanisme incluant plusieurs degrés de liberté, ayant souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet capable de tenir des outils, des pièces ou un dispositif d'inspection.

Pour le sens commun, un robot manipulateur est un dispositif mécanique articulé capable d'imiter certaines fonctions humaines telles que la manipulation d'objets, dans le but de remplacer l'homme pour la réalisation de certaines tâches matérielles [4].

### **II.3.2 Composants du robot manipulateur**

Un robot est constitué d'un ensemble de composants, ayant chacun un rôle bien spécifique. Ces composants sont au nombre de cinq que nous détaillons ci-dessous [4] :

#### **II.3.2.1 Système mécanique articulé**

Un système mécanique articulé est un mécanisme ayant une structure plus au moins proche du bras humain. Il est constitué d'un ensemble de solides reliés entre eux par des liaisons (pivot, glissière, rotule, sphérique...Etc.) animées avec des joints mécaniques. Dans ce système mécanique on trouve des liaisons actives car elles sont motorisées comme le cas des liaisons pivots. Et celles qui ne sont pas motorisées, ce sont des liaisons passives telles que les liaisons rotules.

#### **II.3.2.2 Actionneurs ou organes de motorisation**

Le terme actionneur désigne tout dispositif générateur d'effort à vitesse variable qui permet de modifier la configuration d'un robot manipulateur. Si on se limite aux actionneurs pratiquement utilisables, il est possible de les classer selon le type du mouvement généré. Les actionneurs linéaires qui développent une force et génèrent un mouvement de translation parallèlement à cette force, et les actionneurs rotatifs qui développent un couple et génèrent un mouvement de rotation autour de l'axe du couple. Et aussi selon la nature de la source d'énergie, on trouve des actionneurs pneumatiques qui utilisent l'air comprimé comme source d'énergie, d'actionneurs hydrauliques sous pression, et d'actionneurs électriques qui utilisent l'énergie électrique.

La puissance massique et le pouvoir d'accélération sont des critères importants qui permettent une comparaison objective de ces différents types d'actionneurs.

#### **II.3.2.3 Effecteur ou organe de préhension**

L'effecteur est l'organe terminal du robot, il est fixé au poignet de celui-ci. Ce poignet se termine généralement par une plaque de base, percée de trous filetés, cela permet la fixation de différents effecteurs à un robot universel et donc l'adaptation de celui-ci à des tâches spécifiques.

#### **II.3.2.4 Capteurs ou organes de perception**

Un capteur est un organe de prélèvement d'informations qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique).

Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande. On distingue entre types de capteurs :

**a) Capteurs proprioceptifs**

Ils fournissent l'information sur la configuration du manipulateur tel que la position, la vitesse, l'accélération...etc dont le but est d'assurer au robot manipulateur le contrôle de sa structure mécanique articulée. Ils interviennent aussi dans les boucles de régulation afin de permettre à l'unité de commande de prendre la décision adéquate.

**b) Capteurs extéroceptifs**

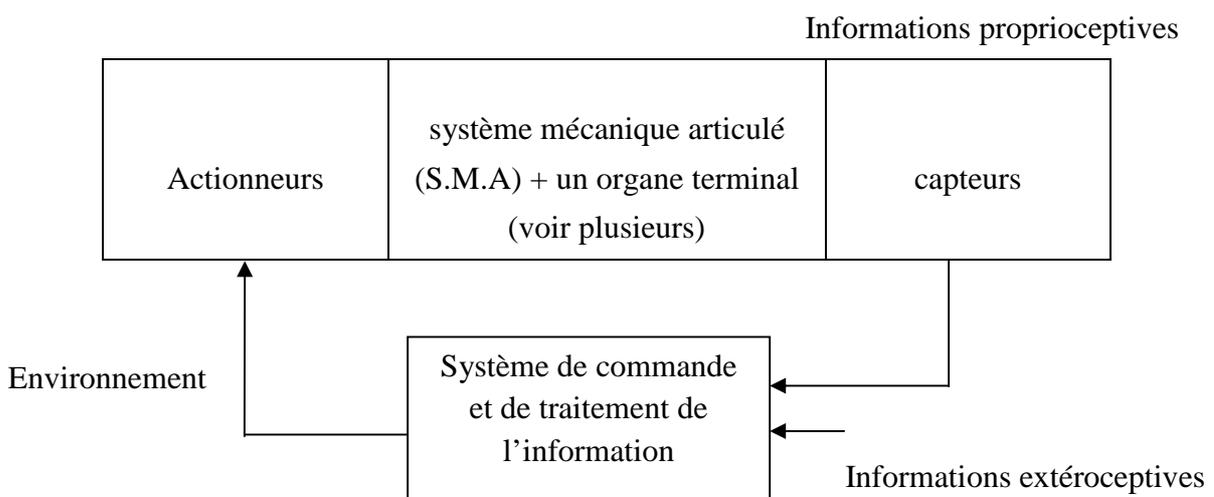
Ils interviennent lorsque l'espace de travail est mal connu, afin de donner les informations sur l'environnement extérieur du manipulateur comme la température, l'image...Etc. Ils permettent de modifier le comportement du manipulateur pour s'adapter aux contraintes imposées.

**II.3.2.5 Système de traitement**

C'est lui qui gère l'ensemble des tâches. Il admet trois rôles essentiels :

- le rôle de l'information : consiste à collecter l'information venant des capteurs.
- le rôle de la décision : en partant d'une tâche définie et en tenant compte des données du système et de l'environnement, il établit les actions adéquates.
- le rôle de la communication.

Le schéma suivant représente la liaison entre les différentes parties de la structure d'un robot manipulateur.



**Figure II.3 : Chaine d'asservissement pour un robot manipulateur [4].**

## II.4 Robots nageurs

L'efficacité de la nage des poissons dans leur environnement a fait l'objet de multiples réflexions de la part des chercheurs (biologistes ou autres) depuis de très nombreuses années.

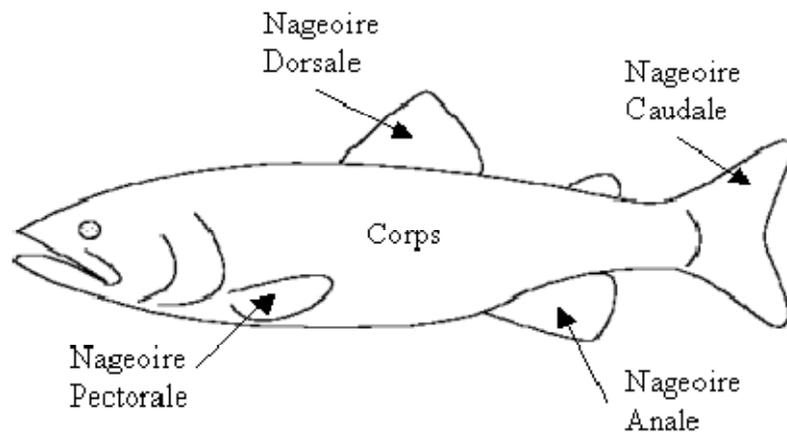
Les chercheurs ont constaté qu'en plus d'une efficacité énergétique remarquable, certains poissons pouvaient atteindre des accélérations 5 fois supérieures à la gravité terrestre, et d'autres poissons (telle que l'anguille), sont capables grâce à leur morphologie d'effectuer de longs trajets migratoires de plusieurs milliers de kilomètres et sur une durée de 7 à 9 mois, cela en dépensant un minimum d'énergie.

Ces résultats forts témoignent de l'efficacité de la nage des poissons, et c'est donc naturellement que ces derniers ont constitués une source d'inspiration pour les "bio-roboticiens".

Notons que de manière générale, la nage est un sujet d'étude extrêmement riche et la littérature scientifique portant sur le sujet est vaste [5].

### II.4.1 Principe de nage des poissons

La multitude d'espèces de poissons vivants dans les océans sont généralement cataloguées suivant les parties du corps qui oscillent afin de générer la nage (Figure II.4) [6].



**Figure II.4 – Définitions des différents organes du poisson [7].**

Les poissons sont des animaux vertébrés aquatiques pourvus de nageoires et dont le corps est le plus souvent couvert d'écailles permettant de réduire la traînée de l'animal lors de la nage.

Les chercheurs ont classés les poissons selon deux types de nage qui sont :

**II.4.1.1 Nage Périodique** : est caractérisée par la répétition cyclique d'un même mouvement de propulsion et utilisée par les poissons pour parcourir de grande distance à une vitesse constante.

**II.4.1.2 Nage Transitoire** : est utilisée pour chasser une proie ou pour échapper à un prédateur, et incluant les départs rapides, les virages, et les plongées.

Le premier type traduit l'utilisation du corps ou des nageoires pour se propulser, tandis que le second est lié au mouvement caractéristique des différents organes qui sont mis en jeu dans la nage.

Cependant, intéressons-nous à la nage périodique, elle est le mode locomoteur le plus utilisé par les poissons téléostéens (poissons vertébrés).

**a) Modes de propulsions**

On distingue deux modes de propulsion chez les poissons :

Le premier mode de propulsion est appelé BCF "Body Caudal Fin", il s'applique aux poissons courbant leur corps et leurs nageoires caudales créant un va-et-vient qui les propulse.

D'autres poissons nagent grâce aux mouvements de leurs nageoires dorsales et anales, qui forment les nageoires médianes. Et aussi les mouvements des deux autres nageoires pectorales et pelviennes qui forment les nageoires paires. On appelle cette nage le mode MPF "Médian Paired Fins". Approximativement 15% des poissons utilisent ce mode.

**b) Le mouvement caractéristique**

A l'intérieur de ces modes, existent deux mouvements caractéristiques :

- Le mouvement ondulatoire.
- Le mouvement oscillant.

On caractérise le mouvement ondulatoire par la propagation d'une onde rétrograde à la direction du mouvement d'amplitude croissante le long du corps du poisson.

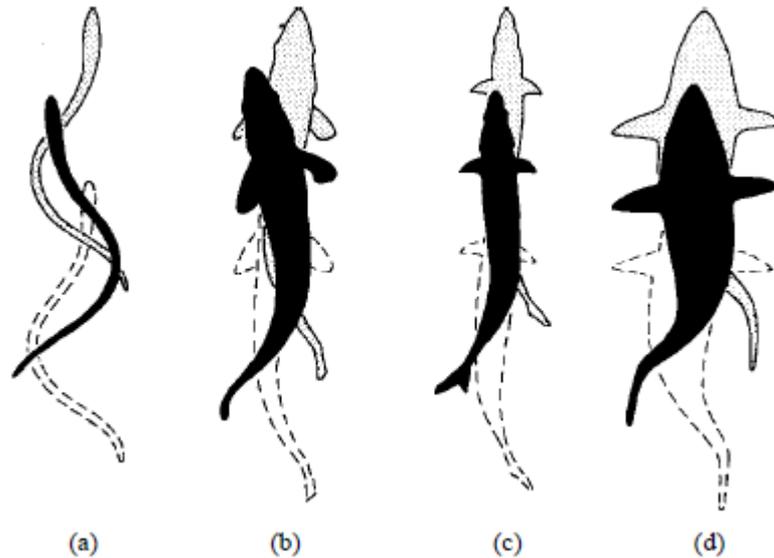
Le mouvement oscillant se caractérise par un battement stationnaire, aucune onde n'intervient dans ce mouvement.

**II.4.2 Différentes catégories de poissons**

Pour se mouvoir, la plupart des poissons propagent une onde le long de leurs corps, de la tête vers la queue, générant ainsi une force de propulsion. Cependant, les caractéristiques de l'onde ainsi propagée sont différentes suivant les espèces et en particulier selon leurs morphologies [7].

Ces différences ont amené les biologistes à établir une classification générale des espèces en fonction de ce critère, qui regroupe les catégories suivantes :

Ainsi, on distingue quatre catégories différentes de poissons (Figure II.5).



**Figure II.5 - Illustration des différents types de nage ondulatoire chez les poissons [7].**

- a) **Anguilliforme** : inspiré de l'anguille, cette appellation est utilisée pour les poissons qui font onduler une grande partie de leurs corps au cours de la propulsion.
- b) **Subcarangiforme** : Chez les poissons de type Subcarangiforme, l'amplitude de l'oscillation est plus faible et ne s'étend pas sur tout le corps.
- c) **Carangiforme** : La rigidité des poissons de type carangiforme est encore plus prononcée, ce type fait onduler le tiers de son corps lors de sa propulsion.
- d) **Tunniforme** : inspiré du poisson tunas, ce terme désigne la locomotion des poissons dont la propulsion est basée en grande partie sur le mouvement de la queue dont l'ondulation reste relativement faible.

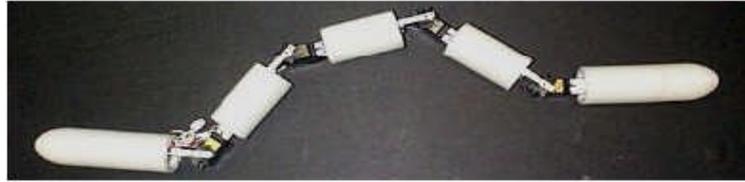
#### II.4.3 Robots nageurs existants et leurs applications

A partir des quatre catégories de poissons que nous avons pu voir, nous allons présenter quelques réalisations de robot pour chacune de ces catégories [8].

