

# Régulation de la position d'une bille sur un plateau inclinable

Rapport de projet

L3 EEAR à distance  
Université Henri Poincaré – CNED

Nicolas Bernard  
n.bernard@lafraze.net

5 juin 2009

Version 2009-06-11  
5 juin 2009  
Preliminaire

Empreinte de la version (`git`)  
5f99170e979405735bfe33138c1d274e5830c9cd  
Document compilé ( $\LaTeX$ ) le 5 juin 2009.

Ce document est formaté avec  $\LaTeX$ . Sauf exception, les figures ont été réalisées avec `xfig` et les graphiques à l'aide de `gnuplot`; les schémas électroniques ont été réalisés avec `gschem` de la suite `gEDA` et les circuits imprimés avec le programme `pcb`.

# Table des matières

Table des matières . . . . .	3
<b>1 Étude du système</b>	<b>7</b>
1.1 Modélisation . . . . .	7
1.2 Étude du système . . . . .	8
1.2.1 Système initial . . . . .	8
1.2.2 Commande par retour d'état . . . . .	9
1.2.3 Système augmenté . . . . .	11
1.3 Limites du modèle . . . . .	12
<b>2 La partie mécanique</b>	<b>13</b>
<b>3 Le circuit de contrôle</b>	<b>17</b>
3.1 L'alimentation . . . . .	17
3.2 La partie acquisition . . . . .	18
3.2.1 Sélection du signal analogique . . . . .	18
3.2.2 Interface avec le joystick . . . . .	19
3.2.3 Interface avec la dalle tactile . . . . .	19
3.2.4 Alternatives et améliorations possibles . . . . .	20
3.3 Le microcontrôleur . . . . .	20
3.4 Les actionneurs . . . . .	21
3.4.1 Servomoteurs de modélisme . . . . .	21
3.4.2 Alternatives et améliorations possibles . . . . .	21
<b>4 La programmation du PIC</b>	<b>25</b>
4.1 Configuration générale . . . . .	25
4.2 Configuration des entrées / sorties . . . . .	25
4.2.1 Configuration du CAN . . . . .	26
4.2.2 Configuration du PWM . . . . .	26
4.3 Régulation PID . . . . .	27
4.3.1 Temps . . . . .	27
4.3.2 Utilisation du PID DSP . . . . .	28
4.4 Fonctions diverses . . . . .	29
<b>A Le programme du dsPIC</b>	<b>33</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>33</b>



# Introduction

Le but de ce projet était de réguler la position d'une bille sur un plateau. Ce plateau est mobile en ceci qu'il peut s'incliner selon ses deux axes, l'inclinaison étant contrôlable par des moteurs. Le plateau est constitué (ou, comme ici, recouvert) d'une dalle tactile qui permet de connaître la position de la bille.

Dans la fabrication de ce projet, il y a trois parties distinctes :

- la partie mécanique ;
- la partie électronique ;
- la partie informatique, c'est-à-dire la programmation de la puce (un microcontrôleur dsPIC) qui contrôle le système.

Toutefois, avant de parler de la fabrication elle-même, nous allons commencer par étudier ce système de manière théorique. C'est l'objet du premier chapitre.

*Version préliminaire*  
*5 juin 2009 -- 20:11*

# Chapitre 1

## Étude du système

### 1.1 Modélisation

Le problème est le même selon les deux axes d'inclinaison ( $x$  et  $y$ ) du plateau. Nous nous contenterons donc de le modéliser sur les  $x$ , le raisonnement est le même pour les  $y$ .

Sur un plan incliné d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontale, une bille se met à rouler et son accélération<sup>1</sup> est constante et égale à

$$a_x(t) = \ddot{x}(t) = \frac{5}{7}g \sin \alpha \quad (1.1)$$

Il est facile d'intégrer cette équation et de remonter à la vitesse de la bille, puis à sa position :

$$\dot{x}(t) = \frac{5}{7}g \sin \alpha t \quad (1.2)$$

$$x(t) = \frac{1}{2} \frac{5}{7}g \sin \alpha t^2 \quad (1.3)$$

Ce qui rend les choses plus complexes ici, c'est que l'inclinaison n'est pas constante : l'angle  $\alpha$  varie au cours du temps. L'accélération n'est donc pas constante et on a en réalité :

$$\ddot{x}(t) = \frac{5}{7}g \sin(\alpha(t)) \quad (1.4)$$

Il est beaucoup plus difficile d'intégrer cette équation étant donné que la fonction  $\alpha(t)$  n'est pas connue.

Pour simplifier le problème, on va se placer dans le cas discret (c'est de toute façon celui qui va nous intéresser, puisque le microcontrôleur qui va commander notre système fonctionne avec un temps discret). On peut alors supposer que sur un intervalle de temps petit, l'angle est constant. On a alors

$$\alpha(t) = \alpha_t \quad (1.5)$$

---

<sup>1</sup>Celle de son centre de gravité pour être précis

La vitesse devient alors une suite :

$$\dot{x}(0) = \dot{x}_0 \quad (1.6)$$

$$\dot{x}(1) = \frac{5}{7}g \sin \alpha_0 (t_1 - t_0) + \dot{x}_0 \quad (1.7)$$

$\vdots$

$$\dot{x}(i) = \frac{5}{7}g \sin(\alpha_{i-1}) \underbrace{(t_i - t_{i-1})}_{\Delta_i} + \dot{x}(i-1) \quad (1.8)$$

Si l'on suppose que tous les  $\Delta_i$  sont égaux à  $\Delta$ , on peut écrire le terme général de la suite ainsi :

$$(\dot{x}(n))_{n>0} = \frac{5}{7}g\Delta \sum_{i=1}^n \sin \alpha_{n-1} + \dot{x}_0 \quad (1.9)$$

De même pour la suite  $(x(n))$  :

$$x(0) = x_0 \quad (1.10)$$

$$x(1) \approx x(0) + \frac{\dot{x}(1) + \dot{x}(0)}{2} (t_1 - t_0) \quad (1.11)$$

$\vdots$

$$x(i) \approx x(i-1) + \frac{\dot{x}(i) + \dot{x}(i-1)}{2} \Delta_i \quad (1.12)$$

En supposant là aussi que tous les  $\Delta_i$  valent  $\Delta$ , comme

$$\frac{\dot{x}(i) + \dot{x}(i-1)}{2} = \dot{x}(i-1) + \frac{1}{2} \frac{5}{7}g\Delta \sin \alpha_{n-1} \quad (1.13)$$

le terme général peut s'écrire :

$$(x(n))_{n>0} \approx x(0) + \Delta \sum_{i=0}^{n-1} \dot{x}(i) + \frac{1}{2} \frac{5}{7}g\Delta^2 \sum_{i=0}^{n-1} \sin \alpha_i \quad (1.14)$$

Si l'on pose comme vecteur d'état  $X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$  et en posant  $\forall i, U_i = [\sin \alpha_i]$ , notre système se met donc sous la forme :

$$X_n = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \Delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_A X_{n-1} + \underbrace{\frac{5}{7}g\Delta \begin{bmatrix} \frac{\Delta}{2} \\ 1 \end{bmatrix}}_B U_{n-1} \quad (1.15)$$

$$Y_n = \underbrace{[1 \ 0]}_C X_n \quad (1.16)$$

## 1.2 Étude du système

### 1.2.1 Système initial

#### Stabilité

Le déterminant de  $(pI - A)$  vaut  $(p-1)^2 = p^2 - 2p + 1$  : la condition nécessaire du critère de Routh n'est pas vérifiée, ce qui nous confirme l'instabilité du système.

