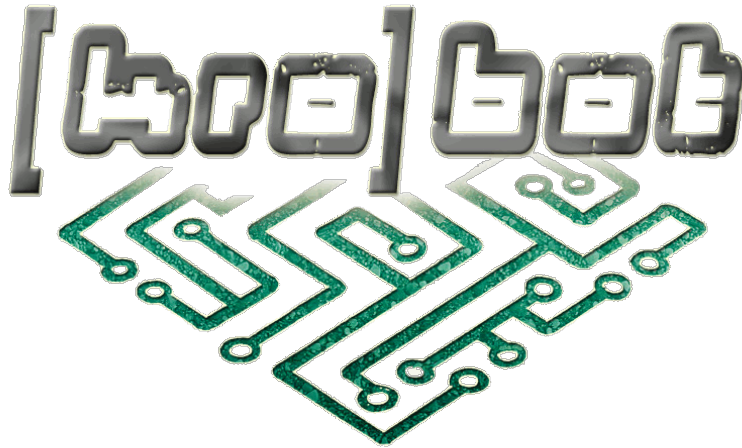


Travaux encadrés de recherche
sous la direction de Germain Haessig



Localisation de robots mobiles à l'aide de laser

par

Adam Heriban et Guillaume Lapouge

Table des matières

1	Analyse du problème posé	3
1.1	Cahier des charges	3
1.2	Analyse de solutions existantes	5
1.2.1	Télémétrie	5
1.2.2	Cartographie et localisation simultanées	5
1.2.3	Triangulation	6
1.3	Solution choisie	6
2	Principe de fonctionnement et théorie	7
2.1	Principe de fonctionnement	7
2.2	Détail de la localisation	9
2.3	Limites d'une telle solution	10
3	Élaboration d'un prototype	13
3.1	Choix des composants	13
3.2	Logiciels utilisés	15
3.3	Nécessité d'un filtre de Kalman avancé	15
4	Essais et prototypes	17
4.1	Caractérisation du capteur laser	17
4.2	Prototype 1 (février 2015)	18
4.2.1	Réalisation	18
4.2.2	Résultats	21
4.3	Prototype 2 (Mars 2015)	22
4.3.1	Réalisation	22
4.3.2	Résultats	23
4.4	Montage Spécial (Avril 2015)	26
4.4.1	Réalisation	26
4.4.2	Résultats	26
4.5	Prototype 2 modifié (Avril 2015)	28
4.5.1	Réalisation	28
4.5.2	Résultats	29
4.6	Prototype final :	29
4.7	Idées pour le produit fini	30
5	Traitement des données	31
5.1	Liaison entre le robot et le capteur	31
5.2	Filtre de Kalman	31
6	Conclusion	36

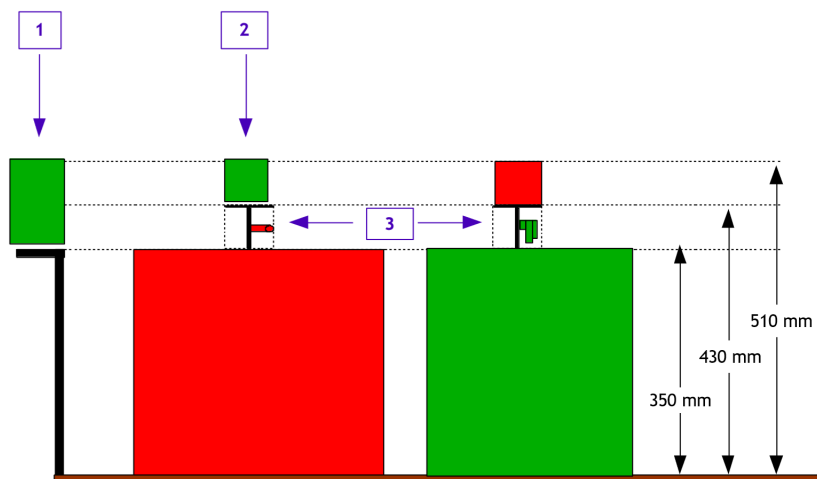
Chapitre 1

Analyse du problème posé

1.1 Cahier des charges

Ce TER est réalisé en étroite collaboration avec le club de robotique de l'E.N.S. de Cachan ([kro]bot) dans l'optique de fournir des capteurs de position fonctionnels et robustes lors de la Coupe de France de Robotique du 22 Mai 2015.

Dans ce contexte, le cahier des charges est directement établi en accord avec les règles de cet événement ainsi qu'avec les performances désirées par le [kro]bot. Les informations capitales pour la localisation des robots peuvent être résumées en un schéma issu du règlement officiel :



Légende :

- 1 : balise fixe (dimensions maximales L x l x h: 80 x 80 x 160 mm)
- 2 : balise embarquée (dimensions maximales L x l x h: 80 x 80 x 80 mm)
- 3 : mât du support (pouvant accueillir des capteurs et éléments associés uniquement, à condition de rester à l'intérieur de la projection verticale du support de balise)

FIGURE 1.1 – Schématisation de robots de deux équipes (verte et rouge) équipés de capteurs

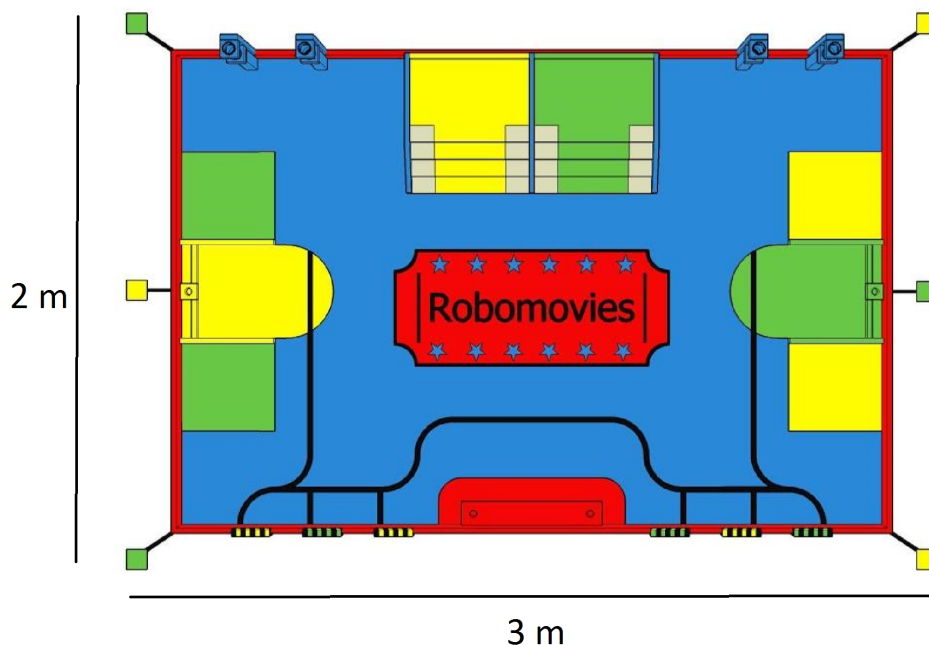


FIGURE 1.2 – Plan de la table avec position des balises à l’extérieur de la table en fonction des équipes (verte et jaune)

Critère	Valeurs	Importance
Dimension des balises embarquées	80mm × 80mm × 80mm	Capital
Dimension des balises fixes	80mm × 80mm × 160mm	Capital
Poids des balises embarquées	400 g	Capital
Précision en positionnement (x,y)	± 5 cm	Très important
Précision du cap fourni	± 1°	Très important
Robustesse aux bruits présents lors de la Coupe de France de Robotique		Très important
Sans interférences avec les autres Robots		Très important
Complexité de la solution, nécessité de puissance de calcul		Important
Prix		Important

L’environnement proposé lors de la coupe de France de Robotique contient en effet de nombreuses sources d’interférences dans de nombreux domaines (Spots puissants gênant les caméras et infrarouges, interférences avec les ultrasons etc).

Nous procéderons maintenant à une étude de l’éventail des capteurs disponibles pour une utilisation lors de la coupe de robotique.

1.2 Analyse de solutions existantes

Lors de cette section, nous analyserons quelques solutions utilisées lors de la Coupe de France de Robotique afin d'en extraire les caractéristiques intéressantes.

1.2.1 Télémétrie

Télémètre ultrason

Ces capteurs reposent sur le principe du sonar, ils mesurent donc le temps que met une onde sonore à être réfléchi à un obstacle. Soit ΔT le temps que met l'onde à revenir au capteur, d la distance entre l'objet réfléchissant l'onde et le capteur et enfin V la vitesse de propagation du son dans l'air (340 m/s à 15°).

On a :

$$d = \frac{\Delta T \times V}{2}$$

Avantages	Inconvénients
+ Utilisable de 1 cm à 250 cm	- Directivité des ultrasons dans un cône de 30°
+ Bonne précision pour des distances faibles	- Précision qui diminue avec l'éloignement
+ Peu cher	- Localisation relative à d'autres objets en mouvements
+ Facilité d'utilisation	- Interférences et bruit important sur les mesures

Le principal problème de cette solution est l'interférence entre les capteurs lors d'une rencontre avec un robot utilisant la même technologie, nous la mettrons donc de côté.

