

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique
Spécialité Automatique et informatique industrielle

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

THEME

**Identification des paramètres d'un pendule inverse-
application sur le banc d'essai du laboratoire
feedback 33-200 .**

Présenter par :

BEZNIA Adel
HAMROUNE Hanane
SEKKAI Narimane

encadre par :

M^r GUENOUNOU.O
M^r KACIMI.M.A

Devant le jury :

M^r LEHOUCHE.H
M^r HEDDAR.H

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier le dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr : GUENOUNOU. O et notre Co-encadreur Mr : KACIMI. Md A, pour leurs précieux conseils et leur aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury Mr LEHOUCHE.H et Mr HEDDAR. H pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons également à remercier tous les enseignants et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à toutes et à tous.

Dédicace

On dédie ce modeste travail :

À nous mères, source éternelle d'inspiration, de motivation et de bénédiction.

À nous pères, maître de passion, de patience et de persévérance.

À nous frères et sœurs.

A nos familles pour leurs encouragements et leurs aides.

À nous amis d'enfances et de toutes circonstances.

Et plus spécialement à mes binômes.

Et à tous ceux qui m'aiment et qui m'ont encouragée

Listes des figures

I. 1 : Exemple du principe de fonctionnement du Segway	3
I. 2 : Le banc d'essais du pendule inversé (Feedback 33-200)	4
I. 3 : Schéma d'un system pendule et chariot.....	6
I. 4 : Schémas équivalent d'un moteur à courant continue	9
I. 5 : transformation tension-force via le moteur électrique	10
II.1 : Organigramme général d'un algorithme génétique	13
II.2 : Structure génétique des individus et Codage	15
II.3 : Sélection par roue de loterie biaisée.....	17
II.4 : Sélection par tournoi (Minimisation).....	17
II.5 : croisement a un site	18
II.6 : croisement a deux sites	19
II.7 : croisement a k-site	19
II.8 : croisement uniforme.....	20
II.9: Principe de la mutation Binaire	20
II.10 : Fonction de teste Lévy	22
II.11 : Evolution de la fitness	23
III.1 : Schéma synoptique de la méthodologie adoptée.....	25
III.2 : Schéma synoptique de l'essai.....	27
III.3: Evolution de la meilleure Fitness (fonction objectif) à travers les générations	28
III.4 : Evolution des deux paramètres (d et ΔJ) à travers les générations	29
III.5: Résultats correspondants à la dernière génération (Apprentissage).....	30
III.6 : Résultats correspondants à la dernière génération (Validation).....	31
III.7 : Banc de données expérimentales pour l'identification du moteur	32
III.8: Evolution de la fitness en fonction des générations	34
III.9: Evolution des paramètres T et J_p en fonction des générations	34
III.10 : Résultats correspondants à la dernière génération (Apprentissage).....	35
III.11 : Résultats correspondants à la dernière génération (Validation).....	36
III.12 : Banc de données expérimentales pour l'identification.....	37
III.13 : Evolution de la fitness en fonction des générations.....	38
III.14: Evolution des paramètres b et M en fonction des générations.....	38
III.15 : Résultats correspondants à la dernière génération	39
III.16 : Comparaison entre les angles réels et les angles du modèle.....	40

Liste des tableaux

II.1 : Paramètre de l'algorithme génétique	22
II.2 : Résultats de l'optimisation par l'AG	23
III.1 : Paramètres de l'algorithme génétique	26
III.2 : Plages de variation d et ΔJ	27
III.3 : Plages de variation J_p et T	33
III.4 : Plages de variation de b et M	37

Liste des matières

Table des matières

Introduction générale	1
1 Généralités sur la pendule inverse	
1.1 Introduction	3
1.2 Intérêt de l'étude du pendule inversé	3
1.3 Description du banc d'essais	4
1.3.1 Principe de fonctionnement du système	4
1.3.2 Capteurs et actionneurs utilisés	5
1.4 Modélisation du pendule inversé	5
1.4.1 Energie cinétique du système	6
1.4.2 Energie potentielle du système	7
1.5 Modèle d'état du système	8
1.6 Simulation du système	9
1.7 relation entre la force et le déplacement	10
1.8 Conclusion	11
Chapitre II : Algorithmes Génétiques	
II.1 Introduction	12
II.2 Algorithmes génétiques (AG)	12
II.3 Mécanismes de fonctionnement des (AGs)	13
II.4 Population initiale	14
II.5 Codage des individus	14
II.5.1 Codage binaire	15
II.5.2 Codage en base n	15
II.5.3 Codage réel	15
II.6 Fonction d'évaluation	16
II.7 Sélection des parents	16
II.7.1 Sélection par la roulette de loterie biaisée	16
II.7.2 Sélection par tournoi	17
II.8 Opérateur génétique	17
II.8.1 Croisement	18
II.8.2 Mutation	20

Liste des matières

II.9 Notion d'élitisme	21
II.10 Critère d'arrêt	21
II.11 Exemple d'application	21
II.12 Conclusion	23
Chapitre III :Identification des Paramètres	
III.1 Introduction	25
III.2 méthodologie d' identification des paramètres	25
III.3 identification des paramètres du pendule	26
III.3.1 description de l'essai pratique	26
III.3.2 modélisation du pendule simple	27
III.3.3 résultat de simulation et discussion	28
III.4 identification des paramètres du moteur	31
III.4.1 description de l'essai pratique	32
III.4.2 modélisation du système	32
III.4.3 résultat de simulation.	33
III.5 identification du coefficient de frottement b et de la masse M du chariot.	36
III.5.1 description de l'expérimentation pratique.	36
III.6 Bilan de l'identification	40
III.6 conclusion	41
Conclusion générale	42

Introduction générale

Introduction générale

Durant le siècle dernier, des applications scientifiques, industrielles et militaires ont motivé l'analyse rigoureuse et la conception de contrôle des systèmes. Ces questions, d'origine pratique, ont vite révélé d'intéressants problèmes théoriques

Parmi ces applications, le pendule inversé a toujours été l'une des problématiques majeures de tout système dont le centre de gravité se trouve au-dessus de son axe de pivotement ou de rotation. On en trouve des exemples d'applications dans de nombreux domaines mais plus particulièrement dans les transports. Ainsi, les trains à grandes vitesses, les Segway et les fusées spatiales représentent tous plus ou moins des pendules inversés. L'exemple le plus simple à observer reste néanmoins le corps humain. Il s'agit en effet d'un triple pendule inversé où les chevilles, genoux et hanches représentent les axes de rotations. De ce fait, les prothèses médicales modernes intègrent aujourd'hui une électronique embarquée afin d'aider le patient à se maintenir en équilibre sans effort.

Dans notre recherche on utilise l'optimisation qui est l'une des branches les plus importantes des mathématiques appliquées, et de nombreuses recherches, à la fois pratiques et théoriques, lui sont consacrées. Il existe deux grandes approches de l'optimisation. L'une est dite déterministe : les algorithmes de recherche utilisent toujours le même cheminement pour arriver à la solution, et on peut donc déterminer à l'avance les étapes de la recherche. L'autre est aléatoire : pour des conditions initiales données, l'algorithme ne suivra pas le même cheminement pour aller vers la solution, et peut même proposer différentes solutions. C'est vers cette seconde approche, que va s'orienter notre travail, et plus particulièrement vers un type bien précis d'algorithme de recherche aléatoire, les algorithmes génétiques.

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation, appartenant à la famille des algorithmes évolutionnaire, fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Leur fonctionnement est extrêmement simple. On part d'une population de solutions potentielle (chromosomes) initiales arbitrairement choisies, on évalue les performances relatives (fitness) qui permet de quantifier sa qualité. Sur la base de ces performances on crée une nouvelle population de solutions potentiels en utilisant

des opérateurs évolutionnaires simple la sélection le croisement et la mutation. On recommence ce cycle jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante (optimale)

Identification couvre à la fois une démarche et un ensemble de techniques dont l'objet est la détermination de modèle de comportement d'un procédé physique à partir de mesures caractéristiques de son fonctionnement dynamique. Ce modèle ne cherche qu'à reproduire au mieux un fonctionnement dynamique dans un contexte donné, sans se préoccuper de la signification physique éventuelle des paramètres dont il dépend. Identifier un procédé, c'est donc déterminer, à partir de mesures expérimentales caractérisant son fonctionnement dynamique, les valeurs des paramètres du modèle le plus simple possible et conduisant à un comportement jugé comparable.

Ce mémoire vise à utiliser un algorithme génétique pour l'identification des paramètres d'un système pendule inverse

Le présent travail est constitué de trois chapitres

Chapitre 1 nous présentons dans ce chapitre un modèle non linéaire d'un système classique : le pendule inverse, par la suite nous élaborons le modèle mathématique de ce dernier en se basant sur le formalisme d'Euler-Lagrange. Ensuite, nous présentons ce système dans l'espace d'état. Enfin, nous présentons les résultats de simulation obtenus à partir du modèle établi.

Chapitre 2 nous présentons dans ce chapitre une description des algorithmes génétiques puis les différentes étapes de l'algorithme simple et leur mécanismes de fonctionnement avec une application de ce dernier

Chapitre 3 le dernier chapitre de ce mémoire présente les notions d'identification et une application du problème d'identification paramétrique d'un pendule inverse ainsi que les résultats des simulations et leurs interprétations

Chapitre I :

Description et modélisation du
pendule inversé

I.1 Introduction

Actuellement, le pendule inversé est au centre de nombreuses recherches dans divers domaines scientifiques. Il est devenu l'un des outils didactiques les plus importants de l'automatique, et pratiquement tous les services universitaires d'automatique sont dotés d'un système pendule inversé. Avec ces différentes formes (simple, double, rotatif..), le pendule inversé permet de modéliser plusieurs autres systèmes rencontrés dans l'industrie et même dans la vie de tous les jours.

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter une description générale du pendule inversé et de son intérêt dans le domaine de l'automatique, avant de procéder au développement de son modèle dynamique en utilisant le formalisme d'Euler-Lagrange. Le modèle ainsi trouvé sera ensuite représenté dans l'espace d'état, ainsi que la modélisation du moteur à courant continu.

I.2 Intérêt de l'étude du pendule inversé

L'étude du pendule inverse est devenu très importante non seulement pour l'industrie, mais aussi pour différentes autre disciplines. L'exemple le plus évident de ce système est l'homme lui-même qui est considéré comme un double pendule inversé, dont les deux axes de rotations sont les chevilles et les hanches qui travaillent sans cesse pour le maintenir debout. L'étude de ce modèle par exemple, est au centre de l'industrie de conception de prothèses et de robotique tout particulièrement les robots humanoïdes [1].

Le principe du pendule inversé a également inspiré de nombreux moyen de transport récents comme le Segway, la gyro-roue... qui est facilement piloter par de simple balancement en avant pour avancer.

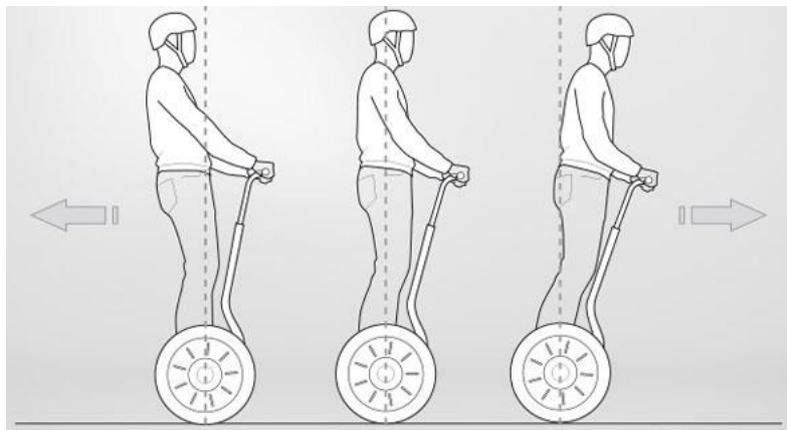


Figure I. 1 : Exemple du principe de fonctionnement du Segway

I.3 Description du banc d'essais

Le banc d'essais du pendule inversé à étudier dans la suite de ce projet est représenté dans la figure I-2. Il est composé d'un chariot se déplaçant sur un rail et d'un pendule libre attaché à ce dernier. Le système chariot-pendule est multi variables fortement couplées, non linéaire, instable et sous actionné également. Le système comporte aussi beaucoup d'effets parasites comme les frottements, les modes élastiques de la courroie, les effets contrecoup des vitesses et la ceinture en plus de la saturation d'entrée. Toutes ces caractéristiques le rendent un excellent support expérimental pour tester les performances et la robustesse des techniques de commande [2]

Le modèle de ce pendule inversé a deux degrés de liberté qui sont représentées par deux coordonnées : x pour le déplacement horizontal du chariot, et Θ pour la rotation du pendule. La Figure I-2 ci-dessous, illustre la structure matérielle de cet ensemble.



Figure I. 2 : Le banc d'essais du pendule inversé (Feedback 33-200)

I.3.1 Principe de fonctionnement du système

Le principe de fonctionnement de ce système est très simple et très intuitive en théorie : quand le pendule penche vers la droite, le chariot doit le rattraper en effectuant un mouvement vers la droite et inversement.

La commande de ce pendule inversé vise d'abord à redresser en position haute le pendule et ensuite à le maintenir dans cette position toute en gardant le chariot au centre du rail. Cependant, la difficulté dans cette tâche reste de régler l'intensité et la forme de la réaction du chariot en fonction de l'angle que le pendule fait avec la verticale.

I.3.2 Capteurs et actionneurs utilisés

Il existe plusieurs capteurs intégrés dans le banc d'essai, certains sont dédiés au chariot tandis que d'autres sont dédiés au pendule :

- Le premier capteur sous forme de roue encodeuse délivre une image de la position du chariot sur son rail de guidage par rapport au centre de ce dernier. Si le chariot est situé à droite du centre, une valeur positive est mesurée, dans le cas contraire la valeur est négative.
- Le second capteur est de même nature que le précédent, lui aussi délivre une image de la position angulaire du pendule reflétant l'angle entre le bras du pendule et la verticale. Si le pendule penche vers la droite, un angle positif est mesuré. Dans le cas contraire, l'angle est négatif.
- En plus de ces deux capteurs, le banc d'essai dispose également de deux capteurs sous forme d'interrupteur (TOR) utilisés comme des fins de course placés aux deux extrémités du rail.

Le système dispose d'un seul actionneur qui est un moteur à courant continu, il est chargé de contrôler le mouvement du chariot [1]. La rotation du moteur est transformée en une translation linéaire par l'intermédiaire de deux poulies et d'une courroie crantée. Le déplacement du chariot dans un sens ou dans l'autre assure par réaction le mouvement du pendule qui est initialement en position basse.

I.4 Modélisation du pendule inversé

Dans cette partie, nous cherchons à obtenir les équations du mouvement du pendule et du chariot. Ces équations différentielles régissant le comportement dynamique du système seront établies à partir du formalisme d'Euler-Lagrange [3][4] basé sur le principe de conservation d'énergie mécanique.

$$L = E_c - E_p \tag{I.1}$$

Avec : L , E_c , E_p correspondent respectivement au lagrangien, l'énergie cinétique, et l'énergie potentielles.

Chapitre I Description et modélisation du pendule inversé

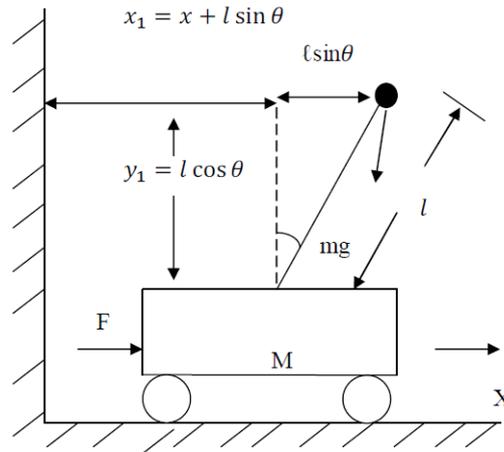


Figure I. 3 : Schéma d'un system pendule et chariot.