## Commandabilité

Déterminons la matrice de commandabilité  $\mathcal{C}$  et son rang.

$$\mathcal{C} = [ B \quad AB ] \quad (1.17)$$

$$= \frac{5}{7}g\Delta \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta & \frac{3}{2}\Delta \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

$$\det \mathcal{C} \neq 0 \quad (\Delta \neq 0) \quad (1.19)$$

Le rang de cette matrice est 2 (si  $\Delta$  n'est pas nul, ce qui est nécessairement le cas), le système est donc commandable.

## Observabilité

Déterminons la matrice d'observabilité  $\mathcal{O}$  et son rang.

$$\mathcal{O} = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & \Delta \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

$$\det \mathcal{O} \neq 0 \quad (\Delta \neq 0) \quad (1.22)$$

Le rang de cette matrice est 2 (si  $\Delta$  n'est pas nul, ce qui est nécessairement le cas), le système est donc observable.

### 1.2.2 Commande par retour d'état

Si l'on utilise une commande par retour d'état, on a alors

$$U_i = -K(X_i - X^*) \quad (1.23)$$

$X^*$  étant la consigne et  $K = [ k_1 \quad k_2 ]$ .

Notre système devient donc :

$$X_n = \begin{bmatrix} 1 & \Delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} X_{n-1} - \frac{5}{7}g\Delta \begin{bmatrix} \frac{\Delta}{2} \\ 1 \end{bmatrix} K(X_{n-1} - X^*) \quad (1.24)$$

$$Y_n = [1 \ 0] X_n \quad (1.25)$$

soit :

$$X_n = \underbrace{(A - BK)}_{A'} X_{n-1} + \underbrace{BK}_{B'} X^* \quad (1.26)$$

$$Y_n = [1 \ 0] X_n \quad (1.27)$$

### Conditions de stabilité

Étudions  $A'$  pour savoir à quelles conditions ce système sera stable :

$$\det(pI - A') \approx p^2 + \left( g\Delta \left( \frac{5}{14}\Delta k_1 + \frac{5}{7}k_2 \right) - 2 \right) p + g\Delta \left( \frac{5}{14}\Delta k_1 - \frac{5}{7}k_2 \right) + 1 \quad (1.28)$$

Comme il s'agit d'un système du second ordre, le critère de Routh nous indique qu'il faut :

$$\begin{cases} g\Delta \left( \frac{5}{14}\Delta k_1 + \frac{5}{7}k_2 \right) - 2 > 0 \\ g\Delta \left( \frac{5}{14}\Delta k_1 - \frac{5}{7}k_2 \right) + 1 > 0 \end{cases} \quad (1.29)$$

$$\begin{cases} g\Delta \left( \frac{5}{14}\Delta k_1 + \frac{5}{7}k_2 \right) > 2 \\ g\Delta \left( \frac{5}{14}\Delta k_1 - \frac{5}{7}k_2 \right) > -1 \end{cases} \quad (1.30)$$

comme  $g > 0$  et  $\Delta > 0$ ,

$$\begin{cases} \frac{5}{14}\Delta k_1 + \frac{5}{7}k_2 > 2 \\ \frac{5}{14}\Delta k_1 - \frac{5}{7}k_2 > -1 \end{cases} \quad (1.31)$$

En additionnant, on a :

$$2\frac{5}{14}\Delta k_1 > 1 \quad (1.32)$$

$$k_1 > \frac{7}{5\Delta} \quad (1.33)$$

En soustrayant cette fois, on obtient :

$$2\frac{5}{7}k_2 > 3 \quad (1.34)$$

$$k_2 > \frac{21}{10} \quad (1.35)$$

On a donc les deux conditions suivantes :

$$\begin{cases} k_1 > \frac{7}{5\Delta} \\ k_2 > \frac{21}{10} \end{cases} \quad (1.36)$$

### Précision

On remarque qu'il n'est pas possible de satisfaire l'équation

$$A - BK = 0 \quad (1.37)$$

avec les conditions précédentes sur  $K$ .

Cela implique que cette régulation n'est pas précise (gain statique en boucle fermée différent de 1).

Nous allons donc « augmenter » le système pour résoudre ce problème.

### 1.2.3 Système augmenté

#### Vecteur d'état augmenté

On utilise le vecteur d'état augmenté  $X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ r \end{bmatrix}$  où  $r$  est tel que  $\dot{r} \equiv x$ .

$$X_n = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \Delta & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{A''} X_{n-1} + \underbrace{\frac{5}{7}g\Delta \begin{bmatrix} \frac{\Delta}{2} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{B''} U_{n-1} \quad (1.38)$$

$$Y_n = \underbrace{[1 \ 0 \ 0]}_C X_n \quad (1.39)$$

#### Commandabilité et observabilité

La matrice de commandabilité est la suivante :

$$C' = [ B'' \quad A''B'' \quad A''^2B'' ] \quad (1.40)$$

$$= \frac{5}{7}g\Delta \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\Delta & \frac{3}{2}\Delta & \frac{5}{2}\Delta \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & \frac{1}{2}\Delta & 2\Delta \end{bmatrix} \quad (1.41)$$

Son déterminant est non nul, donc le système est toujours commandable.

Il est immédiat que le système n'est pas observable à cause du nouveau paramètre  $x_3$  dont les conditions initiales ne sont pas observables.

#### Commande par retour d'état

Notre commande par retour d'état est toujours de la forme :

$$U_i = -K (X_i - X^*) \quad (1.42)$$

$X^*$  étant la consigne, mais on a à présent  $K = [ k_1 \quad k_2 \quad k_3 ]$ .

Déterminons les conditions sur  $K$  pour que ce système soit stable.

$$\begin{aligned} \det(pI - (A'' - B''K)) &= p^3 + \left( \frac{5}{14}\Delta^2 g k_1 + \frac{5}{7}\Delta g k_2 - 3 \right) p^2 \\ &+ \left( -\frac{10}{7}\Delta g k_2 + \frac{5}{14}\Delta^2 g k_3 + 3 \right) p \\ &+ \frac{5}{14}\Delta^2 g (k_3 - k_1) + \frac{5}{7}\Delta g k_2 - 1 \end{aligned} \quad (1.43)$$

Selon le critère de Routh, il faut que les conditions suivantes soient vérifiées pour que le système soit stable :

$$k_1 > \frac{7}{2\Delta^2 g} \quad (1.44)$$

$$k_2 > \frac{49}{20\Delta g} \quad (1.45)$$

$$k_3 > \frac{7}{5\Delta^2 g} \quad (1.46)$$

$$\begin{aligned} \frac{5}{7} \left( \frac{\Delta^2 g}{2} k_1 + \Delta g k_2 - \frac{21}{5} \right) & \quad \left( -2\Delta g k_2 + \frac{\Delta^2 g}{2} k_3 + \frac{21}{5} \right) \\ & > -\frac{\Delta^2 g}{2} k_1 + \Delta g k_2 + \frac{\Delta^2 g}{2} k_3 - \frac{7}{5} \quad (1.47) \end{aligned}$$

### 1.3 Limites du modèle

Les limites de ce modèle sont principalement au niveau de notre angle  $\alpha$  : on suppose en effet que la commande est instantanée alors qu'en réalité,  $\alpha(t)$  est une fonction continue qui « tente de suivre » la commande. Cette dernière peut, elle, être discontinue. Le lien entre la commande et l'angle devrait à son tour être modélisé. Il ferait intervenir des paramètres physiques comme le poids de la bille et les caractéristiques des moteurs et du montage, etc.

