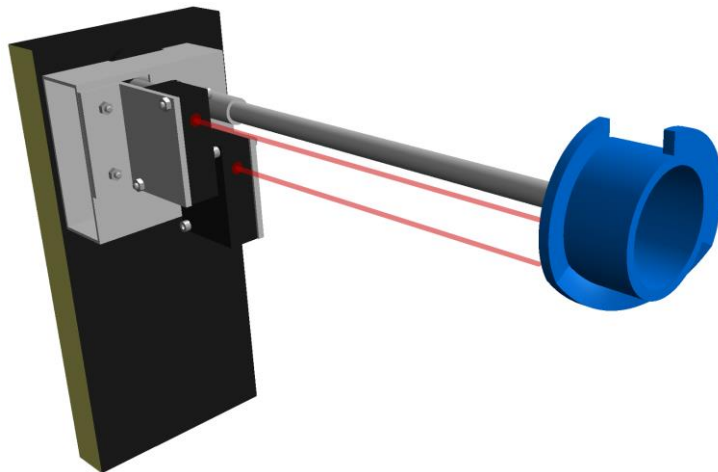




ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

# Projet d'ingénierie simultanée

Stratégie de Babyfoot, vision des adversaires



**Résumé** – Dans ce rapport, nous décrivons notre démarche dans la conception d'un système permettant de mesurer la disposition des joueurs adverses sur une table de Babyfoot.

**Réalisé par**

Paul-Arthur DREYFUS, Son PHAM-BA

**Supervisé par**

Christophe SALZMANN, Milan KORDA

École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Semestre du printemps 2015

## Table des matières

1. Introduction .....	2
2. État de l'art.....	2
3. Cahier des charges.....	3
4. Description des idées .....	3
4.1. Spirale et capteurs de distance.....	3
4.2. Caméra.....	3
4.3. Magnétisme .....	4
4.4. Codage sur la canne.....	4
4.5. Ondes radio.....	4
4.6. Capteur de distance <i>Terabee</i> .....	4
5. Évaluation des solutions.....	5
6. Présentation de la solution .....	6
6.1. Description.....	6
6.1.1. Capteurs de distance .....	6
6.1.2. Acquisition des données.....	6
6.1.3. Positionnement des capteurs .....	7
6.1.4. Spirale.....	7
6.2. Assemblage.....	8
6.2.1. Liste des pièces .....	8
6.2.2. Mise en plan .....	8
6.2.3. Fabrication.....	8
6.2.4. Montage .....	8
6.3. Traitement des données .....	8
7. Réalisation.....	9
7.1. Montage .....	9
7.2. Résultats .....	11
8. Continuation .....	14
8.1. Montage .....	14
8.2. Capteurs.....	14
8.3. Traitement des données.....	14
9. Conclusion.....	15
Bibliographie.....	16

## 1. Introduction

Dans le cadre du projet d'ingénierie simultanée au laboratoire d'automatique de l'EPFL, une équipe d'étudiants ont repris en main l'ancien projet de stratégie sur un *Babyfoot*. Ce projet consiste en l'automatisation de l'un des côtés du *Babyfoot* pour permettre à une personne d'y jouer seul. À terme, ce projet pourra par exemple être commercialisé à des joueurs professionnels ou dans de grandes salles de jeu, pouvant attirer les bons joueurs qui voudront affronter la machine. Ce sera aussi un bon moyen de mettre en avant la *Laboratoire d'Automatique* lors des journées portes ouvertes de l'EPFL.

Le développement de ce projet a été séparé en plusieurs parties, qui ont toutes été faites par un binôme : la stratégie, le contrôle, la vision de la balle et la vision des adversaires. Dans ce rapport, nous allons décrire le développement de la vision des joueurs adverses.

## 2. État de l'art

Nous ne sommes pas les premiers à s'être penchés sur ce problème. En effet *l'Université Technologique de Munich* a déjà publié un papier décrivant la réalisation de l'exact même projet [1].

Pour la partie de la vision des joueurs adverses, ils ont utilisé deux capteurs de distance basés sur des lasers de la marque *Baumer*. Au bout des cannes, ils ont placé une forme assez particulière permettant de transformer le degré de liberté de rotation en un degré de translation, comme l'on peut le voir sur la Figure 1. Cela permet grâce aux deux lasers de mesurer la distance et l'angle de la canne. Leur solution est élégante mais possède quelques points négatifs, le principal étant dû à la distance entre les capteurs et le babyfoot. En effet cela réduit la robustesse des mesures lorsque le babyfoot est soumis à des chocs.

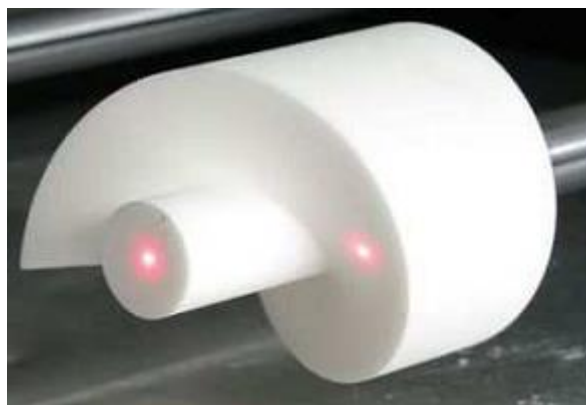


Figure 1 – Spirale au bout d'une canne

### 3. Cahier des charges

Nous avons identifié les fonctions principales (FP) et les fonctions contraintes (FC) du mécanisme à concevoir. L'aptitude du système à satisfaire une fonction donnée est évaluée selon des critères et quantifiée par des valeurs lorsque cela est possible.