I.4.1 Energie cinétique du système

- L'énergie cinétique du chariot est donnée par l'équation suivante :

$$E_{cc} = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 \quad (\text{I.2})$$

- L'énergie cinétique du pendule est exprimée par l'équation suivante:

$$E_{cp} = \frac{1}{2} m v_c^2 + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (\text{I.3})$$

Avec :

\dot{x} : Vitesse linéaire du chariot :

$\dot{\theta}$: Vitesse angulaire du pendule.

J : Moment d'inertie du pendule.

v_c : vitesse du centre de gravité du pendule.

La vitesse v_c est donnée en équation (I.5). Elle est définie par la variation de la position du centre de gravité du pendule notée r_c exprimé par l'équation suivante où \vec{i}, \vec{j} sont des vecteurs unitaires du repère x, y:

$$\vec{r}_c = (x + l \sin \theta) \vec{i} + l \cos \theta \vec{j} \quad (\text{I.4})$$

$$\vec{v}_c = \frac{d\vec{r}_c}{dt} = (\dot{x} + l \dot{\theta} \cos \theta) \vec{i} - l \dot{\theta} \sin \theta \vec{j} \quad (\text{I.5})$$

En substituant l'équation (I.5) dans l'équation (I.3) on trouve :

$$E_{cp} = \frac{1}{2} m(\dot{x}^2 + 2\dot{x}l\dot{\theta}\cos\theta + l^2\dot{\theta}^2\cos^2\theta + l^2\dot{\theta}^2\sin^2\theta) + \frac{1}{2}J\dot{\theta}^2$$

$$E_{cp} = \frac{1}{2} m(\dot{x}^2 + 2\dot{x}l\dot{\theta}\cos\theta + l^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}J\dot{\theta}^2 \quad (\text{I.6})$$

L'énergie cinétique de l'ensemble chariot et pendule est exprimée par :

$$E_c = E_{cc} + E_{cp} \quad (\text{I.7})$$

$$E_c = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + 2\dot{x}l\dot{\theta}\cos\theta + l^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}J\dot{\theta}^2 \quad (\text{I.8})$$

I.4.2 Energie potentielle du système

L'énergie potentielle totale du système correspond à celle créée par la masse m du pendule, on obtient ainsi :

$$E_p = mgl.\cos\theta \quad (\text{I.9})$$

Maintenant que l'expression de l'énergie cinétique E_c et de l'énergie potentielle E_p du système sont établies, on peut alors calculer l'expression du lagrangien L .

$$L = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + 2\dot{x}l\dot{\theta}\cos\theta + l^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}J\dot{\theta}^2 - mgl.\cos\theta \quad (\text{I.10})$$

L'équation générale d'Euler-Lagrange est donnée par :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varepsilon}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varepsilon_j} + \frac{\partial D_f}{\partial \dot{\varepsilon}_j} = F_j \quad (\text{I.11})$$

Où :

$\varepsilon(t)$: Coordonnées généralisées du degré de liberté (x ou θ).

D_f : Désigne l'énergie dissipée par frottement.

F_j : Composante généralisé appliquée.

A partir de l'équation (I.11), la modélisation du système selon la loi générale l'Euler-Lagrange est donnée par :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varepsilon}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varepsilon_j} = F_j - \frac{\partial D_f}{\partial \dot{\varepsilon}_j} \quad (\text{I.12})$$

- **Premier degré de liberté** $\varepsilon_1(t) = x(t)$:

$$D_{f1} = \frac{1}{2}b\dot{x}^2 \text{ et } \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = F - b\dot{x} \quad (\text{I.13})$$

Chapitre I Description et modélisation du pendule inversé

La dérivée partielle du Lagrangien par rapport à \dot{x} et t s'écrit :

$$\frac{d}{dt}(M\dot{x} + m\dot{x} + ml\dot{\theta} \cos\theta) - 0 = F - b\dot{x} \quad (I.14)$$

$$(M + m)\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos\theta - ml\dot{\theta}^2 \sin\theta + b\dot{x} = F \quad (I.15)$$

- **Deuxième degré de liberté** $\varepsilon_2(t) = \theta(t)$:

$$D_{f_2} = \frac{1}{2}d \cdot \dot{\theta}^2 \text{ et } \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = -d\dot{\theta} \quad (I.16)$$

La dérivée partielle du lagrangien suivant $\dot{\theta}$ et t s'écrit :

$$\frac{d}{dt}(ml\dot{x}\cos\theta + ml^2\dot{\theta} + J\dot{\theta}) - (-ml\dot{x}\sin\theta\dot{\theta} + mgl\sin\theta) = -d \cdot \dot{\theta} \quad (I.17)$$

$$(ml^2 + J)\ddot{\theta} + ml\ddot{x}\cos\theta + ml\dot{x}\sin\theta \cdot \dot{\theta} - ml\dot{x} \cdot \dot{\theta} \sin\theta - mgl\sin\theta = -d \cdot \dot{\theta} \quad (I.18)$$

Enfin, le modèle de connaissance de l'ensemble chariot-pendule est donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} h\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos\theta - ml\dot{\theta}^2 \sin\theta = F \\ N\ddot{\theta} + d\dot{\theta} + ml\ddot{x} \cos\theta - mgl \sin\theta = 0 \end{cases} \quad (I.19)$$

Avec :
$$\begin{cases} h = (M + m) \\ N = (ml^2 + J) \end{cases}$$

I.5 Modèle d'état du système chariot-pendule

Le modèle d'état de l'ensemble chariot-pendule est calculé à partir du modèle non linéaire exprimé dans l'équation (I.19) on considérons le vecteur d'état suivant $X=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T=[x \ \dot{x}\theta\dot{\theta}]^T$ contenant: la position et la vitesse linéaire du chariot en plus de la position et de la vitesse du pendule respectivement.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{-bN}{hN - m^2l^2\cos^2x_3}x_2 - \frac{m^2l^2g}{hN - m^2l^2\cos^2x_3}\cos x_3 \sin x_3 + \frac{mld\cos x_3}{hN - m^2l^2\cos^2x_3}x_4 \\ &\quad + \frac{mlN\sin x_3}{hN - m^2l^2\cos^2x_3}x_2^2 + \frac{FN}{hN - m^2l^2\cos^2x_3}x_2^2 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \end{aligned} \quad (I.20)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 &= \frac{mlg}{N}\sin x_3 - \frac{d}{N}x_4 + \frac{mlb\cos x_3}{hN - m^2l^2\cos^2x_3}x_2 - \frac{m^2l^2d\cos^2x_3}{N(hN - m^2l^2\cos^2x_3)}x_4 + \frac{m^3l^3g\cos^2x_3\sin x_3}{N(hN - m^2l^2\cos^2x_3)} \\ &\quad - \frac{m^2l^2\cos x_3 \sin x_3}{N(hN - m^2l^2\cos^2x_3)}x_2^2 - \frac{mlF}{hN - m^2l^2\cos^2x_3}\cos x_3 \end{aligned}$$

$$y_1 = x_1$$

$$y_2 = x_3$$

I.6 Modélisation du moteur à courant continu

Comme le moteur utilisé pour entrainer le chariot est un moteur à courant continu à aimant permanent, le flux inducteur est constant. Le schéma électrique et mécanique équivalent de l'induit est donné par la figure suivante.

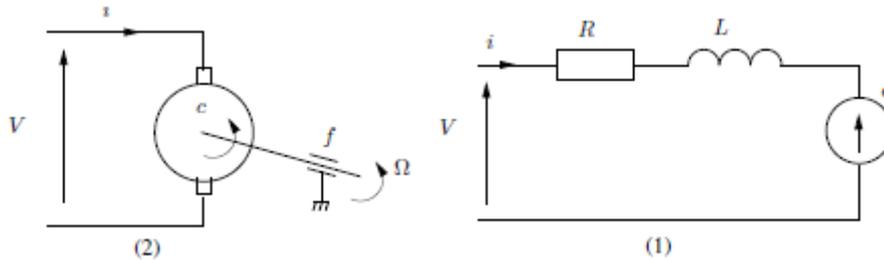


Figure I. 4 : schéma équivalent d'un moteur à courant continue

- Equations électriques

L'équation électrique, liant la tension $V(t)$ aux bornes de l'induit (rotor), le courant d'induit $i(t)$ et la force électromotrice $e(t)$ est

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) = V(t)$$

Où R est la résistance de l'induit du MCC, L son inductance et $e(t)$ la force contre électromotrice, qui est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor :

$$e(t) = k_b \Omega(t)$$

Où k_b est la constante électrique du moteur (constante de la fem) et $\Omega(t)$ la vitesse de rotation.

- Equation mécanique

L'équation mécanique rendant compte des couples agissant sur le rotor s'écrit :

$$J_m \frac{d\Omega(t)}{dt} = c(t) - c_r(t) - f\Omega(t)$$

Où $c(t)$ est le couple moteur, $c_o(t)$ le couple résistant (charge et perturbations), f le coefficient de frottement visqueux et J_m le moment d'inertie du rotor. Par construction, le couple $c(t)$ est proportionnel au courant d'induit $i(t)$:

$$c(t) = k_m i(t)$$

Où k_m est la constante du couple moteur.

- Equation du couple

$$\frac{d\Omega(t)}{dt} = -\frac{f}{J_m} \Omega(t) + \frac{k_m i(t)}{J_m}$$

I.7 Relation entre la force et le déplacement

Dans le cas de notre système, la force F est développée par le moteur à courant continu. Le schéma de la figure ci-dessous illustre la relation existante entre le moteur commandé par la tension $V_c(t)$ et la force F permettant l'entraînement du chariot donc le balancement du pendule.

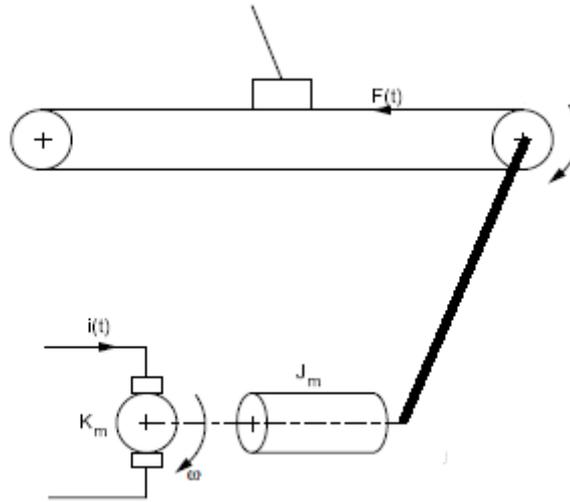


Figure I. 5 : transformation tension-force via le moteur électrique

D'après le deuxième principe de la dynamique, nous avons :

$$(J_m + 2J_p)\dot{\Omega}(t) = C_m(t) - F(t) \cdot r$$

Avec : J_m est le moment d'inertie du moteur et J_p est le moment d'inertie des deux poulies

La vitesse est liée au déplacement du chariot par :

$$\Omega(t) = \frac{\dot{x}(t)}{r}$$

Alors :

$$F(t) = \frac{C_m(t)}{r} - \frac{(J_m + 2J_p)}{r^2} \ddot{x}(t)$$

En remplaçant la relation du couple, on obtient :

$$F(t) = \frac{K_m}{R_a r} \left(V(t) - K_b \frac{\dot{x}(t)}{r} \right) - \frac{f}{r^2} \dot{x}(t) - \frac{(J_m + 2J_p)}{r^2} \ddot{x}(t)$$

D'où :

$$F(t) = \frac{K_m}{R_a r} V(t) - \left[\frac{K_m K_b}{R_a r^2} + \frac{f}{r^2} \right] \dot{x}(t) - \frac{(J_m + 2J_p)}{r^2} \ddot{x}(t) \quad (I.20)$$

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de fonctionnement du pendule inversé et l'intérêt de son étude également avant de procéder à la modélisation du pendule inversé Feedback instrument (33-200) du laboratoire de recherche LTII. La modélisation de ce banc d'essai a été faite en se basant sur le formalisme d'Euler-Lagrange.

A la fin de ce chapitre, nous avons fini par obtenir un modèle théorique de l'ensemble moteur-chariot-pendule correspondant au banc d'essai réel. A présent il reste à déterminer la valeur de ses paramètres. Pour cela nous proposons d'utiliser un algorithme d'optimisation dit algorithme génétique, qui sera le sujet du prochain chapitre.

Chapitre II

Algorithmes génétique

II.1 Introduction

Les algorithmes génétiques sont inspirés directement de la théorie d'évolution énoncée par Charles Darwin en XIX^{ième} siècle [5]. Le but principal de ces algorithmes est de trouver une solution à des problèmes difficiles, des problèmes auxquels on ne connaît pas de méthode exacte pour les résoudre en un temps raisonnable [6]. Ces algorithmes font évoluer une population d'individus (solutions) d'une génération à une autre par un ensemble d'opérateurs dits aussi « génétiques » tout en cherchant à améliorer une fonction objective [7].

Dans ce présent chapitre, nous allons d'abord présenter le mécanisme de fonctionnement de l'algorithme génétique en plus de ses différents opérateurs lui permettant de trouver la solution aux problèmes d'optimisation même les plus difficile d'entre eux. Ensuite, nous allons illustrer l'utilisation de cet algorithme sur une fonction teste afin de montré leurs efficacités.

II.2 Algorithmes génétique (AG)

Les algorithmes génétiques sont très connus en littérature comme des méthodes méta-heuristiques évolutionnaires très puissantes. Ils ont été appliquées avec succès à de multitude de problèmes ce qui fait leur popularité parmi tous les algorithmes d'optimisations. Les algorithmes génétiques utilisent un vocabulaire similaire à celui de la génétique, cependant les processus auxquels ils font référence sont beaucoup plus complexes. En imitant ces processus, les algorithmes génétiques font évaluer un ensemble de solutions à travers les générations successives. Ainsi les AGs ne se basent pas sur un seul individu, mais plutôt sur une population d'individus pour obtenir un résultat se rapprochant de la solution optimale.

Pour un problème d'optimisation donné, chaque individu de la population représente un point de l'espace de recherche ou une solution potentielle. Il est composé d'un ou plusieurs chromosomes eux même constitués de plusieurs gènes qui contiennent les caractères héréditaires de l'individu. A chaque individu est attribué une « fitness » exprimant la qualité de ce dernier et son niveau d'adaptation. Avec cette valeur, les individus participent dans une compétition à la survie. Les individus les plus performants sont sélectionnés pour être des

parents ou des géniteurs qui vont se reproduire pour donner naissance à une nouvelle génération d'individus [8,9].

Cette sélection favorise la préservation des meilleures solutions de la population courante tandis que la reproduction assure une exploration efficace de l'espace de recherche. A travers les opérateurs génétiques de reproductions, les meilleures solutions sélectionnées vont créer une nouvelle génération de solutions plus adaptées au problème, en garantissant que ces dernières contiendront une grande proportion des caractéristiques de meilleures solutions de génération précédente [8].

II.3 Mécanismes de fonctionnement des (AGs)

Le mécanisme de l'algorithme génétique peut être résumé par une suite de procédures successives qui se répètent à chaque génération. Ces procédures sont listées comme suite :

1. Initialisation aléatoire de la première population dite : population initiale de taille N.
2. Décodage et Evaluation de chaque individu de la population.
3. Sélection des parents ou des meilleurs individus de la population courante.
4. Génération de la population enfant à travers les opérateurs génétiques de croisement et mutation.
5. Formulation de la population suivante en combinant les parents et les enfants.
6. Retour à la phase d'évaluation jusqu'à la vérification d'un critère d'arrêt.

Pour plus de clarté, la figure (II.1) ci-après reprend ces mêmes étapes et procédures sous forme d'un organigramme.