##### a) Poissons anguilliformes

Cette catégorie de poissons est celle qui est la plus étudiée dans la littérature. On peut citer le robot REEL 2 de l'université de Harvard, le robot lamproie de la Northeastern University, le robot lamproie Amphibot II de l'EPFL et le robot anguille ACM-R5 du laboratoire Hirose.

On prend l'exemple du robot REEL2 qui est un robot dont le but est de pouvoir tester les lois de commande et le problème de la génération de trajectoires. La locomotion anguilliforme est basée sur des ondulations du corps. Ainsi, la nage de l'anguille présente des performances remarquables en termes de manœuvrabilité (Figure II.6).



**Figure II.6** – Le robot REEL2 : Anguille à 5 corps [8].

#### **b) Poissons Subcarangiformes**

Dans cette catégorie on cite le robot Potuna dont la queue dispose de deux degrés de liberté et dont les nageoires pectorales sont actionnées par un moteur (Figure II.7)



**Figure II.7**-Robot Potuna (laboratoire POSTECH, Corée) [8].

#### **c) Poissons carangiformes**

Dans cette catégorie de poissons, on peut citer le robot G9 de l'université Essex en Angleterre, c'est un robot qui possède une queue à 4 vertèbres actionnées par 3 moteurs. (Figure II.8)



**Figure II.8** – Robot G9 de l'université Essex (Angleterre) [8].

#### d) Poissons Thunniformes

Dans le domaine des poissons thunniforme, le robot le plus abouti est sans conteste le robot thon Robotuna du MIT (Institut de technologie du Massachusetts) (Figure II.9).



**Figure II.9 – Le prototype RoboTuna du MIT [8].**

Ce robot a pour but d'étudier les lois de nage permettant d'atteindre de grandes vitesses de déplacement avec la plus faible consommation d'énergie possible. Le mouvement du corps de ce robot thon est obtenu par l'intermédiaire de 8 vertèbres rigides actionnées par 6 moteurs électriques. Ce robot est également le premier à être équipé d'une peau complète et lisse afin d'être le plus proche du poisson qu'il mime.

#### II.4.4 L'intérêt des robots nageurs dans l'exploitation sous marine

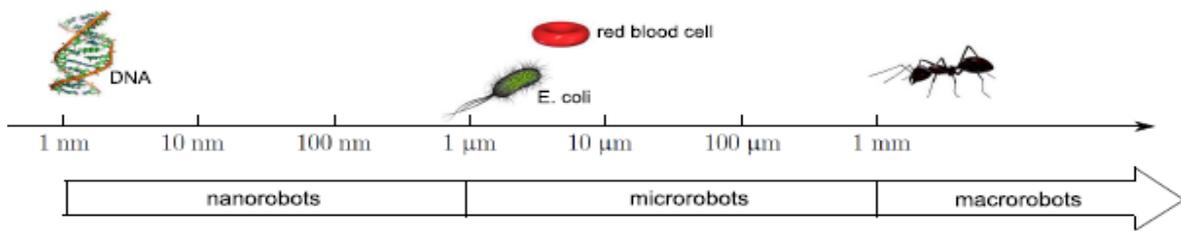
L'étude et le développement des robots sous-marins autonomes, performants et manœuvrables est d'une importance primordiale. Cette importance est justifiée par les besoins actuels de surveillance et de l'exploration des milieux sous-marins encombrés et dynamiques.

Ces robots sous-marins s'adaptent aux obstacles et aux milieux difficiles, tout en analysant l'environnement sous-marin. Ils servent à la protection des ports et des barrages, à l'analyse et à l'inspection d'infrastructures industrielles en mer, à la détection des mines, à la surveillance de l'environnement et à l'exploration des ressources marines.

A nos jours, la technologie ne se limite pas seulement à l'étude des robots, les chercheurs ont miniaturisé cette création pour satisfaire la demande de chaque domaine en créant le micro-robot [9].

#### II.5 Micro-robot

Un micro-robot est une machine miniaturisée, conçue pour exécuter une tâche ou des tâches spécifiques avec précision. Ce dispositif évolue à l'échelle micrométrique. (La figure II.10) montre une barre d'échelle qui représente les micro-robots avec quelques objets intuitifs [10]



**Figure II.10 - L'échelle micro et nano [10].**

Les micro-robots déjà existants peuvent être classés suivant un critère principal qui concerne leur mobilité. Nous distinguons alors les micro-robots mobiles des micro-robots fixes. Plusieurs types de micro-robots mobiles existent. Ils sont classifiés selon leur type de locomotion (le milieu dans lequel ils évoluent ainsi que leur mode de propulsion). Les micro-robots mobiles évoluent sur terre, dans les airs ou encore sur ou sous l'eau.

### II.6 Micro-robots nageurs

Le « Micro-swimmer Robot » (littéralement mini-robot nageur en français) est un objet microscopique ayant la capacité de se déplacer par lui-même dans le fluide qui l'entoure. Il est composé de nanoparticules magnétiques.

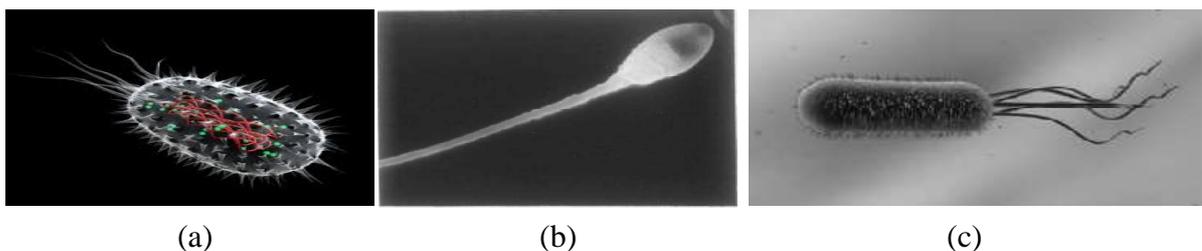
Ces micro-organismes doivent lutter contre des forces de viscosité lorsqu'ils nagent ; ce qui complique également la conception des robots microscopiques destinés à évoluer dans le même milieu [11].

#### II.6.1 Types de micro-robots nageurs

Différents types de micro-robot nageurs ont été conçus et réalisés par le groupe du prof. Metin Sitti de Carnegie Mellon University [12], et ce par biomimétisme avec de nombreuses bactéries ou des cellules.

#### II.6.2 Présentation de micro-nageurs naturels

Selon le domaine biologique il existe diverses sortes de micro-objets de ce type. On peut citer parmi les cellules procaryotes, les bactéries Escherichia Coli, parmi les cellules eucaryotes, les Cils et les spermatozoïdes, (voir la figure II.11) [13]



**Figure II.11 : Quelques micro-nageurs biologiques et leur stratégie de locomotion [10].**

Les Cils se déplacent avec deux mouvements (**Figure II.11.a**), le battement de poussée (le cil se plie) et le battement de récupération (il revient à sa position initial). Un spermatozoïde a une queue souple (**Figure II.11.b**), nage en propageant une onde de la base à l'extrémité de sa queue. La **figure II.11.c** montre une image d'une bactérie *E. coli* O157: H7 avec un faisceau de flagelles entraîné dans une forme hélicoïdale pour la Propulsion à tire-bouchon.

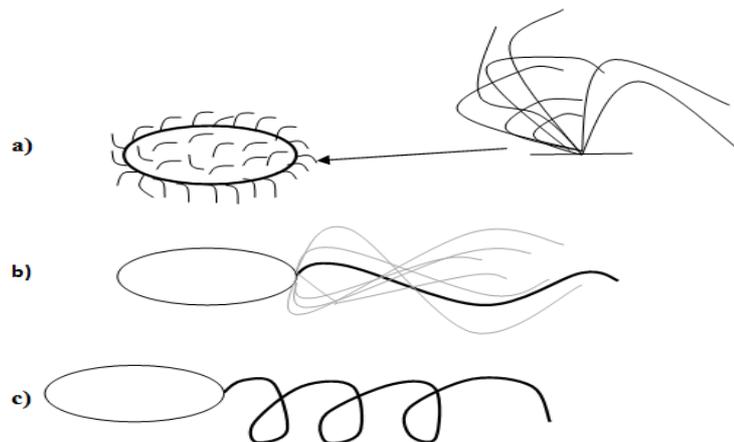
Ces micro-organismes représentent l'objet d'inspiration des chercheurs pour la fabrication d'un modèle d'adaptation de micro-robot artificiel destiné à accomplir des tâches précises.

### II.6.3 Présentation de micro-nageurs artificiels

Un certain nombre de méthodes de nage robotisées ont été montées pour travailler aux petites échelles, mais à mesure que la taille diminue l'efficacité est réduite à cause de l'utilisation des configurations à mouvement alternatif.

Il existe d'autres méthodes de natation biomimétique utilisant la physique sur des objets à échelle microscopique, elle nécessite des composants mécatroniques et présente un défi dans la micro-fabrication, l'alimentation et le contrôle sans fil.

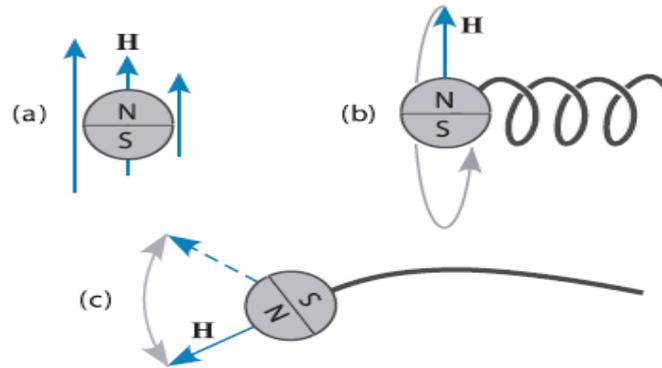
Les cellules sont dessinées de façon identique pour mettre en évidence les différences dans les modes de propulsion, mais il existe une grande variété de formes et de tailles de micro-organismes comme le montre la figure II.12



**Figure. II.12 - Locomotion des micro-organismes :** (a) Des Cils qui se déplacent à travers le flux pendant la course de puissance, et qui se replient près du corps pendant la course de récupération ; (b) Des flagelles eucaryotes qui créent des motifs tels que les vagues de déplacement ; (c) Propulsion rotative en tire-bouchon.

Presque tous les dispositifs utilisent des champs magnétiques. Aucun autre principe d'actionnement n'offre la possibilité de transférer de telles quantités de puissance sans fil, de ce fait un champ magnétique est un choix évident pour les propulser ; ce qui permet d'éliminer la nécessité de reproduire un moteur moléculaire dans un micro-robot.

Le micro-robot nage de droite à gauche dans chacun des trois cas et le corps de l'ensemble du micro-robot est représenté comme un aimant. La figure II.13 illustre les méthodes de natation magnétiques [14].



**Figure. II.13 - Méthodes de natation magnétiques [14].**

#### II.6.4 Fonctionnement des micro-robots nageurs

Pour un fonctionnement normal du micro-robot, deux conditions doivent être satisfaites pour donner naissance à une force de propulsion.

Ce dernier doit posséder une tête sinon son déplacement sera impossible, car un flagelle oscillant seul dans un fluide visqueux crée deux forces de même amplitude sur chacune de ses extrémités mais de sens opposés. De ce fait elle en résulte une force de propulsion nulle.

La présence de la tête induit une brisure de symétrie et donc une résultante de force de propulsion non nulle.

D'autre part la viscosité de l'environnement est indispensable au déplacement du dispositif. Une viscosité faible rend la force de propulsion négligeable créée par l'oscillation de flagelle.

La queue ondule en suivant la direction du champ, propulsant le micro-nageur. Cette découverte pourrait servir à transporter et à positionner des cellules placées à la tête du micro-nageur, car la direction et la vitesse du mouvement sont réglables [15].

#### II.6.5 Micro-robots nageurs pour des applications médicales

En général, l'administration d'un médicament dans le corps s'effectue par une voie traditionnelle et se déplace dans tout l'organisme, même si ce dernier est destiné à soigner un organe en particulier. Par conséquent ceci cause des effets secondaires indésirables (nausées, maux de tête, diarrhées, rougeurs) dans les organes qui ne sont pas la cible du traitement.

Pour la résolution de ce problème un micro-robot nageur sera le mieux placé pour apporter directement le médicament là où il est nécessaire (par exemple au niveau d'une tumeur ou d'une artère bouchée).

Cependant la question qui se pose, quelle est la voie de navigation des micro-nageurs dans le corps ?

Les micro-robots peuvent naviguer à travers diverses voies naturelles [12] afin de réaliser des opérations dites minimalement invasive, et nous citons les principales voies qui sont : le système urinaire, le système nerveux central, le système cardiovasculaire et les autres voies.