## Chapitre 2

# La partie mécanique

La partie mécanique de la construction consiste principalement à fabriquer et assembler différentes pièces. Nous avons en fait construit le système en nous basant sur une dalle tactile que nous avons. Le plateau a été dimensionné à partir de celle-ci et les autres pièces en conséquence.

La principale difficulté vient du fait que le plateau doit avoir deux degrés de liberté. On peut imaginer diverses méthodes pour obtenir cela ; le plus simple est sans doute d'utiliser des rotules.

La figure 2.1 présente les caractéristiques essentielles des rotules utilisées.

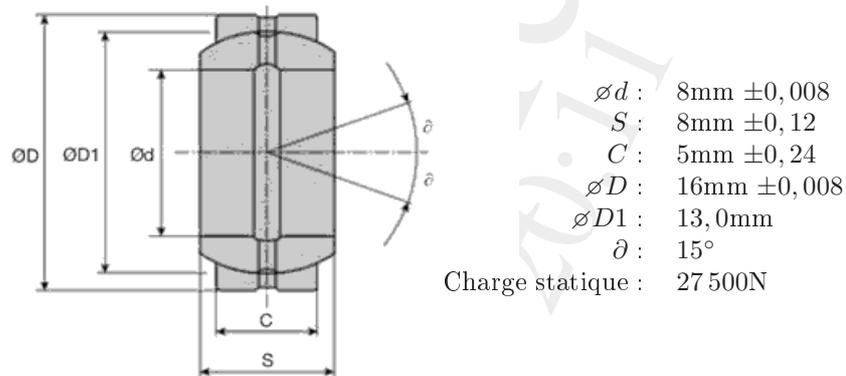


FIG. 2.1 – Les rotules qui permettent les mouvements du plateau (image : *HPC*).

Le plateau étant constitué d'une plaque de tôle, ces rotules ne peuvent y être fixées directement. Nous avons donc usiné dans une barre d'aluminium (cf. figure 2.2) des supports pour fixer ces rotules au plateau.

Ces supports eux-mêmes doivent être fixés au plateau. Nous avons envisagé différents moyens pour ce faire et avons choisi de les coller à l'époxy. Pour assurer une bonne tenue, il faut prendre soin de décaper les surfaces collées. Dans le cas de l'aluminium qui s'oxyde très vite, le décapage et l'application de la colle se font simultanément à l'aide d'un morceau de papier abrasif imperméable recouvert de colle.

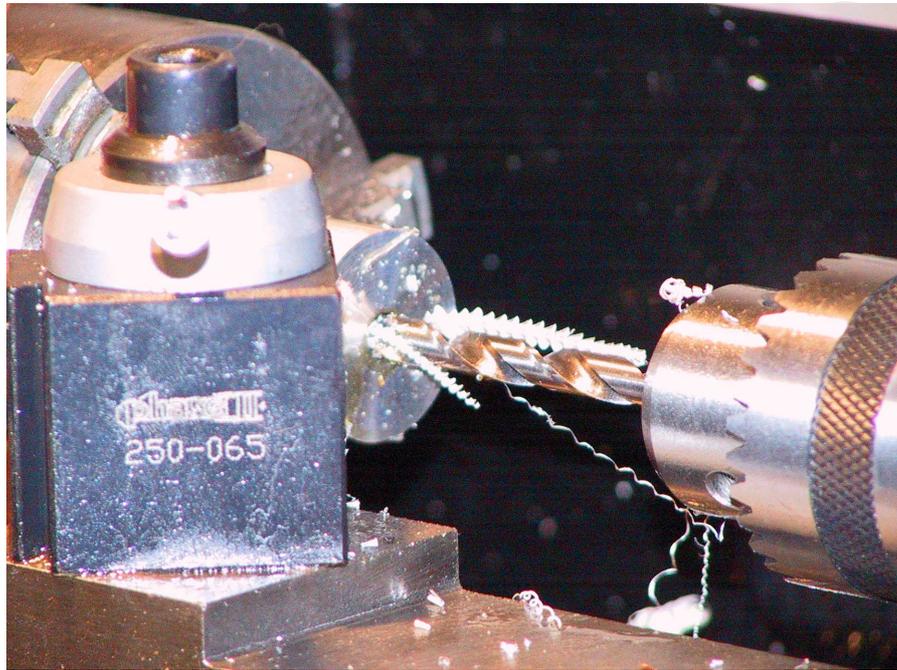


FIG. 2.2 – Usinage des supports de rotule

Des tiges filetées M4 sont utilisées comme bielles. Là aussi, des pièces (figure 2.4) ont été usinées pour faire le lien avec les rotules d'une part, et avec le bras des servomoteurs d'autre part.

Les supports des servomoteurs sont simplement des plaques de tôle découpées et pliées. Ils sont eux-même vissés sur la base.

La base est une croix de bois faite à partir de chevrons de  $5 \times 10$  centimètres. Elle assure la stabilité de l'ensemble. Une tige part de son centre et supporte le plateau, via la rotule centrale de celui-ci.

La figure 2.6 montre l'aspect global du système. Les cartes électroniques (voir chapitre suivant) ne sont pas présentes sur cette photographie, mais elles viennent se fixer sur la base.

Dans les améliorations qu'il serait possible d'apporter, on peut noter :

- le montage du plateau sur rotules fait que celui-ci peut tourner autour de l'axe central. Bien que la présence des moteurs l'en empêche normalement, les bras en plastique des servomoteurs utilisés sont relativement souples et peuvent se déformer, laissant le plateau libre de tourner sur quelques degrés. À part le stress mécanique que cela impose aux bras des moteurs, cela n'est toutefois pas gênant ;
- les supports des servomoteurs pourraient être renforcés afin d'éviter un léger jeu dû à leur déformation lorsque l'effort des moteurs change de sens.



FIG. 2.3 – La face inférieure du plateau, avec les trois supports de rotules.

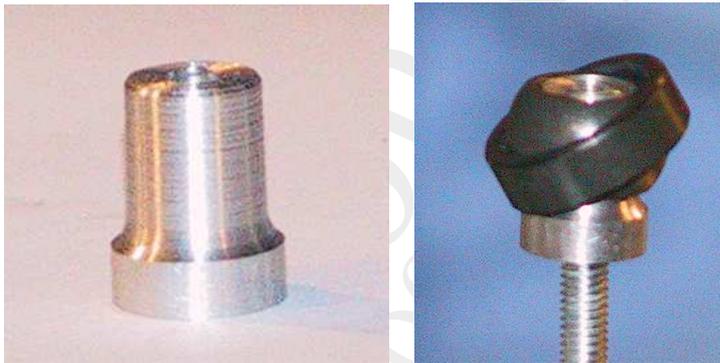


FIG. 2.4 – Une des pièces usinées pour faire le lien entre les rotules et les bielles (seule à gauche, avec rotule et bielle à droite).