Télémètre infrarouge

Le capteur infrarouge est constitué d'un récepteur qui détecte l'intensité lumineuse dans la gamme des lumières infrarouge et d'un émetteur de lumière infrarouge. On fait une mesure avec la LED infrarouge éteinte et une avec la LED infrarouge allumée. S'il n'y a aucun obstacle proche, la valeur lue est la même. Sinon, l'obstacle aura réfléchi la lumière infrarouge et la deuxième mesure donnera un résultat plus élevé.

Il permet aussi de suivre une ligne noire sur fond clair. En effet, le noir réfléchit beaucoup moins la lumière infrarouge que les couleurs claires.

Le capteur infrarouge peut enfin être utilisé en capteur de distance en mesurant l'angle avec lequel le rayon réfléchi arrive sur le récepteur. En fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur, on peut en déduire la distance de l'obstacle.

Avantages	Inconvénients
+ Bonne précision	- Utilisable jusqu'à 150 cm maximum
+ Peu cher	- Largeur de détection très faible
+ Facilité d'utilisation	- Interférences et bruit important sur les mesures

Les capteurs infrarouges sont utilisables lors de la Coupe de France de Robotique lorsqu'ils sont à l'abri des spots et des capteurs des autres robots. Cependant, leur utilisation est ainsi limitée.

1.2.2 Cartographie et localisation simultanées

La cartographie et localisation simultanée (ou Simultaneous Localisation and Mapping, SLAM) est la construction d'une représentation appelée carte d'un environnement a priori inconnu à partir d'un ou plusieurs capteurs tout en estimant la position du ou des capteurs dans cette carte.

Cette localisation peut être classiquement réalisée à l'aide d'un capteur vidéo (type caméra) ou d'un télémètre laser tournant (LIDAR) type Hokuyo.

La solution par vision monoculaire, si elle est attractive doit finalement être écartée à cause de la présence de nombreux spots lumineux qui éblouissent la caméra.

La localisation par télémètre laser tournant quant-à-elle semble parfaitement adaptée à notre problème. Voyons tout d'abord son principe de fonctionnement :

Une onde lumineuse de type laser est émise à une fréquence donnée. Cette onde se propage alors en ligne droite et, lorsqu'elle rencontre un obstacle, rebondit sur celui-ci pour revenir vers le capteur. Le déphasage entre l'onde émise et l'onde reçue est proportionnel à la distance. En tournant, le capteur va créer une cartographie de distances associées à l'angle de rotation, on a donc des points.

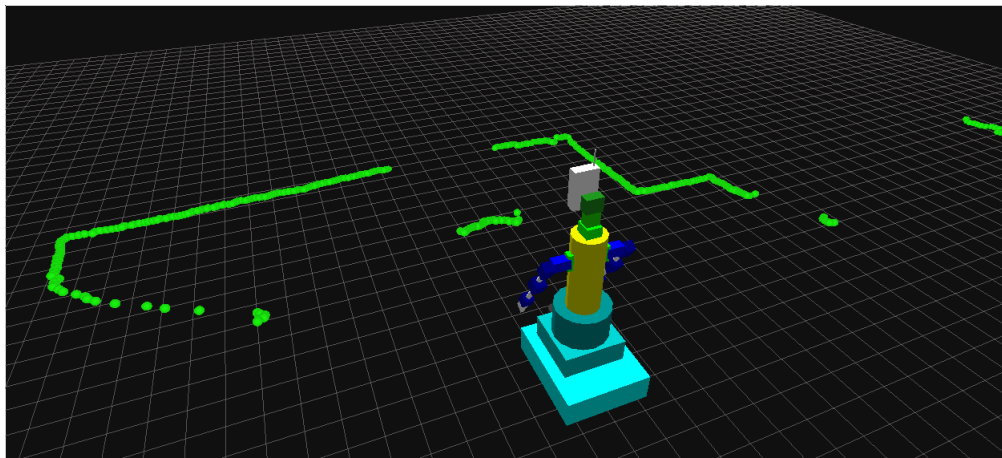


FIGURE 1.3 – Exemple de points fournis par l'Hokuyo

Ces données peuvent ensuite être traitées et faisant de la reconnaissance de droites par la transformée de Hough, ou par fusion de données en utilisant un filtre de Kalman.

Avantages	Inconvénients
+ Précision adaptée à notre problème	- Peut être gêné par un obstacle
+ Dimensions adaptées $50mm \times 50mm \times 70mm$	- Demande une forte puissance de calculs
+ Insensible aux perturbations	- Excessivement cher

Le prix d'un tel capteur (de l'ordre du millier d'euros) est le seul véritable obstacle à son utilisation lors de la coupe. Ce prix si élevé s'explique par le fait que le laser doit être certifié de classe 1 pour être autorisé à la coupe, ces lasers sont recherchés et plus chers.

Le [kro]bot a donc naturellement cherché à s'en procurer un à moindre frais. Pour cela, le télémètre laser tournant d'un petit aspirateur automatique a été récupéré, ce dernier coûtant aux alentours de la centaine d'euros. Le système fonctionne mais le constructeur précise que, en cas de démontage de l'aspirateur, le laser originalement de classe 1 doit être considéré comme étant de classe 4. Cela nous empêche donc de l'utiliser dans le cadre de la coupe.

1.2.3 Triangulation

L'estimation de position à partir d'une triangulation est une estimation qui a le mérite de s'appuyer sur des paramètres connus et invariants tels que la position de balises placées aux endroits définis en partie 1.1. C'est le principe du GPS.

Il existe de nombreuses solutions s'appuyant ou non sur les capteurs que nous avons vus précédemment et de nouvelles sont présentées chaque année.

1.3 Solution choisie

Nous avons vu que le laser était une solution de choix puisqu'il s'avère quasi imperturbable et que nous pouvons tirer profit du caractère invariant et connu des balises.

La solution que nous avons finalement retenue est un capteur laser tournant repérant nos balises fixes. Ce système balaisera son environnement à l'aide d'un laser de classe 1 et localisera 3 balises fixes de positions connues afin de trianguler sa position.

Ce principe de fonctionnement à déjà été éprouvé par des équipes telles que Microb et s'est avéré être prometteur bien que difficile à créer. (Précisions problématiques)

Chapitre 2

Principe de fonctionnement et théorie

2.1 Principe de fonctionnement

Notre système de localisation serait composé d'un laser tournant équipé d'un capteur optique activé à chaque tour complet réalisé. Nos 3 balises seraient disposées sur les supports prévus à cet effet et recouvertes d'un ruban adhésif réfléchissant.



FIGURE 2.1 – Ruban adhésif réfléchissant

Le laser, se réfléchit alors sur la balise pour revenir à un capteur compris dans le système de localisation. On observe alors un front montant sur le signal observé puis, lorsque le laser finit par dépasser la balise, l'absence de réflexion provoque un front descendant du signal qui revient à 0.

En outre, le top-tour optique, orienté de façon à concorder avec l'avant du robot, nous fournirait un point de repère vis à vis de la position angulaire du capteur.

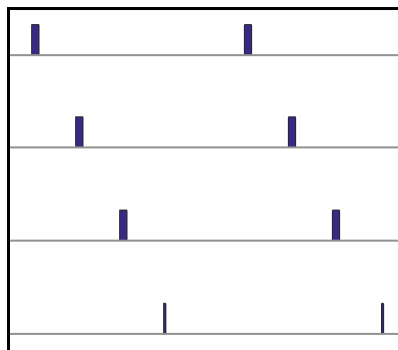


FIGURE 2.2 – Prévion de la forme des signaux obtenus (balise 1, 2, 3 et top tour). Dans la réalité les trois balises sont sur la même entrée.

Les données que nous pouvons alors extraire d'un tel système sont :

- La vitesse de rotation du capteur :

$$\omega_{rot} = \frac{2\pi}{\Delta T_{top.tour}} \quad (2.1)$$

- Les différents angles θ_{ij} .
 i étant le numéro de la balise, $i \in [1..3]$.
 $j = 1$ s'il s'agit d'un angle d'arrivée sur la balise, $j = 2$ pour l'angle de départ de la balise.