D'après les chercheurs l'accès le plus privilégié pour la navigation de ce micro-dispositif est la voie cardiovasculaire. Ce système circulatoire comprend le cœur et le réseau des vaisseaux sanguins utilisés pour transporter le sang aux différents organes du corps. Ainsi pratiquement tous les organes du corps humain sont alimentés par le système sanguin, de sorte que le système cardiovasculaire est la voie la plus adaptée pour la navigation endovasculaire d'un micro-robot afin d'atteindre l'ensemble du corps humain.

Les micro-nageurs fabriqués dans le laboratoire ont un diamètre inférieur à un demi millimètre et d'une longueur au plus 3 mm.

## II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les diverses catégories de robots nageurs tout en précisant leurs source d'inspiration selon les types de nage (transitoire et périodique) et aussi selon les modes de propulsion (BCF "Body Caudal Fin" et MPF "Médian Paired Fins").

Nous avons cité aussi les micro-robots nageurs qui sont créés à base des existences naturelles. D'ailleurs, nous avons présenté les différentes sortes de ces nageurs et leurs fonctionnements selon leurs sources d'inspiration.

Ensuite nous avons abordé le domaine de leurs applications et leurs intérêts par rapport à la résolution des tâches les plus difficiles pour l'être humain.

Ce chapitre constitue ainsi une bonne motivation pour la modélisation d'un robot manipulateur à deux bras. Son prototype sera présenté avec sa modélisation dynamique dans le prochain chapitre.

### III.1 Introduction

Pour commander ou simuler le comportement d'un système mécanique articulé (robot), on doit disposer d'un modèle. Cependant il existe plusieurs possibilités de modélisation selon les objectifs voulus, les contraintes de la tâche et les performances recherchées. On cite parmi les modèles mathématiques nécessaires : les modèles géométriques, cinématiques et dynamiques.

Dans ce chapitre on fait appel aux équations dynamiques qui décrivent explicitement la relation entre la force et le mouvement, contrairement à l'équation cinématique qui ne tient pas compte aux forces externes.

Le modèle dynamique d'un mécanisme articulé est obtenu à l'aide d'une suite d'équations mathématiques dont le but est de décrire son mouvement. Dans ce contexte, nous allons présenter les équations d'Euler Lagrange, qui décrivent l'évolution du système mécanique et illustré par un exemple. Cette modélisation est utile dans le cas d'une simulation, dont le but étant l'obtention de l'évolution des différents angles, vitesses et accélérations angulaires en fonction des couples appliqués aux différentes articulations.

Pour bien comprendre le principe de la modélisation dynamique, on prend le robot manipulateur à deux articulations comme exemple d'application.

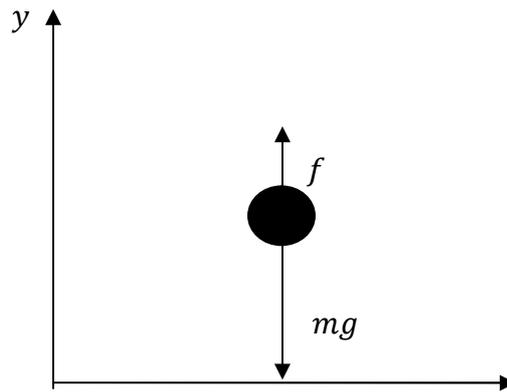
### III.2 Formalisme de Lagrange

Il s'agit d'une très célèbre démonstration en mathématiques. Elle repose sur le lemme fondamental du calcul des variations. Les équations d'Euler Lagrange ont plusieurs propriétés très importantes qui peuvent être exploitées pour concevoir et analyser des algorithmes de contrôle de rétroaction.

Dans cette section nous dérivons un ensemble général d'équations différentielles qui décrivent l'évolution des systèmes mécaniques au cours du temps. On les appelle équations de mouvement d'Euler Lagrange.

Pour motiver cette approche, nous montrons comment les équations d'Euler Lagrange peuvent être dérivées de la seconde loi de Newton pour un système à un degré de liberté consistant en une particule de masse constante  $m$ , contrainte de se déplacer dans la direction de l'axe des  $y$ , et soumise à une force  $f$  et à son poids, comme le montre la figure III.1 [16].

**Exemple :** chute d'une masse constante.



**Figure III.1**-Système a un degré de liberté [16].

On a:

$$m \ddot{y} = f - mg \quad (\text{III. 1})$$

On remarque que le côté gauche de l'équation peut être écrit comme suit :

$$m\dot{y} = \frac{d}{dt} (m\dot{y}) = \frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{y}} \left( \frac{1}{2} m\dot{y}^2 \right) = \frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{y}} \quad (\text{III.2})$$

Où  $K = \frac{1}{2} m\dot{y}^2$  représente l'énergie cinétique du système.

Et la force gravitationnelle peut s'écrire comme suit :

$$mg = \frac{\partial}{\partial y} (mgy) = \frac{\partial P}{\partial y} \quad (\text{III.3})$$

Où  $P = mgy$  est l'énergie potentielle due à la gravité.

Si on définit

$$L = K - P = \frac{1}{2} m\dot{y}^2 - mgy \quad (\text{III.4})$$

En dérivant le Lagrangien par rapport à  $\dot{y}$  ensuite par rapport à  $y$ , on obtient :

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} = \frac{\partial K}{\partial \dot{y}} \quad ; \quad \frac{\partial L}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} \quad (\text{III.5})$$

On peut écrire l'équation (III.1) comme suit

$$\frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{y}} - \frac{\delta L}{\delta y} = f \quad (\text{III.6})$$

La fonction  $L$  est la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle qui est appelée le Lagrangien du système, et l'équation (III.6) est appelé l'équation de Euler Lagrange.

**Remarque :** La méthode présentée n'est pas celle qui donne le modèle le plus performant du point de vue du nombre d'opérations, mais c'est la méthode la plus simple compte tenue de ces objectifs.

### III.3 Modélisation dynamique d'un robot manipulateur

Le modèle dynamique consiste à définir les équations du mouvement du robot qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercés par les actionneurs et les positions, les vitesses ainsi que les accélérations des articulations [17].

On peut définir deux types de modèles dynamiques:

- a. Un modèle dynamique inverse (trouver les couples articulaires  $\tau(t)$ ).
- b. Un modèle dynamique direct est celui qui exprime les accélérations articulaires en fonction des positions, vitesses et couples des articulations (trouver les accélérations  $\ddot{q}(t)$ ). Il est alors représenté par la relation

$$\ddot{q} = g(\dot{q}, q, \tau, \varphi) \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$\tau$ : Vecteur des couples/forces des actionneurs, selon que l'articulation est rotoïde ou prismatique. Dans la suite, on écrira tout simplement couples.

$q$  : vecteur des positions articulaires.

$\dot{q}$ : Vecteur des vitesses articulaires ;

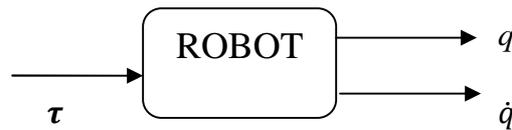
$\ddot{q}$  : Vecteur des accélérations articulaires ;

$\varphi$ : Vecteur représentant l'effort extérieur (forces et moments) qu'exerce le robot sur l'environnement.

L'équation dynamique du système s'écrit sous la forme suivante :

$$\tau = A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Q(q) \quad (\text{III.8})$$

Qu'on peut représenter par le schéma ci-dessous :



**Figure III.2-**Représentation des entrées-sorties du Robot [17].

Après l'obtention des équations mathématiques, plusieurs formalismes ont été utilisés pour obtenir le modèle dynamique des robots.

Les formalismes les plus souvent utilisés sont :

Le formalisme de Lagrange.

Le formalisme de Newton-Euler.

Nous avons choisi d'utiliser le formalisme qui se base sur les équations de Lagrange car il est simple et élégant. En effet, ce formalisme se caractérise par la clarté du calcul et par le fait que les équations utilisées ont une signification physique.

### III.4 Exemple d'application

Considérons le robot manipulateur représenté sur la figure III.3.

On considère la notation comme suit :

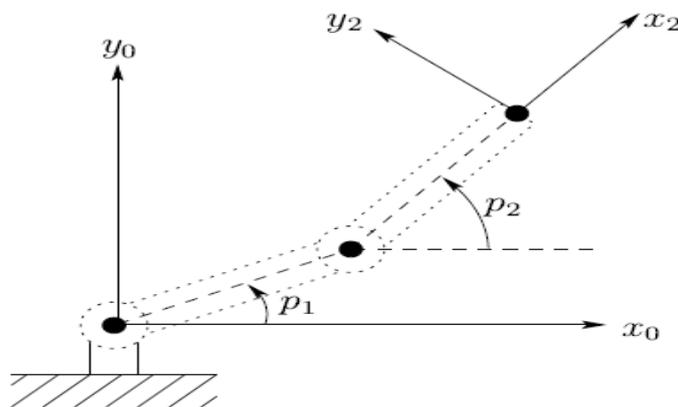
$l_1$  et  $l_2$  Désignent respectivement la longueur des bras 1 et 2.

$l_{c1}$  et  $l_{c2}$  Désignent la distance entre l'articulation précédente et le centre de masse du bras.

$m_1$  et  $m_2$  Désignent la masse des bras 1 et 2.

Nous avons choisi comme coordonnées généralisées les variables communes

$q_1(t) = p_1(t)$  ;  $q_2(t) = p_2(t)$  ( $p_1$  et  $p_2$  désignent les angles articulaires).



**Figure III.3-** les coordonnées généralisées d'un robot [16].

L'utilisation des équations de Lagrange dans la dérivation de la dynamique du robot

Peut être réduit à quatre étapes principales:

1. Calcul de la fonction d'énergie cinétique  $K(q, \dot{q})$ .
2. Calcul de la fonction d'énergie potentielle  $P(q)$ .
3. Calcul du Lagrangien  $L(q, \dot{q})$ .
4. Développement des équations de Lagrange

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1 \dots, n \quad (\text{III.9})$$

Pour une meilleure lisibilité des équations, nous avons posé

$$x_1(t) = x_1 ; y_1(t) = y_1 ; x_2(t) = x_2 ; y_2(t) = y_2 \text{ et } p_1(t) = p_1 ; p_2(t) = p_2.$$

Les coordonnées des positions des centres de masses des bras sont données par ces équations:

$$\begin{cases} x_1 = l_{c1} \cos p_1 \\ y_1 = l_{c1} \sin p_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_2 = l_{c2} \cos p_2 + l_1 \cos p_1 \\ y_2 = l_{c2} \sin p_2 + l_1 \sin p_1 \end{cases}$$

On applique la dérivée pour obtenir la vitesse des centres de masses des bras,

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -l_{c1} \dot{p}_1 \sin p_1 \\ \dot{y}_1 = l_{c1} \dot{p}_1 \cos p_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -l_{c2} \dot{p}_2 \sin p_2 - l_1 \dot{p}_1 \sin p_1 \\ \dot{y}_2 = l_{c2} \dot{p}_2 \cos p_2 + l_1 \dot{p}_1 \cos p_1 \end{cases}$$

### III.4.1 Calcul de l'énergie cinétique

La relation générale de l'énergie cinétique du robot est :

$$k(p, \dot{p}) = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) \quad (\text{III.10})$$

Elle peut être décomposée comme suit :  $k(p, \dot{p}) = k_1(p, \dot{p}) + k_2(p, \dot{p})$

Où

$k_1(p, \dot{p})$  L'énergie cinétique associée à la masse  $m_1$

$k_2(p, \dot{p})$  L'énergie cinétique associée à la masse  $m_2$

$$k_1(p, \dot{p}) = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{p}_1^2$$

$$k_2(p, \dot{p}) = \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) = \frac{1}{2} m_2 [(l_{c2} \dot{p}_2 \sin p_2 + l_1 \dot{p}_1 \sin p_1)^2 + (l_{c2} \dot{p}_2 \cos p_2 + l_1 \dot{p}_1 \cos p_1)^2]$$

On obtient la relation suivante qui exprime l'énergie cinétique totale du système:

$$k(p, \dot{p}) = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{p}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 (l_{c2}^2 \dot{p}_2^2 + l_1^2 \dot{p}_1^2 + 2 l_{c2} l_1 \dot{p}_2 \dot{p}_1 \cos(p_2 - p_1)) \quad (\text{III. 11})$$

### III.4.2 Calcul de l'énergie potentielle

La même procédure que pour l'énergie cinétique  $P(p) = P_1(p) + P_2(p)$

$$P_1(p) = m_1 g l_{c1} \sin p_1$$

$$P_2(p) = m_2 g (l_1 \sin p_1 + l_{c2} \sin p_2)$$

$$P(p) = m_1 g l_{c1} \sin p_1 + m_2 g (l_{c2} \sin p_2 + l_1 \sin p_1) \quad (\text{III.12})$$

### III.4.3 Calcul du lagrangien

$$L(p, \dot{p}) = K(p, \dot{p}) - P(p) \quad (\text{III.13})$$

$$L(p, \dot{p}) = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{p}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_{c2}^2 \dot{p}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{p}_1^2 + l_{c2} l_1 \dot{p}_2 \dot{p}_1 \cos(p_2 - p_1) - m_1 g l_{c1} \sin p_1 + m_2 g l_{c2} \sin p_2 - m_2 g l_1 \sin p_1 \quad (\text{III. 14})$$

