



Université Libre de Bruxelles  
Faculté des sciences appliquées

BA2 orientation ingénieur civil

# Rapport de recherche bibliographique

Section informatique : Robot motard

Groupe 14 Tuteur : Verhaegen Gary

Delhayé Quentin

Dumont Arnaud

Giaux Camille

Lasbleis Pierre

Roig Gauthier

Bruxelles, 13 novembre 2011

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Recherches</b>	<b>4</b>
2.1	Équilibre de la moto . . . . .	4
2.1.1	Mots-clés . . . . .	5
2.1.2	Équations de recherche . . . . .	5
2.1.3	Résultats . . . . .	6
2.2	Dynamique de la moto . . . . .	8
2.2.1	Mots-clés et équations de recherche . . . . .	8
2.2.2	Résultats de recherche en fonction du moteur de recherche . . . . .	9
2.3	Capteurs, moteurs et brique NXT . . . . .	12
2.3.1	Mots-clés . . . . .	12
2.3.2	Equations de recherche . . . . .	12
2.3.3	Résultats de recherche en fonction du moteur de recherche . . . . .	13
2.4	Programmation . . . . .	15
2.4.1	Documentation . . . . .	16
2.4.2	Exemples de code . . . . .	17
2.4.3	Contrôle de la moto : la régulation en boucle fermée . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Conclusion</b>	<b>21</b>

# 1. Introduction

Le cahier des charges du projet nous demande de réaliser un robot motard gérant son équilibre dynamiquement tout en étant capable de suivre un circuit à l'aide de ses différents capteurs. Pour réaliser cette tâche, on nous fournit un kit LEGO<sup>®</sup> MINDSTORMS<sup>®</sup> NXT<sup>1</sup>. Nous avons donc d'emblée subdivisé les recherches comme suit :

- équilibre de la moto ;
- dynamique de la moto ;
- capteurs, moteurs et brique NXT ;
- programmation.

Les principales étapes de recherche sont les suivantes : détermination des mots-clés du sujet, et élaboration des équations de recherche qu'il faudra ensuite introduire dans divers moteurs de recherche. Ceux que nous avons utilisés tout au long de notre travail sont les suivants :

- CIBLE<sup>2</sup> ;
- Science Direct<sup>3</sup> ;
- Techniques de l'Ingénieur<sup>4</sup> ;
- Web of Knowledge<sup>5</sup> ;
- Google Scholar<sup>6</sup>.

Nous avons appliqué cette méthode à toutes les subdivisions de notre projet afin d'en dégager un certain nombre de documents que nous jugions pertinents. Pertinence et fiabilité que nous avons systématiquement justifiées afin de nous assurer une base solide sur laquelle développer les aspects à la fois théoriques et pratiques de notre projet.

---

1. MINDSTORMS et NXT sont des marques déposées de LEGO Group

2. <http://bib7.ulb.ac.be/uhtbin/webcat>

3. <http://www.sciencedirect.com/>

4. <http://www.techniques-ingenieur.fr/>

5. <http://isiknowledge.com/>

6. <http://scholar.google.com>

## 2. Recherches

### 2.1 Équilibre de la moto

L'équilibre étant un sujet vaste, il a fallu partir d'un document plus accessible pour orienter nos recherches. Après des recherches préliminaires, nous avons retenu un site de vulgarisation nommé *Culture Staps*<sup>1</sup>, nous avons trouvé un premier document<sup>2</sup> qui expliquait en termes simples les principes d'équilibre d'un vélo, et donnait quatre éléments clés pour déterminer l'équilibre d'un vélo : la chasse, la distance entre les roues (l'empattement), la position du centre de gravité, ainsi que la surface de contact des pneus avec le support. Ce document nous a paru digne de confiance car il provient du site d'un professeur de sport dans une université française (le centre universitaire Condorcet), ayant écrit un livre sur l'enseignement des activités sportives.

Un autre point de départ a été les sites internet de différents constructeur de motos (Ducati, Honda, BMW, Yamaha) afin de chercher des détails complémentaires sur la chasse, l'empattement et l'inclinaison de la fourche.

---

1. LECA, R. *Culture Staps*. [URL: http://www.culturestaps.com/](http://www.culturestaps.com/) – visité le 28-10-2011.

2. *Idem Biomécanique : l'équilibre*. 2008 [URL: http://www.culturestaps.com/site\\_g0000b9.pdf](http://www.culturestaps.com/site_g0000b9.pdf).

### 2.1.1 Mots-clés

Nous avons donc pu dégager un certain nombre de mots-clés qui seraient à la base de nos recherches.