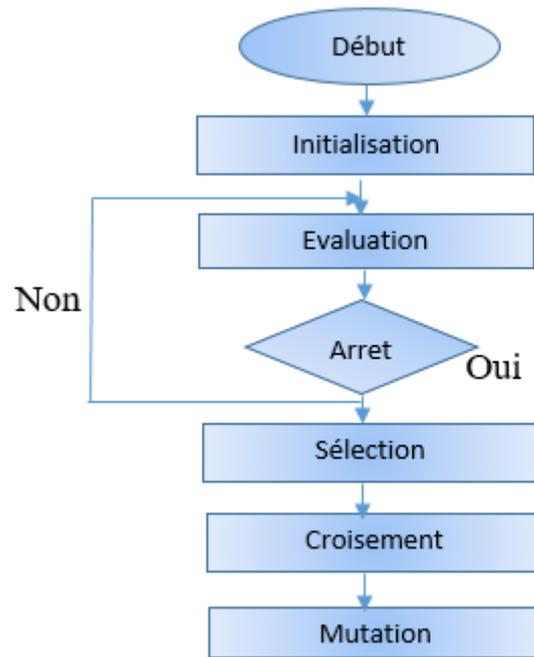


Figure II.1 : Organigramme général d'un algorithme génétique

La mise en œuvre des algorithmes génétiques nécessite donc plusieurs étapes, l'idée fondamentale est que la population produite contient potentiellement la solution ou plutôt la meilleure solution au problème étudié. Cette solution n'est pas exprimée directement car la composition génétique sur laquelle elle repose est dispersée chez plusieurs individus. Ce n'est que par l'association de ces fragments génétiques au cours de la reproduction que la solution se forme. En lors de la reproduction, l'individu associé hérite par hasard d'un des gènes de chacun de ses parent. L'originalité de ce mécanisme de reproduction repose en particulier sur le fait qu'il ne considère pas uniquement la mutation comme source d'évolution, mais aussi et surtout le phénomène de croisement. C'est en croisant les solutions potentielles existant que l'on peut se rapprocher de l'optimum

II.4 Population initiale

La population initiale représente le premier espace de travail de l'algorithme qui servira de base pour les générations futures. Cette population dont la taille est de N est un sous ensemble de tout l'espace des solutions possibles. Bien qu'il existe des heuristiques permettant l'initialisation de cette dernière pour certains problèmes fortement contraints [10], elle est souvent générée aléatoirement car l'usage de ces méthodes peut conduire l'algorithme à converger trop rapidement vers un optimum local [8,11]

Le problème principale dans cette étape est le choix de la taille de la population ce choix est très important car il détermine la diversité de l'espace de recherche. En effet, si la taille de la population est trop petite il y aura une convergence prématurée car l'algorithme n'a pas un grand échantillon de l'espace de recherche. Par contre, une population trop grande induit un cout important en temps d'évaluation de la fonction d'adaptation.

II.5 Codage des individus

La procédure de codage intégrée dans les algorithmes génétique modélise la transcription génotype-phénotype existante réellement dans le monde du vivant. Elle associe à chacun des individus une structure de données. Le codage des individus se fait après la phase de modélisation mathématique du problème à traiter. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétique. Aujourd'hui, on peut constater plusieurs type de codage qui sont utilisé soit indépendamment ou combinés dans le même chromosome.

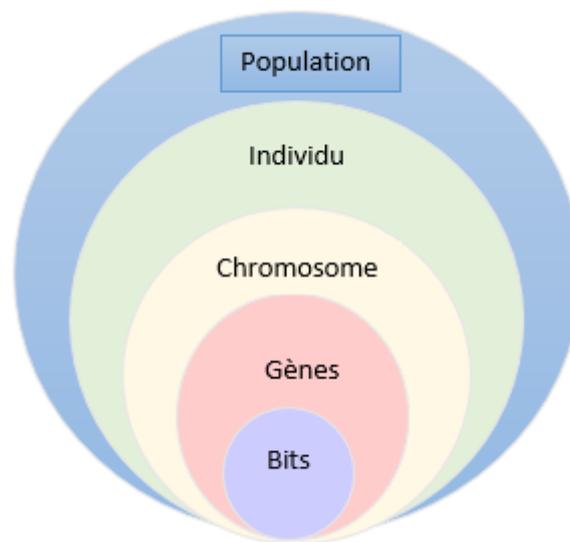


Figure II.2 : Structure génétique des individus et Codage

II.5.1 Codage binaire

Ce codage a été le premier à être utilisé car c'est le plus simple à mettre en œuvre avec un alphabet réduit à deux éléments $\{0,1\}$, rajouter à ça l'existence de fondements théoriques et la facilité de mise en œuvre des opérateurs génétiques [12]

II.5.2 Codage en base n

Le codage en base n utilise n alphabets $\{0, 1, 2, \dots, n-1\}$ pour représenter les différentes valeurs de la variable d'optimisation. Chaque alphabet est pondéré de la même façon que pour le binaire, cela nous permet de représenter toutes les valeurs possibles de la variable sous ce code.

II.5.3 Codage réel

Contrairement au codage binaire, ce codage est plus récent. Dans le codage réel chaque gène est représenté par une suite de valeurs réelles à la place de suite de bits binaire. Ce type de codage peut être très utile notamment dans le cas des espaces de recherche continue et très large. Par ailleurs, ce codage permet d'améliorer la performance de l'algorithme génétique du moment qu'il ne nécessite pas une procédure de décodage. D'autre part il permet de réduire significativement la taille des individus dans la population [12].

II.6 Fonction d'évaluation

La procédure d'évaluation permet d'attribuer une valeur d'adaptation à chaque individu. C'est selon cette valeur que l'algorithme s'assure que les individus performants seront conservés alors que les individus peu adaptés seront progressivement éliminés de la population. La procédure d'évaluation nécessite impérativement la formulation d'une fonction d'évaluation (f), cette fonction est aussi appelée : fonction objective. Le résultat fourni par cette fonction va permettre de sélectionner ou de refuser un individu pour ne garder que les meilleurs parmi toute la population courante [13].

II.7 Sélection des parents

La sélection constitue l'une des fondations des algorithmes génétiques, elle est bien entendu une version artificielle de la sélection naturelle à la survie darwinienne. Elle consiste en principe à choisir les individus les mieux adaptés afin d'avoir une population de solution plus performante capable de faire converger l'algorithme vers l'optimum globale. Cette procédure permet de donner aux meilleurs individus plus de probabilité de contribuer à la formulation de la population des générations suivantes. Plusieurs méthodes de sélection sont utilisées dans les algorithmes génétiques [8].

II.7.1 Sélection par la roulette de loterie biaisée

C'est la méthode de sélection la plus connue et la plus ancienne également dans le domaine des AGs binaire. Chaque chromosome occupe un secteur de roulette dont l'angle est proportionnel à son niveau d'adaptation [14,15]. L'individu considéré comme bon ayant un niveau d'adaptation élevé aura systématiquement un large secteur sur la roulette et donc plus de chance d'être sélectionnée.

Le principe de cette méthode de sélection consiste à associer à chaque individu (H_i) une probabilité (P_i) proportionnelle à sa fitness $f(H_i)$. Ainsi à chaque individu de la population est associé une probabilité de sélection calculée comme :

$$P_i = \frac{f(H_i)}{\sum_{i=1}^n f(H_i)}$$

Tels que S est une fonction régulière et croissante. Chaque individu est alors reproduit avec la probabilité (P_i), certain individu (les bons) seront alors plus reproduit tandis que les autres (les mauvais) sont éliminés

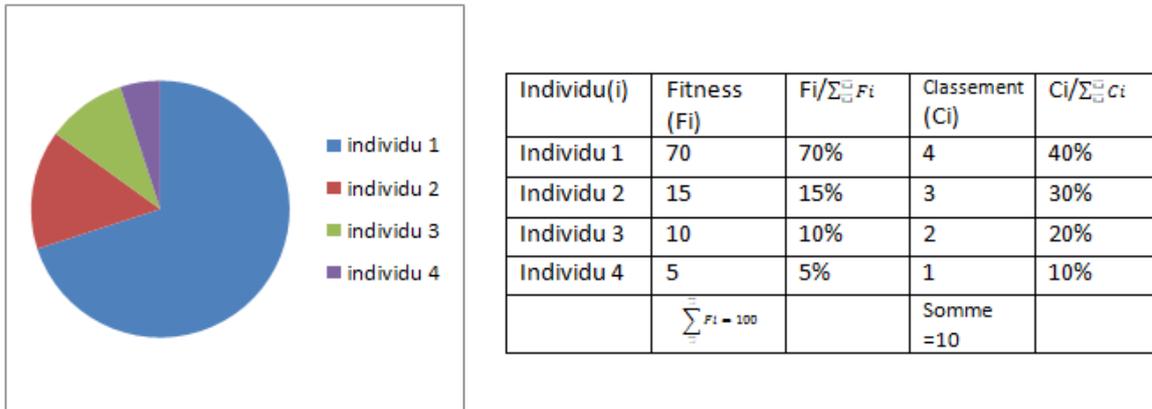


Figure II.3 : Sélection par roue de loterie biaisée

II.7.2 Sélection par tournoi

C'est la méthode la plus facile à mettre en œuvre. Cette technique consiste à choisir aléatoirement un nombre (k) d'individus dans la population, puis parmi tous ces individus elle sélectionne celui qui a la meilleure performance. Les individus qui participent à ce tournoi sont soit remis ou soit retirés complètement de la population selon le choix de l'utilisateur [16,17].

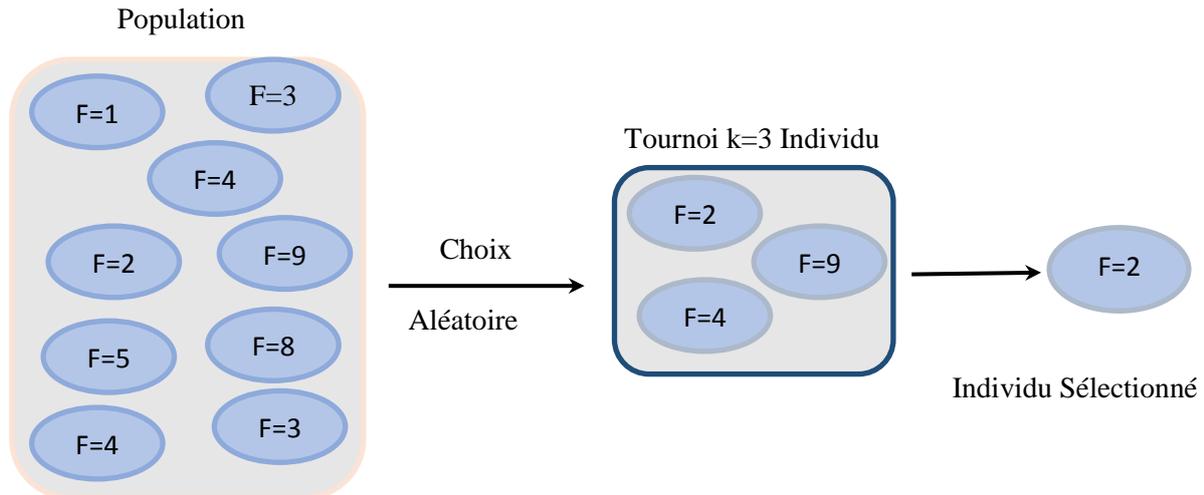


Figure II.4 : Sélection par tournoi (Minimisation)

II.8 Operateur génétique

Pour réaliser l'optimisation, l'algorithme génétique utilise, en plus de la sélection, d'autres opérateurs génétiques qui jouent un rôle prépondérant dans sa réussite à trouver la solution optimale. Ces opérateurs sont appelés : l'opérateur de croisement et de mutation. Si le principe de chacun de ces opérateurs est facilement compréhensible, il est toutefois difficile d'expliquer l'importance isolée de chacun de ces opérateurs dans la réussite de l'algorithme génétique. Cela tient pour partie au fait que chacun de ces opérateurs agit selon divers critères qui lui sont propre (valeur sélective des individus, probabilité d'activation de l'opérateur,...etc.)

II.8.1 Croisement

Le croisement est un opérateur de recombinaison qui opère sur la population de parents sélectionnés. Il consiste en principe à mettre au hasard les individus parents en paire. Puis selon un processus fort simple, il réalise un échange d'information (gènes) entre les chromosomes des deux parents de façon à ce que pour chaque deux parent croisé, deux enfants sont produits [18,19].

a. Croisement en un site (croisement en un seul point)

Le croisement en un point est l'opérateur de croisement le plus simple. Sur tout la longueur (l) du chromosome parent, il sélectionne un point au hasard appelé (locus) suivant lequel il réalise ensuite l'échange de gènes entre les deux parents pour formuler les chromosomes des deux enfants selon la probabilité (Pc) [20].

Le premier enfant prend ainsi la section avant le (locus) du chromosome du premier parent et la section après le locus du second parent pour formuler son propre chromosome. Le contraire se fait pour la formulation du chromosome du second enfant.

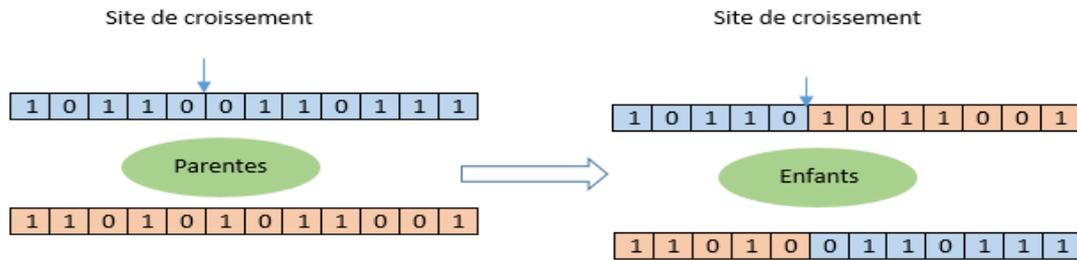


Figure II.5 : croisement a un site

L'idée du croisement en un point présentée précédemment peut être également extrapolée pour le cas de plusieurs locus (points). Dans ce cas on parle de croisement en plusieurs points. On choisit au hasard deux points de croisement ou plus, puis on échange les fragments situés entre ces points en prenant une section entre les points d'un parent et les autres sections en dehors des points de l'autre parent [21].

Exemple

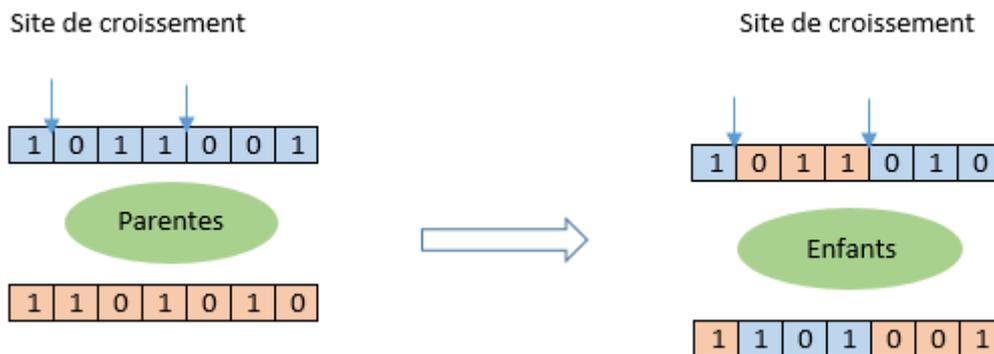


Figure II.6 : croisement a deux sites

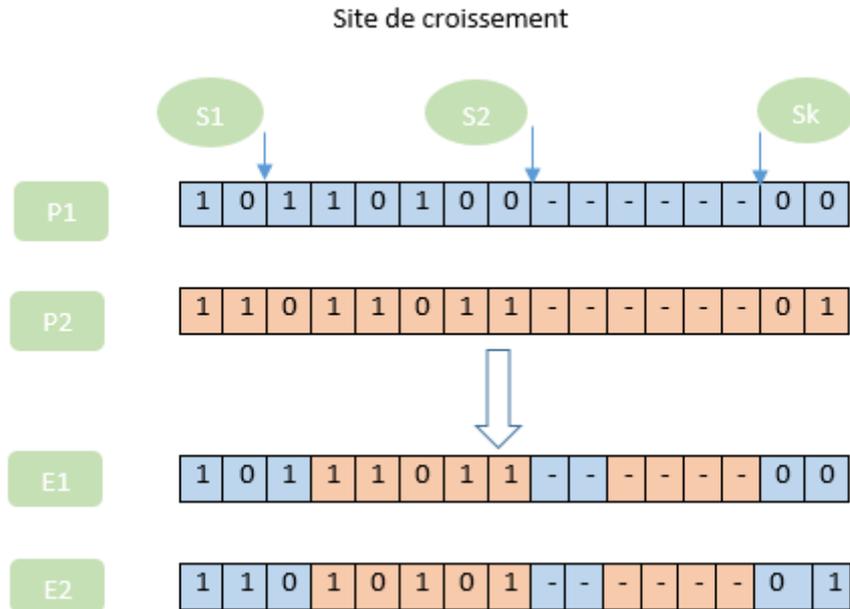


Figure II.7 : croisement a k-site

b. Croisement uniforme

Il consiste à définir de manière aléatoire un masque, c'est-à-dire une chaîne de bits de même longueur que les chromosomes des parents sur lesquels il sera appliqué. Ce masque est destiné à savoir à chaque locus de quels parents le premier enfant devra hériter le gène en question s'y trouvant à cette position. Si face à un locus le masque présente un 0 l'enfant héritera le gène s'y trouvant du parent (1), si par contre le masque présente un 1 il en héritera du parent (2).