Tableau 1 - Cahier des charges

Type	Description	Critères	Valeurs
FP1	Détecter la position linéaire et l'angle d'une canne	Fréquence des mesures	Supérieure à 300Hz
		Précision des mesures	Inférieure à 1mm
FP2	Transmettre les données	-	-
FC1	Robustesse	Résistance aux chocs	Déviations faibles
FC2	Distance de mesure du capteur	Borne inférieure	Le plus proche de 0
		Borne supérieure	Supérieure à 200 mm
FC3	Inertie ou frottement rajoutés	-	Plus faible possible

### 4. Description des idées

Afin de satisfaire au cahier des charges, nous avons eu plusieurs idées concernant la mesure des positions linéaire et angulaire des cannes.

#### 4.1. Spirale et capteurs de distance

La première idée est basée sur la solution déjà fonctionnelle développée par *l'Université Technologique de Munich*, décrite plus haut dans l'état de l'art. Quelques idées de modifications ont quand même émergé. Les capteurs ne sont plus éloignés du babyfoot mais collés dessus, permettant d'augmenter la robustesse. La spirale est donc conçue à l'envers de celle montrée sur la Figure 1 et est mise sur une rallonge encastrée dans la canne. Cette rallonge permet de se placer à portée des capteurs laser, qui ne peuvent mesurer qu'à partir d'une distance minimale.

#### 4.2. Caméra

La partie de détection de la balle utilisant déjà une caméra, une des idées fut d'aussi en utiliser une pour détecter les cannes. Pour optimiser la vision du déplacement linéaire et pour pouvoir détecter la rotation, une marque est apposée à canne (Figure 2). Cette marque comprend deux anneaux de tailles fixes permettant d'avoir une cible à fixer par la camera et permettant un calibrage automatique à chaque prise de mesure, la distance entre les anneaux étant connue. A côté de ces anneaux se trouve un triangle qui fait le tour de la canne et qui permet en regardant une ligne de pixel de la camera de mesurer une rotation.

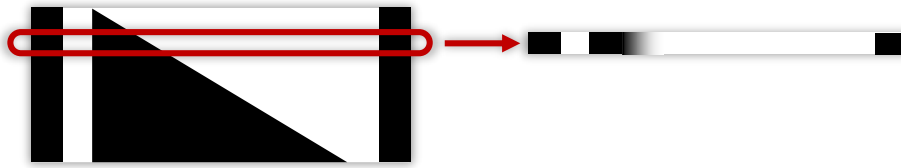


Figure 2 - Marque et vision de la caméra

### 4.3. Magnétisme

Une autre idée fut de mettre des aimants dans la canne et de détecter une variation de champ magnétique avec par exemple une bobine autour de la canne. Le majeur problème étant l'obligation du calibrage des capteurs à chaque redémarrage. L'inertie rajouté par les aimant n'est pas non plus négligeable, tout comme leurs interactions avec les roulements à billes.

### 4.4. Codage sur la canne

Une solution aurait été de graver toute la canne avec un codage du type « code de Gray » lu en sortie par une petite caméra. Ce codage, une fois traité, aurait indiqué l'emplacement absolu de la canne. Le problème vient cette fois de la dégradation de ces gravures due à leur interaction avec les roulements à billes.

### 4.5. Ondes radio

Nous avons aussi envisagé de mettre des émetteurs d'ondes radio dans les cannes du babyfoot : deux par cannes à la même distance et opposés dans la largeur, tous à des fréquences différentes, pour pouvoir ensuite les triangulariser. Connaissant leurs positions absolues en 3D, on aurait pu savoir la position et l'angle de chaque barre.

Le problème de cette idée est la précision de la triangularisation des émetteurs, la meilleure étant à 5mm, bien au-dessus des spécifications de cahier des charges.

### 4.6. Capteur de distance *Terabee*

La dernière solution à avoir été envisagée fut l'utilisation des capteurs *Terabee* préalablement achetés par le labo [2]. Ce sont des capteurs de distance utilisés pour les drones, assez précis pour cette utilisation mais surtout beaucoup moins chers que des capteurs laser. Ils auraient seulement pu remplacer les lasers de la première solution (Section 4.1). Plusieurs tests ont été faits avec ces capteurs débouchant sur une précision maximum de l'ordre de 5mm, bien trop faible pour notre utilisation. Des tests ont montré que même un traitement des données reçues ne permettait pas de réduire l'erreur en dessous de 2mm.