Mots-clés	Mots-clés traduits
Chasse	Trail
Vélo	Bicycle
Moto	Motorcycle
Empattement	Wheelbase
Équilibre	Equilibrium
Stabilité	Stability
Inclinaison fourche	Rake angle/caster
Virage	Curve/leaning
Roue	Wheel
Mécanique	Mechanics
Dynamique	Dynamics
Force	Force
Route	Road
Géométrie	Geometry

### 2.1.2 Équations de recherche

Les premiers résultats des équations de recherche élaborées s'étant révélés pléthoriques et peu pertinents, il a fallu réduire leur nombre en usant des termes de liaison *AND* et *NOT*, ainsi que des caractères de complétion \* et \$.

1. Vélo AND equilibre NOT sûreté NOT interface
2. moto OR vélo NOT motor
3. vélo AND géométrie NOT route
4. motorcycle AND trail SAME caster NOT motor
5. fork AND 'rake angle'
6. motorcycle AND lean\*
7. bike AND stability AND mechanic\* AND wheel AND force

Nous avons entré ces différentes équations dans divers moteurs de recherche :

- Techniques de l'Ingénieur ;
- Science Direct ;
- Web of Knowledge ;
- CIBLE.

### 2.1.3 Résultats

Les seules équations ayant abouti sont les équations 4 et 5, qui ont mené aux deux sources suivantes.

TEZUKAA, Y., H. ISHIB et S. KIYOTAC *Application of the Magic Formula Tire Model to Motorcycle Maneuverability Analysis*. JSAE Review vol. 22, juillet 2001, Nr. 3

Ce premier document provient du magazine japonais *JSAE Review* et traite en partie de la maniabilité d'une moto. La validité de cet article peut être appuyée par sa provenance : JSAE s'avère être l'abréviation de « Society of Automotive Engineers of Japan » un organisme fondé en 1947 et qui publie continuellement depuis lors dans le domaine des sciences et de la technologie. Malheureusement, le sujet principal de l'article concerne l'influence des pneumatiques sur le comportement de la moto, et ce paramètre n'étant pas modifiable dans notre projet, il ne sera d'une aide que limitée.

LAIA, H.-C. *et al. Design Parameters Study on the Stability and Perception of Riding Comfort of the Electrical Motorcycles Under Rider Leaning* . JSAE Review vol. 13, février 2003, Nr. 1

Ce second document traite de la stabilité d'une moto sur laquelle le conducteur s'incline d'un côté. Cette source nous est bien évidemment utile car le fait d'utiliser un contrepoids pour remplacer le rôle du pilote est envisagé. De plus, cette source est fiable car elle provient d'un article paru dans un journal scientifique sérieux, et aussi car les rédacteurs de ces articles sont des professeurs d'universités.

Toutes les autres équations ont pu mener aux mêmes résultats que précédemment, ou se sont révélées infructueuses.

Aussi, nous avons dû faire des recherches complémentaires. Nous avons donc utilisé les documents que nous avons déjà. Nous avons tout d'abord exploité la bibliographie du document trouvé sur le site *Culture Staps* et avons obtenu la source suivante.

JONES, D. E. H. *The Stability of the Bicycle*. Physics Today, avril 1970 p 34–40

Dans ce document, l’auteur tente de construire un vélo volontairement instable, ce qui nous a aidé à comprendre le rôle de la chasse sur le comportement d’un vélo. L’auteur a publié de nombreux articles dans des revues scientifiques telles que *New Scientist* ou *Nature*, et ce document est cité comme référence dans de nombreux autres documents traitant du sujet. On peut donc lui concéder une certaine renommée et avoir confiance en celui-ci.

Ensuite, nous avons retenu un constructeur dont le site internet proposait un document expliquant le rôle de la chasse, de l’empattement, ainsi que de l’inclinaison de la fourche.

YAMAHA MOTOR *Motorcycle Workshop. Part 1 : Chassis Geometry*. (URL:  
<http://www.yamaha-motor.eu/designcafe/en/about-design/technology>) – visité le  
28-10-2011

Ces informations provenant d’un site commercial, il est dans leur intérêt de fournir des informations à la fois accessibles et exactes. De plus, ces informations sont en parfait accord avec celles trouvées dans d’autres sources.

## 2.2 Dynamique de la moto

Cette partie a pu être divisée en différentes sous-parties liées aux divers phénomènes physiques qui régissent le mouvement de la moto. Nous avons ainsi :

- l’effet gyroscopique ;
- la description du système ;
- le contrôle dynamique de l’équilibre ;
- les équations du mouvement.

La quasi-totalité des sources trouvées traite de plusieurs de ces points.