La création du second enfant se fait de manière symétrique, si pour un gène donné le masque indique que le premier enfant devra recevoir celui-ci du parent (1) alors le second enfant recevra le gène du parent (2).

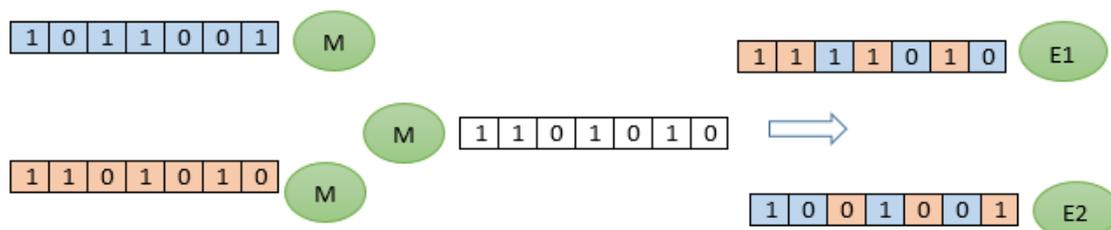


Figure II.8 : croisement uniforme

II.8.2 Mutation

La mutation est un opérateur qui opère sur la population enfant générée après le croisement des parents. Le rôle de cet opérateur est de modifier aléatoirement, avec une certaine probabilité (P_m), la valeur d'une composante de l'individu. Cette modification consiste simplement à inverser un bit dans le chromosome dans le cas du codage binaire [13].

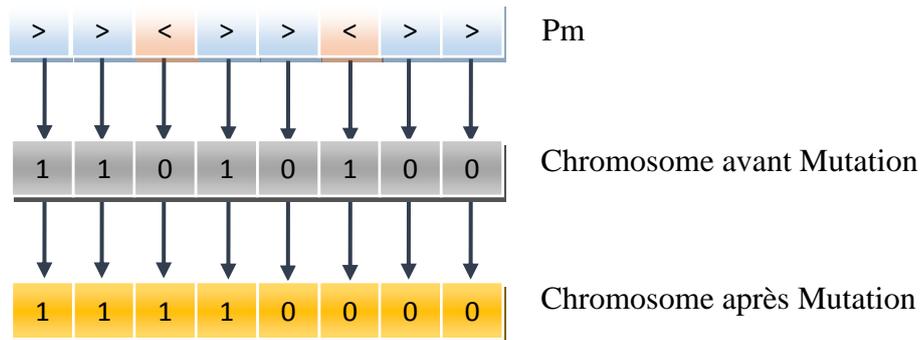


Figure II.9: Principe de la mutation Binaire

La mutation peut pratiquement intervenir sur n'importe quel locus dans le chromosome et le modifier. Par cette modification, la mutation est capable d'introduire de nouvelles matérielles génétiques dans la population, chose que le croisement binaire ne peut pas faire. De ce fait la mutation constitue le mécanisme d'extraction de l'algorithme génétique une fois piégé dans les optimums locaux.

II.9 Notion d'élitisme

Parfois dans le processus d'évolution des algorithmes génétiques, le meilleur individu se perd au cours de l'opérateur de sélection ou de croisement ou de mutation qui modifie sa structure chromosomique. Or, le préserver durant ces opérations pour le réintroduire en suite dans la nouvelle génération, si aucun des nouveaux individus ne présente de meilleures performances que lui, serait beaucoup plus intéressant afin d'améliorer la qualité des solutions de génération en génération. Cette procédure de préservation est appelée élitisme [23].

II.10 Critère d'arrêt

Au cours de son évaluation la population tend à converger, c.-à-d. que les individus tendent à se ressembler de plus en plus. Quand la population s'uniformise en grande partie, les individus fournissent une bonne approximation de l'optimum du problème étudié. Cet optimum peut être l'optimum global du problème ou un optimum local qui toutefois très

proche de l'optimum global. La qualité d'optimum trouvé dépend fortement du critère d'arrêt utilisé pour arrêter l'algorithme. Cette critère est soit le nombre maximum de génération, soit une valeur de fitness minimale ou dans les meilleur cas une convergence vers la meilleure solution.

II.11 Exemple d'application

Dans cette partie nous allons utiliser l'algorithme génétique simple avec le codage binaire pour optimiser une fonction teste bien connue dans la littérature nommée fonction (Lévy N° 13). Cette fonction est donnée par l'équation mathématique suivante et illustrée dans la figure (II.10).

$$f(x) = \sin^2(3\pi x_1) + (x_1 - 1)^2(1 + \sin^2(3\pi x_2)) + (x_2 - 1)^2(1 + \sin^2(3\pi x_1)) \quad (\text{II.1})$$

Cette fonction est définie pour deux variable de décisions notée (x_1, x_2) appartenant à l'intervalle $[-10, 10]$. La fonction a un minimum global défini comme suite :

$$f(x^*) = 0, \quad x^* = (x_1, x_2) = (1, 1) \quad (\text{II.2})$$

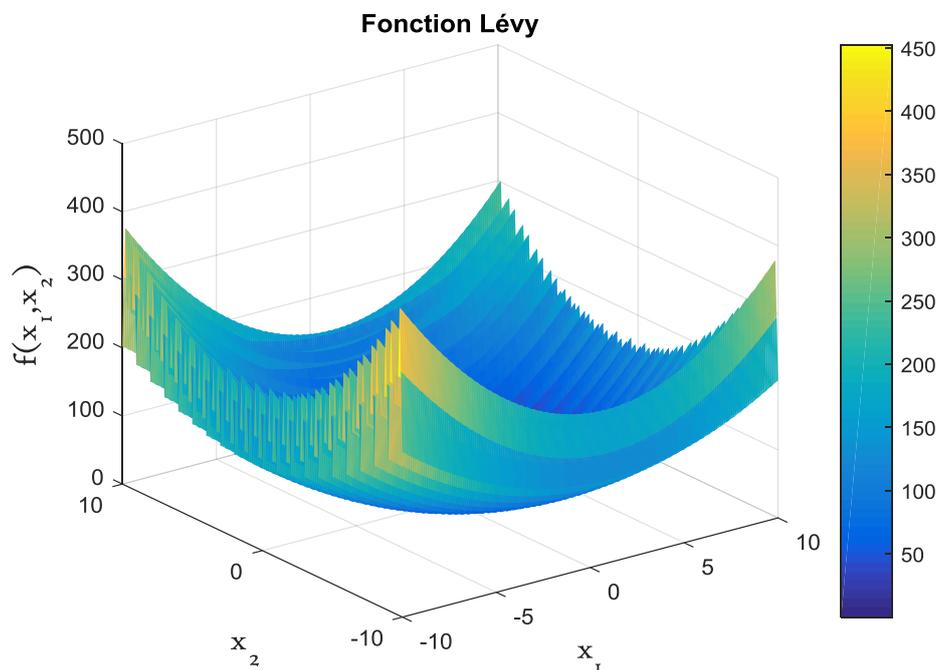


Figure II.10 : Fonction de teste Lévy

La figure II.10, présente la forme de la fonction Lévy dans l'espace de recherche $[-10, 10]$. On peut voir dans cette figure que la fonction comporte plusieurs optimum locaux et semble apriori difficile à optimiser.

Pour l'optimisation de cette fonction nous avons utilisé un algorithme génétique simple avec un codage binaire dont les paramètres sont donnés par le tableau II.1 ci-dessous.

Tableau II.1 : Paramètre de l'algorithme génétique

Taille de la population N	20
Taille du chromosome	20 bit
Taille du code binaire/variable	10bit
Probabilité de croisement	0.85
Probabilité de mutation	0.05
Sélection par Tournoi	
Croisement en un point	
Mutation en Complément à 1	
Nombre de génération	500

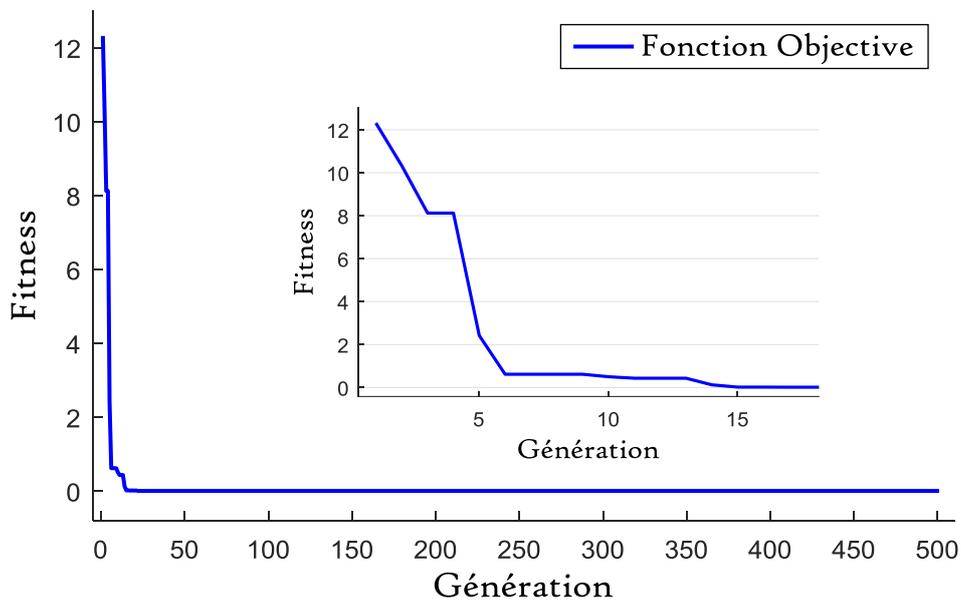


Figure II.11 : Evolution de la fitness

La figure II.11 montre l'évolution du processus d'optimisation de l'algorithme génétique. On peut facilement constater que l'algorithme a réussi l'optimisation de cette fonction et a trouvé un optimum très proche de l'optimum théorique. En effet, à la fin de la simulation, l'algorithme a donné les valeurs suivantes pour les variables de décision x_1 et x_2 :

Tableau II.2 : Résultats de l'optimisation par l'AG

variable	Code binaire	Valeur décimale
x_1	1 0 0 0 1 1 0 0 1 1	1.0068
x_2	1 0 0 0 1 1 0 0 1 1	1.0068

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les mécanismes régissant le fonctionnement des algorithmes génétiques simples à codage binaire. Nous avons aussi exposé en détail les différents opérateurs génétiques qu'utilise cet algorithme pour faire converger une population d'individus tirés au hasard vers l'optimum global du problème étudié. A la fin de ce chapitre, nous avons présenté un exemple illustratif sur l'usage de cet algorithme pour optimiser une fonction mathématique.

L'exemple présenté montre bien que l'algorithme génétique simple est très performant, car il a réussi facilement à trouver l'optimum de la fonction qui est multimodale comportant plusieurs optimum locaux.

[Texte]

Chapitre III :

Identification du pendule feedback 33-200

III.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'identification des paramètres inconnus du pendule inversé considéré dans le cadre ce travail. Le problème d'identification est ainsi formulé comme un problème d'optimisation pour lequel les algorithmes génétiques, étudiés dans le deuxième chapitre, sont utilisés comme méthode de résolution. Il s'agit de manière générale à adapter les paramètres du modèle pour que les courbes théoriques soient les plus proches possibles des courbes obtenus expérimentalement sur le banc d'essais du laboratoire LTII.

Comme nous allons le détailler, juste après, la procédure d'identification est répartie en trois étapes et pour chaque étape deux paramètres sont identifiés.

III.2 Méthodologie d'identification des paramètres

Le problème d'identification du système complet du pendule inversé est décomposé en trois étapes. A chaque étape en isole un ensemble de paramètres à identifier. Par conséquent dans un premier temps nous allons identifier les paramètres liés au pendule ($d, \Delta J$), puis ensuite nous identifierons certains paramètres du moteur qui ne sont pas connus comme le coefficient de frottement du moteur f qui n'est pas donnée par le constructeur et le moment d'inertie des poulies (J_p) qui lie le moteur au chariot. Enfin et en dernier lieu nous allons identifier le coefficient de frottement du chariot (b) en plus de sa masse. La méthodologie de travail adoptée est illustrée par la Figure III.1.

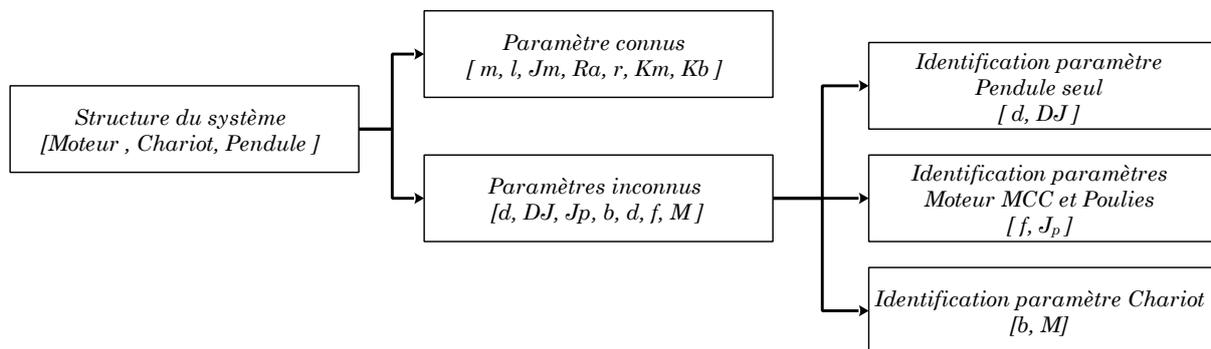


Fig.III.1 –Schéma synoptique de la méthodologie adoptée

Pour la recherche des paramètres manquants, nous avons utilisé un algorithme génétique simple avec un codage binaire dont les paramètres sont donnés par le tableau III.1.

Dans cet algorithme, seule le nombre de générations et les plages de variations des paramètres à optimiser qui changent d'une étape à une autre.

Tableau III.1 : Paramètres de l'algorithme génétique

Taille de la population N	20
Taille du code binaire/variable	20 bits
Probabilité du croisement	0.85
Probabilité de mutation	0.01
Sélection par tournoi	
Croisement en deux points	
Mutation en complément a 1	

Tous les individus de l'algorithme génétique sont soumis à la même fonction objective défini par l'équation (III.1). Cette fonction est utilisée pour toutes les étapes d'identification des différents paramètres. Autrement dit c'est la même fonction que nous utiliserons pour la suite de ce travail.

$$Obj = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |e(k)| \tag{III.1}$$

avec $e(k)$ est l'écart entre les signaux de simulation théoriques est les signaux expérimentaux, k est le numéro de l'échantillon et N le nombre total des échantillons.

III.3 Identification des paramètres du pendule

L'objectif de cette partie est de déterminer les valeurs suivantes : le moment d'inertie de l'axe de rotation du pendule et la barre métallique (ΔJ), et le coefficient de frottement (d) et ce pour une meilleure similitude entre les résultats théoriques et expérimentaux.