## 5. Évaluation des solutions

Après avoir listé les idées les plus pertinentes, nous les comparons aux exigences du cahier des charges (Tableau 1) dans le Tableau 2 afin de choisir celle qui satisfait le plus de critères. La fonction FP2 (transmission des données) n'est pas testée car elle constitue un traitement en aval des données reçues.

Tableau 2 - Évaluation des solutions

En **vert** : contrainte satisfaite, en **orange** : admissible, en **rouge** : contrainte violée.

Type	Contraintes	Spirale	Camera	Magnétique	Codage	Onde radio	Terabee
FP1	> 300Hz	1000Hz	~200Hz	-	-	-	~200Hz
	< 1mm	0.5mm	~1cm	-	-	~1cm	~1cm
FC1	Faible	Supposée faible	Quasiment nulle	Faible	Moyenne	Nul	Supposée faible
FC2	Près de 0	100mm	0	50mm	50mm	0	200mm
	> 200mm	600mm	Ok	Ok	Ok	Ok	14m
FC3	Faible	Supposée moyenne	0	Grande	Frottement important	Quasiment nulle	Supposée faible

La solution de la spirale et capteurs de distance est celle qui répond le mieux à la fonction principale, bien que la solution des ondes radio soit meilleure au niveau des contraintes. Les critères de la fonction principale étant plus importants, c'est la solution de la spirale et capteurs de distance qui est choisie.

## 6. Présentation de la solution

### 6.1. Description

Les personnages sont contrôlés par des cannes. Chaque canne possède deux degrés de liberté : un en translation et un en rotation. La rotation est convertie translation à l'aide d'une spirale. Les deux translations sont ensuite lues par des capteurs de distance.

#### 6.1.1. Capteurs de distance

Chaque canne peut être déplacée de 400mm au maximum. En prévoyant une marge de 100mm dus à la rotation transformée en translation, nous avons besoin d'un capteur possédant une portée de 500mm.

Nous avons trouvé chez *WayCon* le capteur *LAS-T5-500* [3] possédant une portée de 100mm à 600mm, une résolution entre 0.015mm et 0.67mm, un temps de réponse inférieur à 0.9ms (environ 1100Hz) et retournant une sortie analogique située entre 0V et 10V. Il doit être alimenté avec une tension de 12V à 28V avec un courant maximal de 100mA. L'angle d'incidence du laser avec la surface dont on désire mesurer la distance doit être inférieur à 30°.

Ces capteurs possèdent cinq pattes. Sur le câble fourni par le constructeur, les fils reliés aux pattes les plus importantes sont donnés dans le Tableau 3. Les autres fonctions peuvent être trouvées dans le document [3] à la page 5.

Tableau 3 - Connection électrique du LAS-T5-500

Patte	Couleur du câble	Fonction
1	Marron	Alimentation V +
2	Blanc	Sortie 0...10
3	Bleu	Terre GND

#### 6.1.2. Acquisition des données

Les câbles de terre et de sortie des capteurs sont connectés à un boîtier *myRIO* de *National Instruments* afin de pouvoir manipuler les données avec *LabVIEW*. Une alimentation externe de 12V doit être utilisée pour tous les capteurs. Le document [4] nous apprend que le boîtier possède huit entrées analogiques de 0V à +5V et deux autres entrées analogiques de -15V à +15V. Étant donné qu'il y a quatre cannes à scruter avec deux capteurs par canne et que chaque capteur envoie un signal de 0V à +10V, deux options sont disponibles : on peut utiliser soit les entrées de +5V, soit les entrées de -15V/+15V.

Dans le cas des entrées de +5V, il faut utiliser des diviseurs de tension pour passer les sorties des capteurs de 10V à 5V, comme montré sur la Figure 3. Les résistances doivent être identiques et valoir au minimum 100Ω. Un tel montage pourra être fait sur une *breadboard*. Un seul boîtier est alors nécessaire et les connections se font sur les *Expansion Ports A* et *B* aux ports :

- 6 (AGND) pour la terre de quatre capteurs

- 3 (AI0) pour la sortie d'un capteur
- 5 (AI1) pour la sortie d'un deuxième capteur
- 7 (AI2) pour la sortie d'un troisième capteur
- 9 (AI3) pour la sortie d'un quatrième capteur.

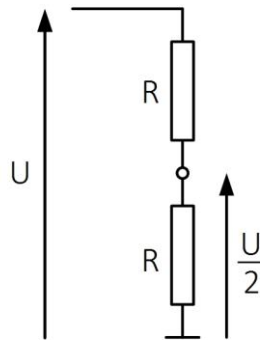


Figure 3 – Diviseur de tension

Dans le cas des entrées de  $-15V/+15V$ , quatre boîtiers sont nécessaires au total. Les connections se font sur le *Mini System Port Connector C* aux ports :

- 1 (+15 V) pour l'alimentation de deux capteurs
- 3 ou 6 (AGND) pour la terre de deux capteurs
- 7 (AI0+) pour la sortie d'un capteur
- 9 (AI1+) pour la sortie de l'autre capteur.

### 6.1.3. Positionnement des capteurs

Un support est conçu pour soutenir deux capteurs par canne le plus près possible de la table de *Babyfoot*, sachant que les câbles à l'arrière des capteurs sortent parallèlement aux faisceaux laser. Les cannes doivent être rallongées afin que leur spirale se trouve toujours dans la portée admissible des capteurs.