On a alors :

$$\theta_{ij} = (t_{balise\ i,\ j} - t_{top.tour}) \times \omega_{rot} \quad (2.2)$$

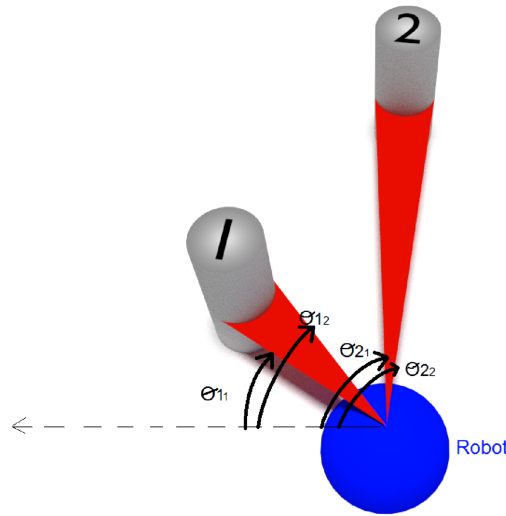


FIGURE 2.3 – Schéma de principe de fonctionnement pour une balise 1 plus proche du capteur qu'une balise 2

- Les distances d_i des balises par rapport au capteur. En effet, plus une balise est proche du capteur, plus la plage angulaire $\Delta\theta_i$ sur laquelle elle est perçue est grande.

$$\Delta\theta_i = (t_{balise\ i,2} - t_{balise\ i,1}) \times \omega_{rot}$$

Une simple figure trigonométrique nous donne :

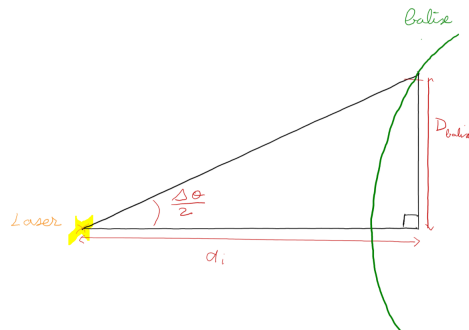


FIGURE 2.4 – Relation entre la plage angulaire perçue par le capteur et la distance réelle de la balise

$$d_i = \frac{D_{balise}}{\tan\left(\frac{\Delta\theta_i}{2}\right)} \quad (2.3)$$

2.2 Détail de la localisation

Notre localisation s'appuierait finalement sur la complémentarité de 3 mesures :

- Les angles relatifs des balises par rapport au robot.
- Les distances relatives des balises par rapport au robot.
- Les informations de localisation fournies par odométrie.

Localisation par mesures de distances

Cette méthode de localisation est aussi efficace qu'elle est simple. Elle consiste à mesurer la distance de notre robot aux trois balises. Celui-ci se trouve donc à l'intersection des trois cercles centrés sur les balises b_i et de rayon les distances d_i déterminées précédemment.

La bonne connaissance de l'écart-type des mesures de nos distances permettrait alors d'estimer la zone dans laquelle se trouve le robot.

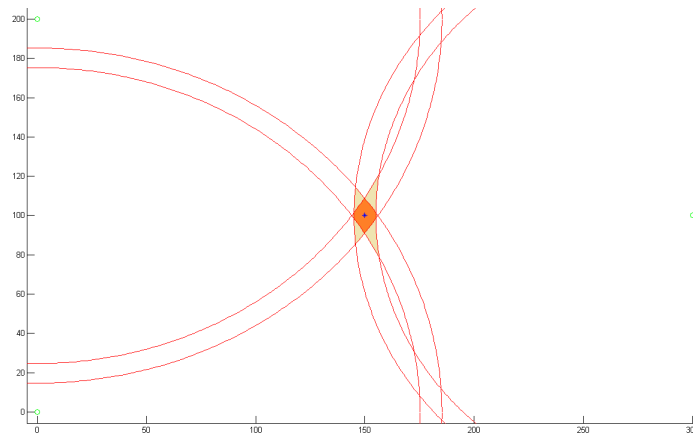


FIGURE 2.5 – Estimation de la position du robot avec une meure de $\pm 5\text{cm}$, le robot étant le point bleu, les balises en vert et la zone estimée en orange

Localisation par mesure des angles

Cette méthode de localisation, plus originale, s'appuie sur le théorème des angles inscrits. En effet, si l'on nomme b_1 et b_2 deux balises et R notre robot, l'angle $\widehat{b_1 R b_2}$ est constant pour R situé sur un cercle passant pas b_1 et b_2 . Connaître la valeur de cet angle permet donc de nous localiser sur un arc de cercle passant par b_1 et b_2 .

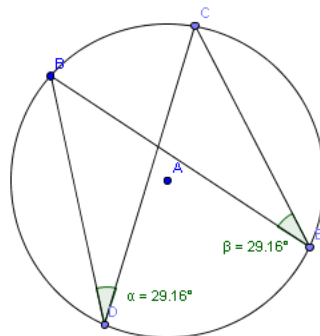


FIGURE 2.6 – Illustration du théorème de l'angle inscrit

La troisième balise permet finalement de lever l'incertitude en nous fournissant 2 arcs de cercles candidats supplémentaires, l'intersection entre ces arcs étant alors la position estimée du robot.

Localisation par odométrie

L'odométrie est une technique permettant d'estimer la position d'un véhicule en mouvement en fonction de la mesure en position des roues fournies par des capteurs dédiés.

Si l'odométrie n'a pas de lien direct avec notre système de balises, elle n'en reste pas moins intéressante. En effet, ces mesures, malgré le biais croissant accumulé au fur et à mesure du déplacement, sont tout à fait acceptables si elles sont recalibrées régulièrement.

En conclusion :

On peut donc espérer faire de la fusion de données afin de tirer le meilleur de nos trois informations. Nous aborderons ce problème en fin du chapitre 3.

2.3 Limites d'une telle solution

Localisation par mesures de distances

Nous avons vu précédemment que ces mesures nous permettraient de localiser simplement notre robot dans la cas où l'on sait à quelle balise associer quelle distance mesurée.

Cependant, le robot tournant sur lui-même, comment savoir quelle balise correspond à quelle distance ?

- Une association balise/mesure improbable peut être aisément repérée si l'intersection des trois cercles est en dehors de la zone de jeu ou que les cercles ne se croisent pas.
- Dans le cas où plusieurs associations balise/mesure sont possibles avec une zone d'intersection définie dans la zone de jeu, un problème se pose.

Pour mieux comprendre quelles sont ces permutations possibles et dans quelles zones de jeu elles interviennent, nous avons étudié ce problème sous Matlab.

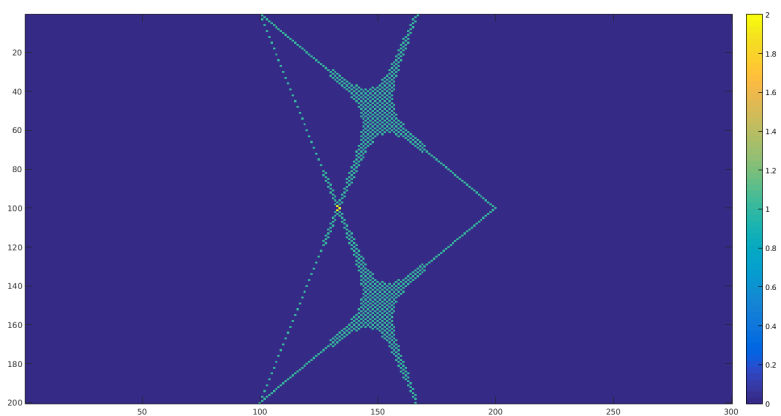


FIGURE 2.7 – On montre ici les zones où les permutations parasites peuvent paraître valides (1 ou 2). On rappellera que les réflecteurs sont situés en $(0,0)$ $(0,200)$ $(300,100)$.

On a donc une bonne connaissance des zones où les solutions au problème ne seront pas uniques et on peut prédire les moments où cela posera problème.

N'oublions en outre pas les informations apportées par les autres mesures et qui pourront nous permettre de résoudre ce problème.

Localisation par mesure des angles

Rapidement, on se rend compte qu'avec la mesure d'angle, un seule permutation se situe sur la table.
On se confronte cependant à un autre problème nommé affectueusement "cercle de la mort" :