III.3.1 Description de l'essai pratique

Dans ce test, nous avons détaché le chariot de la courroie qui le relie au moteur, ensuite nous avons utilisé deux supports pour bloquer le chariot et de l'empêcher de se mouvoir quand le pendule oscille. Après avoir donc préparé le système, nous avons enregistré deux banques de données expérimentales. Pour chaque banque, le pendule est relâché à partir d'un angle initial différent. La Figure III.2 montre le principe de ce test.

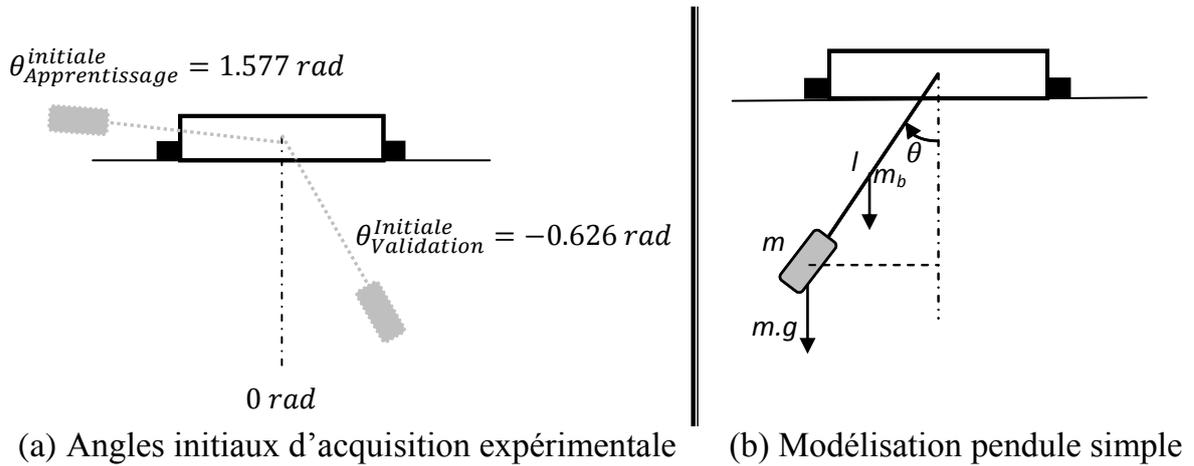


Figure III.2 : Schéma synoptique de l'essai.

III.3.2 Modélisation du pendule simple

Les équations mathématiques qui régissent la dynamique de ce pendule sont obtenues à partir du deuxième principe de la dynamique.

$$J\ddot{\theta} = \sum C = -mgl \sin(\theta) - m_b g \frac{l}{2} \sin(\theta) - d\dot{\theta}$$

$$J\ddot{\theta} + d\dot{\theta} + (m + m_b \frac{l}{2})gl \sin(\theta) = 0$$

J : Représente le moment d'inertie du pendule, ce dernier est constitué d'une masse $m=0.23\text{Kg}$, d'une barre métallique de masse $m_b=0.0365\text{Kg}$, et d'un axe de rotation de masse inconnu. De ce fait on pose :

$$J = J_0 + \Delta J$$

Avec: J_0 représente le moment d'inertie de la masse. ($J_0=m.l^2$) et ΔJ est le moment d'inertie de l'ensemble axe de rotation + barre métallique. Le modèle ainsi obtenu (équation ci-dessus) est implémenté sous Matlab/Simulink pour des fins de simulations. Dans cet essai, l'algorithme génétique est exécuter sur 50 générations, où chaque chromosome code simultanément les deux paramètres inconnus à savoir $[d, \Delta J]$. Ainsi, chaque chromosome a une taille de 40 bits pour coder ces deux paramètres dans les plages de variation suivantes :

Tableau III.2 : Plages de variation d et ΔJ

	d	ΔJ
Minimum	0,0001	0
Maximum	0,0015	0,005

III.3.3 Résultat de simulation et discussion

Après l'exécution de l'algorithme génétique, nous avons obtenu le résultat suivant :

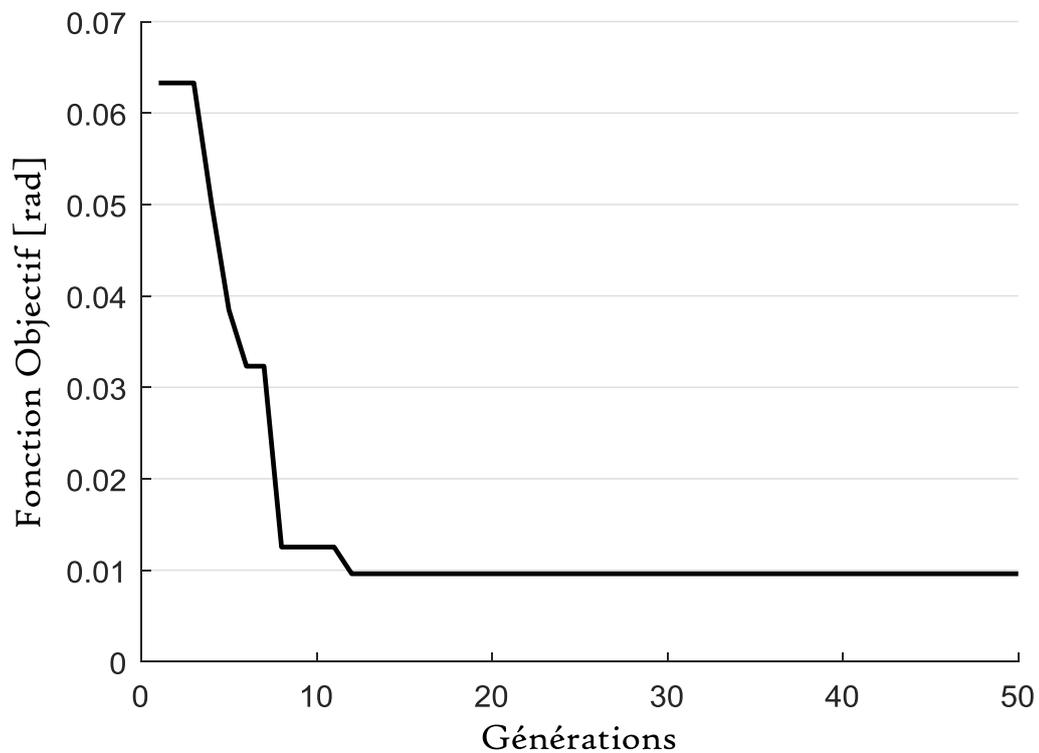


Figure III.3: Evolution de la meilleure Fitness (fonction objectif) à travers les générations

A partir de la Figure III.3, on remarque qu'au début de la simulation l'amplitude de la fitness marque une diminution très significative, elle passe de 0,0632 à 0,012 au bout des 12 premières générations. A partir de la 12^{ème} génération, la fonction fitness commence à se stabiliser autour de la valeur 0.0096 et reste ainsi constante jusqu'à la dernière génération.

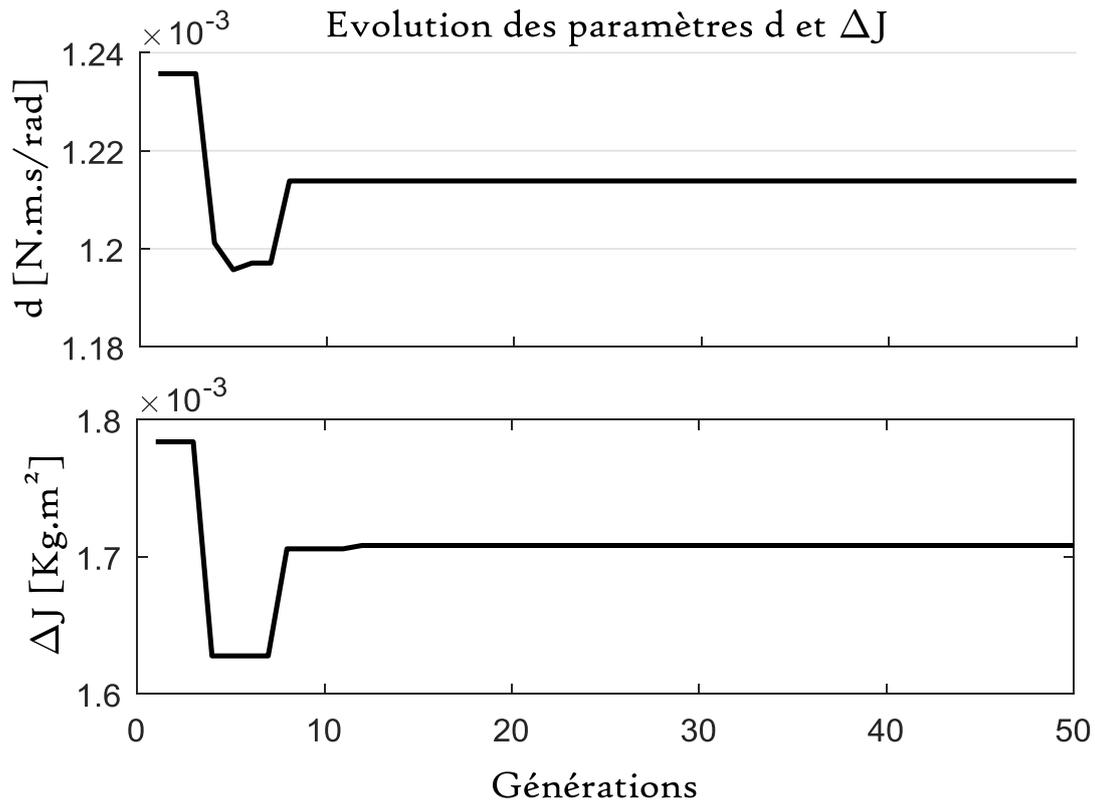


Figure III.4: Evolution des deux paramètres (d et ΔJ) à travers les générations

La Figure III.4 représente l'évolution du coefficient de frottement d et du moment d'inertie ΔJ du pendule. Au bout des 12 premières générations les valeurs des deux paramètres marquent une diminution puis commencent à se stabiliser. On dit que l'algorithme génétique converge vers une valeur optimale pour les deux paramètres. Les valeurs obtenues en fin du processus d'optimisation sont :

- Coefficient de frottement du pendule : $d = 0.00127 \text{ N.m.s/rad}$.
- Moment d'inertie de la barre + l'axe de rotation : $\Delta J = 0.001725 \text{ Kg.m}^2$.

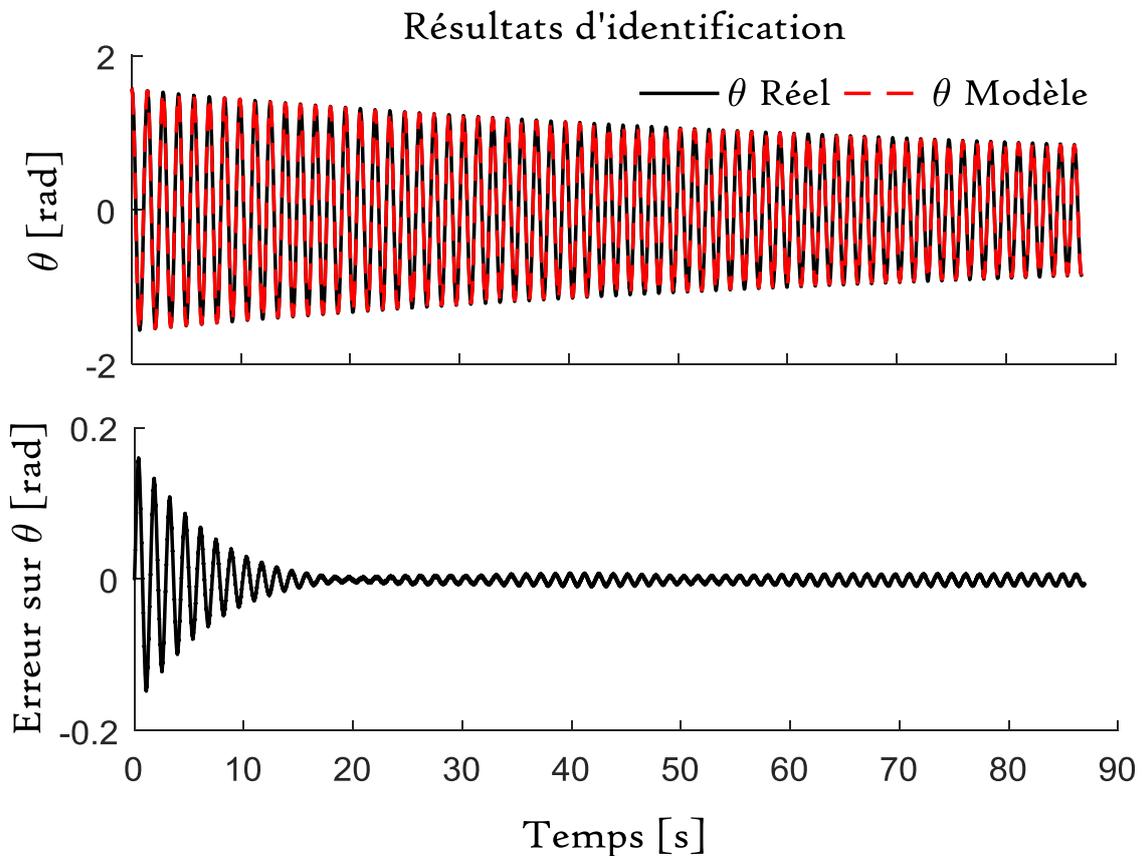


Figure III.5:Résultats correspondants à la dernière génération (Apprentissage)

La Figure III.5 représente les résultats d'identification correspondants à la dernière génération pour l'étape d'apprentissage. Les premiers axes présentent l'évolution de l'angle du modèle théorique (en rouge) et l'évolution de l'angle expérimentale (en noire), tandis que les seconds axes présentent l'évolution de l'erreur en fonction du temps.

On peut facilement constater que les deux courbes d'évolution des angles se superposent, ce qui signifie que le modèle théorique suit le comportement du modèle réel. En plus de ces deux courbes, l'évolution de l'erreur qui est l'écart entre les deux premières courbes est donnée juste en bas. Cette dernière montre également le succès de l'algorithme génétique à trouver les valeurs optimales des deux paramètres du moment que l'erreur diminue au fur et à mesure que le temps augmente jusqu'à finir par converger vers 0.