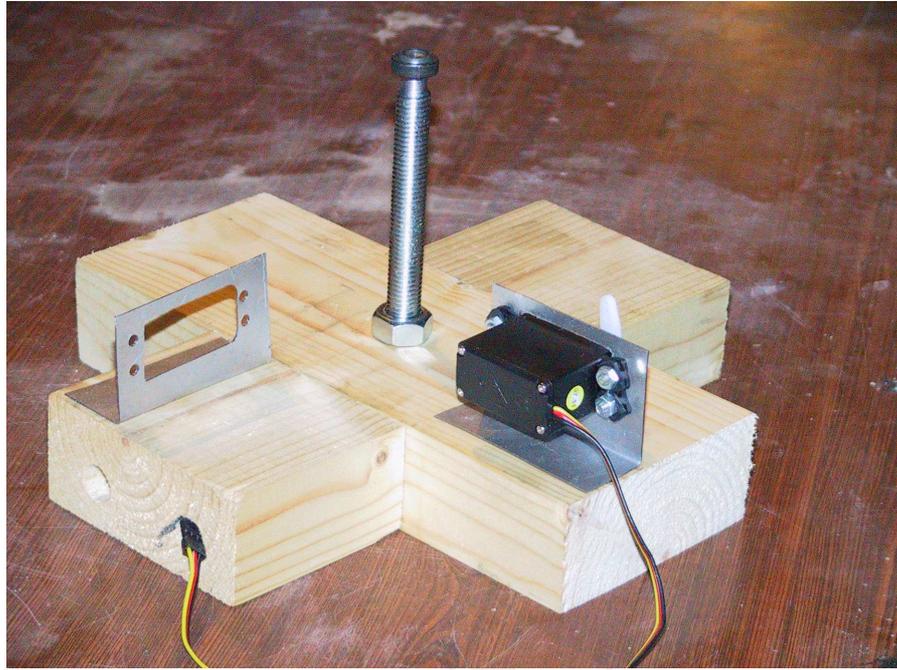


FIG. 2.5 – La base du montage, avec la tige destinée au support du plateau, les supports des servomoteurs et un servomoteur.

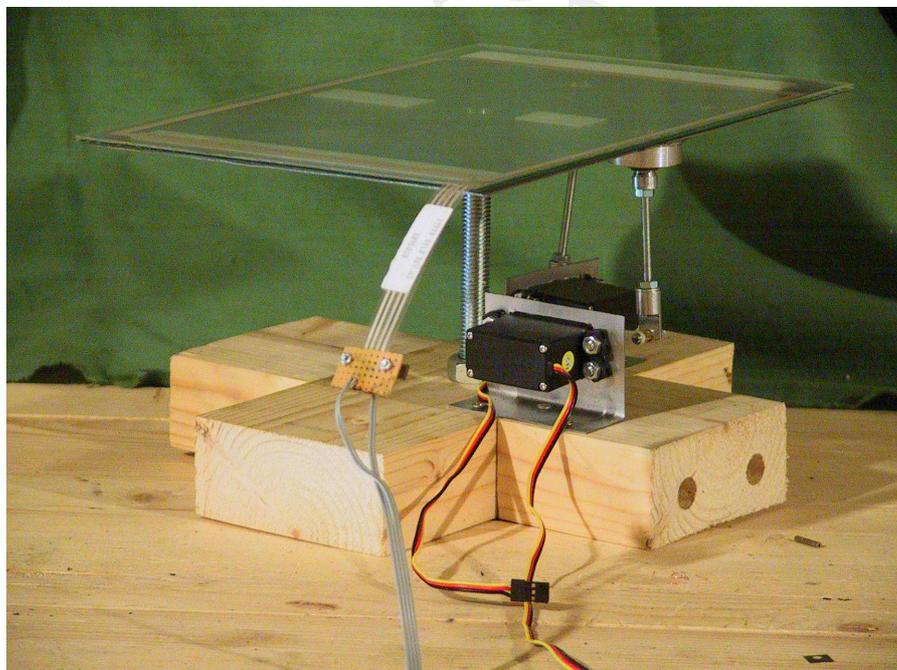


FIG. 2.6 – Les différentes pièces de la partie mécanique assemblées.

## Chapitre 3

# Le circuit de contrôle

Le circuit électronique peut se diviser, sur un plan logique, en quatre parties :

1. une partie alimentation, qui fournit les tensions nécessaires ;
2. une partie acquisition qui est chargée d'interfacer les capteurs et le microcontrôleur ;
3. une partie « centrale » constituée du microcontrôleur et des composants qui lui sont liés (quartz, etc.) ;
4. une partie « action » qui fait l'interface entre le microcontrôleur et la partie mécanique.

Pour des questions de facilité de mise au point, nous avons développé des modules (circuits imprimés) distincts pour ces différentes parties (à l'exception de la dernière, très réduite il est vrai).

Revenons sur ces différentes parties un peu plus en détail.

### 3.1 L'alimentation

L'alimentation est particulièrement simple : elle est construite autour de deux régulateurs qui fournissent les tensions régulées dont les composants ont besoin. Notons que cette alimentation ne fournit pas le 6V utilisé par les servomoteurs, ceux-ci étant directement alimentés séparément.

Il s'agit d'une adaptation directe de celle décrite dans [1], seul le régulateur 3,3 V ayant été remplacé (pour des questions de disponibilité). Son schéma se trouve figure 3.1 ; le circuit imprimé correspondant figure 3.2.

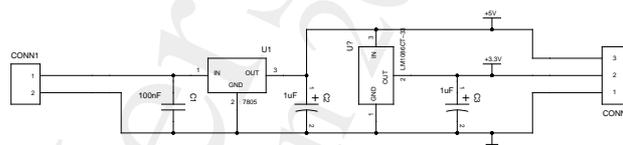


FIG. 3.1 – Schéma de l'alimentation.

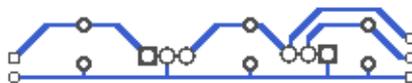


FIG. 3.2 – Circuit imprimé de l'alimentation, correspondant au schéma de la figure 3.1.

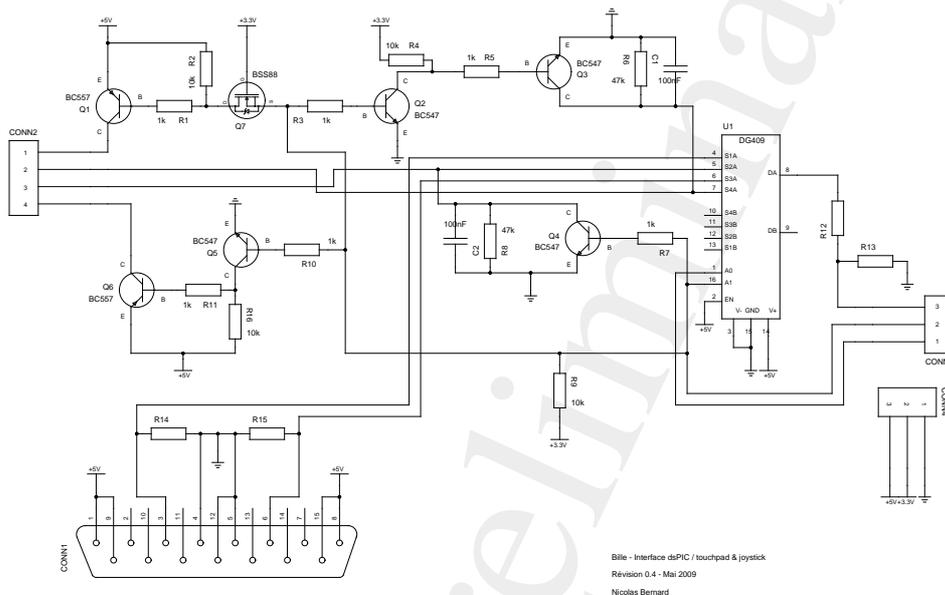


FIG. 3.3 – Schéma de la partie acquisition.