### 6.1.4. Spirale

La spirale est conçue pour profiter de l'angle d'incidence maximum de  $30^\circ$  avec le laser et ainsi obtenir la plus grande précision possible. L'équilibre axial est aussi recherché.

La partie « stratégie » du projet a décidé qu'il n'était pas nécessaire de connaître l'orientation des cannes lorsque les personnages ne peuvent pas toucher la balle. La partie pentue de la spirale n'occupe donc qu'un secteur de  $-60^\circ$  à  $+60^\circ$ , partie sur laquelle l'orientation peut alors être mesurée.

## 6.2. Assemblage

### 6.2.1. Liste des pièces

La liste des pièces pour mesurer une canne se trouve dans le Tableau 4. Les plans de ces pièces se trouvent en annexe.

Tableau 4 - Liste des pièces

Nom	Identification	Quantité	Matériau	Caractéristiques
Support	PLAQUE	1	Aluminium	-
Équerre 1	EQUERRE_DROITE	1	Aluminium	-
Équerre 2	EQUERRE_GAUCHE	1	Aluminium	-
Barre	TUBE	1	Aluminium	-
Spirale	SPIRALE	1	Plastique	-
Capteur	LASER	2	-	-
Vis	VIS_M4X12	4	Acier	DF=4mm, L=12mm
Vis	VIS_M4X30	4	Acier	DF=4mm, L=30mm
Écrou	ECROU_M4	8	Acier	DF=4mm

### 6.2.2. Mise en plan

Voir annexe.

### 6.2.3. Fabrication

Les pièces que nous avons conçues sont fabriquées à l'*Atelier de Génie Mécanique* de l'*EPFL*, sauf la spirale qui a été fabriquée par impression 3D.

Le fichier à envoyer pour la fabrication des pièces en aluminium se trouve en annexe, bien qu'il faille mettre à jour les annotations dans les mises en plan (nom, numéro du dossier). La fabrication des pièces pour une canne revient à 150CHF.

Le fichier 3D de la spirale est aussi fourni en annexe pour la fabrication 3D.

### 6.2.4. Montage

Le montage se fait selon le plan donné en annexe. Le support des capteurs est collé à la table de *Babyfoot* tandis que la barre est encastrée dans la canne.

## 6.3. Traitement des données

Pour chaque canne, deux valeurs sont retournées :

- X allant de 0V à 5V (ou 10V) correspondant à la translation,
- Y allant de 0V à 5V (ou 10V) correspondant à la rotation.

La distance de translation en millimètres est alors donnée par

$$T = aX + b \quad (1)$$

où  $a$  [mm/V] et  $b$  [mm] sont des constantes à déterminer expérimentalement.

L'angle de rotation en degrés est donné par

$$R = 4 \times ((aY + b) - T) - 60 \quad (2)$$

Lorsque  $R < -(60 + \varepsilon)$  ou  $R > 60 + \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  [°] étant un nombre petit à déterminer expérimentalement, on retourne une valeur de  $180^\circ$  pour indiquer que les personnages ne peuvent pas atteindre la balle.

Le traitement des données est fait sur *LabVIEW* avec *myRIO* installé.

## 7. Réalisation

### 7.1. Montage

Au terme du semestre, nous avons reçu quatre capteurs laser, un ensemble de pièces pour mesurer une canne et un boîtier *myRIO*.

Nous avons donc monté un dispositif pour la canne des défenseurs. Nous avons choisi d'utiliser les entrées de +5V (A/A10 et A/A11) sur le boîtier *myRIO* et avons donc fabriqué deux diviseurs de tension.