### III.4.4 Développement d'Euler Lagrange

En utilisant les équations de Lagrange (III.6) on déduit alors :

$$\tau_1 = \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{p}_1} - \frac{\delta L}{\delta p_1}$$

$$\tau_1 = (m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2) \ddot{p}_1 + (m_2 l_1 l_{c2} \cos(p_2 - p_1)) \ddot{p}_2 + (-m_2 l_1 l_{c2} \sin(p_2 - p_1)) \dot{p}_2^2 + (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos p_1 \quad (\text{III. 15})$$

$$\tau_2 = \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{p}_2} - \frac{\delta L}{\delta p_2}$$

$$\tau_2 = l_1 l_{c2} \cos(p_2 - p_1) \ddot{p}_1 + m_2 l_{c2}^2 \ddot{p}_2 + m_2 l_1 l_{c2} \sin(p_2 - p_1) \dot{p}_1^2 + m_2 g l_{c2} \cos p_2 \quad (\text{III. 16})$$

En résumé, les équations du mouvement du robot s'écrivent sous la forme :

$$d_{11}\ddot{p}_1 + d_{12}\ddot{p}_2 + c_1\dot{p}_2^2 + \phi_1 = \tau_1 \quad (\text{III. 17})$$

$$d_{21}\dot{p}_1 + d_{22}\ddot{p}_2 + c_2\dot{p}_1^2 + \phi_2 = \tau_2 \quad (\text{III. 18})$$

Par identification avec les équations (III.15) et (III.16) les coefficients sont définis comme suit:

$$d_{11} = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2$$

$$d_{12} = m_2 l_1 l_{c2} \cos(p_2 - p_1)$$

$$c_1 = -m_2 l_1 l_{c2} \sin(p_2 - p_1)$$

$$d_{21} = l_1 l_{c2} \cos(p_2 - p_1)$$

$$d_{22} = m_2 l_{c2}^2$$

$$c_2 = m_2 l_1 l_{c2} \sin(p_2 - p_1)$$

$$\phi_1 = (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos p_1$$

$$\phi_2 = m_2 g l_{c2} \cos p_2$$

Afin de déterminer le modèle d'état de ce système, on utilise le changement de variable suivant :

$$x_1 = p_1$$

$$x_3 = p_2$$

$$\dot{x}_1 = \dot{p}_1$$

$$\dot{x}_3 = \dot{p}_2$$

$$x_2 = \dot{p}_1$$

$$x_4 = \dot{p}_2$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{p}_1$$

$$\dot{x}_4 = \ddot{p}_2$$

On déduit les expressions de  $\ddot{p}_1$  et  $\ddot{p}_2$  à partir des équations du mouvement du robot (III.17) et (III.18).

Pour obtenir l'expression de  $\ddot{p}_1$ , on multiplie l'équation (III.17) par  $(d_{22})$  et l'équation (III.18) par  $(-d_{12})$ , ensuite on fait la somme de ces deux produit.

$$\ddot{p}_1 = a_{11}\dot{p}_2^2 + a_{12}\dot{p}_1^2 + D_{11} + D_{12} + B_1$$

Pour obtenir l'expression de  $\ddot{p}_2$ , on multiplie l'équation (III.17) par  $(d_{21})$  et l'équation (III.18) par  $(-d_{11})$ , ensuite on fait la somme de ces deux produit.

$$\ddot{p}_2 = a_{21}\dot{p}_2^2 + a_{22}\dot{p}_1^2 + D_{21} + D_{22} + B_2$$

Avec

$$a_{11} = \frac{m_2 l_1 \sin(p_2 - p_1)}{(m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 - m_2 l_1^2 \cos^2(p_2 - p_1))}$$

$$a_{12} = \frac{l_1^2 \sin 2(p_2 - p_1)}{2(m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 - m_2 l_1^2 \cos^2(p_2 - p_1))}$$

$$D_{11} = \frac{(m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos p_1}{(m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 - m_2 l_1^2 \cos^2(p_2 - p_1))}$$

$$D_{12} = \frac{m_2 l_1 \cos(p_2 - p_1) g \cos p_2}{(m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 - m_2 l_1^2 \cos^2(p_2 - p_1))}$$

$$D_{12} = \frac{(l_{c2} \tau_1 + p_1 \cos(p_2 - p_1) \tau_2)}{l_{c2} (m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 - m_2 l_1^2 \cos^2(p_2 - p_1))}$$

$$a_{21} = \frac{m_2 l_1^2 \sin 2(p_2 - p_1)}{2(m_2 l_1^2 \cos^2(p_2 - p_1) - m_1 l_{c1}^2 - m_2 l_1^2)}$$

$$a_{22} = \frac{l_1 \sin(p_2 - p_1) (m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2)}{l_{c2} (m_2 l_1^2 \cos^2(p_2 - p_1) - m_1 l_{c1}^2 - m_2 l_1^2)}$$

$$D_{21} = \frac{l_1 \cos(p_2 - p_1) (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos p_1}{l_{c2} (l_1^2 \cos^2(p_2 - p_1) - m_1 l_{c1}^2 - m_2 l_1^2)}$$

$$D_{22} = \frac{g (m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2) \cos p_2}{l_{c2} (l_1^2 \cos^2(p_2 - p_1) - m_1 l_{c1}^2 - m_2 l_1^2)}$$

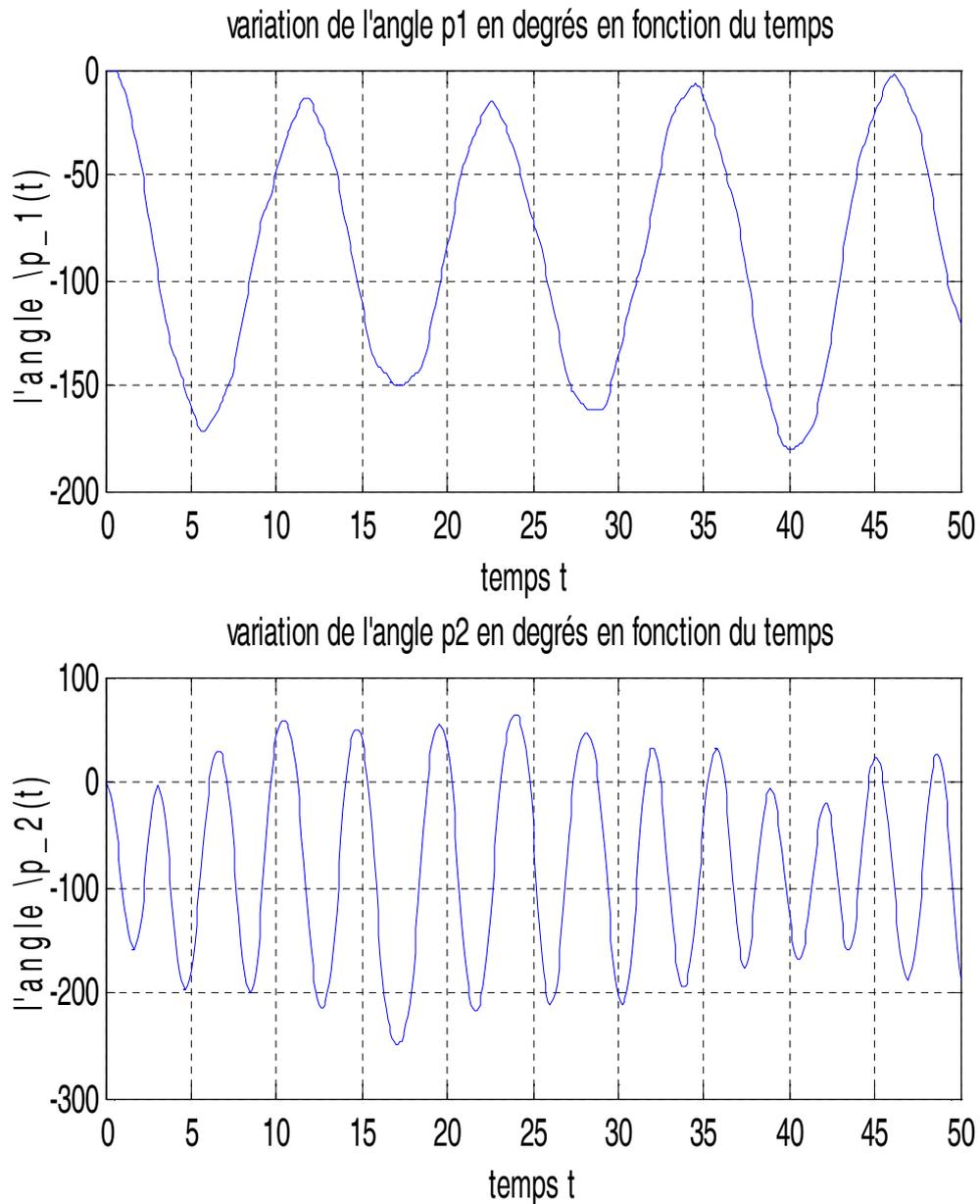
$$B_2 = \frac{m_2 l_1 l_{c2} \cos(p_2 - p_1) \tau_1 - (m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2) \tau_2}{m_2 l_{c2}^2 (m_2 l_1^2 \cos^2(p_2 - p_1) - m_1 l_{c1}^2 - m_2 l_1^2)}$$

On déduit le modèle d'état comme suit :

$$\left[ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_{11} x_4^2 + a_{12} x_2^2 + D_{11} + D_{12} + B_1 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = a_{21} x_4^2 + a_{22} x_2^2 + D_{21} + D_{22} + B_2 \end{array} \right]$$

### III.5 Résultats de la simulation du modèle

A l'aide du logiciel MATLAB on a pu voir les variations des deux angles d'articulations du robot manipulateur en fonction du temps dans la figure suivante :



**Figure III.4** -Variation de  $p_1$  et  $p_2$  en fonction du temps.

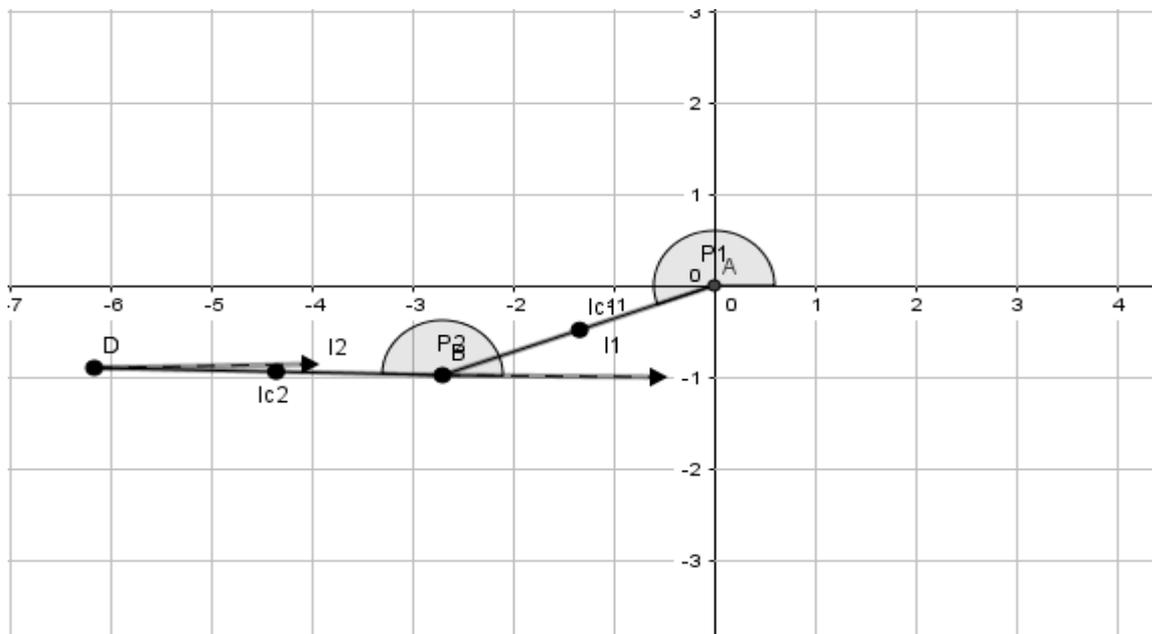
On a choisi trois temps différents pour dessiner le mouvement du robot manipulateur selon les valeurs de  $P_1$  et  $P_2$

	$t = 0s$	$t = 5s$	$t = 10s$	$t = 15s$
$P_1$	$0^\circ$	$-160.0933^\circ$	$-48.3394^\circ$	$-111.5902^\circ$
$P_2$	$0^\circ$	$-180.6056^\circ$	$43.9703^\circ$	$39.8942^\circ$

**Tab.III.1-** les valeurs des angles en degrés à des instants différents.

Les figures suivantes représentent le mouvement du robot à chaque instant  $t$  :