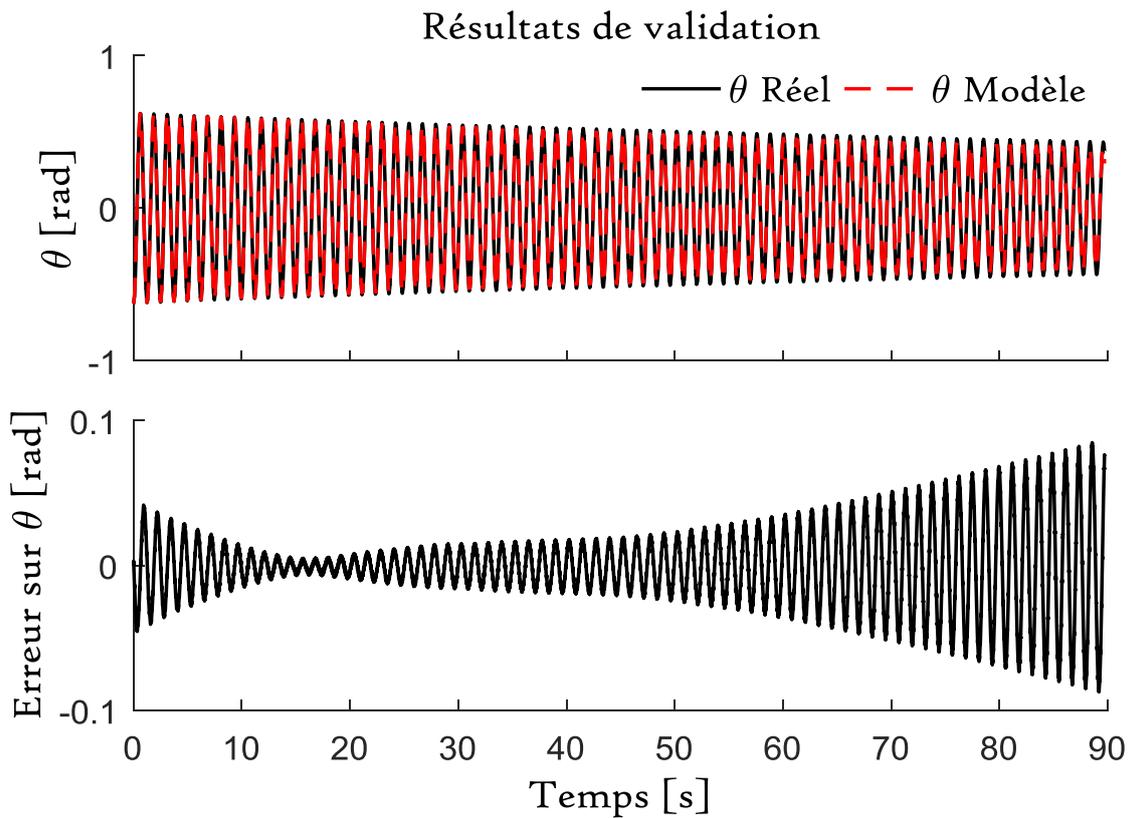


Figure III.6: Résultats correspondants à la dernière génération (Validation)

La Figure III.6 représente les résultats de validation correspondants à la dernière génération. Les courbes d'évolution des angles sont pratiquement similaires. En effet on peut constater que les deux courbes oscillent à la même fréquence ce qui signifie que le coefficient d'inertie est très proche de sa valeur réelle. Cependant, comme le montre l'évolution de l'erreur, le coefficient de frottement marque une légère diminution de l'angle théorique qui est assez minimale par rapport à la durée de la simulation.

Ces deux tests montrent effectivement que les valeurs trouvées par l'algorithme génétique sont très proches de celles réelles, du moment que le modèle théorique arrive à imiter avec une très bonne précision le comportement du système réel.

III.4 Identification des paramètres du moteur

Le moteur utilisé dans le banc d'essai est de type *Crouzet* 82 850 002. Ses principaux paramètres sont résumés dans l'annexe 1. À partir de cette fiche, on peut constater que la valeur du coefficient de frottement visqueux ne figure pas dans la fiche technique établie par

le constructeur. En plus de ce coefficient de frottement, une poulie de rayon $r=27\text{mm}$ est montée sur l'axe du moteur et permet donc à l'aide d'une courroie d'entraîner le chariot quand le moteur est en rotation. Par conséquent, le coefficient d'inertie de la poulie est un autre paramètre inconnu du système.

Pour cela, on propose dans cette partie une optimisation du moment d'inertie de la poulie (J_p) en plus du coefficient de frottement visqueux du moteur f .

III.4.1 Description de l'essai pratique

Pour cet essai on ne s'intéresse qu'à l'identification de la partie moteur+ poulie, pour cela nous avons isolé le moteur du chariot en enlevant la courroie qui les relie. Par la suite nous avons appliqué une tension (un échelon) au moteur et enregistré le déplacement produit. Ainsi nous avons également collecté une banque de donnée expérimentale pour identifier les paramètres inconnus, comme le montre la figure suivante :

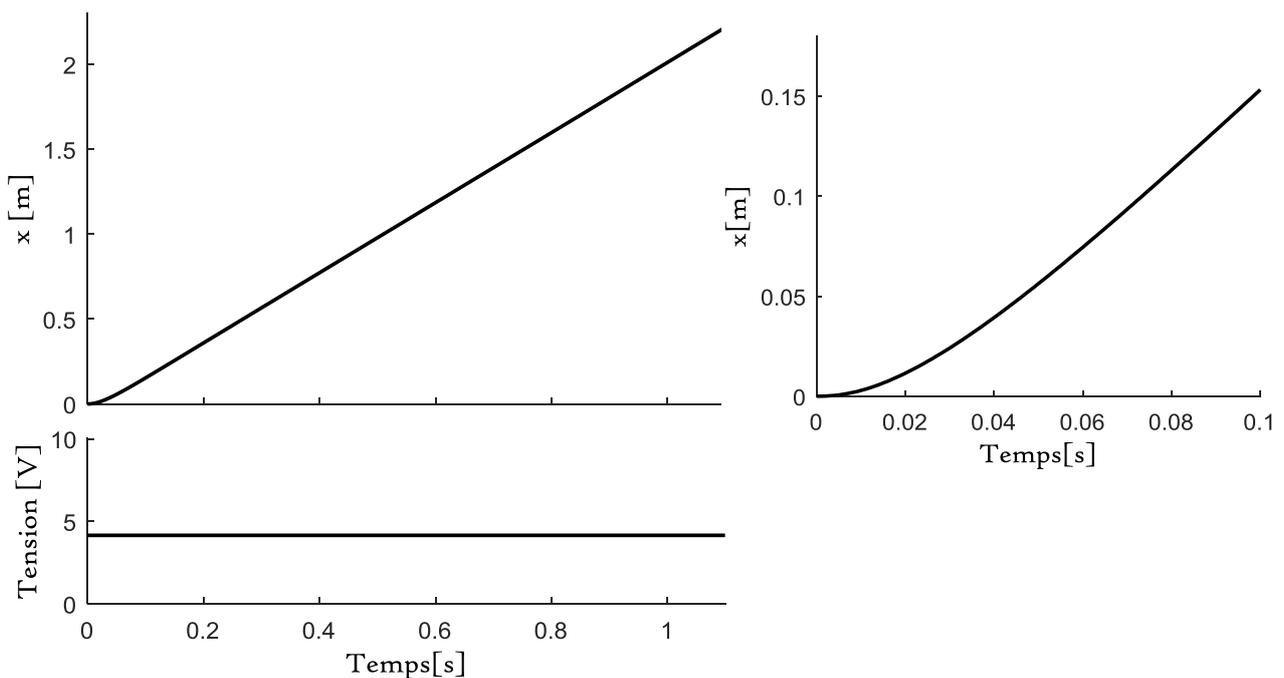


Figure III.7: Banc de données expérimentales pour l'identification du moteur

III.4.2 Modélisation du système

Afin de trouver ces deux paramètres (J_p et f) on a arrangé les équations du moteur sous forme d'une fonction de transfert de premier ordre menue d'un intégrateur de forme :

$$\frac{X(p)}{V(p)} = \frac{\alpha T}{p(1 + Tp)}$$

Avec :

$$\alpha = \frac{K.r}{Ra.(J_m + J_p)}; \quad T = \frac{Ra.(J_m + J_p)}{Ra.f + Km^2}; \quad p \text{ est l'opérateur de Laplace}$$

On remarque que J_p influe sur α c'est-à-dire le régime permanent alors que T caractérise le régime transitoire. Ainsi l'optimisation simultanée de J_p et T semble très logique étant donné que la réponse d'un système à un échelon de tension est souvent caractérisée par ces deux régimes transitoire et permanent. Ainsi donc l'idée est d'implémenter ces deux dernières sous Matlab afin que l'algorithme génétique retrouve leurs valeurs optimales. Ensuite, à partir de ces deux valeurs trouvées on peut remonter vers la valeur du coefficient de frottement par la relation suivante :

$$f = \frac{Ra.(J_m + J_p) - TKm^2}{Ra.T}$$

L'algorithme génétique utilisé durant cette étape est exécuté pour 100 générations. Chaque chromosome code deux paramètres à savoir $[J_p, T]$ dans les intervalles donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.3 : Plages de variation J_p et T

	J_p	T
Minimum	$0,7.10^{-5}$	0
Maximum	$1,5.10^{-5}$	0,1

III.4.3 Résultats de simulation

Après exécution de l'algorithme génétique nous avons obtenu les résultats suivant :

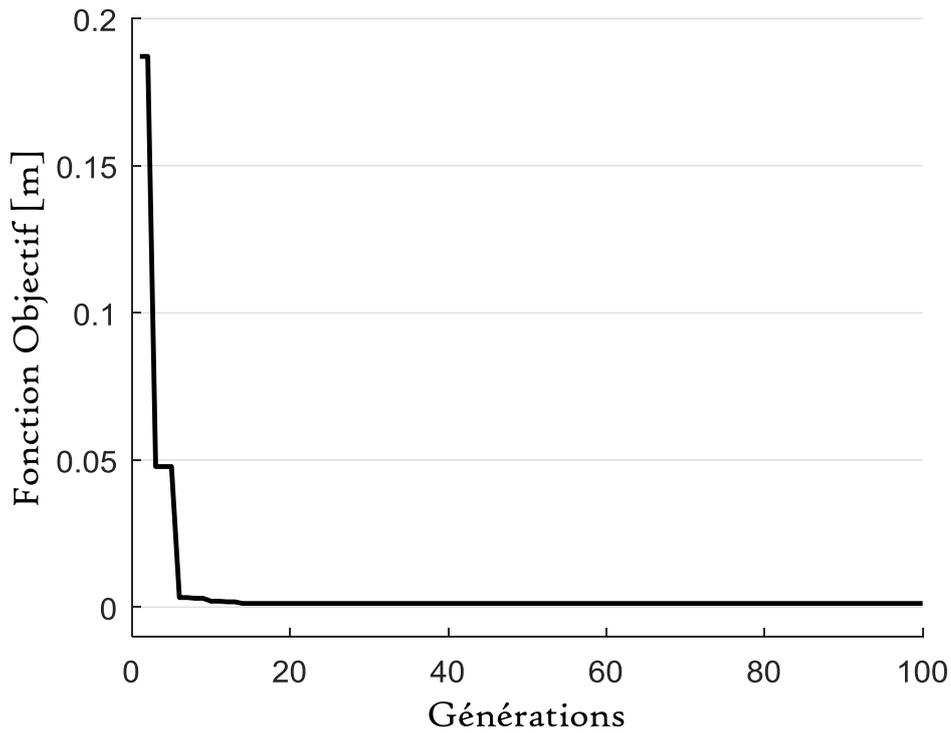


Figure III.8: Evolution de la fitness en fonction des générations

La figure ci-dessus représente l'évolution de la fitness à travers les générations. On remarque qu'au début de la simulation la valeur de la fonction objective marque une diminution très significative, elle passe de 0.1872 à 2.0310^{-3} au bout de quelques générations. A partir de la 10^{ème} génération, la fonction fitness commence à se stabiliser autour de la valeur 12.6610^{-4} et reste ainsi constante jusqu'à la dernière génération. La figure III.9 donne l'évolution des paramètres recherchés.

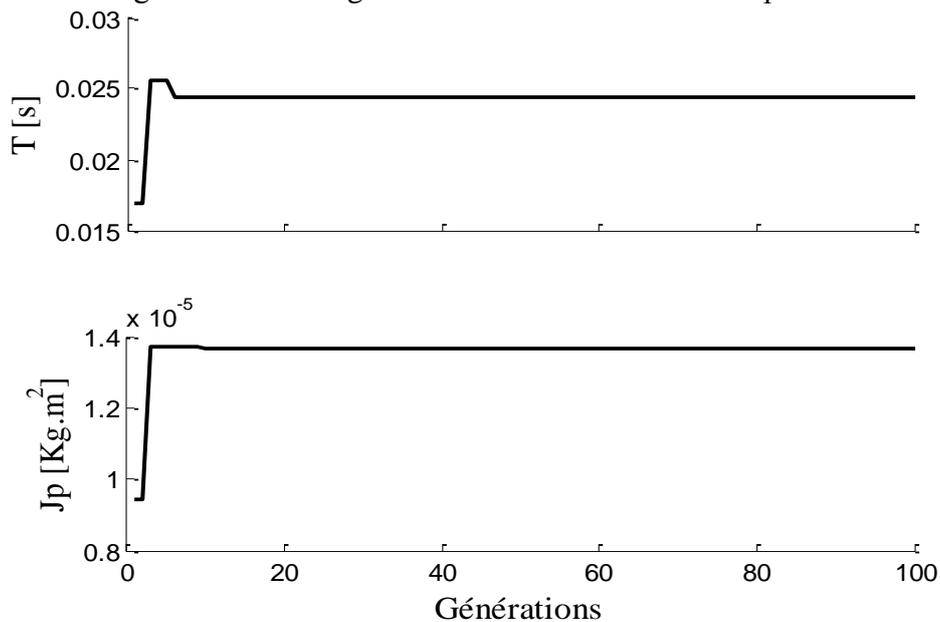


Figure III.9: Evolution des paramètres T et J_p en fonction des générations

Les paramètres correspondants au meilleur chromosome de la dernière génération sont donnés comme suit :

- Coefficient de frottement du Moteur : $f=4,94.10^{-5}\text{N.m.s/rad}$
- Moment d'inertie de la polie : $J_p=1,3639.10^{-5}\text{Kg.m}^2$

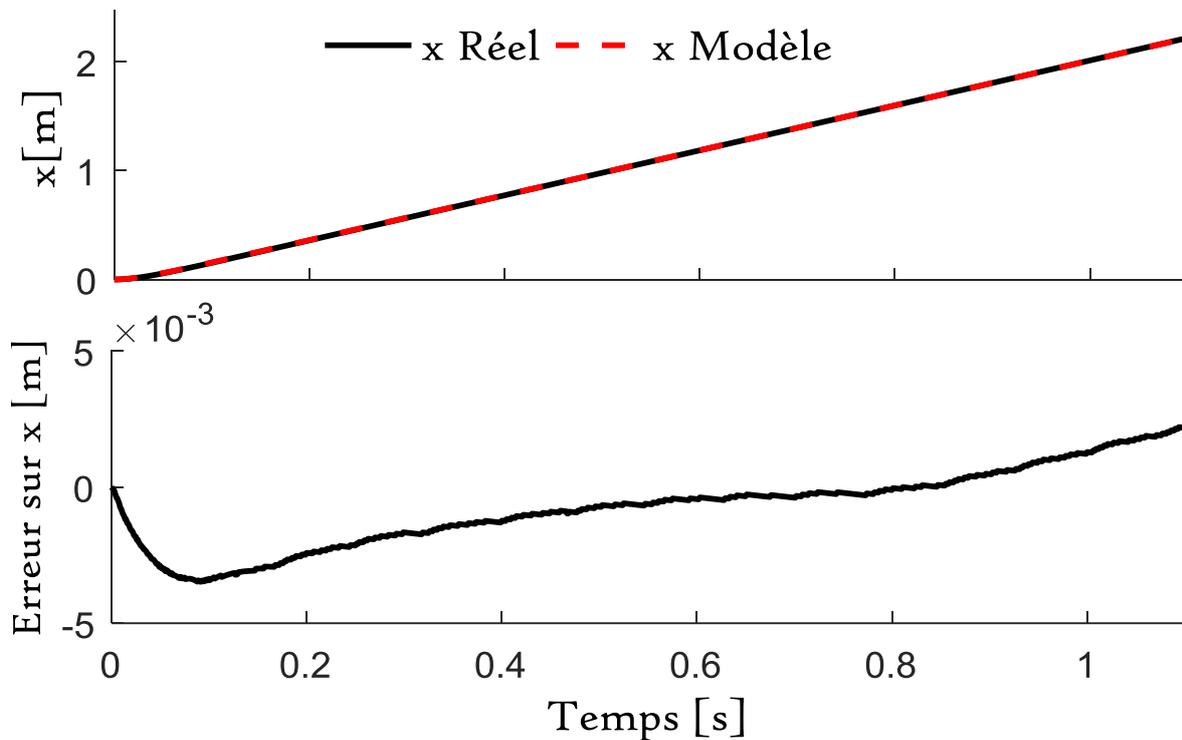


Figure III.10 : Résultats correspondants à la dernière génération (Apprentissage)

La Figure III.10 représente les résultats d'identification correspondants à la dernière génération, la première allure comporte deux courbes, la première en noir représente le signal de déplacement $x(t)$ obtenu à partir de l'essai pratique sur le moteur et la deuxième en rouge représente le signal de déplacement $x(t)$ obtenu lors de la simulation du modèle. On remarque que les deux courbes sont pratiquement superposées avec une erreur maximale inférieure à 5mm. Pour vérifier si les valeurs obtenues de J_p et f sont très proches des valeurs réelles, nous avons appliqué une tension d'amplitude différente de celle utilisée pour l'apprentissage, et les résultats ainsi obtenus sont illustrés par la Figure III.11. Là aussi les résultats sont satisfaisants.