### 2.2.1 Mots-clés et équations de recherche

Sujets	Mots-clés	Mots-clés traduits
Effet gyroscopique	Gyrosopes Force Moto Vélo Description mathématique	Gyroscopic Force Motorcycle Bicycle Math description
Paramètres du système	Distances entre les roues Centre de gravité	Wheel base Center of gravity
Contrôle de la moto	Robot Conducteur Conduire	Robot Rider Driving
Dynamique de la moto	Dynamique Moto Vélo Mouvement	Dynamics Motorcycle Bicycle Motion

Pour écrire les équations il a fallu éliminer certains termes qui revenaient de manière abusive lors des recherches (il a par exemple été nécessaire de mettre de côté les documents traitant d'accidents de la route). Nous pouvons ajouter que dans les équations suivantes le terme « motorcycle » a systématiquement été changé en « bicycle », ces deux systèmes ne divergeant que par leur source d'énergie. De plus, la vitesse d'un vélo étant beaucoup plus faible, les différentes approximations faites dans ces documents seront plus à même de correspondre avec notre prototype.

#### **Pour la dynamique de la moto**

- dynamic AND motorcycle

#### **Pour l'effet gyroscopique**

- gyroscope AND moto AND "Description mathématique"
- couple AND gyroscopique
- gyroscopic AND force

#### **Pour les paramètres du système**

- motorcycle AND wheels AND NOT risk AND NOT accident AND NOT helmet
- motorcycle AND wheelbase AND NOT risk AND NOT accident AND NOT helmet
- motorcycle AND gravity AND NOT risk AND NOT accident AND NOT helmet

#### **Pour le contrôle de la moto**

- motorcycle AND rider AND control

### **2.2.2 Résultats de recherche en fonction du moteur de recherche**

L'entrée des différentes équations énoncées au point précédent dans différents moteurs de recherche nous a permis de trouver des sources reprises ci-dessous. Les moteurs utilisés sont les suivants :

- CIBLE ;
- Science Direct ;
- Techniques de l'Ingénieur ;
- Google scholar.

**CIBLE**

COSSALTER, V. *Motorcycle Dynamics*. s.l.: LULU, 2006 372 p

Ce livre étudie le système mécanique que constitue la moto et en dresse une description précise. En revanche il n'étudie pas le cas où le véhicule est conduit par un pilote et ne considère pas de contrôle dynamique. Il est utile dans l'étude de la ligne droite ainsi que pour l'entrée dans les virages. Il considère aussi ces problèmes pour des vitesses faibles d'une part et importantes d'autre part, ce qui pourrait nous aider à comprendre l'influence de la vitesse sur l'équilibre. De plus, l'auteur est professeur ordinaire dans la dynamique des véhicules à l'Università Degli Studi Di Padova, ce qui nous permet de faire confiance à ce document.

**Science Direct**

PACEJKA, H. Chap. 11 : *Motorcycle Dynamics In Tyre and Vehicle Dynamics*. Seconde édition.  
s.l.: Elsevier Ltd., 2006 p 517–585

Le chapitre de ce livre a été écrit par un scientifique qui travaille sur le mouvement des véhicules et en particulier sur des motos depuis longtemps. Il a ainsi acquis une légitimité et une maîtrise du sujet appréciable. Ce chapitre décrit lui aussi le système de la moto mais en envisage la conduite par un conducteur indépendant (à l'instar de notre robot motard). Ce conducteur est modélisé mais aussi pris en compte dans les équations du mouvement. L'auteur envisage aussi différents modèles en fonction des approximations effectuées.

YOKIMORI, M., T. OYA et A. KATAYAMA *Rider Control Behavior to Maintain Stable Upright Position at Low Speed*. *JSAE Review*, vol. 21, janvier 2000, Nr. 1 p 61–65

Cet article pose des conditions de stabilité pour un modèle de moto en fonction de la position du centre de gravité du système. Il se base notamment sur d'autres publications du même journal. Il est ainsi possible de retracer toute la démarche suivie et de trouver facilement des informations supplémentaires à partir de cet article. Celui-ci vient aussi du journal *JSAE Review*.

YAVIN, Y. *The Derivation of the Kinematic Model from the Dynamic Model of a Riderless Bicycle*. *Computers & Mathematics with Applications* vol. 51, mars 2006, Nr. 6–7

Ce document nous permet d'étudier en détail le cas d'une moto robotisée. Même si le titre du document pourrait faire penser à un système où l'équilibre n'est pas maintenu, il apparaît que le contrôle de la moto est ici pris en charge par des éléments concrets symbolisés par des moments de forces. Nous

pouvons donc l'utiliser pour mettre au point le maintien de l'équilibre. Les publications de l'auteur de cet article sont reprises sur le site<sup>3</sup> de la « Universität Trier » (En Rhénanie-Palatinat). Nous pouvons ainsi supposer qu'ils ont été contrôlés par la communauté scientifique.