**Pour  $t = 5 s$**



**Figure III.5-** Mouvement du robot à  $t = 5 s$ .

Pour  $t = 10\text{ s}$

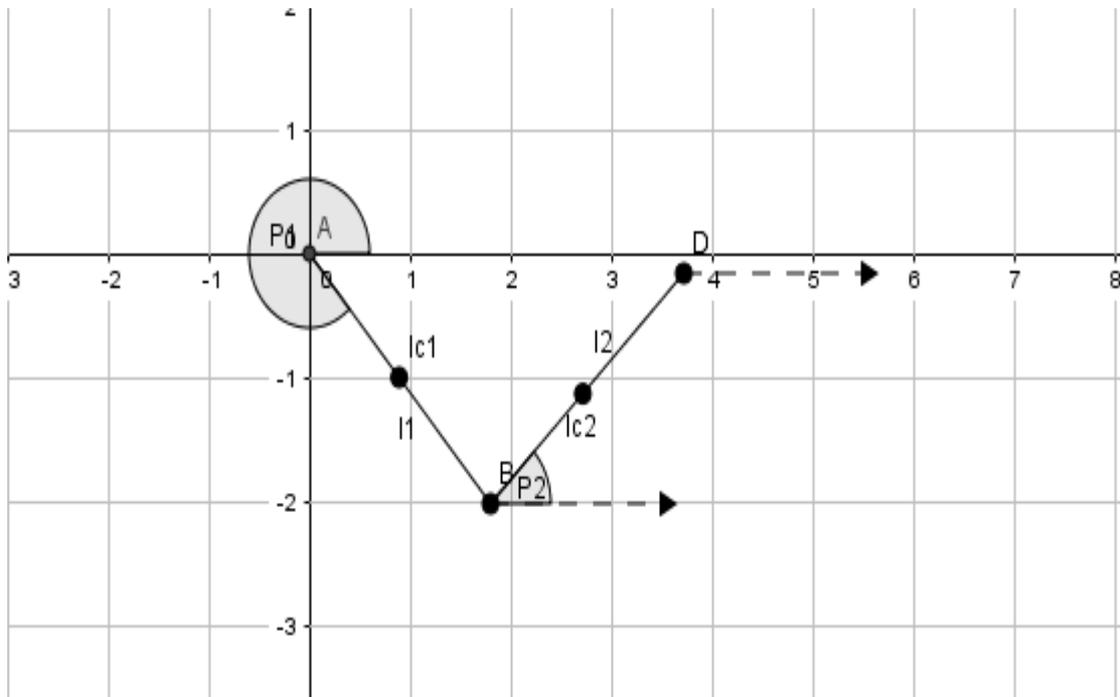


Figure III.6- Mouvement du robot à  $t = 10\text{ s}$ .

Pour  $t = 15\text{ s}$

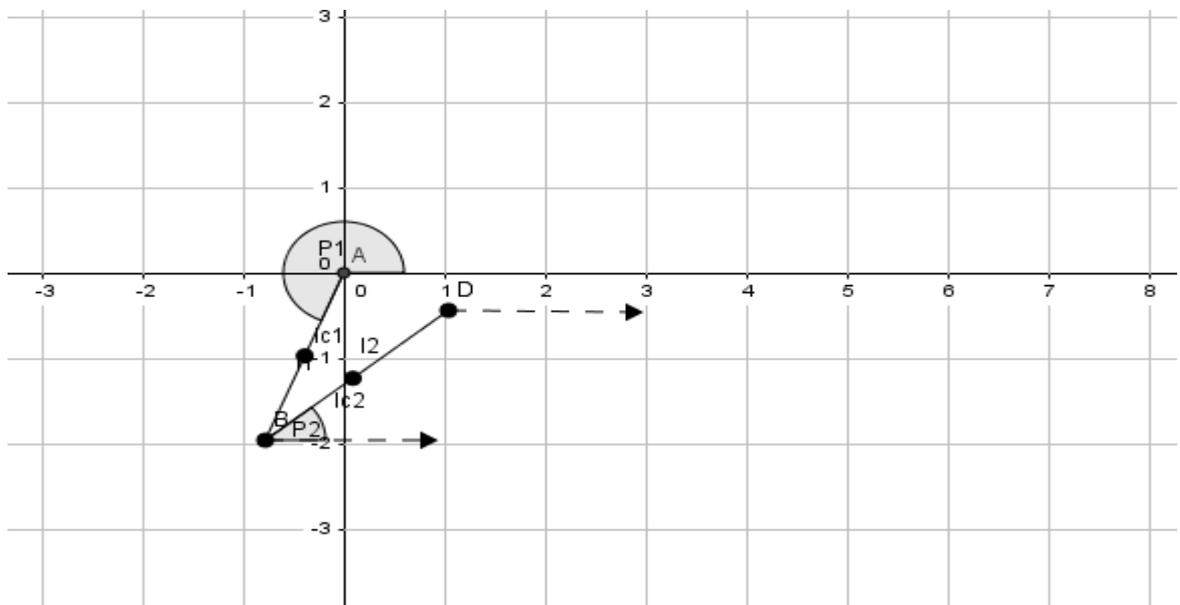


Figure III.7- Mouvement du robot à  $t = 15\text{ s}$ .

### III.6 Conclusion

Ce chapitre propose l'étude du modèle dynamique d'une structure mécanique articulée. La première partie est consacrée à bien détailler le formalisme d'Euler Lagrange que nous avons illustré par un exemple.

Ensuite pour bien comprendre le principe de la méthode d'Euler Lagrange, nous avons modélisé le mouvement d'un robot manipulateur à deux bras. Et à l'aide de MATLAB nous avons simulé les résultats de la modélisation.

Ce chapitre n'est qu'une introduction pour bien maîtriser le formalisme d'Euler Lagrange, afin de l'utiliser dans le chapitre qui suit pour modéliser le robot nageur.

## IV.1 Introduction

Dans la nature, on rencontre deux grands types de poissons chacun étant inféodé à un type de nage. Les premiers sont dits carangiformes, ce sont les meilleurs nageurs en eau libre, tels le thon. Les seconds sont les anguilliformes, tels l'anguille ou la murène dont les capacités de manœuvrabilité atteignent des records.

Récemment, beaucoup de projets sont consacrés à l'étude, la réalisation et le contrôle des robots nageurs. Dans ce chapitre, on choisit le carangiforme pour le modéliser grâce à ses caractéristiques incroyables dans certaines applications sous-marines.

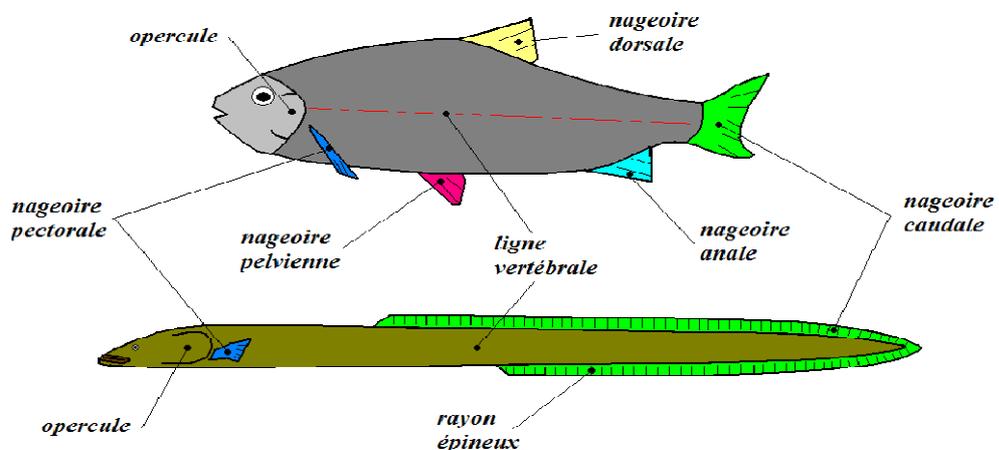
Dans cette partie, on suit les étapes de la modélisation dynamique sur ce mécanisme à quatre articulations en utilisant le formalisme des équations d'Euler Lagrange.

A la fin, on analyse les résultats de la simulation qui représente la variation des angles d'articulations en fonction du temps. A des instants choisis on dessine le mouvement de ce carangiforme.

## IV.2 Caractéristiques du poisson carangiforme

Pour montrer les caractéristiques du poisson carangiforme, nous avons préféré faire une comparaison entre les deux types de poissons qui sont connus par leurs qualités de nage. Les carangiformes sont les meilleurs nageurs en eau libre, tel que le thon. Par contre les anguilliformes, l'anguille est considérée comme un optimum en terme de manœuvrabilité.

Sur cette figure, on représente les morphologies de ces deux types de nageurs, une anguille européenne et une truite de mer afin de montrer, de façon générale, les organes des poissons jouant un rôle dans la nage :



**Figure IV.1-**Les morphologies de deux poissons osseux : la truite en haut et l'anguille en bas [18].

Nous pouvons remarquer que le corps de l'anguille est très élancé et que ses nageoires dorsale, caudales et anales n'en forment qu'une contrairement à la truite dont le corps est plus court et haut et dont les nageoires sont bien dissociées.

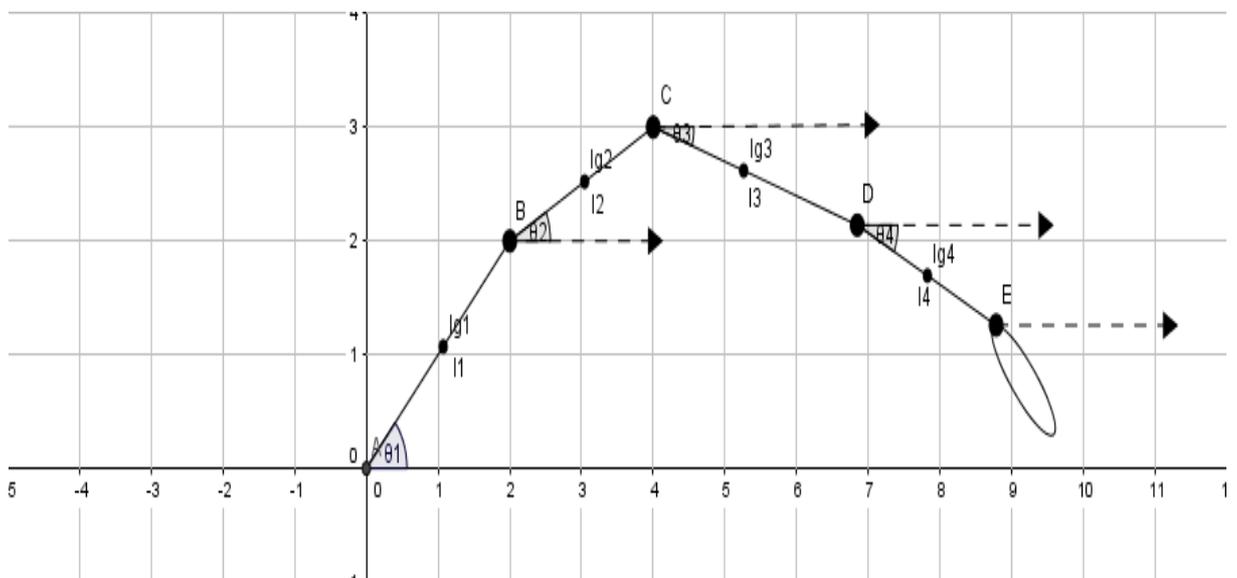
Ces différences morphologiques influent de façon significative sur les aptitudes locomotrices. Ainsi, chez l'anguille, son corps fin lui apportera un gain de manœuvrabilité alors que chez la truite son corps plus ramassé et rigide lui permettra d'atteindre des accélérations et des vitesses plus importantes.

Cependant, les études du mécanisme de propulsion basé sur les nageurs carangiforme sont les plus courantes, en raison de leur conception facile [18].

### IV.3 Présentation du robot carangiforme

Le robot poisson biomimétique carangiforme est composé d'un corps rigide antérieur et une queue souple. On le modélise comme un mécanisme à quatre articulations et chacune de ces dernières est motorisée [19].

Il est actionné par un mécanisme articulé qui se compose de quatre liens  $[l_1 \dots l_j]$  et ( $j = 1 \dots n$ ),  $l_j$  est le rapport de longueur du lien et  $n$  est le nombre d'articulation du poisson. Donc on peut considérer ce robot comme une série de liens interconnectés, comme le montre la figure suivante :



**Figure IV.2** Structure d'un robot nageur à quatre articulations

Les articulations sont déterminées par une paire de coordonnées selon les deux axes. Chaque angle entre  $l_j$  et l'axe des abscisses est représenté par  $\theta_j$ .

Pour imiter le mouvement carangiforme, un modèle mathématique devrait être établi en définissant la fonction  $L$  en fonction de la structure des quatre mécanismes articulaires.

#### IV.4 Modélisation du robot poisson carangiforme

Pour analyser le mouvement du robot poisson, un modèle dynamique est nécessaire. Il est basé sur la structure biologique du mouvement carangiforme. Le robot poisson est considéré comme un manipulateur série, qui peut être modélisé par le formalisme de Lagrange.