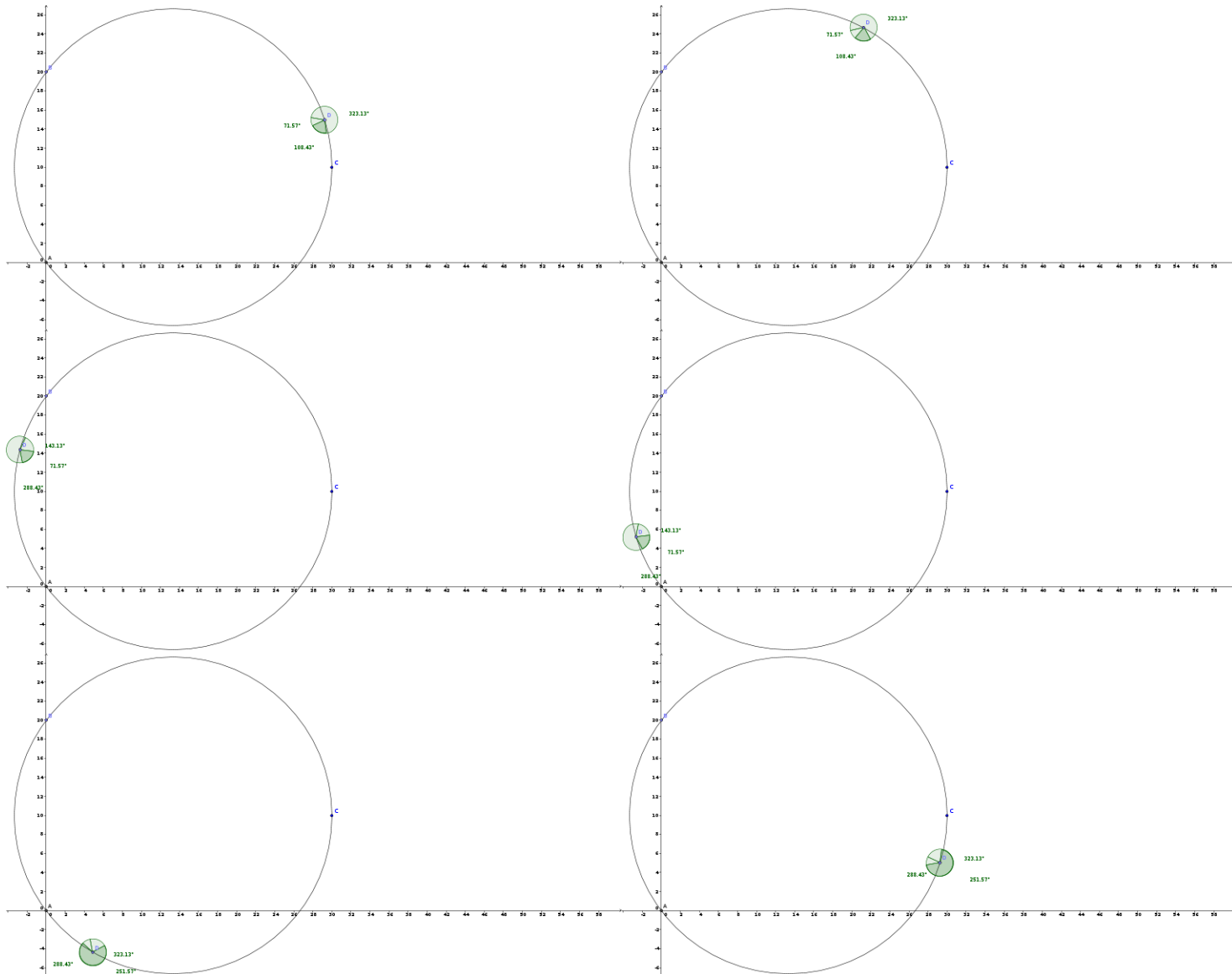


FIGURE 2.8 – Phénomène du cercle de la mort modélisé sur Geogebra

Le constat est simple : Lorsqu'on se situe sur le cercle passant par les 3 balises (a b et c), avec un set de trois mesures d'angle, on peut se situer n'importe où sur l'arc. Il est donc impossible de se localiser précisément sur ce cercle.

On constatera de plus que le bruit de mesure tend à augmenter la largeur de ce cercle.

Sur ces 3 figures, on affiche les endroits où le cap extrait des mesures d'angles est faux (écart $> 1^\circ$) pour un bruit de plus en plus grand :

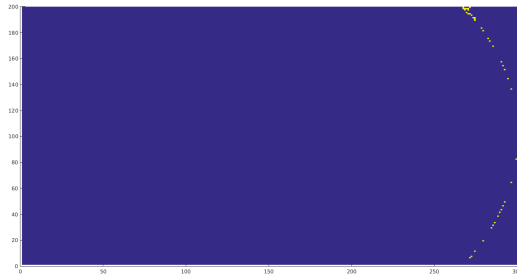


FIGURE 2.9 –

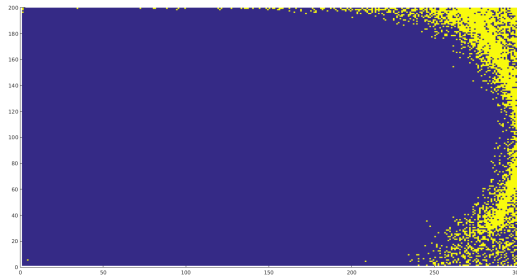


FIGURE 2.10 –

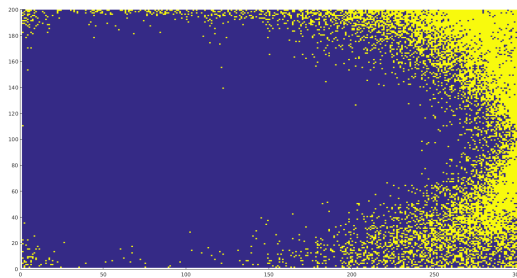


FIGURE 2.11 –

Chapitre 3

Élaboration d'un prototype

3.1 Choix des composants

Pour réaliser notre capteur, nous avons besoin :

- D'un laser de classe 1 avec une photodiode réceptrice associée.
- D'un moteur précis et commandable.
- D'un microcontrôleur avec interruptions et de bonne précision temporelle.
- D'un système d'alimentation du moteur et de la balise.

Une des grandes difficultés du projet consiste à respecter la taille maximale autorisée (un cube de 80mm × 80mm × 80mm).

Le laser & la photodiode

Pour cette partie, nous avons le choix entre réaliser nous même une association laser/photodiode et nous charger de l'alignement du laser pour qu'il se réfléchisse toujours vers la photodiode ou se tourner vers une solution plus fiable et plus compacte : un capteur laser rétro-réfléctif.

Devant la difficulté potentielle d'aligner correctement le laser et le manque de stabilité d'un système que nous aurions réalisés nous-mêmes, nous avons préféré opter pour la sécurité d'une mesure stable.

Notre choix s'est arrêté sur le capteur laser de type rétro-réfléctif E3Z-LR81 2M d'Omron.



FIGURE 3.1 – LE E3Z-LR81 2M d'Omron

Avantages	Inconvénients
+ Utilisable de 20 cm à 7 m	- Temps de réponse mal renseigné (Max 1ms)
+ Signal stable	- Prix
+ Système compact (10,8 mm × 20mm × 33,1 mm)	

Moteur

Le moteur utilisé pourra être un simple moteur à courant continu associé à un hacheur afin d'en contrôler la vitesse de rotation et le sens. Pour avoir une vitesse de rotation du laser constante au cours du temps, on pourra appliquer un fort rapport de réduction au moteur.

Plus récemment, une solution ne nécessitant pas de hacheur nous a été proposée : utiliser un servomoteur en ôtant quelques étages de réduction. Comme nous n'avons pas besoin d'un bon couple ni d'une vitesse de rotation très élevée (20 Hz maximum), cette solution semble être la plus indiquée.

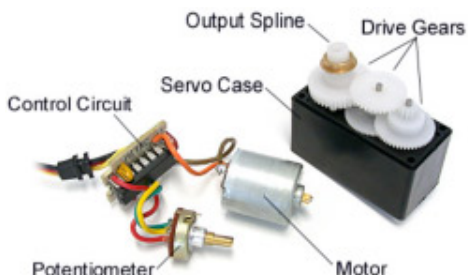


FIGURE 3.2 – Servomoteur avec ses étages de moto-réducteurs

Le servomoteur utilisé fonctionne en angle (consigne en degré à travers la bibliothèque servo d'Arduino). Il suffit de le démonter et de fixer le potentiomètre (glue ...) Pour avoir un servomoteur asservi en vitesse : Plus on se rapproche du potentiomètre, plus on est lent.

Avantages	Inconvénients
+ Facile à utiliser + Compact + Peu cher	- Théoriquement aucun

Microcontrôleur

Notre système doit pouvoir être utilisé en temps réel, nous considérerons qu'à partir de 20 Hz en vitesse de rotation, le laser fournit suffisamment d'informations par seconde pour localiser notre robot.

La précision maximale souhaitable par notre équipe est $\Delta\theta = 0,1^\circ$. Ce qui nous donne une réactivité en temps Δt de :

$$\Delta T = \frac{\Delta\theta}{\omega} = 14\mu s$$

En outre, afin de repérer correctement les temps de montée et de descente des signaux fournis par la photodiode réceptrice, nous aurons besoin d'une entrée utilisable en interruption.

Notre choix s'arrêtera finalement sur une carte Arduino mini pro.

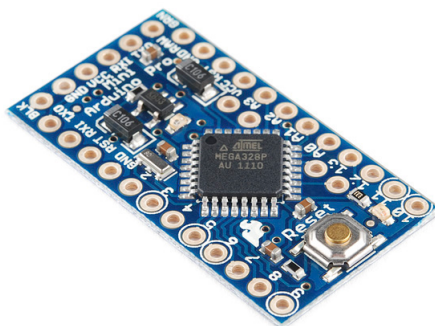


FIGURE 3.3 – Carte Arduino mini pro

Avantages	Inconvénients
+ Facile à utiliser	- Absence de port USB pour communiquer
+ Compact	- fonctionnement en 3.3V (voir prototype final)
+ Peu cher et disponible	
+ Communauté active	

3.2 Logiciels utilisés

- Arduino
- Matlab
- Eagle

3.3 Nécessité d'un filtre de Kalman avancé

Le filtre de Kalman est un filtre à réponse impulsionnelle infinie qui estime les états d'un système dynamique à partir d'une série de mesures incomplètes ou bruitées.

Nous avons vu, tout au long de cette bibliographie que nous disposons de plusieurs sources d'informations :

- Les données de positionnement issue de l'odométrie
- Les données fournies par la balise

Dans une méthode d'estimation classique, une simple erreur dans la modélisation du système entraîne inévitablement une erreur au niveau de l'estimation. La force du filtre de Kalman est d'intégrer un terme d'imprécision sur le modèle lui-même, ce qui lui permet de donner des estimations correctes malgré les erreurs de modélisation.