ZEVIN, A. *On the Theory of Linear Gyroscopic Systems*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, vol. 60, 1996, Nr. 2 p 227–232

Cet ouvrage offre une description mathématique complète mais surtout expliquée en détails de l'effet gyroscopique, ce qui est un gage de fiabilité. Nous pouvons retracer cette démarche pour la valider. L'auteur applique cette description à des systèmes et son implication sur l'équilibre de ces systèmes. Nous pouvons donc nous en servir pour aborder l'étude de la moto comme système gyroscopique.

### Google Scholar

MARTINEZ, A. *Design and Implementation of a Linear Control System for a Two-wheeled vehicle and a Robotic Bicycle*. DEA, University of Toronto, 2008

Cet écrit est une thèse réalisée récemment et dont le résultat final est une moto issue du kit de LEGO MINDSTORMS NXT. Le modèle que nous allons développer est proche de celui présenté ici. Ainsi, les approximations faites dans le cadre de cette thèse pourront être considérées comme acceptables et utilisées dans notre propre modélisation.

### Techniques de l'Ingénieur

RADIX, J.-C. *Gyroscopes et gyromètres mécaniques avec élément rotatif*. 2000

Ce document explique et décrit d'une façon relativement simple ce qu'est l'effet gyroscopique tout en offrant une bonne description mathématique. L'auteur est ingénieur civil télécommunications, professeur indépendant et a de nombreuses publications à son actif.

Nous utilisons aussi l'un de nos syllabus d'un caractère plus général de mécanique pour résoudre des équations (Lagrange) ou obtenir des définitions/précisions sur l'inertie d'un système, l'effet gyroscopique, etc.

DELCHAMBRE, A. *Mécanique rationnelle II*. 5<sup>e</sup> édition. Bruxelles: Presses Universitaires de Bruxelles, 2010

---

3. <http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/indices/a-tree/y/Yavin:Y=.html>

## 2.3 Capteurs, moteurs et brique NXT

### 2.3.1 Mots-clés

Cette section comporte différents sujets de recherche. En effet, nous pouvons nous renseigner de manière générale sur le kit de LEGO fourni (LEGO MINDSTORMS NXT), comme de manière plus spécifique à propos de ses différents composants, c'est-à-dire : la brique intelligente NXT, les divers capteurs (tactile, photosensibles, de son, de distance à ultrasons et gyroscopique) et les servomoteurs. Il est à noter que le capteur gyroscopique est le seul à ne pas être construit par LEGO mais par HiTechnic<sup>4</sup>. On peut d'ailleurs trouver sur leur site internet des informations sur son utilisation et sa programmation (aspect qui sera développé dans la partie éponyme).

Ces sujets nous ont menés à établir les termes de recherche suivants (traduits pour la plupart via le site officiel<sup>5</sup> de LEGO).

Sujets	Mots-clés	Mots-clés traduits
Général	LEGO MINDSTORMS NXT	LEGO MINDSTORMS NXT
Brique Intelligente NXT	Brique NXT	NXT Brick
Capteurs	Capteur tactile	Touch Sensor
	Capteur photosensible	Light Sensor
	Capteur de son	Sound Sensor
	Capteur de distance à ultrasons	Ultrasonic Sensor
	Capteur gyroscopique	Gyroscopic Sensor
Moteurs	Moteur NXT	NXT Motor
	Servomoteur	Servo Motor

### 2.3.2 Equations de recherche

Pour obtenir nos équations de recherche, il nous a fallu ajouter aux différents termes de recherche le mot « Lego » afin d'avoir une recherche suffisamment restreinte, excepté pour la brique intelligente NXT qui faisait déjà l'objet d'une recherche spécifique.

#### Pour le kit fourni en général

Lego AND "Mindstorms NXT"

4. DATAPORT SYSTEMS, INC *HiTechnic Products*. (URL: <http://www.hitechnic.com/>) – visité le 28-10-2011.

5. LEGO GROUP *Lego Mindstorms*. (URL: <http://mindstorms.lego.com>) – visité le 27-10-2011.

**Pour la brique intelligente NXT**

Brique AND NXT

Brick AND NXT

**Pour les capteurs**

Lego AND Capteur\* AND Tactile\*

Lego AND Touch AND Sensor\*

Lego AND Capteur\* AND Photosensible\*

Lego AND Light AND Sensor\*

Lego AND Capteur\* AND Son\*

Lego AND Sound AND Sensor\*

Lego AND Capteur\* AND Ultrason\*

Lego AND Ultrasonic AND Sensor\*

HiTechnic AND Capteur\* AND

HiTechnic AND Gyroscopic AND Sensor\*

Gyroscopique\*

**Pour les moteurs**

Lego AND NXT AND Moteur\*

Lego AND NXT AND Motor\*

Lego AND Servomoteur\*

Lego AND Servo AND Motor\*

**2.3.3 Résultats de recherche en fonction du moteur de recherche**

Chacune des équations du point qui précède a été recherchée sur plusieurs moteurs de recherche, dont la liste ci-dessous reprend ceux qui ont abouti à des résultats.