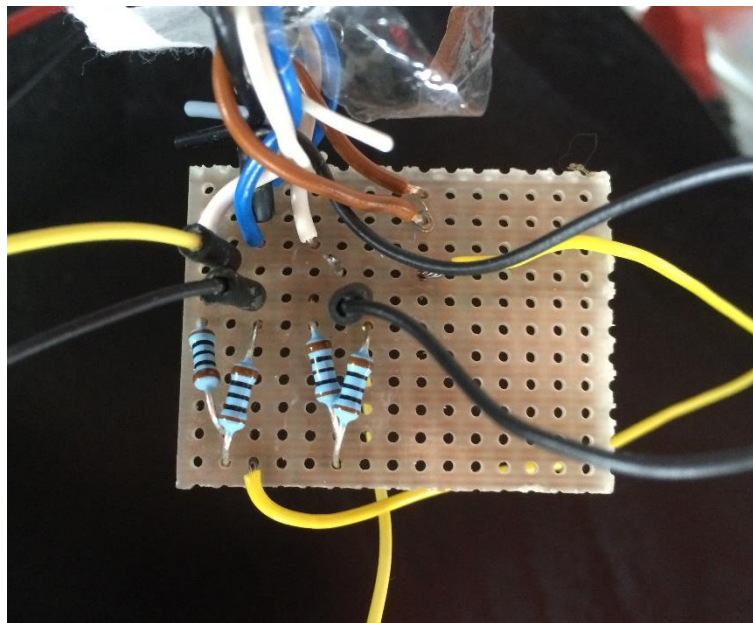


Figure 4 – Diviseurs de tension

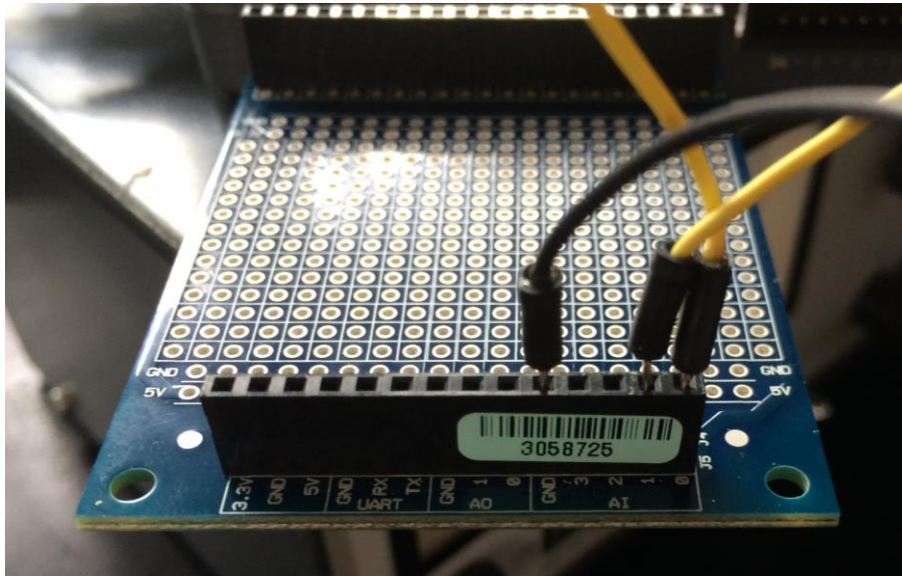


Figure 5 – Connexions au boîtier *myRIO*

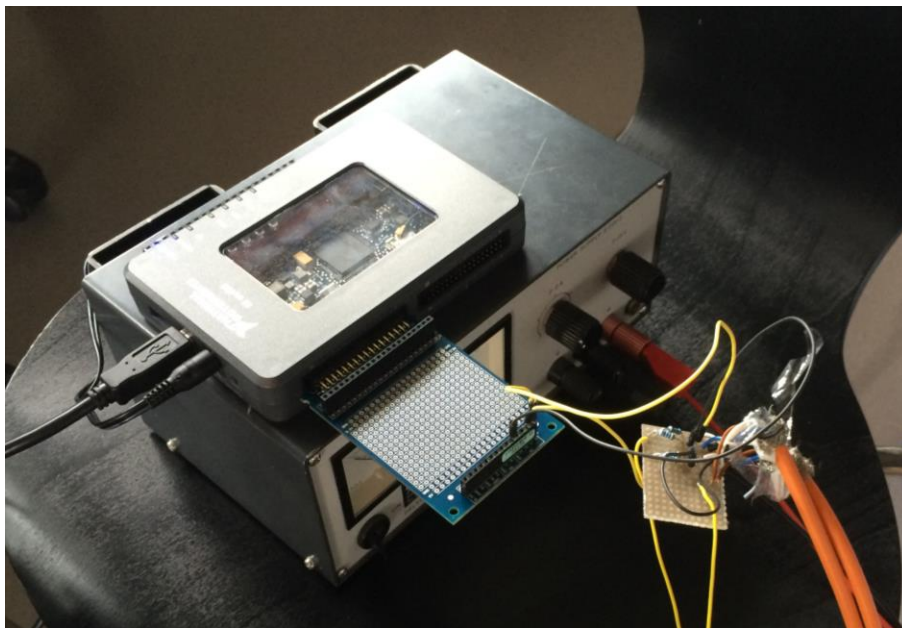


Figure 6 – Montage électronique

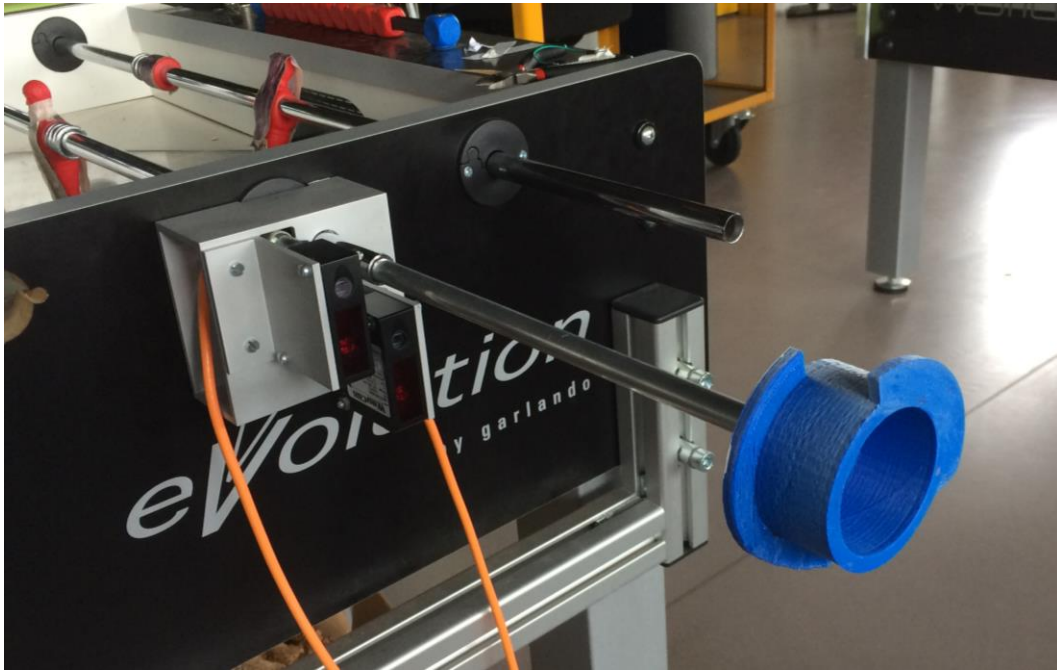
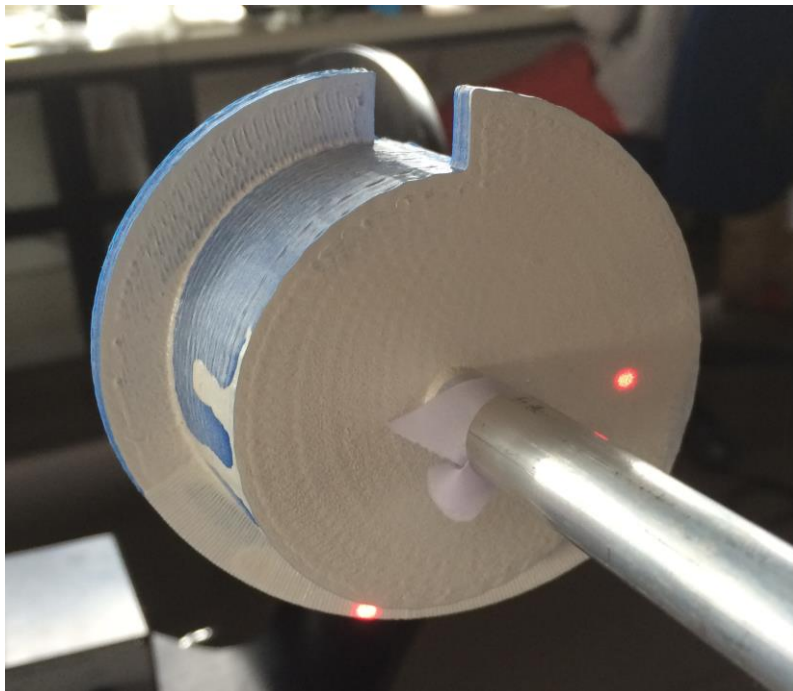
Figure 7 – Montage sur le *Babyfoot*

Figure 8 – Spirale

## 7.2. Résultats

La création d'un VI sur *LabVIEW* nous a permis de déterminer les constantes de conversion suivantes en faisant concorder la mesure et la valeur exacte d'une distance de translation nulle et maximale (370mm) :

- $a = 314\text{mm/V}$ ,
- $b = -179\text{mm}$ ,
- $\varepsilon = 7^\circ$ .

Le VI se trouve en annexe.

Nous avons constaté que la couleur bleue de la spirale faussait les mesures aux plus grandes distances. Nous avons donc appliqué de la peinture blanche sur les surfaces vues par les capteurs.

La comparaison des distances de translation mesurée et exacte nous donne les résultats de la Figure 9.