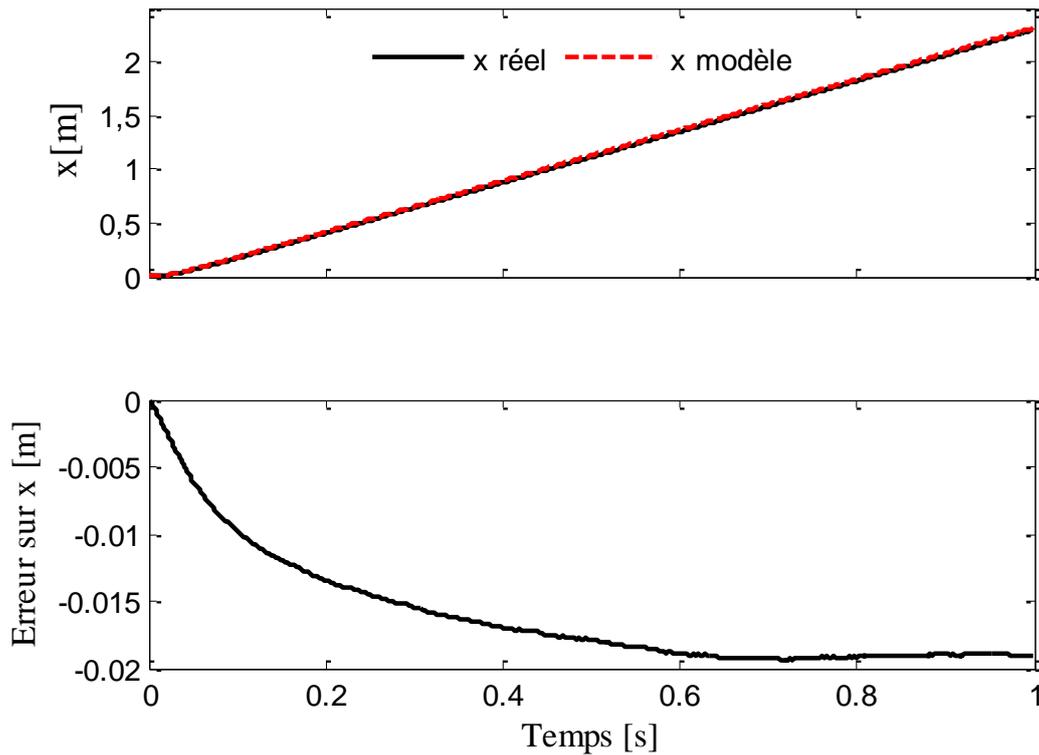


Figure III.11 : Résultats correspondants à la dernière génération (Validation)

III.5 Identification du coefficient de frottement b et de la masse M du chariot

L'objectif de cet essai est de déterminer les valeurs du coefficient de frottement b et de la masse M du chariot.

III.5.1 Description de l'expérimentation pratique

Dans cet essai le pendule est complètement connecté comme il a été réceptionné initialement. Ensuite, nous avons appliqué une tension au moteur et au même temps nous avons enregistré le déplacement du chariot $x(t)$. Un algorithme génétique est alors appliqué pour optimiser les deux paramètres b et M de telle sorte que la courbe théorique du déplacement soit la plus proche possible de celle obtenue expérimentalement. La forme de la tension appliquée aux bornes du moteur et le déplacement enregistré du chariot sont donnés par la Figure III.12.

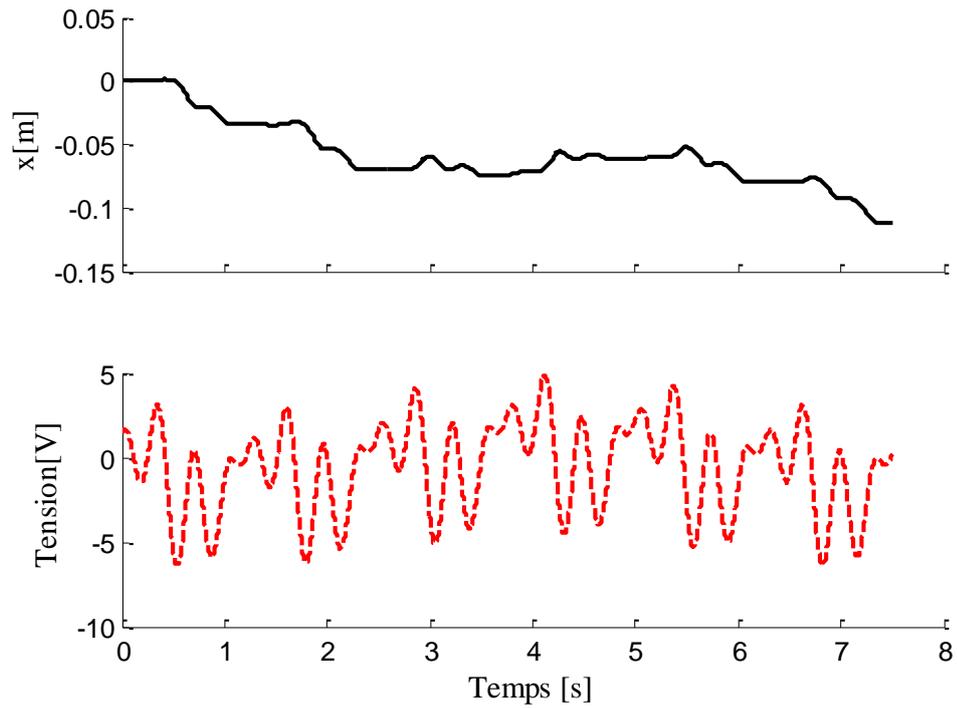


Figure III.12 : Banc de données expérimentales pour l'identification

Les plages de variations des deux paramètres sont données par le Tableau III.4

Tableau III.4: Plages de variation de b et M

	b	M
Minimum	5	1
Maximum	30	1,2

Les résultats obtenus sont résumés par les Figure III.13 à III.15.

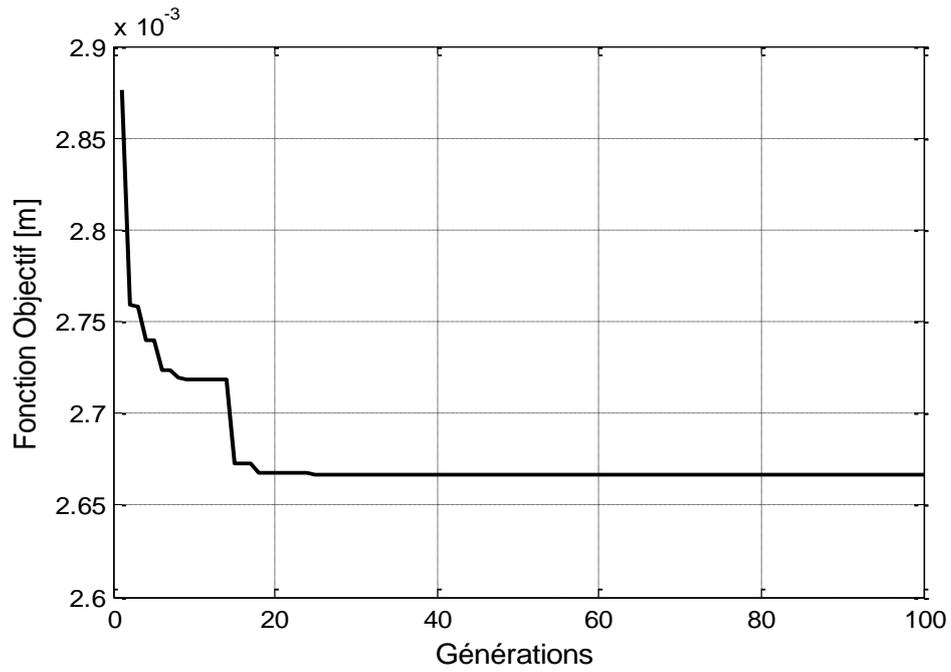


Figure III.13: Evolution de la fitness en fonction des générations

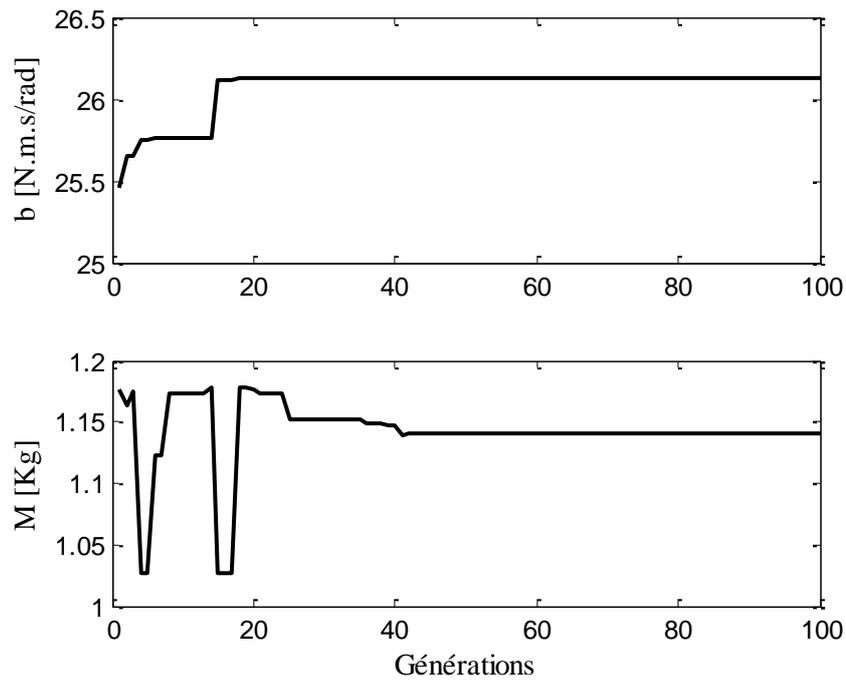


Figure III.14: Evolution des paramètres b et M en fonction des générations

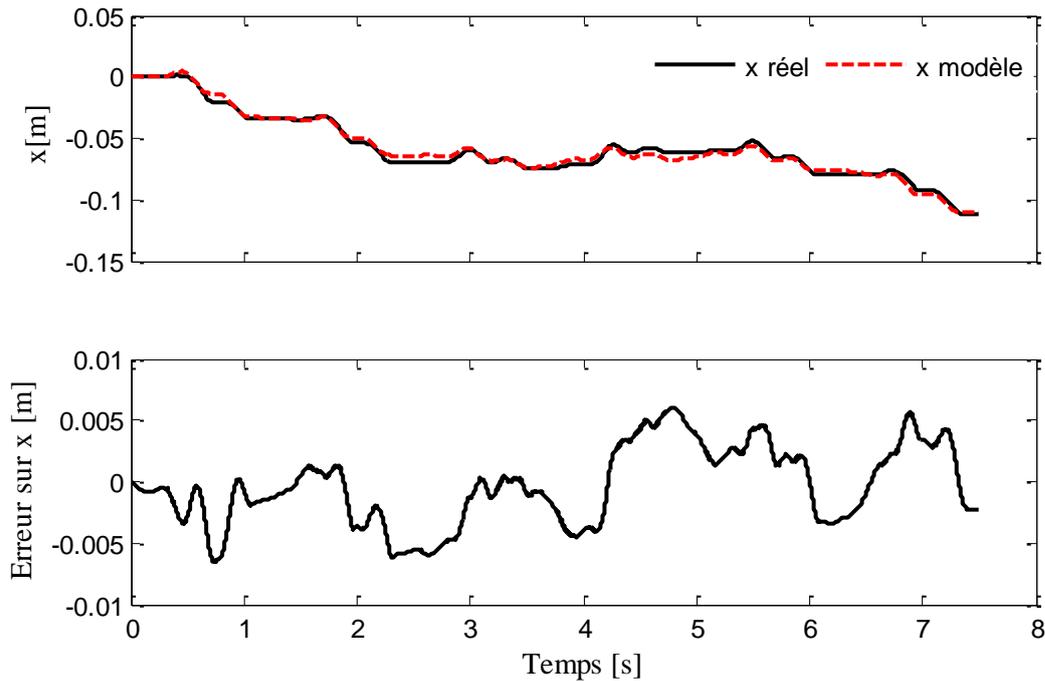


Figure III.15 : Résultats correspondants à la dernière génération

La Figure III.13 illustre l'évolution de la fonction objective au cours des générations. Nous constatons la même évolution que les résultats précédents (Figures III.3 et III.8), soit une diminution rapide au cours des premières générations avant de se stabiliser à sa valeur finale. Ces variations de la fonction objective sont en étroite corrélation avec les variations des valeurs des paramètres recherchés (Figure III.14). La Figure III.15 donne les déplacements réels et théoriques correspondants au meilleur chromosome de la dernière génération. On remarque que les deux courbes sont pratiquement superposées avec une erreur maximale inférieure à 5mm pour un déplacement supérieur à 10cm.

Les paramètres correspondants au meilleur chromosome de la dernière génération sont donnés comme suit :

- Coefficient de frottement du chariot : $b = 26.1339 \text{ N.s/m}$.
- Masse du chariot : $M = 1.1408 \text{ Kg}$.

Pour ces valeurs obtenues, nous avons effectué un deuxième essai avec la même tension d'entrée de la Figure III.12 et nous avons enregistré les balancements du pendule $\theta(t)$. La Figure III. 16, donne la courbe expérimentale de $\theta(t)$, ainsi obtenue, et celle simulée à partir du modèle complet du pendule (Chariot+pendule+Moteur).

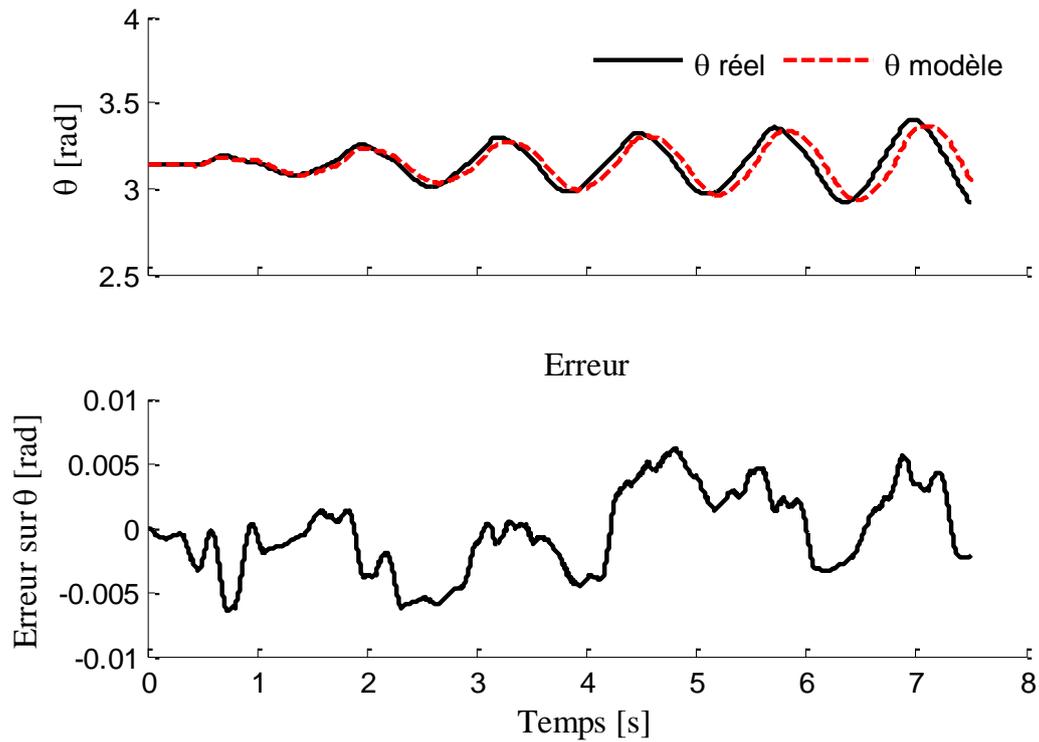


Figure III.16 : Comparaison entre les angles réels et les angles du modèle.