- CIBLE ;
- Science Direct ;
- Springer Link ;
- Google Scholar.

Cependant, un problème est survenu : étant donné que le kit de LEGO est relativement spécifique, les résultats auxquels nous ont menés nos équations de recherche ne se limitent en général pas à un seul composant en particulier, mais bien à l'ensemble de ceux-ci. Ceci justifie le nombre de documents assez restreint dans cette section du travail.

**CIBLE et Springer Link**

KELLY, J. F. *LEGO MINDSTORMS NXT-G Programming Guide*. s.l.: Apress, 2007 197 p

Ce livre nous a semblé intéressant car il nous a permis, en début de projet, d'avoir une première approche des différentes possibilités de réalisation qu'offre notre kit de LEGO.

GASPERI, M., P. HURBAIN et I. HURBAIN *Extreme NXT : Extending the LEGO® MINDSTORMS® NXT to the Next Level*. s.l.: Apress, 2007 286 p

Ce livre repose sur toute une série de tests effectués sur les constituants du kit NXT qui semblent reproductibles. De plus, il a été écrit par un testeur du kit NXT avant commercialisation (participation à un beta-test fermé) et devrait donc pouvoir mériter notre confiance.

### Science Direct et Google Scholar

ASTOLFO, D., M. FERRARI et G. FERRARI *Building Robots with LEGO Mindstorms NXT*. s.l.: Elsevier Inc., 2007 480 p

Cet ouvrage expose des techniques de construction en LEGO, nécessaires à l'élaboration de notre prototype, en plus de nous fournir des informations supplémentaires sur les différentes pièces qui ont été mises à notre disposition.

L'un des auteurs a également pu tester le kit NXT avant commercialisation (version bêta) et un autre a pu contribuer à la programmation de certains de ses constituants ; ce qui nous semble être un gage de connaissance des LEGO NXT.

## 2.4 Programmation

Il existe de nombreuses façons de communiquer avec la brique intelligente LEGO MINDSTORMS NXT. Mais par soucis de temps — à la fois d'apprentissage d'un nouveau langage et de test qui y sont liés — et la documentation étant généralement maigre voire inexistante, nous avons sélectionné les deux suivants.

NXT-G pour sa simplicité de prise en main et parce que l'environnement de programmation de ce langage est fourni avec le kit NXT. C'est aussi un langage développé par LEGO, ce qui assure une compatibilité entière et immédiate.

NXC <sup>6</sup> pour la précision offerte et parce que le langage proche du C nous permet une entrée en matière aisée.

NXT-G ne nous servant qu'à tester le bon fonctionnement des différents capteurs et servomoteurs, la documentation fournie sur le site de LEGO MINDSTORMS <sup>7</sup> ainsi que les références trouvées via les recherches sur les capteurs <sup>8,9</sup> sont amplement suffisantes. Par contre, NXC étant un langage propriétaire développé spécialement pour les produits LEGO MINDSTORMS, il nous faut à la fois une documentation complète et des exemples d'utilisation de code avec une brique intelligente NXT. Les mots-clés et les équations de recherches correspondantes sont les suivantes :

Mots-clés	Mots-clés traduits
Exemples	Exemples Samples
Documentation	Documentation
Tutoriel	Tutorial

---

6. Not eXactly C

7. LEGO GROUP *Lego Mindstorms*. (URL: <http://mindstorms.lego.com>) – visité le 27-10-2011, *op. cit.*

8. KELLY, J. F. *LEGO MINDSTORMS NXT-G Programming Guide*. s.l.: Apress, 2007 197 p, *op. cit.*

9. GASPERI, M., P. HURBAIN et I. HURBAIN *Extreme NXT : Extending the LEGO® MINDSTORMS® NXT to the Next Level*. s.l.: Apress, 2007 286 p, *op. cit.*

Le seul moteur de recherche ayant donné des résultats pertinents étant *Google*, il était indispensable de convenablement restreindre ces résultats.

```
NXC AND exemple AND inurl:univ  NXC AND example OR sample AND inurl:univ
NXC AND documentation           NXC AND documentation
```

*Remarque* : l'opérateur `inurl:univ` permet de filtrer les résultats aux seuls contenant *univ* dans leur url, mot-clé caractéristique de bon nombre d'adresses de sites internet universitaires.