## 3.2 La partie acquisition

Dans notre système, il y a deux entrées possible, selon le mode de fonctionnement choisi :

- un joystick en mode manuel ;
- la dalle tactile en mode automatique.

À chaque fois, il faut extraire les coordonnées en  $x$  et en  $y$  de ces entrées. Comme la dalle tactile impose une lecture séquentielle des coordonnées, nous avons choisi de n'utiliser qu'une seule entrée analogique sur le dsPIC.

Cette partie acquisition prend donc en entrée deux signaux numériques, l'un pour indiquer le mode (automatique ou manuel – **mode**), l'autre pour indiquer si l'on lit  $x$  ou  $y$  (**select**). En retour, ce module envoie le signal analogique correspondant. Le schéma de cette partie est donné sur la figure 3.3 et son circuit imprimé sur la figure 3.4

### 3.2.1 Sélection du signal analogique

Nous avons donc au total quatre signaux analogiques potentiels. La dalle tactile ne peut en fournir qu'un à la fois ; le joystick fournit les deux, mais

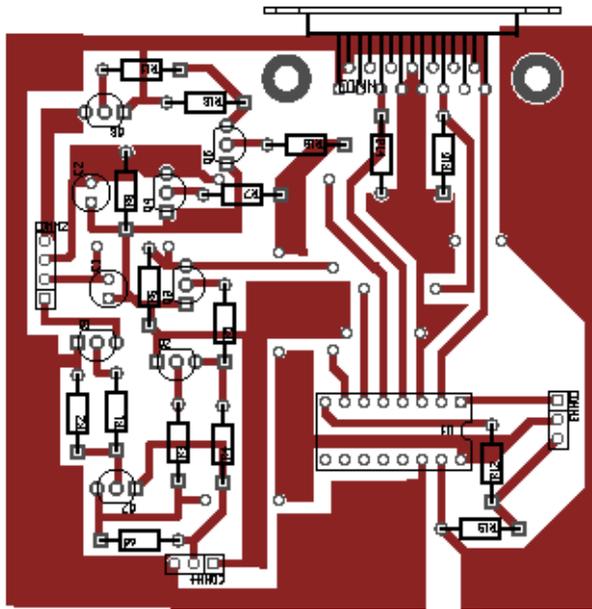


FIG. 3.4 – Circuit imprimé de la partie acquisition.

ils seront échantillonnés successivement. Afin de n'utiliser qu'une seule entrée analogique sur le dsPIC, nous pouvons donc utiliser un multiplexeur analogique comme le DG409 [3].

Celui-ci est utilisé de manière à ce que l'inverseur de sélection du mode permette de sélectionner un groupe de deux entrées (qui seront  $x$  et  $y$  pour le périphérique d'entrée choisi), tandis qu'un signal numérique `select` en provenance du microcontrôleur indique s'il faut transmettre  $x$  ou  $y$ . Notons que la documentation indique qu'une tension supérieure à 2,7V sera interprétée comme un 1 logique; la commande par le dsPIC peut se faire directement.

Le signal analogique sortant du DG409 est a priori entre 0 et 5V. Le dsPIC nécessite un signal compris entre 0 et 3,3V; deux résistances forment donc un pont diviseur sur le signal de sortie.

### 3.2.2 Interface avec le joystick

Nous avons prévu la connexion d'un joystick PC pré-USB, c'est-à-dire muni d'une prise à 15 broches.

Ces joysticks, dans leur expression la plus simple, sont en fait deux résistances variables (0 à 100 k $\Omega$ ) connectées à une alimentation 5V. Nous avons donc ajouté une résistance vers la masse pour récupérer une tension qui varie en fonction de la position du joystick.

### 3.2.3 Interface avec la dalle tactile

Notre dalle tactile est une dalle résistive. C'est-à-dire que si l'on applique une tension entre *haut* et *bas*, on a sur *droite* et / ou *gauche* une tension proportionnelle à la « hauteur » du point de pression (on peut faire le parallèle avec la

broche centrale d'une résistance ajustable). L'inverse se produit si l'on applique à présent la tension entre *droite* et *gauche*.

Cela veut dire qu'il faut pouvoir appliquer une tension entre une paire de bornes et avoir l'autre paire déconnectée de l'alimentation pour pouvoir « lire » ce qui s'y trouve, puis inverser les deux paires.

Pour cela, nous avons adapté le circuit proposé dans [9]. Ce circuit réalise ce que nous avons décrit ci-dessus à l'aide de transistors communs, commandés par le signal que nous appelons `select`.

Nos adaptations sont justement liées à ce signal :

- le circuit original utilisait deux signaux de commande distincts et non un seul ;
- notre signal de commande est un signal 3,3V (alors que la dalle est alimentée en +5V<sup>1</sup>), nous avons donc ajouté un FET pour réaliser l'adaptation comme suggéré dans [12] ;
- de plus, nous avons respectivement remplacé les transistors BC546 et BC556 par des transistors BC547 et BC557 car nous avons ces derniers à disposition.

### 3.2.4 Alternatives et améliorations possibles

A posteriori, il y a un certain nombre de choses que l'on pourrait faire différemment.

Tout d'abord, nous avons découvert récemment qu'il était possible de configurer certaines sorties numériques du dsPIC en collecteur ouvert. Cela signifie qu'il lui serait possible d'« envoyer » un signal de commande en +5V, et donc que le FET n'est pas nécessaire.

Ensuite, il serait possible d'envoyer les quatre signaux analogiques directement sur différentes broches du dsPIC et de choisir celle qui nous intéresse de manière logicielle. Ce choix peut se discuter et est à faire en fonction de l'usage du dsPIC. Ici il serait possible. Dans ce cas, il faudrait toutefois ajouter des résistances car chaque signal nécessitera alors son propre pont diviseur.

Remarquons d'ailleurs que même avec un montage comme le nôtre et son multiplexeur analogique, il pourrait être intéressant de placer un pont diviseur par signal avant le multiplexeur (au lieu d'un pont commun en sortie) afin d'avoir une meilleure adaptation des impédances.

## 3.3 Le microcontrôleur

Notre microcontrôleur est un dsPIC33FJ128MC802 [7] en boîtier SDIP (28 broches). Il fait donc partie de la famille des dsPIC33 de Microchip : il s'agit de microcontrôleurs 16 bits fonctionnant en 3,3V et avec des capacités de traitement du signal.

La programmation de cette puce sera traitée au chapitre suivant et nous ne nous intéressons donc ici qu'à son environnement matériel. Celui-ci, illustré figure 3.5 (circuit imprimé figure 3.6), est très simple et se décompose principalement comme suit :

---

<sup>1</sup>La dalle pourrait en fait sans doute être alimentée en 3,3V.