Nous allons, par conséquent pouvoir nous servir des différentes données pour faire évoluer notre modèle. Par exemple, corriger le biais introduit par l'odométrie grâce aux données fournies par la balise.

Le filtre de Kalman fonctionne en deux étapes :

- Prédiction des données attendues en fonction de notre modèle
- Correction du modèle en fonction des données réelles reçues

En supposant notre système linéaire, on commence par modéliser notre système sous la forme d'une équation de mesure :

$$Y = HX + B$$

ainsi qu'une équation d'état :

$$X_{k+1} = AX_k$$

- Y : vecteur de mesure
- X : vecteur d'état
- B : vecteur de bruit
- H : matrice d'observation
- X_{k+1} : nouveau vecteur d'état
- X_k : vecteur d'état
- A : matrice de transition

Nous pourrions, ensuite construire notre filtre de Kalman avec ses deux étapes :

Phase de prédiction

$$X_{k+1}^p = A.X_k^{kal} \quad (3.1)$$

$$P_{k+1}^p = A.P_k.A^T + Q \quad (3.2)$$

Phase de mise à jour

$$K_{k+1} = P_{k+1}^p \cdot h_{k+1}^T \cdot (R_{k+1} + h_{k+1} \cdot P_{k+1}^p \cdot h_{k+1}^T)^{-1} \quad (3.3)$$

$$P_{k+1} = (I - K_{k+1} \cdot h_{k+1}) \cdot P_{k+1}^p \quad (3.4)$$

$$X_{k+1}^{kal} = X_{k+1}^p + K_{k+1} \cdot (y_{k+1} - h_{k+1} \cdot X_{k+1}^p) \quad (3.5)$$

Avec

- X_{k+1}^p : la prédiction à l'état suivant

- X_k^{kal} : estimation à l'état courant issue du filtrage de Kalman
- P_{k+1} : matrice de covariance de l'erreur à l'instant k+1
- h_{k+1} : matrice d'état uniquement pour la mesure courante.(invariant)
- R_{k+1} : matrice de covariance du bruit de mesure uniquement pour la mesure courante.(invariant)
- I : matrice identité
- y_{k+1} : la mesure à l'instant k+1
- Q : la matrice de covariance du bruit de commande.

Chapitre 4

Essais et prototypes

Ce TER nous a demandé beaucoup de temps d'expérimentation. Des réglages et changements complets de prototypes étant nécessaires afin d'améliorer les performances du capteur. Il s'agit là d'un travail minutieux où la moindre aspérité, irrégularité entraîne des erreurs de positionnement.

Avant de vous présenter les différents prototypes réalisés, voici un rappel des principales contraintes imposées :

- Dimension du capteur (8 cm×8 cm×8 cm)
- Précision du cap ($\pm 1^\circ$)
- Précision en positionnement ($\pm 5\text{cm}$)

4.1 Caractérisation du capteur laser

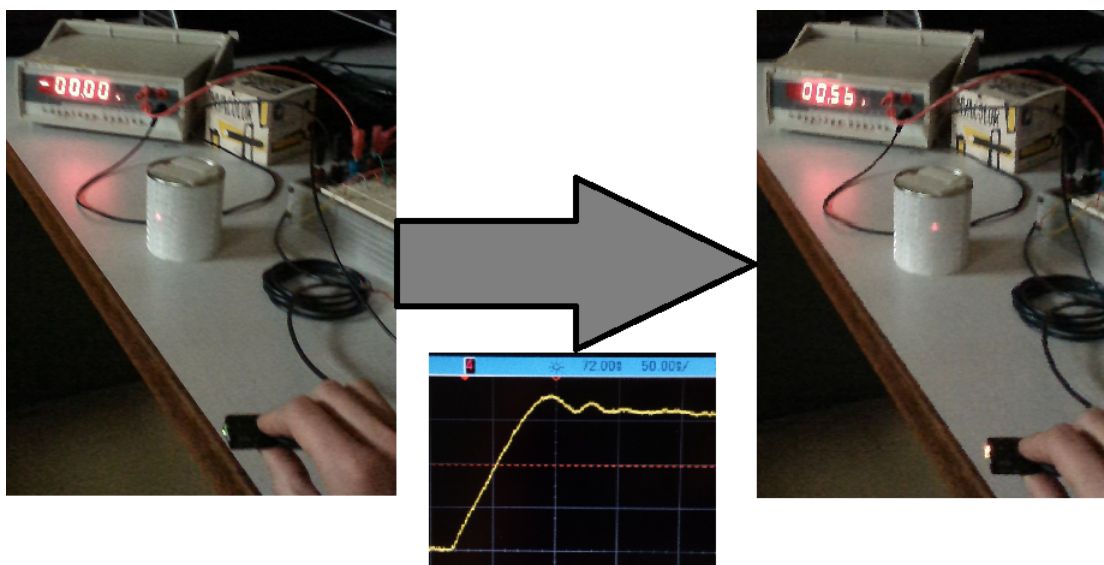


FIGURE 4.1 – Test de la réflexion du laser sur une balise réfléchissante, montée du signal dès que l'on entre dans la bande de réflexion

Après avoir reçu notre capteur laser, nous avons réalisé une batterie de tests afin de déterminer ses caractéristiques.

Temps de montée du signal

Nous avons placé une balise réfléchissante devant le capteur laser et mesuré le temps de montée du signal de sortie. Le signal s'est stabilisé en moins d'une centaine de nanosecondes, cela n'induit donc aucun déphasage ou erreur lors de l'utilisation avec microcontrôleur.

Distance de fonctionnement

Même si le réflecteur est placé à 4m du capteur laser, ce dernier le détecte et le signal de sortie est stable, sans oscillation. Cela nous confirme que ce capteur est compatible avec une utilisation sur interruption avec détection de fronts.

Robustesse aux perturbations

Nous avons fait des essais à différentes luminosités, et avons même braqué une lampe halogène sur les balises réfléchissantes et sur le laser, le fonctionnement n'en est pas altéré. En outre, le laser n'est correctement réfléchi que par nos balises réfléchissantes ou une surface parfaitement réfléchissante orthogonale au faisceau laser, ce qui est en pratique très difficile à réaliser. Ce dispositif sera donc utilisable à la Coupe de France de Robotique.

Plage de réflexion

Nous avons testé la largeur de la plage de réflexion du laser sur une balise réfléchissante. Aux imprécisions de mesure près, nous avons observé que cette largeur est constante quelle que soit la distance.

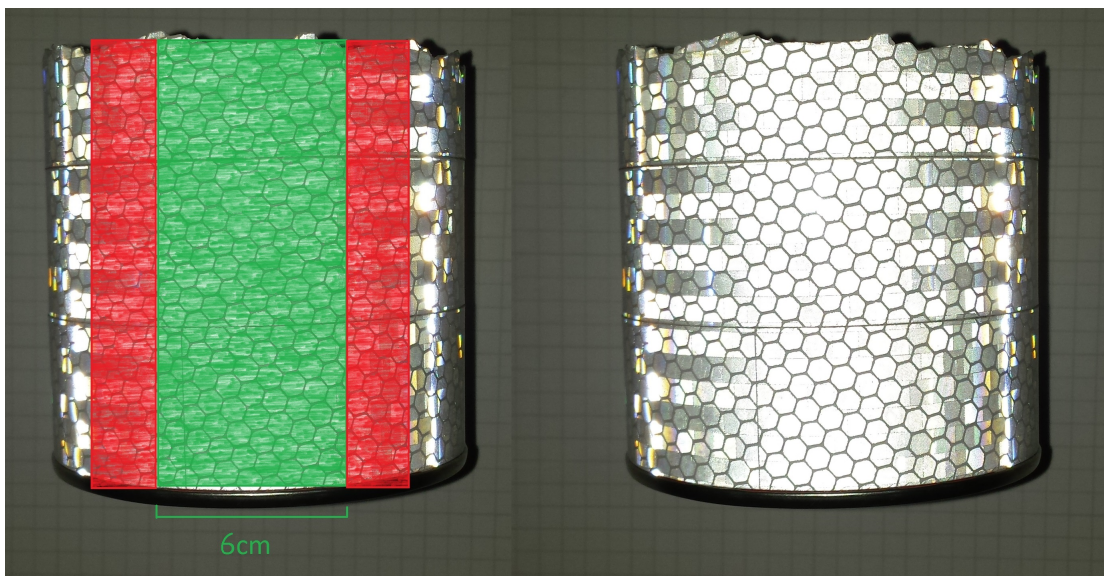


FIGURE 4.2 – Représentation de la bande de réflexion du laser sur une balise réfléchissante (en vert)

4.2 Prototype 1 (février 2015)

4.2.1 Réalisation

Mécanique

Nous avons créé un axe de rotation pour le laser par l'intermédiaire de roulements à billes et d'un contact tournant. Celui-ci est entraîné en rotation par un moteur à courant continu par l'intermédiaire d'un ensemble poulie courroie. Pour assurer la cohésion de l'ensemble, une pièce a été réalisée sur les imprimantes 3D du [Kro]bot.