### 2.4.1 Documentation

Toutes les équations de recherche retournent toujours les mêmes résultats, à savoir les documents disponibles sur le site des développeurs<sup>10</sup>.

BENEDETTI, D. *Programming LEGO NXT Robots using NXC*. 2007 (URL:  
[http://bricxcc.sourceforge.net/nbc/nxcdoc/NXC\\_tutorial.pdf](http://bricxcc.sourceforge.net/nbc/nxcdoc/NXC_tutorial.pdf))

Ce premier document est un tutoriel d'introduction au langage NXC présentant succinctement les capteurs ainsi que leur manipulation. C'est une excellente base de travail pour appréhender NXC.

HANSEN, J. *NXC Guide*. 2011 (URL:  
[http://bricxcc.sourceforge.net/nbc/nxcdoc/NXC\\_Guide.pdf](http://bricxcc.sourceforge.net/nbc/nxcdoc/NXC_Guide.pdf))

Ce document, quant à lui, est une documentation complète et exhaustive du langage NXC. Ce sera une référence essentielle tout au long de la partie de programmation de notre projet dans laquelle nous pourrons trouver des renseignements précis quant à la syntaxe du langage. De plus, pour chacune des fonctions explicitées, il reprend de nombreux exemples d'utilisation, ce qui rend leur compréhension et leurs interactions d'autant plus rapide.

---

10. GEEKNET INC. *NBC - NeXT Byte Codes, Not eXactly C, and SuperPro C*. (URL: <http://bricxcc.sourceforge.net/nbc/>) – visité le 28-10-2011.

### 2.4.2 Exemples de code

GEEKNET INC. *NBC - NeXT Byte Codes, Not eXactly C, and SuperPro C*. (URL: <http://bricxcc.sourceforge.net/nbc/>) – visité le 28-10-2011, *op. cit.*

Encore une fois, il y a de nombreux exemples disponibles sur le site des développeurs.

BABAU, P. J.-P. *Programmation NXC - Application à la commande d'un robot NXT* LEGO®. 2011 (URL: [http://www.lisyc.univ-brest.fr/pages\\_perso/babau/cours/robotnxtubo.pdf](http://www.lisyc.univ-brest.fr/pages_perso/babau/cours/robotnxtubo.pdf))

Ce document présente judicieusement la brique intelligente NXT exploitée à l'aide du langage NXC. L'auteur est professeur au département d'informatique de l'Université de Brest Ouest (UBO) et responsable scientifique de l'équipe IDM (Ingénierie Dirigée par les Modèles). Cette source semble donc non seulement fiable mais aussi de qualité.

DATAPORT SYSTEMS, INC *HiTechnic Products*. (URL: <http://www.hitechnic.com/>) – visité le 28-10-2011, *op. cit.*

HiTechnic est le constructeur du capteur gyroscopique qui nous est fourni avec le kit NXT. Ce constructeur propose sur son site quelques exemples de codes exploitant ce capteur avec ceux fournis par LEGO. C'est donc non seulement très intéressant pour étudier l'interaction entre les capteurs et les servomoteurs, mais aussi digne de confiance puisqu'il est dans son intérêt de fournir un code performant et correct.

### 2.4.3 Contrôle de la moto : la régulation en boucle fermée

#### 2.4.3.1 Introduction

Voici maintenant une partie qui concerne le programme à créer pour contrôler le mouvement de la moto. Nous avons en effet effectué des recherches supplémentaires sur un concept particulier : le régulateur PID. Les différents éléments qui nous ont menés à cette découverte sont :

- des documents traitant de robotique trouvés lors de recherches sur d’autres thèmes de ce projet (ce concept apparaît notamment dans la thèse Alex MARTINEZ<sup>11</sup>).
- La curiosité d’un des membres du groupe qui l’a poussé à prendre connaissance des avancées récentes dans le domaine de la robotique. Un robot cycliste japonais (PRIMER-V2) vient en effet de faire son apparition. Le concept de PID était mentionné dans les documents entourant cette parution.

Les recherches dans ce domaine sont toutefois restées sommaires, des documents clés ayant été trouvés rapidement et le caractère primordial de ce concept au sein du projet n’ayant pas été démontré.

#### 2.4.3.2 Mots-clés

Les informations dont nous avons besoin pour comprendre et ensuite appliquer le régulateur PID étaient d’un caractère plutôt général. En effet, si ce régulateur PID est utilisé partout, il est surtout mis à profit dans le cadre de programmes bien plus complexes que celui de ce projet. Aussi des moteurs de recherche tels que *Science Direct* ou *Technique de l’Ingénieur* ne nous ont pas donné la totalité des renseignements que nous cherchions : la complexité ou la spécificité des documents trouvés nous a poussé à nous tourner vers des moteurs de recherche plus « généralistes » tels que *Google*.