Là aussi les résultats sont appréciables car bien que durant la dernière étape d'optimisation seul le déplacement du chariot a été considéré et optimisé, le modèle théorique est capable de reproduire le balancement du pendule avec une erreur maximale inférieure à 0.0061 rad.

III.6 Bilan de l'identification

Le tableau suivant donne un résumé de l'ensemble des résultats obtenus au cours de ce projet, il permet de lister tous les paramètres du système avec leurs valeurs respectives permettant d'approximer au mieux le système réel.

Essai	Partie étudié	Paramètres		Valeurs	
1	Pendule Simple	Donnés	m	Masse de pendule	0.23Kg
			l	Longueur du pendule	0.385 m
			g	Intensité de la pesanteur	9.81 m.s ⁻²
		Identifiés	d	Coefficient de frottement	0,0012N.m.s/rad
			ΔJ	Coefficients d'inertie de la barre + axe de rotation	0,001725 Kg.m²
2	Moteur - Poulies	Donnés	Ra	Résistance du rotor	2.5 Ω
			Km	Constante mécanique	0.05
			Kb	Constante électrique	0.05
			Jm	Moment d'inertie du moteur	1,4 10 ⁻⁵ Kg.m ²
		Identifiés	f	Coefficient de frottement visqueux	4,94.10⁻⁵ N.m.s/rad
Jp	Moment d'inertie de la poulie		1,3639.10⁻⁵ Kg.m²		
3	Chariot-Moteur	Identifiés	M	Masse du chariot	1,1408 Kg
			b	Coefficient du frottement	26,1339N.s/m.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une procédure d'identification répartie en trois étapes pour identifier correctement les paramètres du système pendule inversé feedback instrument 33-200 du laboratoire LTII.

Ces étapes sont toutes basées principalement sur l'usage de l'algorithme génétique, et les résultats obtenus pour chaque étape sont très acceptables. Ainsi le modèle mathématique global élaboré et ses paramètres identifiés permettent de reproduire avec une bonne précision le déplacement du chariot et les oscillations du pendule.

Conclusion

Conclusion

Le travail abordé dans ce mémoire est porté sur l'identification des paramètres du pendule inverse du banc d'essai disponible au laboratoire LTII. L'intérêt de cette identification et d'avoir les valeurs exactes de chacun de ces paramètres qui influent directement sur sa dynamique réelle. D'autre part ce travail vise à exprimer la force appliquée en fonction de la tension aux bornes du moteur, car en pratique cette dernière n'est pas directement accessible, comme souvent considéré dans pas mal de travaux.

Dans un premier temps, on s'intéressé à la théorie, alors nous nous somme amené à exploiter les équations mathématiques et les relations physiques qui régissent le comportement dynamique du système pendule-chariot par la suite nous avons introduit le moteur à courant continu qui est la source du mouvement du chariot. L'objectif de cette approche théorique est de se familiariser avec problème du pendule inversé.

Ensuite nous nous sommes intéressés à l'algorithme génétique comme étant une méthode de résolution utilisée dans ce travail. Au début, nous avons donné un aperçu sur le fonctionnement de cet algorithme et les différents operateurs génétiques (sélection, croisement, mutation) avant de terminer par un exemple illustratif d'optimisation d'une fonction benchmark.

Enfin, nous avons abordé le problème d'identification des paramètres du pendule inversé par l'algorithme génétique. A cette fin, nous avons proposé une démarche consistant à subdiviser la recherche de ces paramètres en 3 étapes distinguées. Chaque étape vise à isoler un ensemble de paramètres à identifier à fin d'éliminer au mieux les interactions et les dépendances qui peuvent existées et de mettre en défaut le processus d'identification.

Les résultats obtenus à la fin de ce travail, sont très satisfaisants du moment que le modèle théorique adopté arrive à reproduire parfaitement le comportement du système réel avec le jeu de paramètres identifiés.

En perspective il serait intéressant d'exploiter le modèle obtenu pour les synthèses des commandes et leur implémentation en temps réel pour donner un avis définitif sur la validité des paramètres obtenus.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] F.Lahouazi, "Mise en œuvre d'une stratégie de commande neuro-floue : Application a Un pendule inversé ", Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Algérie 2011.
- [2] L.Makdoud, R.Ziane. " Optimisation d'une commande LQR par PSO –Application sur un pendule inverse ", Mémoire de master, 2019.
- [3] M. Bugeja "Non linear swing-up and stabilizing control of an inverted pendulum system " .EuroconLjubljana, Slovenia.2003
- [4] MIOMIR.V "ZERO-MOMENT-POINT-Thirty five years of its life". International journal of humanoid robotics, vol.1, No.1 (2004) 157-173
- [5] Jean-Marc Aillot and Nicolas Durand. Algorithmesgénétique .technicalreport, laboratoire d'optimisation Globale d'ENAC,<http://www.recherche.enac.fr/opti/GA/FAG/ag.pdf>,mars 2005
- [6]F.Fallet-Kahn.Algorithmegénétique .technicalreport, télécom paris tech,<http://www.infres.enst.fr/charon/MOD/rapports/AG.pdf>,janvier 2005
- [7] Eric TaillardPatrick SiarryJohannandreo, AlainPetrovski, Meta heuristiques pour l'optimisation difficile.eyrolles, juillet 2003
- [8]Terki.A analyse des performances des algorithmes génétiques utilisant différentes techniques d'evolution de la population Constantine
- [9]N.Benahmed "optimisation des réseaux de neurones pour la reconnaissance de chiffre manuscrits isolés : sélection et pondération des primitives par algorithmes génétique " université de Québec, 2002
- [10]C.Caux,H.Pierreval et M.C.Portman, "les algorithmes génétiques et leur application d'ordonnement " , thèse de doctorat,l'Université du havre, novembre 2006
- [11] K.Benatchba, " modèle d'exécution pour l'aide à la résolution du problème MAX-SAT", thèse de doctorat d'état, institut national d'informatique, juin 2005
- [12] R bandana, "sélectiond'attributsbasée sur un algorithme génétique neuronal : application à la reconnaissance des caractères manuscrits, université de Constantine
- [13] Voisin, " Application des algorithmes génétiques a l'estimation de mouvement par modélisationmarkovienne", rapport DEA, Université Joseph Fourier, France, 2004

bibliographie

- [14] S.KROUR, optimisation des paramètres d'une cellule photovoltaïque par les algorithmes génétique ", Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie, 2014.
- [15] D.E.Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley Longman Publishing, 1989.
- [16] S. Bourazza, "Variantes d'algorithmes génétiques appliquées aux problèmes d'ordonnancement", Thèse de doctorat, l'Université du Havre, novembre 2006.
- [17] S. E. Merzouk, "Problème de dimensionnement de lots et de livraisons : application au cas d'une chaîne logistique", Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et de l'Université de Franche-Comté, Novembre 2007.
- [18] M. I. Aouad, "Conception d'algorithmes hybrides pour l'optimisation de l'énergie mémoire dans les systèmes embarqués et de fonctions multimodales", Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré –Nancy 1, Juillet 2011.
- [19] A. C.Nearchou, "The effect of various operators on the genetic search for large scheduling problems", International Journal of Production Economics, vol. 88, no.2, pp.191-203, March 2004.
- [20] R.L. Haupt, S.E.Haupt, "Particalgeneticalgorithms", 2^{eme} edition, new Jersy, 2004.
- [21] D.Beasley, D.R.Bull, R. R. Matrin, "An overview of geneticalgorithms : Part 2, ResearchTopics", Unoversitycomputing, Vol 15, N^o 4, 1993, p.170
- [22]: T.Vallé et M.Yıldızoğlu "Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie", Université de Nantes et Université Montesquieu Bordeaux IV 2001.
- [23]: D.Whitley, "Foundations of GeniticAlgorithms 2, US Edition", California, USA, 1993

Ø 42 mm 22 to 52 Watts 52 W Part number 82850002



- Usable power : 20 to 50 W
- For high-power drive applications
- Sintered bronze bearings lubricated for life
- Power supply via 2 output leads
- Optional 1 or 2-channel encoder
- Optional EMC filter

Part numbers

	Type	Type	Voltage	References
82850002	52 W	828500	24 V	Without encoder

Specifications

No-load characteristics

Speed of rotation (rpm)	4050
Absorbed power (W)	7,44
Absorbed current (A)	0,31

Nominal characteristics

Speed (rpm)	3200
Torque (mNm)	100
Usable power (W)	33,5
Absorbed power (W)	52
Absorbed current (A)	2,15
Gearbox case temperature rise (°C)	54
Efficiency (%)	64

General characteristics

Insulation class (conforming to IEC 85)	F (155 °C)
Protection (IEC/EN 60529)	IP20
Max. output power (W)	52
Start torque (mNm)	490
Starting current (A)	9,6
Resistance (Ω)	2,5
Inductance (mH)	2,5
Torque constant (Nm/A)	0,052
Electrical time constant (ms)	1
Mechanical time constant (ms)	13
Thermal time constant (mn)	21
Inertia (g.cm ²)	140
Weight (g)	640
Number of segments	8
Service life (h)	3000
Sintered bronze bearings	▪
Wires length (mm)	200

Encoder characteristics

Current consumption (mA)	0,5 →15
Output current (mA)	< 20 (25 °C)
Supply (V)	4,5 →35 DC
Ambient temperature (°C)	-25 →+85

Accessories

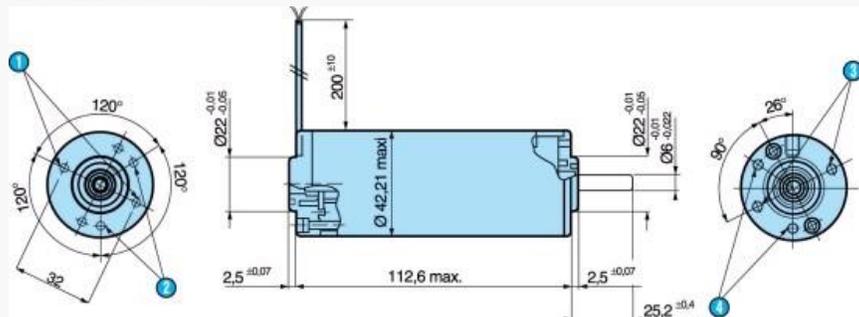
Connection	Code
Pre-assembled female connector, casing 179228-3, tags 179227-1 and leads AWG24 250 mm	79209895

Made to order products, available on request

- Built-in interference suppression
- Other supply voltages
- Shaft lengths at front and/or rear
- Motor 82 850 with 1 or 2 ball bearings
- Other fixing flanges on front and rear
- 200 pulses/rev optical encoder

Dimensions (mm)

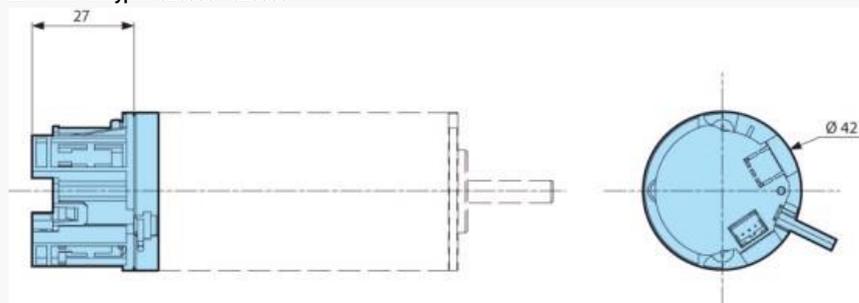
828500 without encoder



N°	Legend
1	2 holes M3 x 0.5 at 180° depth 5 over Ø 32
2	2 holes 2.75 ± 0.05 at 120° depth 5 over Ø 32
3	2 holes M3 x 0.5 at 180° depth 5.5 over Ø 32
4	2 holes M3 x 0.5 at 120° depth 5.5 over Ø 32

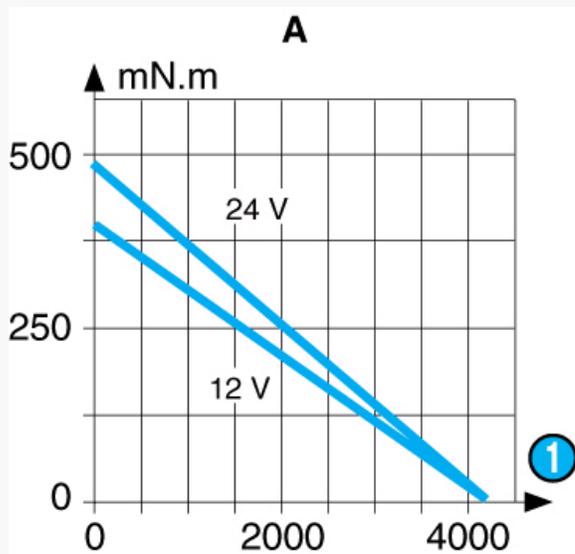
Dimensions (mm)

Encoder on types 828008 - 828500



Curves

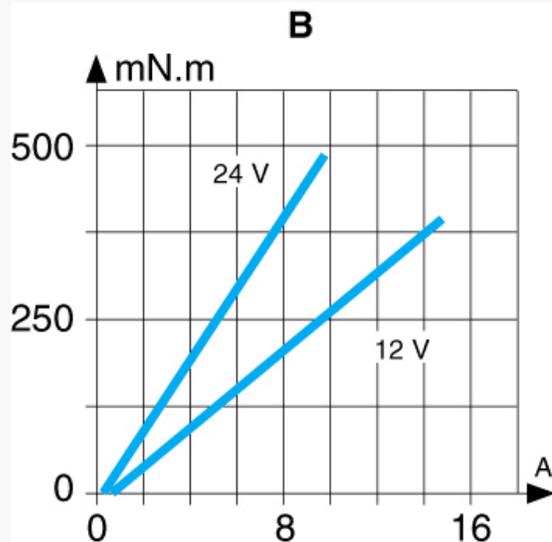
828500



N°	Legend
1	rpm
	Torque/speed curve

Curves

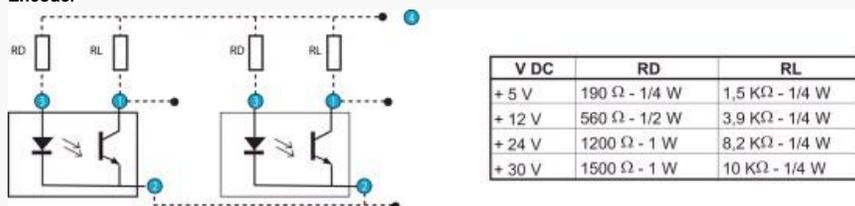
828500



N°	Legend
	Torque/current curve

Connections

Encoder



N°	Legend
①	Signal output
②	0 V DC (encoder power ground supply)
③	Emitting diode
④	Power supply V DC

Product adaptations



- Special output shaft
- Pinion on output shaft
- Special supply voltage
- Special cable length
- Special ball bearings
- Optical or Hall effect encoder - 1 or 2 channels - other resolutions
- Special mounting plate
- Customised electronics
- Special connectors
- EMC filter

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif d'identifier le pendule inverse sur un banc d'essai.

Après présentations et étude du pendule inverse ainsi que le moteur à courant continu nous avons obtenu les équations mathématiques du système. La deuxième partie traite l'étude de l'algorithme génétique avec un exemple illustratif. L'identification des paramètres du pendule inverse a été l'objectif de la dernière partie, les résultats de simulation sont obtenus via Simulink/Matlab .

Abstract

The work presented in this thesis aims to identify the reverse pendulum on a test bench.

After presentations and study of the inverse pendulum as well as the direct current motor, we obtained the mathematical equations of the system. The second part of the study of the genetic algorithm with an illustrative example. The identification of the parameters of the inverse pendulum was the objective of the last part, the simulation results are obtained via Simulink / Matlab.