- un condensateur entre l'entrée  $V_{\text{cap}}$  et la masse ;
- un quartz entre OSC0 et OSC1 ;
- un circuit de reset.

Le reste du schéma est constitué d'un interrupteur pour choisir le mode de fonctionnement (contrôle automatique par le microcontrôleur ou contrôle manuel avec le joystick), d'une LED connectée sur la sortie RB5 du dsPIC et de connecteurs pour relier ce circuit au programmeur, à son alimentation et aux autres circuits.

Nous avons choisi de laisser la possibilité d'évolutions futures de notre montage, c'est pourquoi les broches non utilisées actuellement sont également disponibles sur des connecteurs. Les broches du PWM sont également disponibles sur un connecteur afin de laisser la possibilité d'ajouter un circuit de puissance pour s'interfacer avec d'autres actionneurs.

## 3.4 Les actionneurs

Il faut un moyen de convertir les ordres donnés par le microcontrôleur en des actions physiques. On peut imaginer divers moyens (pistons et vérins, moteurs, etc.). Nous avons choisi d'utiliser des servomoteurs de modélisme, qui sont à la fois faciles à obtenir et à mettre en œuvre.

### 3.4.1 Servomoteurs de modélisme

Les servomoteurs de modélisme ont en général trois fils : un fil pour l'alimentation de puissance (6V dans notre cas), un fil pour des impulsions de commande, et une masse commune.

D'après le constructeur [2], les impulsions de commande sont des impulsions carrées d'une durée variant entre 0,9 et 2,1 millisecondes, rafraîchies à 50 Hz et d'amplitude comprise entre 3 et 5 V.

Cela signifie entre autres que les impulsions délivrées par une unique sortie PWM du dsPIC sont d'amplitude suffisante (3,3V). Il s'agit d'un signal de commande, donc il n'est pas nécessaire d'ajouter un étage de puissance, le dsPIC peut contrôler directement les moteurs.

### 3.4.2 Alternatives et améliorations possibles

Une possibilité pour remplacer les servomoteurs s'ils n'étaient pas assez rapides pourrait être d'utiliser des moteurs de disques durs. Un disque dur standard comporte deux moteurs, l'un qui fait tourner les plateaux, l'autre (figure 3.7) qui positionne la tête de lecture sur le cylindre auquel on veut accéder. Les mouvements de ce dernier sont limités, mais il est à la fois puissant et très rapide.

Dans les disques durs, ces moteurs, appelés *voice-coil motors* à cause de leur mécanisme ressemblant à ceux des haut-parleurs, sont asservis par l'intermédiaire de données spécifiques inscrites sur les plateaux et lues par l'électronique du disque. Sans les plateaux, cet asservissement disparaît, mais pour notre système cela ne semble pas gênant a priori.

Le contrôle de tels moteurs nécessiterait l'usage d'une vraie partie puissance dans notre montage, par exemple basée sur un pont en H L298 : le dsPIC n'est

pas capable de fournir la puissance demandée par ces moteurs directement.

Nous n'avons pas trouvé d'exemple de montages amateurs utilisant de tels moteurs avec un contrôle fin. Le seul exemple que nous ayons trouvé les utilise en tout-ou-rien, c'est-à-dire en butée d'un côté ou de l'autre [4].

Version préliminaire  
5 juin 2009 -- 20:11

Bille - dsPIC - Circuit controle  
 Révision 0.3 Mai 2009  
 Nicolas Bernard

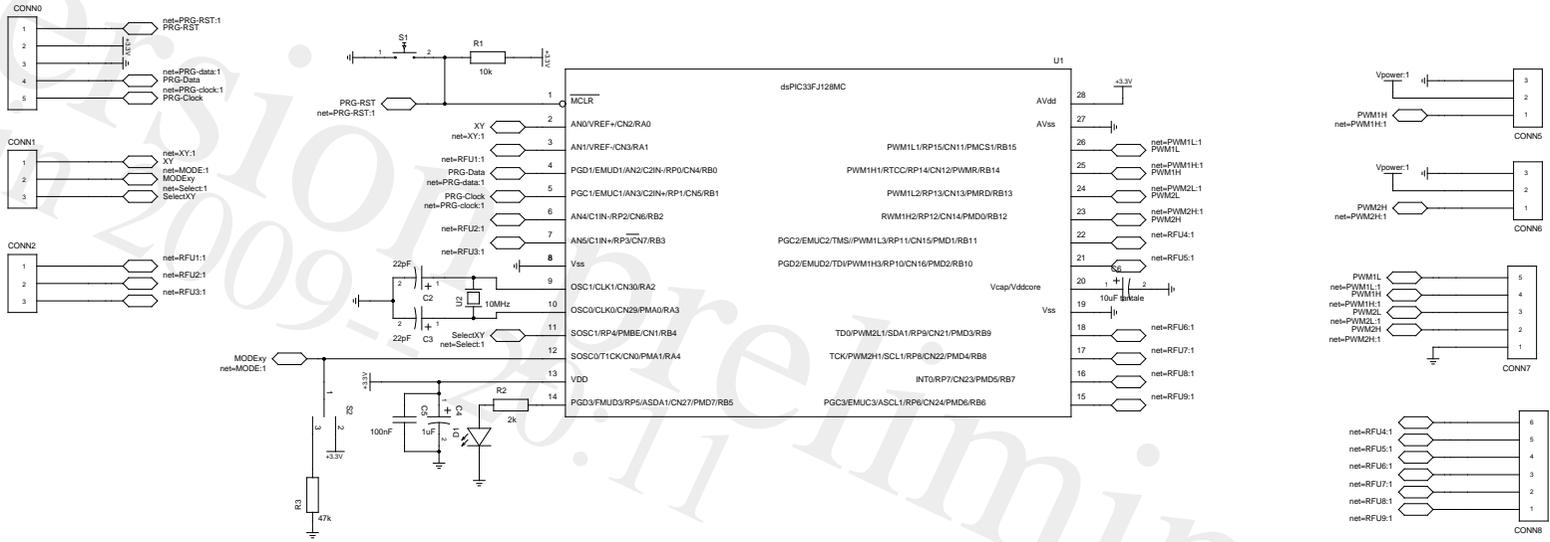


Fig. 3-5 – Schéma de l'environnement du microcontrôleur.

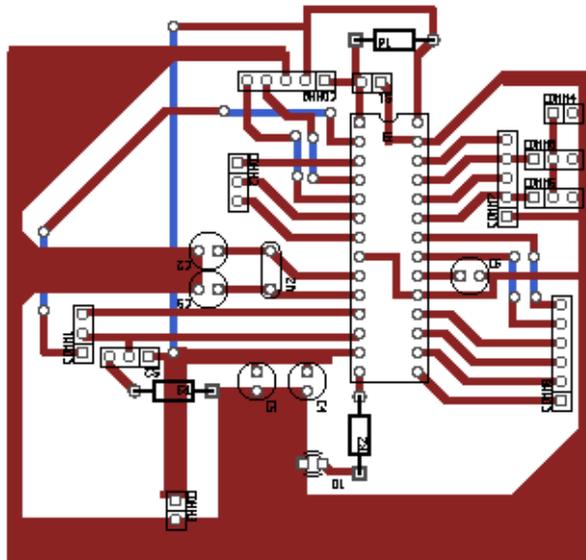


FIG. 3.6 – Circuit imprimé correspondant au schéma de la figure 3.5. La seconde face a été réduite au minimum afin de pouvoir réaliser un circuit simple face avec des *straps*.