---

11. MARTINEZ, A. *Design and Implementation of a Linear Control System for a Two-wheeled vehicle and a Robotic Bicycle*. DEA, University of Toronto, 2008, *op. cit.*

Voici une liste des mots-clés trouvés lors de recherches préliminaires :

Mots-clés	Mots-clés traduits
Régulateurs	Regulator/ controller
PID	PID
proportionnel	proportional
intégral	integral
dérivée	derivative
asservissement	servomechanism
linéaire	linear
automatique	automatic control/ Control engineering
commande prédictive	model predictive control
boucle de contrôle	control loop

Ces mots clés combinés dans des équations de recherche nous ont fourni des résultats probants. Ceux-ci sont décrits dans le paragraphe suivant.

### 2.4.3.3 Résultats des recherches

Les deux moteurs de recherche nous ayant fourni des informations sont : *Google* et *Technique de l'Ingénieur*. Voici les résultats pour l'un et l'autre de ces outils.

#### Google

SHAW, J. A. *The PID Control Algorithm : How it Works, How to Tune it, And How to Use it.*  
 Seconde édition. 2003 68 p

Ce livre présente le concept PID d'une façon simple mais précise et explique son fonctionnement général. Il nous permet de comprendre ce mode de régulation en profondeur et donc de pouvoir l'appliquer plus facilement. Nous pouvons justifier la fiabilité de la source grâce à la carrière de son rédacteur. Il a en effet travaillé pendant de nombreuses années en tant qu'ingénieur dans le domaine du contrôle des processus. Des recoupements entre sources ont aussi pu valider le contenu de ce livre.

**Technique de l'Ingénieur**

ZAMAI, E. et S. GENTIL Principes de chaines de régulation. mars 2003

Ce document décrit le principe général de la régulation grâce à des boucles mais ne développe que très peu le concept de PID, préférant décrire l'enchevêtrement de différentes boucles. Il nous est utile dans sa vision générale de la régulation.

GENTIL, S. et A. BESANCON-VODA Régulateurs PID analogiques et numériques. mars 1999

À l'inverse du texte précédent, cette publication décrit uniquement la régulation suivant un modèle PID : il reste accessible à des étudiants de 2e année tout en conservant un degré de précision et un soin du détail agréable.

La validité de ces deux sources peut être prouvée par la renommée de leurs auteurs. Sylviane Gentil est en effet professeur d'automatique à l'ENSIEG-INPG une école d'ingénierie à Grenoble. Elle participe aussi à des symposiums, ce qui achève de prouver sa compétence. Zamai Eric fait lui partie d'un laboratoire d'automatique à Grenoble. Alina Voda est maître de conférences de l'UJF, une autre université grenobloise.

### 3. Conclusion

Au fil de ce travail de recherche bibliographique, nous avons pris conscience de l'importance de trouver les sources fiables et pertinentes dans le cadre d'un projet d'ingénieur. En effet, pour démarrer un projet et le faire se dérouler le mieux possible, la prise de connaissance du savoir déjà acquis et partagé par des scientifiques reconnus s'avère être une base précieuse, et même capitale. Ce n'est qu'après cette étape primordiale qu'il convient de se lancer dans une étude plus poussée, même s'il est bien sûr permis à tout moment de revenir à ce travail de recherche.

Cependant, nous avons aussi été confrontés à la difficulté d'avoir accès à de telles sources sans expérience ni techniques particulières. C'est pourquoi nous avons pris soin de diversifier et de spécialiser aussi bien les outils de recherches que les recherches elles-mêmes. Ainsi, il a fallu faire appel à diverses équations pour chaque objet de recherche. Équations qu'il nous a été nécessaire de complexifier ou de simplifier selon la pertinence des résultats obtenus.

Finalement, nous avons construit à partir des nombreux documents consultés une bibliographie qui, nous l'espérons, nous aidera et nous guidera tout au long de notre projet. Même si elle n'est pas définitive, cette base de documents nous permettra d'appliquer divers travaux et études à la conception et à la modélisation de notre robot motard, permettant de la sorte de remplir notre cahier des charges.