La méthode de base pour la modélisation d'un poisson robot biomimétique consiste à établir la fonction  $L$ , ensuite on résout les équations différentielles obtenues. Par ailleurs certaines hypothèses peuvent être posées pour simplifier le modèle du système [19]:

- a) le corps du robot poisson peut être considéré comme une série de liens:  $n = 4$ .
- b) le robot poisson nage dans l'eau et n'est pas affecté par l'influence de son environnement.
- c) le mouvement du robot poisson est modélisé uniquement dans un espace 2 D, ce qui est convenu comme le plus utilisable et le plus représentatif.

L'approche d'Euler Lagrange est exprimée par l'énergie cinétique et potentielle du système, la fonction du lagrangien est définie comme suit :

$$L(\theta, \dot{\theta}) = K(\theta, \dot{\theta}) - P(\theta) \quad (\text{IV.1})$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (\text{IV.2})$$

On représente l'énergie cinétique et potentielle du système respectivement par  $K$  et  $P$ .  $\theta_i$  représente l'angle de l'articulation tandis que sa premier dérivé  $\dot{\theta}_i$  représente la vitesse de l'articulation. Également  $\tau_i$  représente le vecteur du couple.

$$k(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (m_j v_j^2 + I_j \omega_j^2) \quad (\text{IV.3})$$

Ici,  $m_j$  représente la masse de l'articulation  $j$ , et  $v_j$  représente la vitesse linéaire de l'articulation, dans cet exemple on considère que le moment d'inertie est nul.

$$P(\theta) = \sum_{i=1}^n m_i g h_i \quad (\text{IV. 4})$$

Ici,  $g$  représente l'accélération gravitationnelle.

Les coordonnées de positions des centres de masse des liens sont données comme suit :

$$\begin{cases} x_1 = l_{g1} \cos \theta_1 \\ y_1 = l_{g1} \sin \theta_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_2 = l_{g2} \cos \theta_2 + l_1 \cos \theta_1 \\ y_2 = l_{g2} \sin \theta_2 + l_1 \sin \theta_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_3 = l_{g3} \cos \theta_3 + l_2 \cos \theta_2 + l_1 \cos \theta_1 \\ y_3 = -l_{g3} \sin \theta_3 + l_2 \sin \theta_2 + l_1 \sin \theta_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_4 = l_{g4} \cos \theta_4 + l_3 \cos \theta_3 + l_2 \cos \theta_2 + l_1 \cos \theta_1 \\ y_4 = -l_{g4} \sin \theta_4 - l_3 \sin \theta_3 + l_2 \sin \theta_2 + l_1 \sin \theta_1 \end{cases}$$

Les coordonnées des vitesses des centres de masse des liens sont

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -l_{g1} \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \\ \dot{y}_1 = l_{g1} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -l_{g2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \\ \dot{y}_2 = l_{g2} \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 + l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = -l_{g3} \dot{\theta}_3 \sin \theta_3 - l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \\ \dot{y}_3 = -l_{g3} \dot{\theta}_3 \cos \theta_3 + l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 + l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_4 = -l_{g4} \dot{\theta}_4 \sin \theta_4 - l_3 \dot{\theta}_3 \sin \theta_3 - l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \\ \dot{y}_4 = -l_{g4} \dot{\theta}_4 \cos \theta_4 - l_3 \dot{\theta}_3 \cos \theta_3 + l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 + l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \end{cases}$$

#### IV.4.1 Calcul de l'énergie cinétique du système

$$K = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} m_3 (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \frac{1}{2} m_4 (\dot{x}_4^2 + \dot{y}_4^2) \quad (\text{IV. 5})$$

On remplace les coordonnées des vitesses des centres de masse des liens dans l'équation ci-dessus et on trouve le résultat suivant :

$$\begin{aligned}
K = & \left( \frac{1}{2} m_1 l_{g1}^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1^2 + \frac{1}{2} m_3 l_1^2 + \frac{1}{2} m_4 l_1^2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \left( \frac{1}{2} m_2 l_{g2}^2 + \frac{1}{2} m_3 l_2^2 + \right. \\
& \left. \frac{1}{2} m_4 l_2^2 \right) \dot{\theta}_2^2 + \left( \frac{1}{2} m_3 l_{g3}^2 + \frac{1}{2} m_4 l_3^2 \right) \dot{\theta}_3^2 + \left( \frac{1}{2} m_4 l_{g4}^2 \right) \dot{\theta}_4^2 + (m_2 l_{g2} l_1 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + m_3 l_2 l_1 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + \\
& m_4 l_{g4} l_3 \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_3) \cos(\theta_2 - \theta_1) - (m_3 l_{g3} l_2 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_2 + m_4 l_3 l_2 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_2) \cos(\theta_3 + \theta_2) - (m_3 l_{g3} l_1 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_1 + \\
& m_4 l_3 l_1 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_1) \cos(\theta_1 + \theta_3) + \cos(\theta_4 + \theta_2) + (-m_4 l_{g4} l_1 \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_4 + \theta_1)) \quad (IV.6)
\end{aligned}$$

#### IV.4.2 Calcul de l'énergie potentiel du système

$$\begin{aligned}
P = & (m_1 l_{g1} + m_2 l_1 + m_3 l_1 + m_4 l_1) g \sin \theta_1 + (m_2 l_{g2} + m_3 l_2 + m_4 l_2) g \sin \theta_2 - \\
& m_3 l_{g3} + m_4 l_3 g \sin \theta_3 - m_4 g l_{g4} \sin \theta_4 \quad m_4 g l_{g4} \sin \theta_4 \quad (IV.7)
\end{aligned}$$

#### IV.4.3 Calcul du Lagrangien

On remplace K et P dans l'équation (IV.1) pour trouver  $L(\theta, \dot{\theta})$  :

$$\begin{aligned}
L(\theta, \dot{\theta}) = & \left( \frac{1}{2} m_1 l_{g1}^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1^2 + \frac{1}{2} m_3 l_1^2 + \frac{1}{2} m_4 l_1^2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \left( \frac{1}{2} m_2 l_{g2}^2 + \frac{1}{2} m_3 l_2^2 + \right. \\
& \left. \frac{1}{2} m_4 l_2^2 \right) \dot{\theta}_2^2 + \left( \frac{1}{2} m_3 l_{g3}^2 + \frac{1}{2} m_4 l_3^2 \right) \dot{\theta}_3^2 + \left( \frac{1}{2} m_4 l_{g4}^2 \right) \dot{\theta}_4^2 + (m_2 l_{g2} l_1 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + m_3 l_2 l_1 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 + \\
& m_4 l_2 l_1 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1) \cos(\theta_2 - \theta_1) - (m_3 l_{g3} l_2 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_2 + m_4 l_3 l_2 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_2) \cos(\theta_3 + \theta_2) - (m_3 l_{g3} l_1 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_1 + \\
& m_4 l_3 l_1 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_1) \cos(\theta_1 + \theta_3) + m_4 l_{g4} l_3 \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_3 \cos(\theta_3 - \theta_4) - (m_4 l_{g4} l_2 \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_2) \cos(\theta_4 + \theta_2) - \\
& m_4 l_{g4} l_1 \dot{\theta}_4 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_4 + \theta_1) - (m_1 l_{g1} + m_2 l_1 + m_3 l_1 + m_4 l_1) g \sin \theta_1 - (m_2 l_{g2} + m_3 l_2 + \\
& m_4 l_2) g \sin \theta_2 + (m_3 l_{g3} + m_4 l_3) g \sin \theta_3 - m_4 g l_{g4} \sin \theta_4 \quad (IV.8)
\end{aligned}$$

#### IV.4.4 Calcul des dérivées partielles

On dérive le lagrangien par rapport à  $\dot{\theta}_j$  puis on le dérive une autre fois par rapport au temps ensuite on soustrait la dérivée du lagrangien par rapport à  $\theta_j$ .

$$a) \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_1} - \frac{\delta L}{\delta \theta_1} = \tau_1$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_1} - \frac{\delta L}{\delta \theta_1} = & [m_1 l_{g1}^2 + l_1^2 (m_2 + m_3 + m_4)] \ddot{\theta}_1 + (m_2 l_{g2} + m_4 l_2 + m_3 l_2) l_1 \cos(\theta_2 - \theta_1) \ddot{\theta}_2 \\
& - (m_2 l_{g2} + m_4 l_2 + m_3 l_2) l_1 \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_2^2 - (m_3 l_{g3} + m_4 l_3) l_1 \cos(\theta_1 + \theta_3) \ddot{\theta}_3 \\
& + (m_3 l_{g3} + m_4 l_3) l_1 \sin(\theta_1 + \theta_3) \dot{\theta}_3^2 + m_4 l_1 l_{g4} \cos(\theta_1 + \theta_4) \ddot{\theta}_4 \\
& - m_4 l_1 l_{g4} \sin(\theta_1 + \theta_4) \dot{\theta}_4^2 - (m_1 l_{g1} + m_2 l_1 + m_3 l_1 + m_4 l_1) g \cos \theta_1
\end{aligned}$$

$$b) \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_2} - \frac{\delta L}{\delta \theta_2} = \tau_2$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_2} - \frac{\delta L}{\delta \theta_2} = & [m_2 l_{g2}^2 + l_2^2 (m_3 + m_4)] \ddot{\theta}_2 + [l_1 (m_2 l_{g2} + m_3 l_2 + m_4 l_2) \cos(\theta_2 - \theta_1)] \ddot{\theta}_1 \\ & + [l_1 (m_2 l_{g2} + m_3 l_2 + m_4 l_2) \sin(\theta_2 - \theta_1)] \dot{\theta}_1^2 \\ & - [l_2 (l_{g3} m_3 + m_4 l_3) \cos(\theta_2 + \theta_3)] \ddot{\theta}_3 + [l_2 (l_{g3} m_3 + m_4 l_3) \sin(\theta_2 + \theta_3)] \dot{\theta}_3^2 \\ & - [m_4 l_2 l_{g4} \cos(\theta_2 + \theta_4)] \ddot{\theta}_4 + [m_4 l_2 l_{g4} \sin(\theta_2 + \theta_4)] \dot{\theta}_4^2 \\ & + (m_2 l_{g2} + m_3 l_2 + m_4 l_2) g \cos \theta_2 \end{aligned}$$

$$c) \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_3} - \frac{\delta L}{\delta \theta_3} = \tau_3$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_3} - \frac{\delta L}{\delta \theta_3} = & (m_3 l_{g3}^2 + m_4 l_3^2) \ddot{\theta}_3 - [l_1 (m_3 l_{g3} + m_4 l_3) \cos(\theta_1 + \theta_3)] \ddot{\theta}_1 + l_1 (m_3 l_{g3} + \\ & m_4 l_3) \sin(\theta_1 + \theta_3) \dot{\theta}_1^2 - [l_2 (l_{g3} m_3 + m_4 l_3) \cos(\theta_2 + \theta_3)] \ddot{\theta}_2 + l_2 (m_3 l_{g3} + m_4 l_3) \sin(\theta_2 + \\ & \theta_3) \dot{\theta}_2^2 + (m_4 l_3 l_{g4} \cos(\theta_3 - \theta_4)) \ddot{\theta}_4 - (m_4 l_3 l_{g4} \sin(\theta_3 - \theta_4)) \dot{\theta}_4^2 - (m_3 l_{g3} + m_4 l_3) g \cos \theta_3. \end{aligned}$$

$$d) \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_4} - \frac{\delta L}{\delta \theta_4} = \tau_4$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_4} - \frac{\delta L}{\delta \theta_4} = & m_4 l_{c4}^2 \ddot{\theta}_4 + [m_4 l_3 l_{g4} \cos(\theta_3 - \theta_4)] \ddot{\theta}_3 - m_4 l_3 l_{g4} \sin(\theta_3 - \theta_4) \dot{\theta}_3^2 - \\ & [m_2 l_2 l_{g4} \cos(\theta_2 + \theta_4)] \ddot{\theta}_2 + m_2 l_2 l_{g4} \sin(\theta_2 + \theta_4) \dot{\theta}_2^2 - [m_4 l_1 l_{g4} \cos(\theta_1 + \theta_4)] \ddot{\theta}_1 + \\ & m_4 l_1 l_{g4} \sin(\theta_1 + \theta_4) \dot{\theta}_1^2 - m_4 g l_{g4} \cos \theta_4. \end{aligned}$$

On peut écrire les équations du mouvement du robot sous la forme suivante :

$$d_{11} \ddot{\theta}_1 + d_{12} \ddot{\theta}_2 + d_{13} \ddot{\theta}_3 + d_{14} \ddot{\theta}_4 + c_{11} \dot{\theta}_2^2 + c_{12} \dot{\theta}_3^2 + c_{13} \dot{\theta}_4^2 + \phi_1 = \tau_1$$

$$d_{21} \ddot{\theta}_1 + d_{22} \ddot{\theta}_2 + d_{23} \ddot{\theta}_3 + d_{24} \ddot{\theta}_4 + c_{21} \dot{\theta}_1^2 + c_{22} \dot{\theta}_3^2 + c_{23} \dot{\theta}_4^2 + \phi_2 = \tau_2$$

$$d_{31} \ddot{\theta}_1 + d_{32} \ddot{\theta}_2 + d_{33} \ddot{\theta}_3 + d_{34} \ddot{\theta}_4 + c_{31} \dot{\theta}_1^2 + c_{32} \dot{\theta}_2^2 + c_{33} \dot{\theta}_4^2 + \phi_3 = \tau_3$$

$$d_{41} \ddot{\theta}_1 + d_{42} \ddot{\theta}_2 + d_{43} \ddot{\theta}_3 + d_{44} \ddot{\theta}_4 + c_{41} \dot{\theta}_1^2 + c_{42} \dot{\theta}_2^2 + c_{43} \dot{\theta}_3^2 + \phi_4 = \tau_4$$