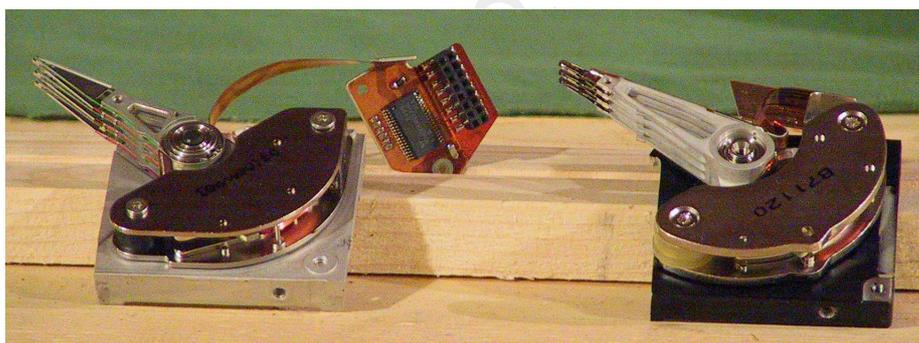


FIG. 3.7 – Deux *voice-coil motors*. Ces moteurs positionnent les têtes dans les disques durs.

## Chapitre 4

# La programmation du PIC

Le microcontrôleur dsPIC est le cœur du système. C'est lui qui fait l'interface entre les différentes parties et qui assure la régulation. Sa programmation est donc particulièrement importante. C'est ce que nous explorons dans ce chapitre (*n.b.* : le programme complet se trouve dans l'annexe A).

### 4.1 Configuration générale

Configuration de l'horloge :

```
/* External crystal, exotic options disabled. */
_FOSC(OSCIOFNC_ON & FCKSM_CSDCMD & POSCMD_HS);
3 /* We use the crystal (primary) from reset. */
_FOSCSEL(FNOSC_PRI & IESO_OFF);
```

Nous utilisons un quartz de 10 MHz, donc :

$$F_{\text{osc}} = 10\,000\,000 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

$$F_{\text{CY}} = \frac{F_{\text{osc}}}{2} = 5\,000\,000 \text{ Hz} \quad (4.2)$$

Cela nous servira ultérieurement pour déterminer les paramètres dépendants du temps.

```
_FWDT(FWDTEN_OFF); //Turn off WatchDog Timer
_FGS(GSS_OFF & GCP_OFF & GWRP_OFF); //Turn off code protect
3 _FPOR(FPWRT_PWR1); //Turn off power up timer
```

### 4.2 Configuration des entrées / sorties

Pour déterminer la configuration des registres d'entrées / sorties, faisons le tour des différentes broches :

- la broche 2 est utilisée en tant qu'entrée analogique. C'est la seule entrée analogique, le registre ADPCFG prend donc la valeur 0xFFFE ;
- les broches 4 et 5 sont utilisées uniquement pour la programmation du microcontrôleur ;
- la broche 11 comme sortie numérique RB4.

- la broche 12 est utilisée comme entrée numérique RA4 ;
- la broche 14 est utilisée comme sortie numérique RB5 pour une LED de contrôle ;

On a donc :

```
TRISA = 0x0011; // RA0 is an [analog] input, RA4 is a digital input, others are output.
TRISB = 0x0000;
```

### 4.2.1 Configuration du CAN

Le convertisseur analogique numérique est configuré pour utiliser la broche AN0 comme canal 0. C'est le seul canal utilisé, la conversion se fait avec douze bits de précision.

La conversion commence automatiquement quand l'échantillonnage est terminé, et une interruption est envoyée pour signaler la disponibilité du résultat.

L'échantillonnage sera lui commandé par le TIMER1 de manière à ce qu'il se fasse régulièrement.

```
AD1CON1 = 0x04E0; // SSRC = auto-convert
AD1CON2 = 0;
3 AD1CON3 = 0;
AD1CON4 = 0;
AD1CHS0 = 0; // CH0 on AN0
6 AD1CSSL = 0;
  _AD1IF = 0;
  _AD1IE = 1;
```

Les valeurs lues sont normalisées, de manière à être exploitables par le PID. Ainsi, par exemple, pour l'axe X :

```
float adcval = ADC1BUF0 - 198;
if (adcval < 0)
3   adcval = 0;
adcval = adcval / 2893;
```

### 4.2.2 Configuration du PWM

Les servomoteurs de modélisme utilisés sont commandés par des impulsions carrées d'une durée variant entre 0,9 et 2,1 secondes, se répétant toute les 20 millisecondes.

$$PxTPER = \frac{F_{cy}}{F_{pwm} \times PxTPER_{prescaler}} - 1 \quad (4.3)$$

$$P1TPER = \frac{5\,000\,000}{50 \times P1TPER_{prescaler}} - 1 \quad (4.4)$$

$$P1TPER_{prescaler} \in \{1, 4, 16, 64\} \quad (4.5)$$

La valeur 1 ne peut convenir comme  $PxTPER$  doit tenir dans 16 bits. 4 convient, on aura donc  $P1TCON < 3, 2 > = 01_b$

$$P1TPER = \frac{5\,000\,000}{50 \times 4} - 1 \quad (4.6)$$

$$= \frac{5\,000\,000}{200} - 1 \quad (4.7)$$

$$= 25\,000 - 1 \quad (4.8)$$

$$= 24\,999 \quad (4.9)$$

$$\text{PWM}_{\text{Resolution}} = \log_2 \left( \frac{2F_{\text{CY}}}{F_{\text{PWM}} \times Px\text{TPER}_{\text{prescaler}}} \right) \quad (4.10)$$

$$= \log_2 50\,000 \quad (4.11)$$

$$\approx 15,6 \quad (4.12)$$

$$\approx 16 \text{ bits} \quad (4.13)$$

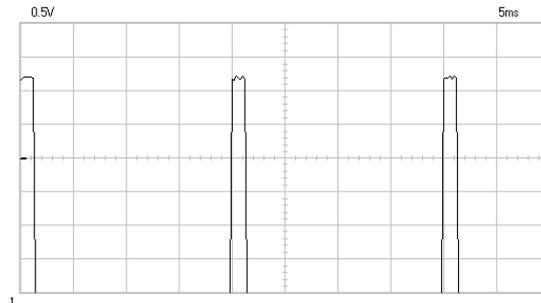


FIG. 4.1 – Oscillogramme de la sortie PWM du dsPIC pour le contrôle d’un servomoteur de modélisme.

## 4.3 Régulation PID

Il serait tout à fait possible de programmer un régulateur PID (c’est d’ailleurs ce que nous avons commencé par faire), mais ce n’est pas nécessaire : la bibliothèque DSP du dsPIC en fournit déjà une implémentation [5]. Cette implémentation fait usage du module DSP et fait les calculs avec des types `fractional` : ainsi elle peut effectuer les calculs sur des valeurs comprises dans  $[-1, 1]$  de manière beaucoup plus rapide qu’en les faisant avec un type `float` traditionnel.