# Bibliographie

- ASTOLFO, D., M. FERRARI ET G. FERRARI: *Building Robots with LEGO Mindstorms NXT*. s.l.: Elsevier Inc., 2007, 480 p
- BABAU, P. J.-P.: *Programmation NXC - Application à la commande d'un robot NXT LEGO®*. 2011  
⟨URL: [http://www.lisyc.univ-brest.fr/pages\\_perso/babau/cours/robotnxtubo.pdf](http://www.lisyc.univ-brest.fr/pages_perso/babau/cours/robotnxtubo.pdf)⟩
- BENEDETTELLI, D.: *Programming LEGO NXT Robots using NXC*. 2007 ⟨URL: [http://bricxcc.sourceforge.net/nbc/nxcdoc/NXC\\_tutorial.pdf](http://bricxcc.sourceforge.net/nbc/nxcdoc/NXC_tutorial.pdf)⟩
- COSSALTER, V.: *Motorcycle Dynamics*. s.l.: LULU, 2006, 372 p
- DATAPORT SYSTEMS, INC: *HiTechnic Products*. ⟨URL: <http://www.hitechnic.com/>⟩ – visité le 28-10-2011, Site WEB sur Internet
- DELCHAMBRE, A.: *Mécanique rationnelle II*. 5<sup>e</sup> édition. Bruxelles: Presses Universitaires de Bruxelles, 2010
- GASPERI, M., P. HURBAIN ET I. HURBAIN: *Extreme NXT : Extending the LEGO® MINDSTORMS® NXT to the Next Level*. s.l.: Apress, 2007, 286 p
- GEEKNET INC.: *NBC - NeXT Byte Codes, Not eXactly C, and SuperPro C*. ⟨URL: <http://bricxcc.sourceforge.net/nbc/>⟩ – visité le 28-10-2011, Site WEB sur Internet
- GENTIL, S. ET A. BESANCON-VODA: Régulateurs PID analogiques et numériques. mars 1999
- HANSEN, J.: *NXC Guide*. 2011 ⟨URL: [http://bricxcc.sourceforge.net/nbc/nxcdoc/NXC\\_Guide.pdf](http://bricxcc.sourceforge.net/nbc/nxcdoc/NXC_Guide.pdf)⟩
- JONES, D. E. H.: *The Stability of the Bicycle*. Physics Today, avril 1970, p 34–40
- KELLY, J. F.: *LEGO MINDSTORMS NXT-G Programming Guide*. s.l.: Apress, 2007, 197 p
- LAIA, H.-C. et al.: *Design Parameters Study on the Stability and Perception of Riding Comfort of the Electrical Motorcycles Under Rider Leaning*. JSAE Review vol. 13, février 2003, Nr. 1

- LECA, R.: *Culture Staps*.  $\langle$ URL: <http://www.culturestaps.com/> $\rangle$  – visité le 28-10-2011, Site WEB sur Internet
- Idem*: *Biomécanique : l'équilibre*. 2008  $\langle$ URL: [http://www.culturestaps.com/site\\_g0000b9.pdf](http://www.culturestaps.com/site_g0000b9.pdf) $\rangle$
- LEGO GROUP: *Lego Mindstorms*.  $\langle$ URL: <http://mindstorms.lego.com> $\rangle$  – visité le 27-10-2011, Site WEB sur Internet
- MARTINEZ, A.: *Design and Implementation of a Linear Control System for a Two-wheeled vehicle and a Robotic Bicycle*. DEA, University of Toronto, 2008
- PACEJKA, H.: Chap. 11 : Motorcycle Dynamics In *Tyre and Vehicle Dynamics*. Seconde édition. s.l.: Elsevier Ltd., 2006, p 517–585
- RADIX, J.-C.: *Gyroscopes et gyromètres mécaniques avec élément rotatif*. 2000
- SHAW, J. A.: *The PID Control Algorithm : How it Works, How to Tune it, And How to Use it*. Seconde édition. 2003, 68 p
- TEZUKAA, Y., H. ISHIB ET S. KIYOTAC: *Application of the Magic Formula Tire Model to Motorcycle Maneuverability Analysis*. JSAE Review vol. 22, juillet 2001, Nr. 3
- YAMAHA MOTOR: *Motorcycle Workshop. Part 1 : Chassis Geometry*.  $\langle$ URL: <http://www.yamaha-motor.eu/designcafe/en/about-design/technology> $\rangle$  – visité le 28-10-2011, Site WEB sur Internet
- YAVIN, Y.: *The Derivation of the Kinematic Model from the Dynamic Model of a Riderless Bicycle*. Computers & Mathematics with Applications vol. 51, mars 2006, Nr. 6–7
- YOKIMORI, M., T. OYA ET A. KATAYAMA: *Rider Control Behavior to Maintain Stable Upright Position at Low Speed*. JSAE Review, vol. 21, janvier 2000, Nr. 1, p 61–65
- ZAMAI, E. ET S. GENTIL: *Principes de chaînes de régulation*. mars 2003
- ZEVIN, A.: *On the Theory of Linear Gyroscopic Systems*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, vol. 60, 1996, Nr. 2, p 227–232