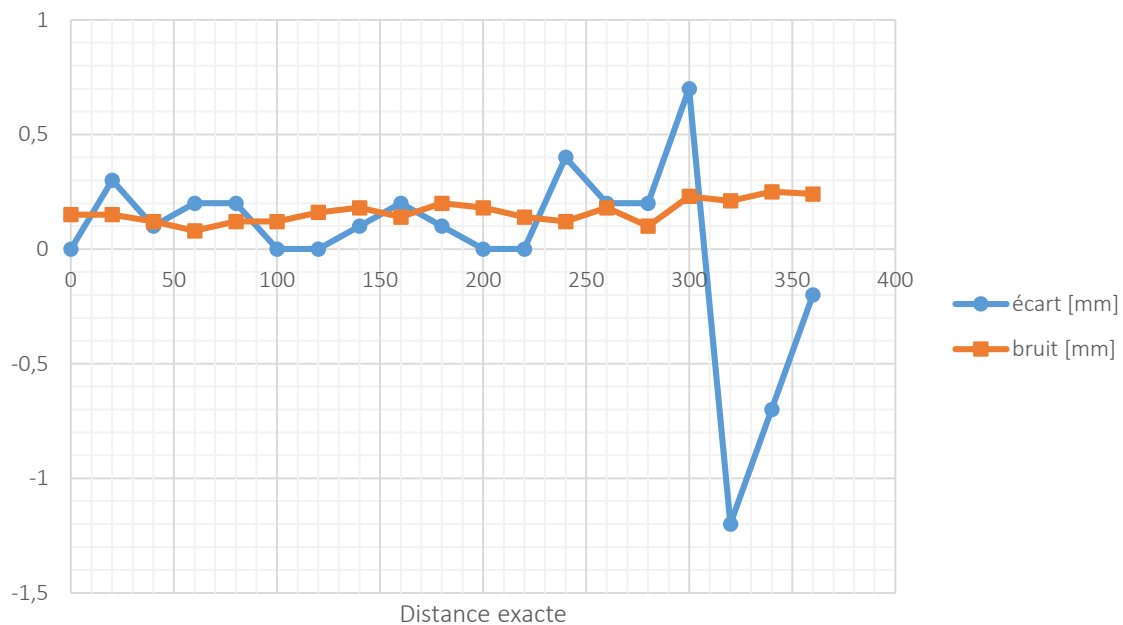


Figure 9 – Comparaison des distances

L'écart est donné par la différence entre la valeur exacte et la valeur moyenne mesurée sur vingt échantillons.

Le bruit est donné par la moyenne de la valeur absolue de l'erreur entre la mesure et la valeur moyenne.

On constate que le bruit ne dépasse pas les 0,25mm, ce qui semble suffisant pour notre utilisation. Étant donné que la tension de sortie des capteurs ne dépasse pas les 1,8V dans cette plage d'utilisation, on peut envisager de retirer les diviseurs de tension pour gagner en précision si le bruit est dû au boîtier *myRIO*. On peut vérifier que le bruit n'est pas dû à l'état de surface de la spirale en faisant une mesure sur un objet blanc lisse.

L'écart ayant un comportement étrange après 300mm, on raffine les mesures avec cinquante échantillons pour obtenir la Figure 10.

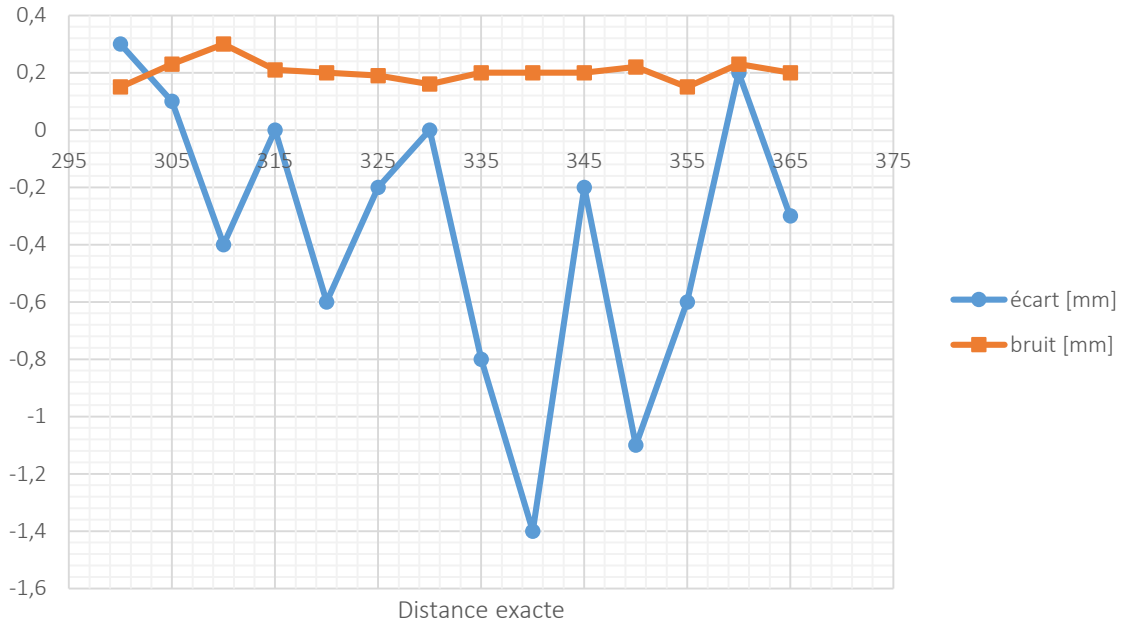


Figure 10 – Comparaison des distances raffinée

On constate que l'écart atteint les 1.4mm, ce qui est bien en accord avec la Figure 11 pour une distance de 500mm, écart maximal réel entre le capteur et la spirale.