Par identification avec les équations obtenues, on aura les coefficients suivant tout en respectant l'ordre de ces dernières :

$$d_{11} = m_1 l_{g1}^2 + l_1^2 (m_2 + m_3 + m_4)$$

$$d_{12} = (m_2 l_{g2} + m_4 l_2 + m_3 l_2) l_1 \cos(x_3 - x_1)$$

$$d_{13} = -l_1 (m_3 l_{g3} + m_4 l_3) \cos(x_1 + x_5)$$

$$d_{14} = -m_4 l_1 l_{g4} \cos(x_1 + x_7)$$

$$c_{11} = -(m_3 l_2 + m_4 l_2 + m_2 l_{g2}) l_1 \sin(x_3 - x_1)$$

$$c_{12} = (m_4 l_3 + m_3 l_{g3}) l_1 \sin(x_1 + x_5)$$

$$c_{13} = m_4 l_1 l_{g4} \sin(x_1 + x_7)$$

$$\emptyset_1 = (m_1 l_{g1} + m_2 l_1 + m_3 l_1 + m_4 l_1) g \cos(x_1)$$

$$d_{21} = l_1 (m_2 l_{g2} + m_4 l_2 + m_3 l_2) \cos(x_3 - x_1)$$

$$d_{22} = m_2 l_{g2}^2 + l_2^2 (m_3 + m_4)$$

$$d_{23} = -(m_3 l_{g3} + m_4 l_3) l_2 \cos(x_3 + x_5)$$

$$d_{24} = -m_4 l_2 l_{g4} \cos(x_3 + x_7)$$

$$c_{21} = (m_2 l_{g2} + m_4 l_2 + m_3 l_2) l_1 \sin(x_3 - x_1)$$

$$c_{22} = (m_3 l_{g3} + m_4 l_3) l_2 \sin(x_3 + x_5)$$

$$c_{23} = m_4 l_2 l_{g4} \sin(x_3 + x_7)$$

$$\emptyset_2 = (m_2 l_{g2} + m_3 l_2 + m_4 l_2) g \cos(x_3)$$

$$d_{31} = -(m_3 l_{g3} + m_4 l_3) l_1 \cos(x_1 + x_5)$$

$$d_{32} = -(m_3 l_{g3} + m_4 l_3) l_2 \cos(x_3 + x_5)$$

$$d_{33} = m_3 l_{g3}^2 + m_4 l_3^2$$

$$d_{34} = m_4 l_3 l_{g4} \cos(x_5 - x_7)$$

$$c_{31} = (m_3 l_{g3} + m_4 l_3) l_1 \sin(x_1 + x_5)$$

$$c_{32} = (m_3 l_{g3} + m_4 l_3) l_2 \sin(x_3 + x_5)$$

$$c_{33} = m_4 l_3 l_{g4} \sin(x_5 - x_7)$$

$$\phi_3 = -(m_3 l_{g3} + m_4 l_3) g \cos(x_5)$$

$$d_{41} = -m_4 l_1 l_{g4} \cos(x_1 + x_7)$$

$$d_{42} = -m_4 l_2 l_{g4} \cos(x_3 + x_7)$$

$$d_{43} = m_4 l_3 l_{g4} \cos(x_5 - x_7)$$

$$d_{44} = m_4 l_{g4}^2$$

$$c_{41} = m_4 l_1 l_{g4} \sin(x_1 + x_7)$$

$$c_{42} = m_4 l_2 l_{g4} \sin(x_3 + x_7)$$

$$c_{43} = -m_4 l_3 l_{g4} \sin(x_5 - x_7)$$

$$\phi_4 = -m_4 l_{g4} g \cos(x_7)$$

Afin de déterminer le modèle d'état de ce système, on considère le changement de variable suivant :

$$x_1 = \theta_1$$

$$x_3 = \dot{\theta}_1$$

$$\dot{x}_1 = \dot{\theta}_1$$

$$\dot{x}_3 = \ddot{\theta}_1$$

$$x_2 = \theta_2$$

$$x_4 = \dot{\theta}_2$$

$$\dot{x}_2 = \dot{\theta}_2$$

$$\dot{x}_4 = \ddot{\theta}_2$$

$$x_5 = \theta_3$$

$$x_7 = \theta_4$$

$$\dot{x}_5 = \dot{\theta}_3$$

$$\dot{x}_7 = \dot{\theta}_4$$

$$x_6 = \dot{\theta}_3$$

$$x_8 = \dot{\theta}_4$$

$$\dot{x}_6 = \ddot{\theta}_3$$

$$\dot{x}_8 = \ddot{\theta}_4$$

A l'aide du logiciel MATLAB, nous avons déduit les expressions de  $\ddot{\theta}_1$   $\ddot{\theta}_2$   $\ddot{\theta}_3$   $\ddot{\theta}_4$  à partir de ces équations :

$$d_{11}\ddot{\theta}_1 + d_{12}\ddot{\theta}_2 + d_{13}\ddot{\theta}_3 + d_{14}\ddot{\theta}_4 + c_{11}\dot{\theta}_2^2 + c_{12}\dot{\theta}_3^2 + c_{13}\dot{\theta}_4^2 + \phi_1 = \tau_1$$

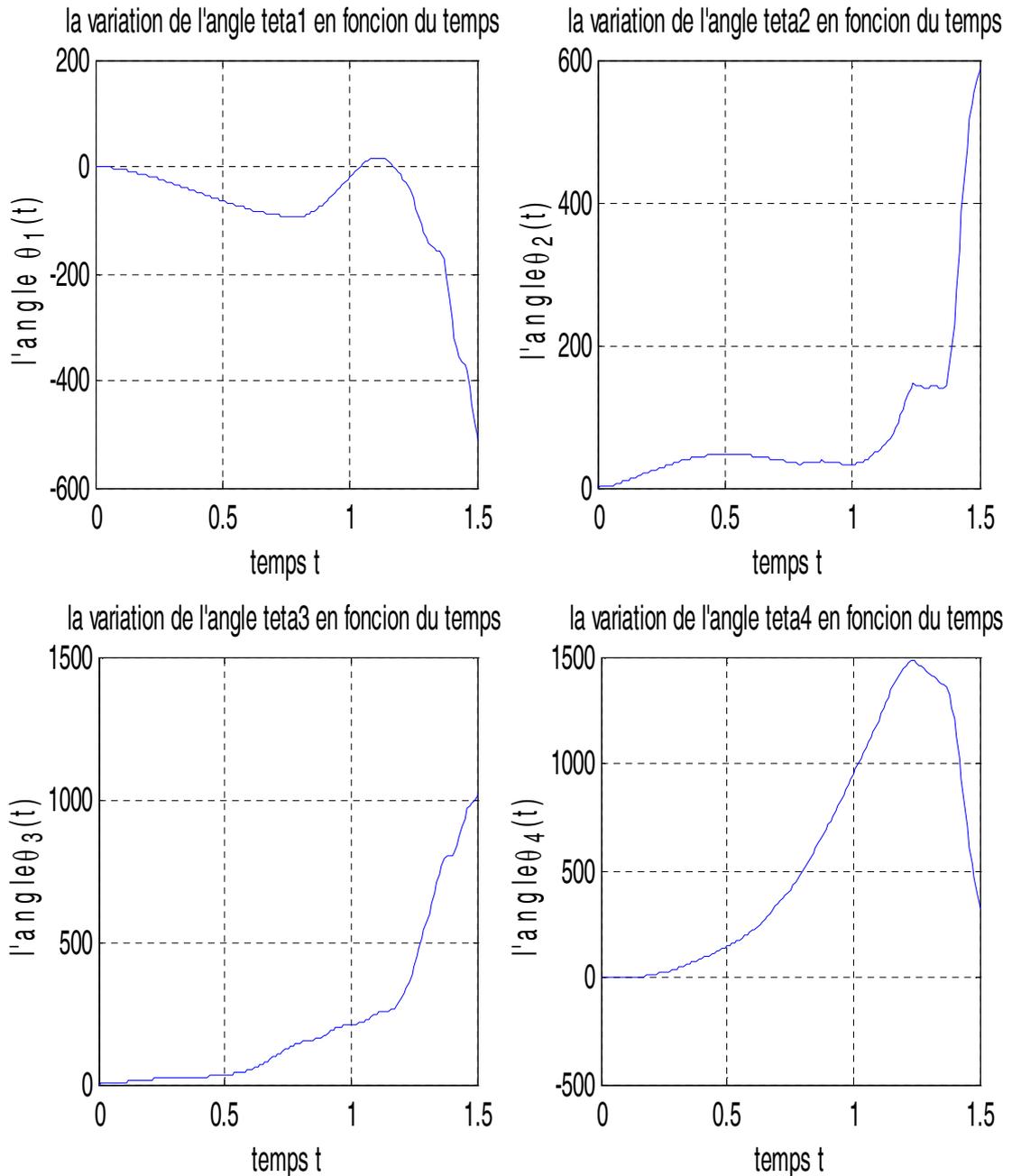
$$d_{21}\ddot{\theta}_1 + d_{22}\ddot{\theta}_2 + d_{23}\ddot{\theta}_3 + d_{24}\ddot{\theta}_4 + c_{21}\dot{\theta}_1^2 + c_{22}\dot{\theta}_3^2 + c_{23}\dot{\theta}_4^2 + \phi_2 = \tau_2$$

$$d_{31}\ddot{\theta}_1 + d_{32}\ddot{\theta}_2 + d_{33}\ddot{\theta}_3 + d_{34}\ddot{\theta}_4 + c_{31}\dot{\theta}_1^2 + c_{32}\dot{\theta}_2^2 + c_{33}\dot{\theta}_4^2 + \phi_3 = \tau_3$$

$$d_{41}\ddot{\theta}_1 + d_{42}\ddot{\theta}_2 + d_{43}\ddot{\theta}_3 + d_{44}\ddot{\theta}_4 + c_{41}\dot{\theta}_1^2 + c_{42}\dot{\theta}_2^2 + c_{43}\dot{\theta}_3^2 + \phi_4 = \tau_4$$

### IV.5 Résultats de la simulation du modèle

Pour simuler le comportement dynamique du robot, nous avons appliqué les couples suivants :  $\tau = \{2 ; 1 ; 1 ; 1\}$  et nous avons relevé les évolutions des différents états. Ces dernières sont données par les figures suivantes.



**Figure IV.3** Variation de  $\theta_1$   $\theta_2$   $\theta_3$   $\theta_4$  en fonction du temps.

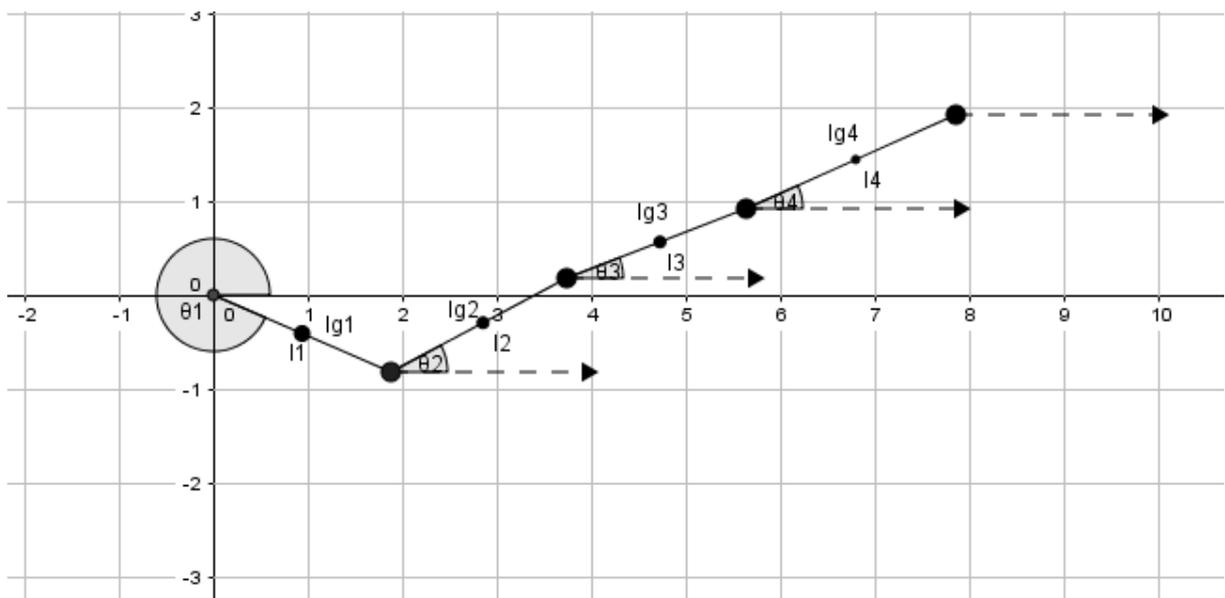
On a choisi quatre temps différents pour dessiner le mouvement du robot nageur selon les valeurs de  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$