Nous avons, au cours du montage final du prototype ajouté le top tour optique qui sera déclenché à chaque tour par le passage d'un bout de vis fixé au capteur tournant.

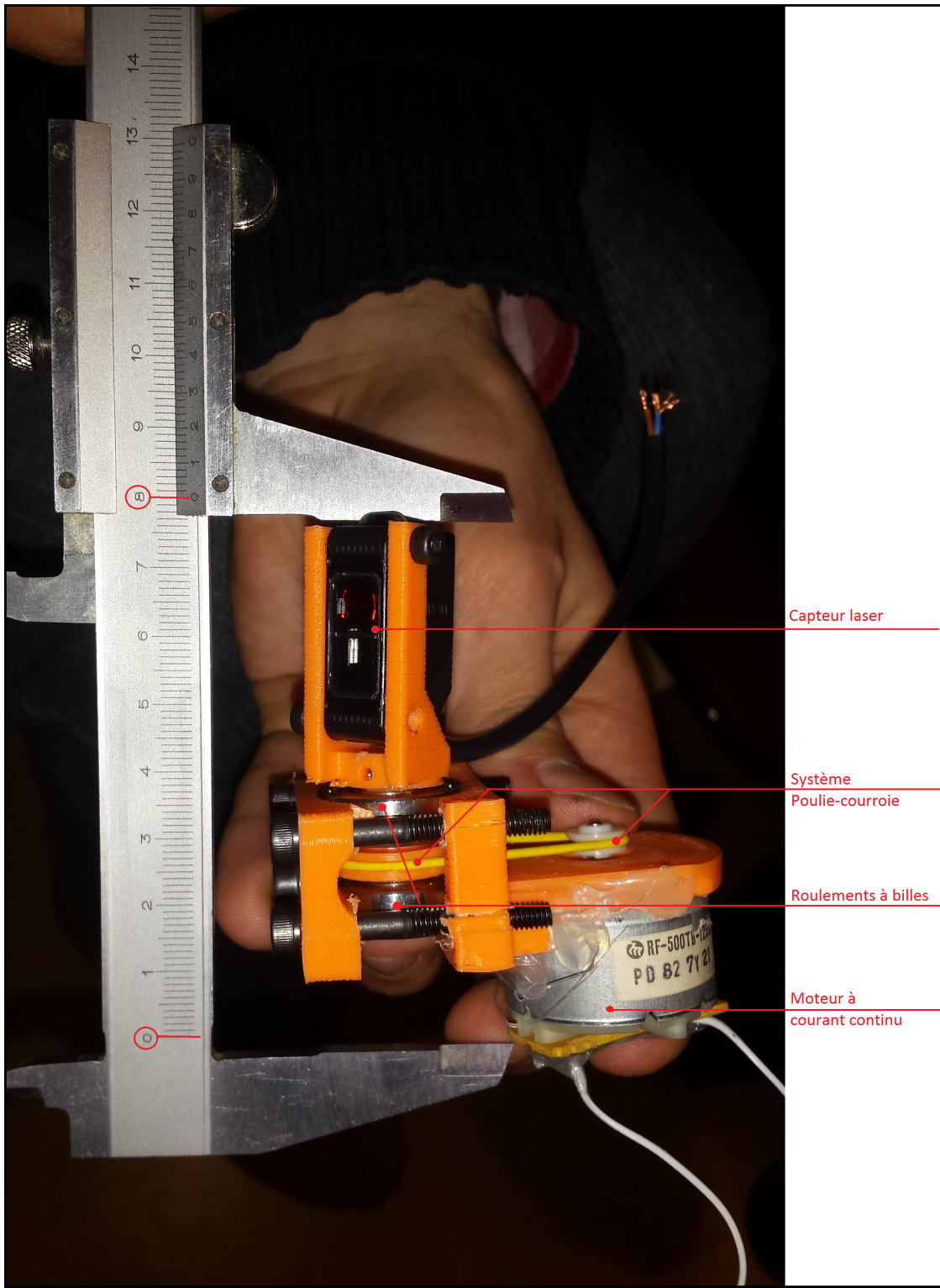


FIGURE 4.3 – Premier prototype

Aspect électronique du montage

Pour récupérer les informations, nous mesurons les temps auxquels les interruptions ont lieu puis traitons les données sous matlab.

Ci-dessous, le schéma électrique concernant les signaux transmis.

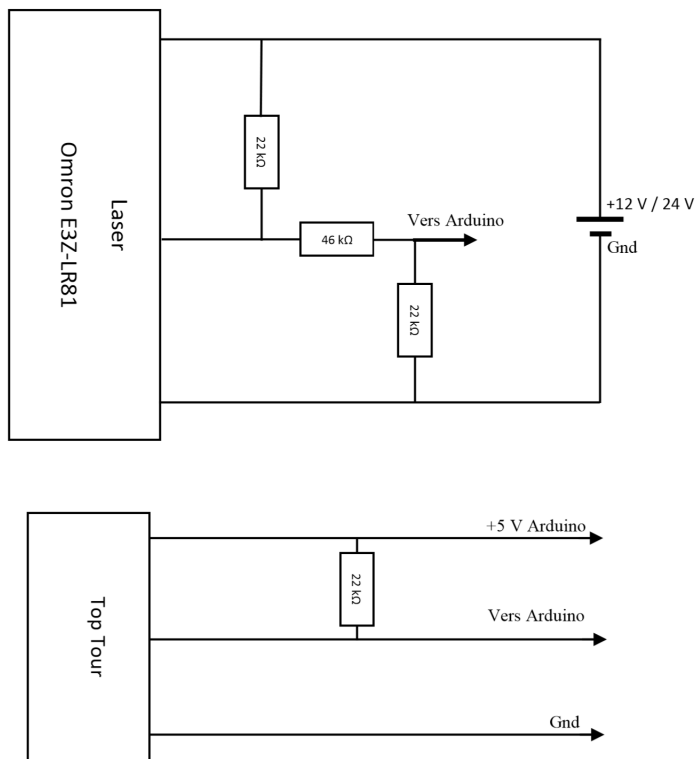


FIGURE 4.4 – Schéma électronique du premier prototype

Concernant le moteur à courant continu, il a fallu régler sa vitesse de rotation et l’asservir. Pour cela nous avons utilisé un pont en H. On envoie via l’Arduino un signal positif à l’entrée Ea et nul à Eb, ainsi, le courant va circuler dans un sens et faire tourner le moteur dans un sens. Inverser Ea et Eb inversera le sens de rotation.

Pour choisir la vitesse de rotation, on utilise une entrée PWM (modulation de largeur d’impulsions) branchée sur Ea, Eb ou une éventuelle entrée En (enable).

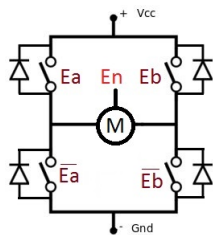


FIGURE 4.5 – Pont en H

4.2.2 Résultats

Nous avons réalisé de nombreux tests afin de caractériser notre premier prototype. Les balises réfléchissantes ont été positionnées autour de notre capteur à une distance de 60 cm.

Données

Les données ci dessous correspondent à l'angle perçu par la balise. Le déphasage observable dans notre graphique est du à une erreur de positionnement du top tour, les données restent parfaitement exploitables.

Plus on progresse dans la valeur des angles et plus on s'approche d'un tour complet. Dès qu'un tour est réalisé, on refait les mesures des angles. Finalement, on a une mesure par tour.