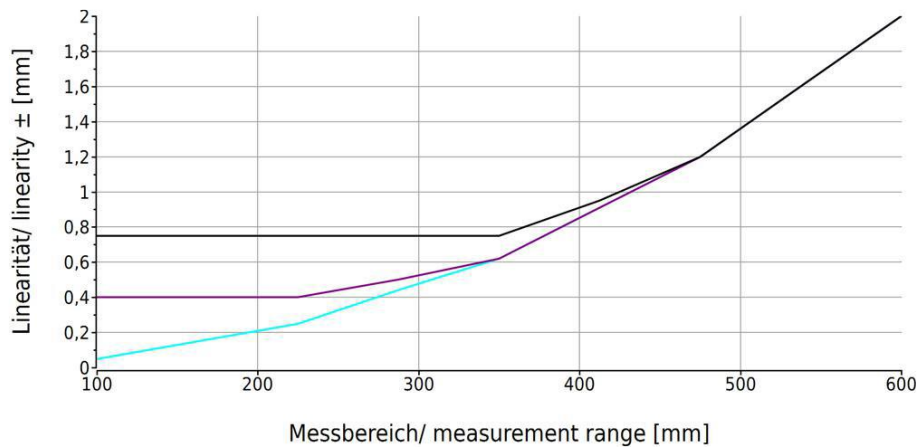


Figure 11 – Erreur de linéarité du LAS-T5-500 selon [3]

C'est la courbe la plus foncée qui correspond au capteur que l'on utilise.

Le fait que l'écart n'oscille pas autour d'une valeur nulle peut aussi s'expliquer par un mauvais choix des paramètres  $a$  et  $b$ .

Le fait que l'angle soit déterminé par le même type de mesure que pour la distance nous fait supposer que le bruit aura un maximum de  $1^\circ$  d'après (2), ce qui est bien vérifié par les mesures.

## 8. Continuation

Les résultats que nous avons obtenus sont à la hauteur de nos espérances. Il reste néanmoins quelques points qu'il est possible d'améliorer avant de dupliquer le montage pour les autres cannes.

### 8.1. Montage

Ne connaissant pas la taille des câbles des capteurs, nous avons sous-estimé la taille du support des capteurs, les câbles s'en trouvent alors pliés. Il sera plus élégant d'élargir cet espace, en faisant attention au fait que la matière brute dans laquelle devra être usiné le nouveau support soit disponible.

Les trous carrés par lesquels passent les câbles ne sont pas bien positionnés (excentrés), cela pourra être corrigé.

Le trou par lequel passe la canne a été dimensionné avec un grand jeu, mais celui-ci n'est pas suffisant et la canne frappe parfois le support lorsqu'on applique un effort particulier. Ce trou pourra donc aussi être agrandi.

La barre de rallonge de la canne a une longueur lui permettant de s'adapter à toutes les cannes. Cependant, chaque canne a une longueur de déplacement différente. La longueur de la rallonge pourra donc être adaptée afin de profiter de la meilleure plage des capteurs.

### 8.2. Capteurs

Les capteurs possèdent une fonction *Teach-in* qui permet de restreindre la portée de mesure au profit d'une meilleure précision. Cette fonction n'a pas été utilisée lors de nos tests et devra être approfondie. Il faudra contacter les fabricants pour plus de détails.

Le diviseur de tension a été jugé inutile dans la plage d'utilisation des capteurs, il pourra être retiré.

### 8.3. Traitement des données

Les paramètres  $a$ ,  $b$  et  $\varepsilon$  ont été choisis manuellement. Il sera utile de créer une fonction de calibration automatique dans le VI.

Le fait que l'angle soit mis à  $180^\circ$  lorsqu'il dépasse une certaine valeur provoque des oscillations à cause du bruit. On pourra programmer une hystérèse dans le VI.

## 9. Conclusion

Ce projet nous a permis de passer par plusieurs itérations dans la conception d'un produit. Notre système final est fonctionnel et sera prêt à être dupliqué à la prochaine itération. La comparaison au cahier des charges initial nous donne le Tableau 5.

Tableau 5 – Comparaison au cahier des charges

Type	Description	Critères	Désiré	Obtenu
FP1	Détecter la position linéaire et l'angle d'une canne	Fréquence des mesures	Supérieure à 300Hz	Jusqu'à 1100Hz
		Précision des mesures	Inférieure à 1mm	Inférieure à 0.25mm
FP2	Transmettre les données	-	-	-
FC1	Robustesse	Résistance aux chocs	Déviations faibles	OK
FC2	Distance de mesure du capteur	Borne inférieure	Le plus proche de 0	100mm
		Borne supérieure	Supérieure à 200 mm	500mm
FC3	Inertie ou frottement rajoutés	-	Plus faible possible	Peu ressenti

## Bibliographie

- [1] Hochschule München, «Projekt Computerkicker,» 2011. [En ligne]. Available: <http://kicker.ee.hm.edu/wiki/index.php/Hauptseite>. [Accès le 17 mai 2015].
- [2] TeraRanger, «The best distance sensor for drones and robotics,» 2015. [En ligne]. Available: <http://www.teraranger.com/product/teraranger-one-distance-sensor-for-drones-and-robotics/>. [Accès le 17 mai 2015].
- [3] WayCon, «Analog Laser Displacement Transducer,» 12 octobre 2014. [En ligne]. Available: [http://www.waycon.biz/fileadmin/waycon/dateien/products/laser\\_sensors/Laser\\_Displacement\\_LAS.pdf](http://www.waycon.biz/fileadmin/waycon/dateien/products/laser_sensors/Laser_Displacement_LAS.pdf). [Accès le 17 mai 2015].
- [4] National instruments, «User Guide and specifications, NI myRIO-1900,» août 2013. [En ligne]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/376047a.pdf>. [Accès le 17 mai 2015].