	$t = 0 \text{ s}$	$t = 0,25 \text{ s}$	$t = 0,5 \text{ s}$	$t = 0,75 \text{ s}$
$\theta_1$	$0^\circ$	$336.36^\circ$	$295.71^\circ$	$267.03^\circ$
$\theta_2$	$0^\circ$	$28.28^\circ$	$46.78^\circ$	$35.603^\circ$
$\theta_3$	$0^\circ$	$21.04^\circ$	$32.87^\circ$	$126.50^\circ$
$\theta_4$	$0^\circ$	$24.34^\circ$	$143.17^\circ$	$53.36^\circ$

**Tab. IV.1** Les valeurs des angles en degrés à des instants différents.

Les figures suivantes représentent les mouvements (formes) du robot à chaque instant  $t$  :

**Pour  $t = 0,25 \text{ s}$  :**



**Figure IV.4** Mouvement du robot à  $t = 0,25 \text{ s}$ .

Pour  $t = 0,5$  s :

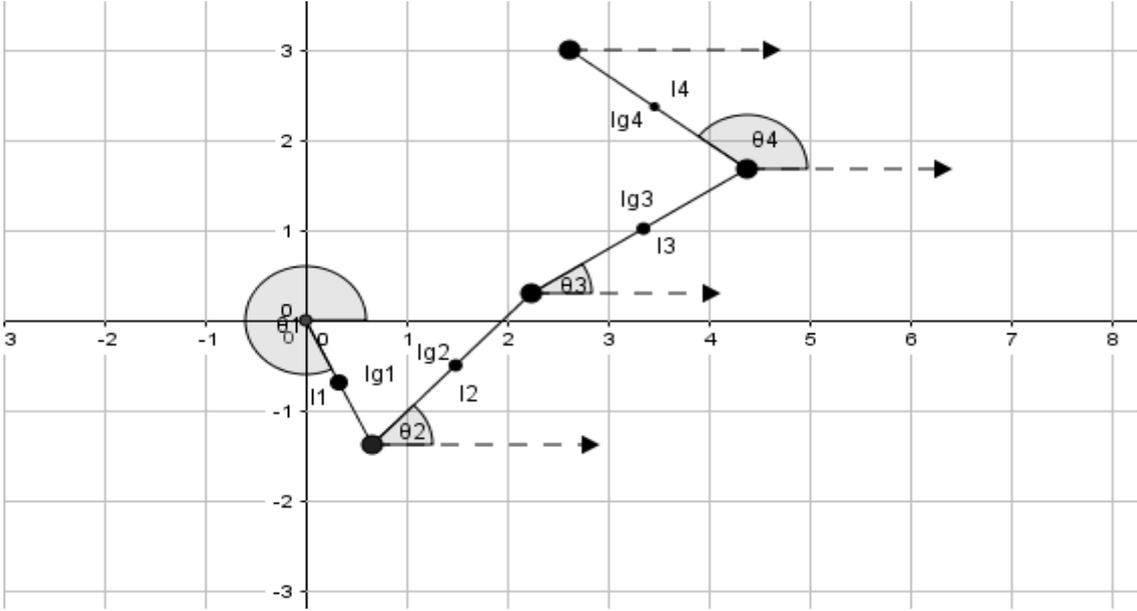


Figure IV.5 Mouvement du robot à  $t = 0,5$  s.

Pour  $t = 0,75$  s :

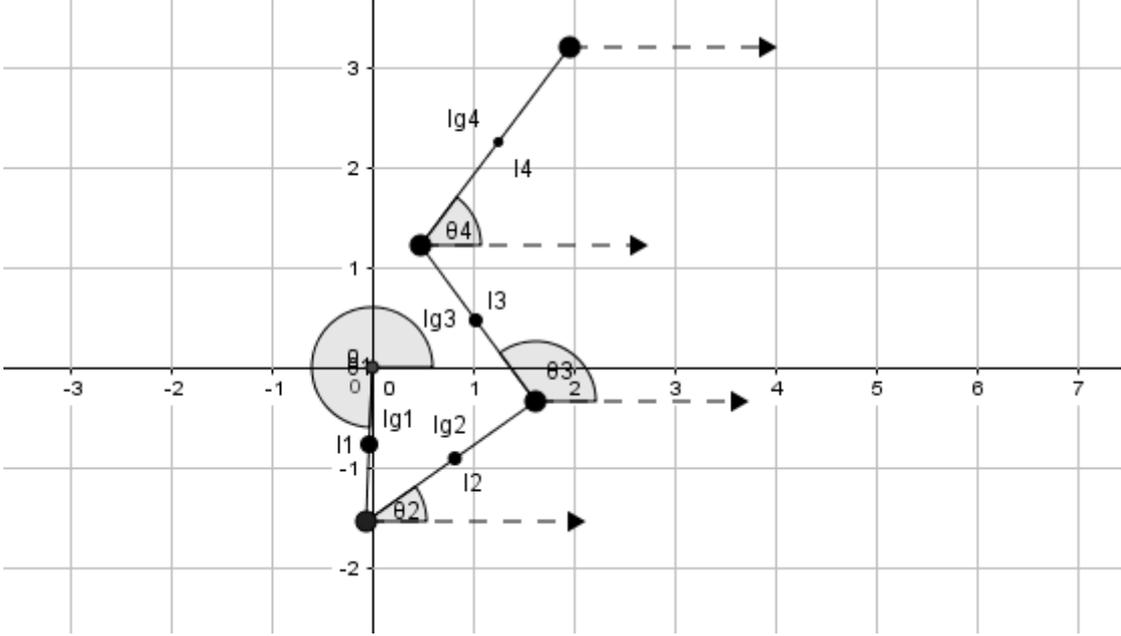


Figure IV.6 Mouvement du robot à  $t = 0,75$  s.

### **Discussion des résultats**

Les résultats obtenus sur le mouvement du robot montrent qu'à  $t = 0,25$  s le robot est tendu. Par contre dans les autres cas, le robot présente certaines formes. Ces dernières lui permettent de faire des mouvements pour nager

D'après la description générale de la nage carangiforme que nous avons fait, on remarque qu'elle est en accord avec les résultats de simulation trouvés. Lorsque le carangiforme nage il fait onduler tout son corps symétriquement par rapport à l'axe de nage avec une amplitude croissante de la tête vers la queue.

### **IV.6 Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation dynamique du robot poisson carangiforme en utilisant le formalisme d'Euler Lagrange.

Dans la première partie, nous avons décrit les caractéristiques du poisson carangiforme, puis, nous avons représenté son mécanisme articulé. Ensuite, dans le but de déterminer le modèle d'état, nous avons modélisé son mouvement qui est basé sur le calcul de l'énergie cinétique, l'énergie potentielle et aussi le calcul de l'équation d'Euler Lagrange.

Pour visualiser le mouvement de ce robot, avec MATLAB, nous avons simulé les résultats obtenus par cette modélisation.

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la modélisation et la simulation des robots nageurs. L'objectif est d'introduire ce type de robot et de modéliser son comportement en utilisant l'équation d'Euler-Lagrange.

Après avoir rappelé des généralités sur la modélisation, nous avons présenté des généralités sur les robots en particulier les robots nageurs. Par la suite, nous avons exposé la méthode de modélisation basée sur les énergies cinétique et potentielle. Il s'agit de l'équation d'Euler-Lagrange. Cette approche est illustrée dans le cas d'un bras manipulateur. La même approche a été utilisée pour modéliser par la suite un robot nageur et simuler son comportement dynamique.

Etude effectuée montre que le formalisme d'Euler-Lagrange constitue une approche intéressante et simple à utiliser pour la modélisation des robots nageurs. Cette approche conduit directement à des équations différentielles qui peuvent être facilement écrites sous forme d'un modèle d'état. Cette forme est facile à simuler et à analyser.

Comme perspective pour notre travail, il serait intéressant de reprendre les calculs que nous avons effectués et de les appliquer sur un micro robot-nageur, en tenant compte des différents phénomènes liés à l'environnement dans lequel il évolue.

## Bibliographie

- [1] P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.P.Richard, F. Rotella, I. Zambettakis., Modélisation et identification des processus, Tome 1, Ediction Technip, Paris, 1992.
- [2] A. Maldi, Modélisation et identification des systèmes, cours 4<sup>ème</sup> année ingénieur Automatique, département automatique, Faculté de Génie Electrique et d'Informatique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009-2010.
- [3] M.Laetitia. Introduction à la robotique [en ligne]. (04/05/2017).  
<https://lmatigno.perso.info.unicaen.fr/L1.Introduction+%C3%A0+la+robotique>.
- [4] Chelly Nizar. Généralités sur les robots manipulateurs[en ligne]. (03/03/17).  
<https://chellynizarblog.files.wordpress.com/2015/.../chapitre-1-système-robotisc3a9.p>.
- [5] Younes Matar, Etude expérimentale de la nage anguilliforme: application à un robot biomimétique, Thèse de doctorat, Université Nantes Angers Le Mans, 2013.
- [6] Jessica Hovnanian, Méthode de Frontières Immergées pour la Mécanique des Fluides. Application à la Simulation de la Nage. Thèse de doctorat, Université BORDEAUX I, 2012.
- [7] Sfakiotakis, M., Lane, D., and Davies, J. B. C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 24, 2 (1999), 237–252.
- [8] Guillaume Gallot, Modélisation Dynamique et Commande d'un robot Anguille. Thèse de doctorat, Université de Nantes et École Centrale de Nantes, 2007.
- [9] Robots sous-marins : une clé pour l'avenir de la recherche marine[en ligne]. (17/03/2017).  
<http://mediathequedelamer.com/actualite/robots-sous-marins-une-cle-pour-lavenir-de-la-recherche-marine/>
- [10] X. Tiantian. Propulsion Characteristics and Visual Servo Control of Scaled-up Helical Microswimmer. Thèse de doctorat, Université de Pierre et Marie Curie, 2014.
- [11] Université de Drexel. Un mini-robot capable de déboucher les artères[en ligne]. (02/04/2017).  
<https://www.google.dz/search?q=www.Chirurgie+un+mini-robot+capable+de+déboucher+les+artères>
- [12] K. Belharet. Navigation prédictive d'un micro-robot magnétique: Instrumentation, commande et validation. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2013.
- [13] M. Garcia. Hydrodynamique de micro-nageurs. Thèse, Université de Grenoble, 2013.

- [14] J.J. Abbott, M. Cosentino Lagomarsino, L.Zhang, L.Dong et B.J. Nelson. How Should Micro-robots swim? The International Journal of Robotics Research, vol. 28, no. 11-12, pages 1434–1447 , 2009.
- [15] Laurent Arcese. Modélisation et commande de micro-robot magnétiquement guidés dans le système cardiovasculaire. Thèse de doctorat, Université d’Orléans, Décembre 2011.
- [16] Philippe COIFFET, LE ROBOTS : Modélisation et Commande, Tome 1, Ediction HERMES, Paris - Londres – Lausanne, 1986.
- [17] Wisama Khalil, Etienne Dombre. Bases de la modélisation et de la commande des robots-manipulateurs[en ligne]. (04/03/17).  
[http://cours-online.gdr-robotique.org/Khalil-Dombre\\_Modelisation/Khalil-Dombre\\_Modelisation.pdf](http://cours-online.gdr-robotique.org/Khalil-Dombre_Modelisation/Khalil-Dombre_Modelisation.pdf)
- [18] Mathieu Porez, Modèle dynamique analytique de la nage tridimensionnelle anguilliforme pour la robotique. Thèse de doctorat, Université de Nantes, Septembre 2007.
- [19] Deniz Korkmaz<sup>1</sup>, Z. Hakan Akpolat<sup>2</sup>, Servet Soyguder<sup>3</sup> and Hasan Alli<sup>3</sup>. Dynamic simulation model of a biomimetic robotic fish with multijoint propulsion mechanism. Transactions of the Institute of Measurement and Control, SAGE. 2015.

## Résumé

L'essentiel de ce travail réalisé dans le cadre du projet de fin d'études intitulé « Modélisation et simulation d'un robot nageur », comprend la modélisation dynamique d'un robot nageur carangiforme en utilisant le formalisme d'Euler Lagrange.

En premier lieu nous avons défini les notions et outils théoriques sur la modélisation, ensuite nous avons abordés des généralités sur les robots manipulateurs et les robots nageurs.

Afin de bien comprendre la méthode d'Euler Lagrange, nous avons modélisé un robot manipulateur à deux articulations et nous l'avons simulé sous MATLAB. Et en dernier lieu nous avons appliqué ce même formalisme sur un robot nageur carangiforme et simulé son comportement.

➤ **Mots clés**

Robot nageur, Robot manipulateur, Micro-robot nageur, Modélisation dynamique, MATLAB.