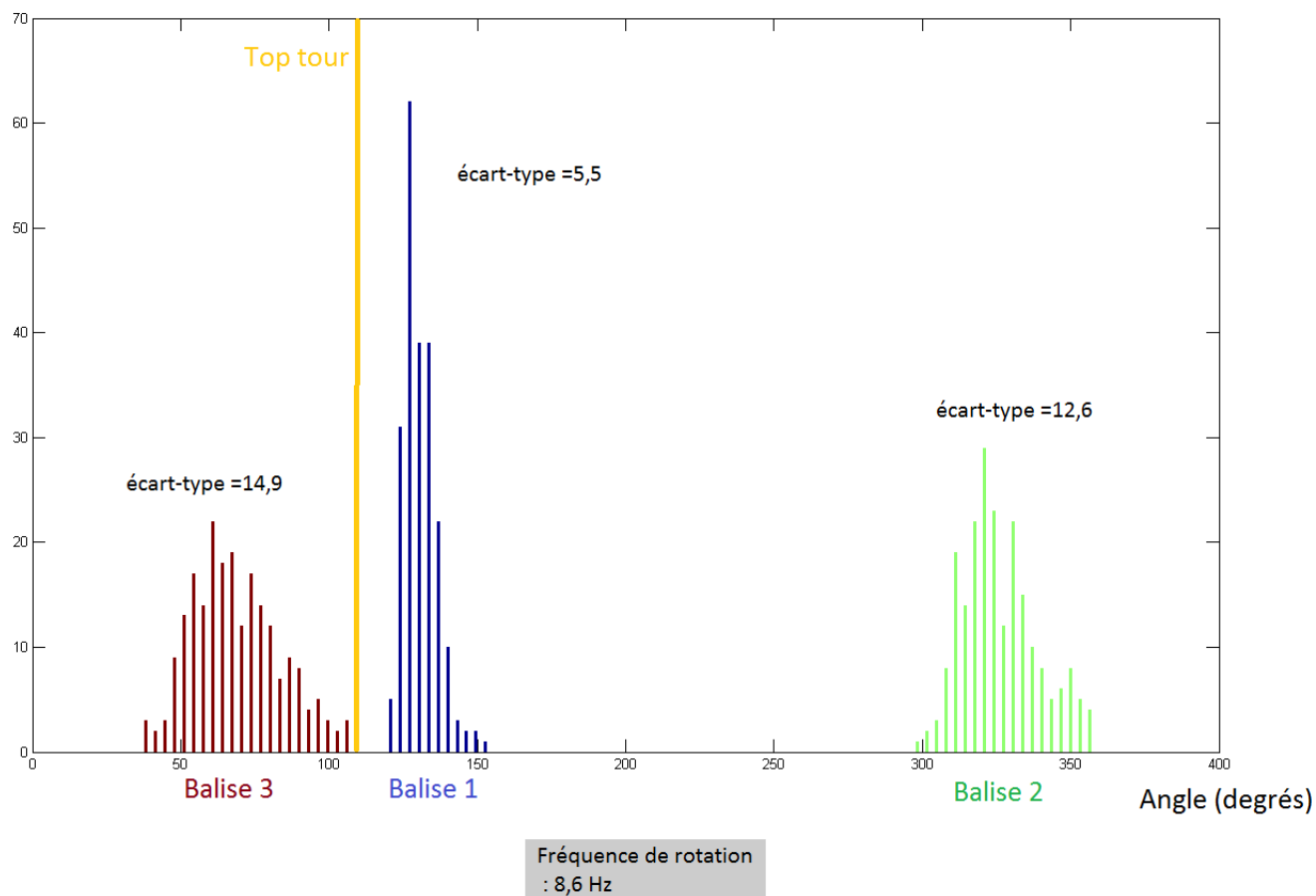


FIGURE 4.6 – Histogramme des mesures des positions angulaires de chaque balise

Interprétation

La découverte de ces résultats a été un véritable choc : la précision angulaire est très largement insuffisante. Nous ne pouvons pas même espérer mesurer une quelconque distance en se servant de la largeur angulaire de réflexion. On pourrait alors croire que si les angles sont estimés avec une forte erreur, les écarts entre les angles soient constants malgré cette erreur mais il n'en est rien.

On remarque que plus les mesures sont faites "loin" du signal du top tour, moins elles sont précises. Cela signifie que le problème ne vient pas de l'électronique mais de la mécanique et plus spécifiquement de la constance de la vitesse de rotation au cours du temps.

Nous nous sommes alors tourné vers l'élaboration d'un second prototype.

4.3 Prototype 2 (Mars 2015)

4.3.1 Réalisation

Mécanique

La mécanique du second prototype repose sur le même principe que le premier mais en plus optimisé et utilisable à la coupe. En effet, ce second prototype est une véritable petite boîte cubique de longueur d'arrête égale à 8 cm.

Nous n'avons pas précisé dans ce TER que le capteur doit aussi se présenter comme une boîte fermée, ce qui va nous obliger à réduire la visibilité du laser placé à l'intérieur. En effet, on souhaiterait une ouverture panoramique à 360 °mais dans un tel cas, le "plafond" de la boîte devrait tenir en lévitation ce qui est impossible. Nous devons donc prévoir des piges de soutien qui bloqueront une partie de la visibilité de notre capteur.

L'axe de rotation autrefois réalisé par deux roulements à billes proches les uns des autres à été revu et on trouve un roulement à billes dans le plancher de la boîte et un autre dans le plafond de la boîte.

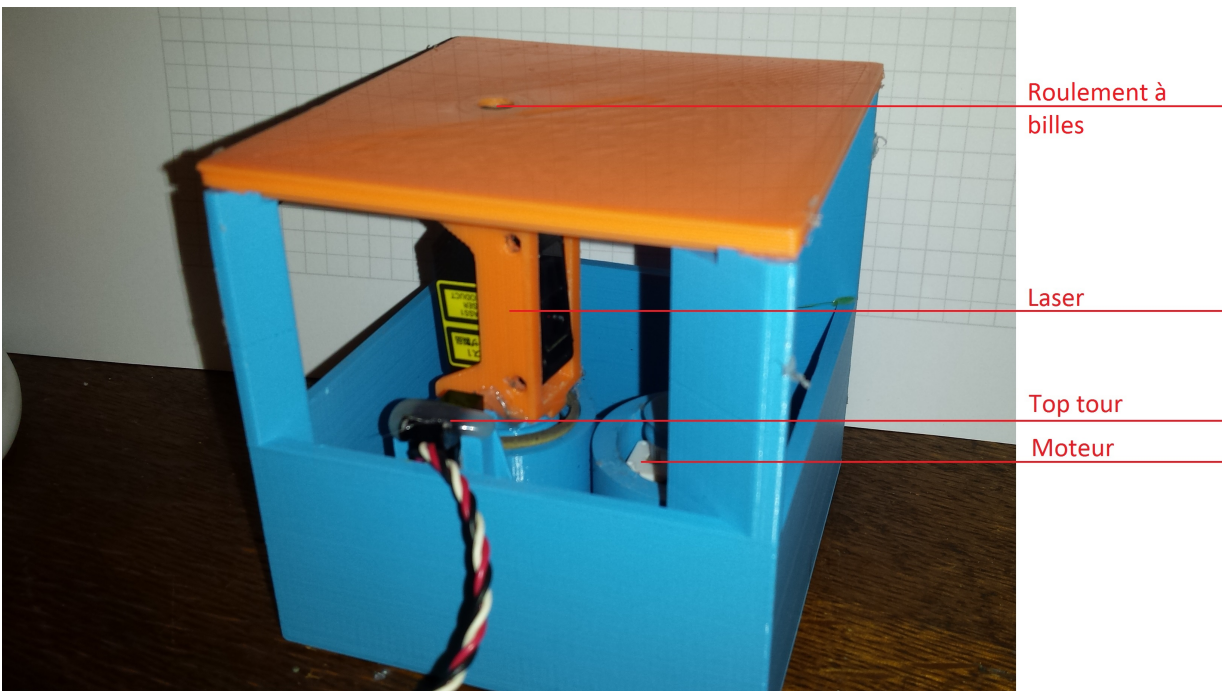


FIGURE 4.7 – Second prototype

Aspect électronique du montage

L'électronique a été conservée sur ce montage, un moteur à courant continu similaire au premier prototype a été utilisé.

4.3.2 Résultats

Nous avons réalisé de nombreux tests afin de caractériser notre second prototype.

Les balises réfléchissantes ont été positionnées autour de notre capteur à une distance de 60 cm. Nous avons ensuite relevé les positions angulaires des balises fournies par le capteur à fréquence variable.

Positions angulaires

A 11 Hz :

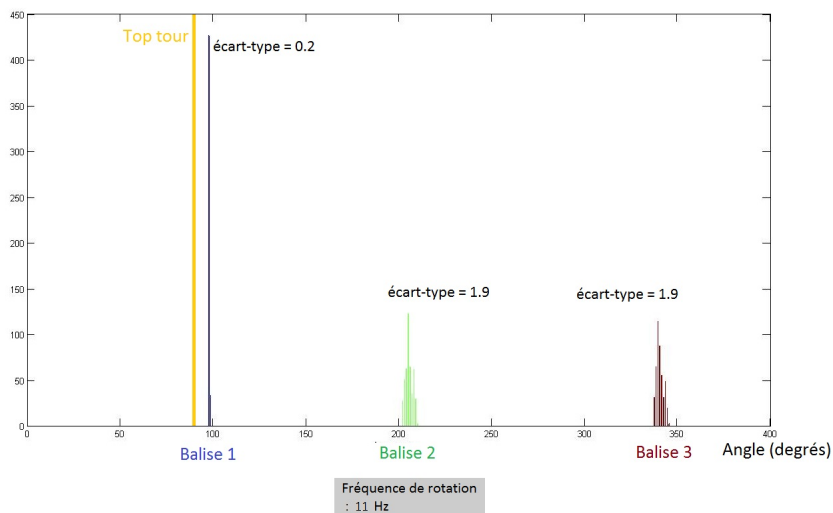


FIGURE 4.8 – Histogramme des mesures des positions angulaires de chaque balise pour une fréquence de rotation de 11 Hz

A 25 Hz :