### 4.3.1 Temps

Le temps est important car l’hypothèse sous-jacente est que les mesures sont faites à intervalles réguliers. C’est l’hypothèse que nous avons faite lors de la modélisation en disant que tous les  $\Delta_i$  étaient égaux à  $\Delta$ .

Dans notre cas, nous avons le `Timer1` qui est utilisé pour donner un « top » à intervalles réguliers. Ce signal est uniquement utilisé pour déclencher l’acquisition du CAN. L’interruption provoquée par la fin de la conversion analogique / numérique provoque la mise à jour du régulateur PID avec la nouvelle valeur et l’assignation d’une nouvelle valeur aux PWMs (en fait on ne travaille que sur un axe à la fois, en alternance).

### 4.3.2 Utilisation du PID DSP

Pour utiliser les fonctions fournies, il faut d'abord déclarer des variables de type `tPID` et les initialiser. Ce type `tPID` est une structure qui comporte les variables relatives à une régulation PID, définie ainsi dans la bibliothèque DSP :

```
typedef struct {  
    fractional * abcCoefficients ;  
3    fractional * controlHistory ;  
    fractional controlOutput ;  
    fractional measuredOutput ;  
6    fractional controlReference ;  
} tPID ;
```

Les noms des trois derniers membres sont assez explicites : ils correspondent respectivement à la sortie du PID, à la valeur de la mesure (entrée du PID) et à la consigne. Le premier membre est un pointeur sur un tableau de trois coefficients ( $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  étant bien sûr les gains proportionnel, intégral et dérivé) :

$$\{ K_p + K_i + K_d , -(K_p + 2 \times K_d) , K_d \}$$

Ce ne sont pas directement les gains qui sont utilisés pour des raisons de vitesse du calcul : il est plus efficace de remplir une fois ce tableau (une fonction `PIDCoeffCalc` est fournie pour le faire) que d'utiliser les gains à chaque fois. Le membre `controlHistory` est un tableau de trois valeurs destiné à garder un historique ; il faut toutefois faire attention en le déclarant car il doit être placé en *espace Y*.

La préparation d'une structure `tPID` se fait donc ainsi :

```
tPID X_axis ;  
fractional x_abccoeff[3] ;  
3 fractional x_ctlhist [3] __attribute__((space(ymemory),far)) ;  
  
X_axis.abcCoefficients = x_abccoeff ;  
6 X_axis.controlHistory = x_ctlhist ;  
X_axis.controlReference = Float2Fract(0.4) ; // consigne  
  
9 fractional x_PIDcoef[3] ; // Gains proportionnel, integral et derive  
x_PIDcoef[0] = Float2Fract(0.45) ; // Gain proportionnel  
x_PIDcoef[1] = Float2Fract(0.001) ; // Gain integral  
12 x_PIDcoef[2] = Float2Fract(0.1) ; // Gain derive  
  
PIDCoeffCalc(x_PIDcoef, &X_axis) ;  
15 PIDInit(&X_axis) ;
```

La fonction PID peut ensuite être appelée régulièrement en stockant préalablement la valeur mesurée dans le membre `measuredOutput` et donne son résultat dans le membre `controlOutput`, comme nous le faisons dans la routine d'interruption du CAN :

```
X_axis.measuredOutput = Float2Fract(adcval) ;  
PID(&X_axis) ;  
3 PIDC1 = MID_X + 1000 * Fract2Float(X_axis.controlOutput) ;
```

## 4.4 Fonctions diverses

Finalement, notons que nous avons défini quelques fonctions auxiliaires pour déboguer le programme. Ainsi par exemple la fonction `crash` va boucler en faisant clignoter la LED répétitivement un nombre de fois passé en paramètre.

```
inline void
crash(int bip)
3 {
    while(1) {
        _LATB5 = 0; // led off
6        unsigned long x, i;
        for (x = 0; x < 1000000; x++);
        for (i = 0; i < bip; i++) {
9            _LATB5 = 1;
            for (x = 0; x < 100000; x++);
            _LATB5 = 0;
12            for (x = 0; x < 100000; x++);
        }
15 }
}
```

Bien que cette fonction soit très simple, elle permet de distinguer un problème d'un autre. On peut par exemple définir les interruptions suivantes qui vont appeler cette fonction et feront clignoter différemment la LED selon le problème rencontré :

```
void __attribute__((__interrupt__, auto_psv))
_AddressError(void)
3 {
    crash(1);
}
6
void __attribute__((__interrupt__, auto_psv))
_StackError(void)
9 {
    crash(2);
}
12
void __attribute__((__interrupt__, auto_psv))
_MathError(void)
15 {
    crash(3);
}
```

*Version préliminaire*  
*5 juin 2009 -- 26:11*

## Conclusion

Ce projet nous a permis d'explorer le programme de la LIE de manière transversale (et même au-delà, comme la partie mécanique).

Le système réalisé est résolument expérimental et nous avons indiqué dans ce rapport un certain nombre d'améliorations — ou du moins de modifications — qui pourraient être apportées pour une « version 2 ».

[TODO]

*Version préliminaire*  
*5 juin 2009 -- 20:11*

## Annexe A

# Le programme du dsPIC

[TODO]

*Version préliminaire*  
5 juin 2009 -- 20:11

*Version préliminaire*  
*5 juin 2009 -- 20:11*

# Bibliographie

- [1] Lotfi Baghli. Mobrob – schéma, 2008.
- [2] Hitec. *General Servo Information*, 2 édition, 2002.
- [3] Intersil. *DG408, DG409 Data Sheet*, juin 1999. Fichier 3283.5 ; disponible en ligne.
- [4] L. P. Maguire, S. Szilagyi, and R. E. Scholten. High performance laser shutter using a hard disk drive voice-coil actuator. *Review of Scientific Instruments*, 75(9) :3077–3079, septembre 2004.
- [5] Microchip. *MPLAB® C30 DSP Library*. Installée dans le répertoire docs/dsp\_lib de MPLAB C30.
- [6] Microchip. *16-bit Language Tools Libraries*, 2008. Version DS51456E ; disponible en ligne sur <http://www.microchip.com>.
- [7] Microchip. *dsPIC33FJ32MC302/304, dsPIC33FJ64MCX02, and dsPIC33-FJ128MCX02/X04 Data Sheet*, 2008. Version DS70291B ; disponible en ligne sur <http://www.microchip.com>.
- [8] Microchip. *MPLAB C Compiler for PIC24 MCUs and dsPIC DSCs User's Guide*, 2008. Version DS51284H ; disponible en ligne sur <http://www.microchip.com>.
- [9] Dusan Mihajlovic. Bon, maintenant il vous faut un écran tactile. Article publicitaire pour *mikroElektronika*, janvier 2009. Disponible en ligne : <http://www.mikroe.com/en/article/09/01/>.
- [10] National Semiconductor. *LM1086 1.5A Low Dropout Positive Regulators*, juin 2005. Disponible en ligne sur <http://www.national.com>.
- [11] Philips Semiconductors. *BC546, BC547 NPN general purpose transistors*, avril 1999. Disponible en ligne.
- [12] Herman Schutte. *Bi-directional level shifter for I<sup>2</sup>C-bus and other systems*. Philips Semiconductors, août 1997. Application Note AN97055 ; disponible en ligne.
- [13] Siemens. *BSS88 SIPMOS Small-Signal Transistor*, mai 1997. Disponible en ligne.