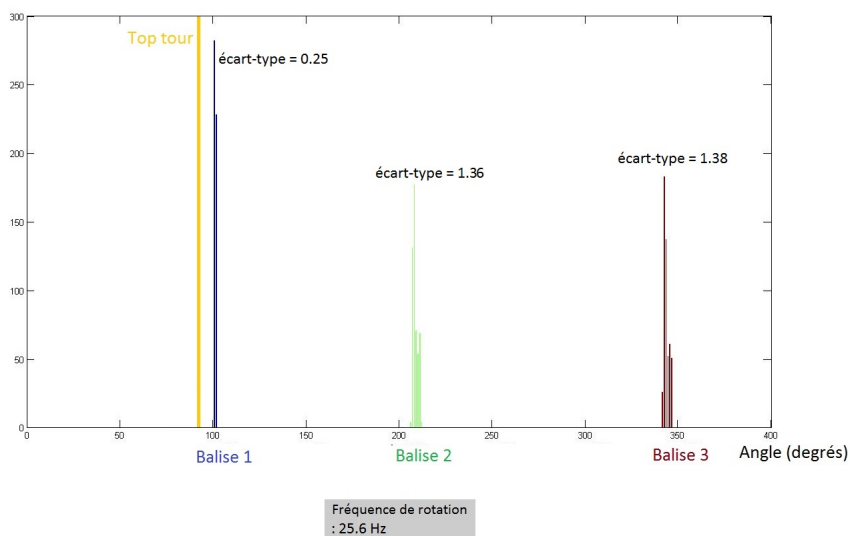


FIGURE 4.9 – Histogramme des mesures des positions angulaires de chaque balise pour une fréquence de rotation de 25.6 Hz

Interprétation des positions angulaires

Nous avons remarqué que les résultats avec une mécanique plus propre étaient largement meilleurs que pour le premier prototype. Cependant l'écart type est encore assez élevé pour une mesure angulaire donnée.

Pour vérifier que le problème était dû à la constance de la vitesse de rotation, nous avons augmenté la vitesse de rotation afin d'amoinrir les effets des frottements mécaniques et des imperfections des liaisons poulie courroie.

On remarque qu'en augmentant la fréquence de rotation, les mesures deviennent de plus en plus précises. Cela signifie que la constance de la vitesse de rotation et/ou la qualité de la mécanique sont les facteurs limitants de notre capteur.

Distances

Nous avons placé une balise réfléchissante à 15 cm du capteur, puis nous l'avons éloignée par étapes de 5 cm.

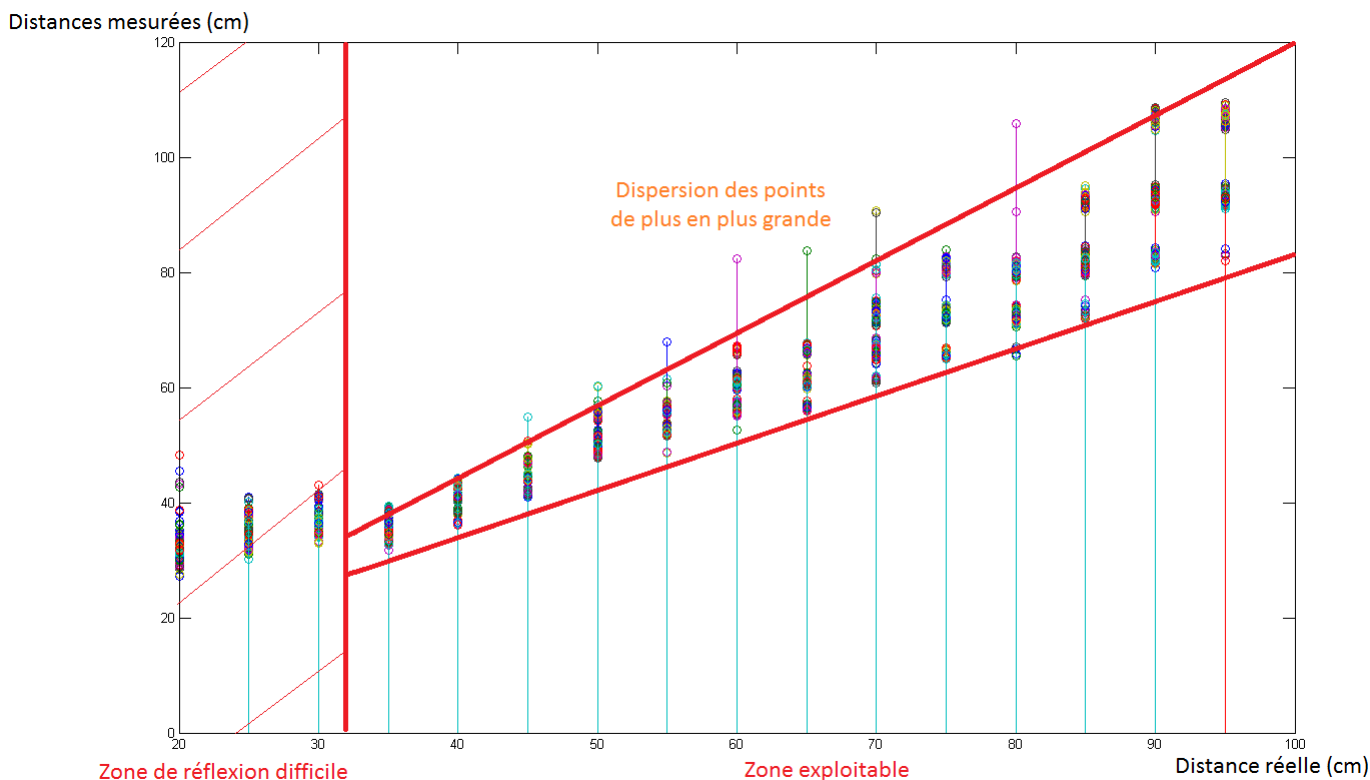


FIGURE 4.10 – Tracé des distances mesurées en fonction de la distance réelle

Interprétation des distances

Comme prévu, les distances ne sont pas exploitables et à mesure que la balise s'éloigne du capteur, la précision de la mesure diminue. Cependant, sur le principe, notre capteur fonctionne bien tel que nous l'avons imaginé (moyenne sur 300 mesures proche du résultat attendu) et cela constitue déjà en soi une victoire.

Un problème imprévu fait surface

Lors de nos différents tests, nous avons fini par vouloir utiliser le système en situation réelle de fonctionnement. Nous avons alors fait face à un nouveau problème : lorsque la vitesse de rotation dépasse les 4 Hz, certaines balises réfléchissantes ne sont pas captées par le laser.

Pour mieux comprendre ce phénomène, nous avons considéré que le capteur Omron E3Z-LR81 présentait constamment le temps de réponse maximal affiché sur la documentation soit 1ms. En se basant sur une largeur de

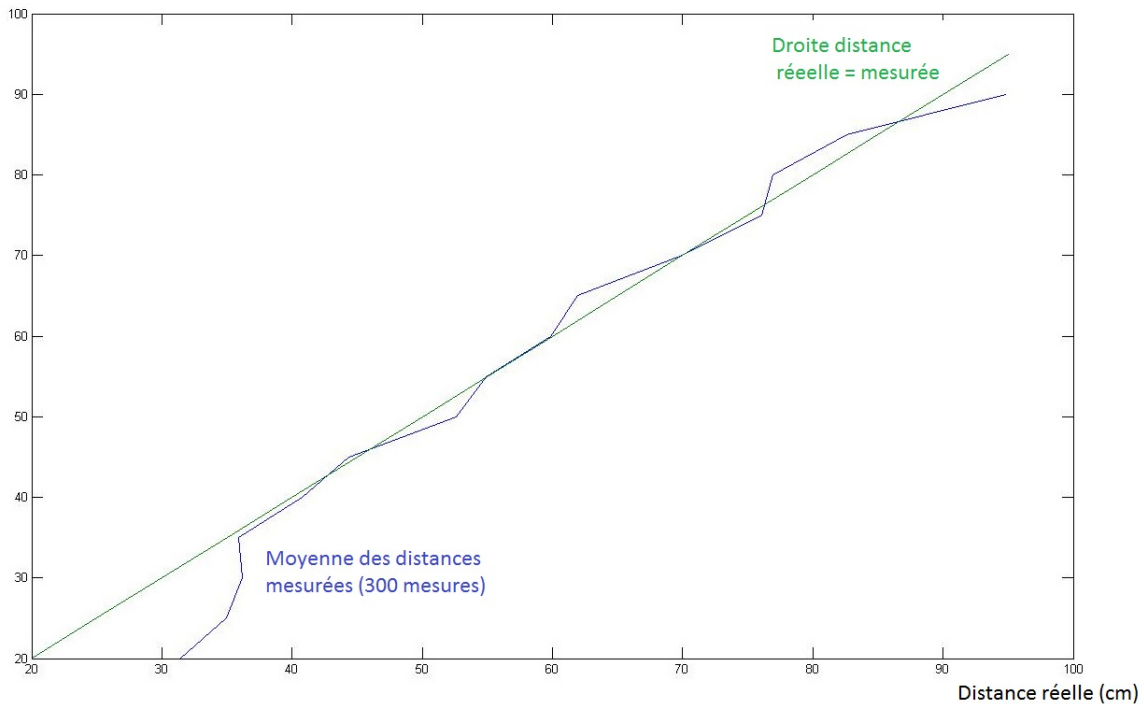


FIGURE 4.11 – Tracé de la moyenne sur 300 points de la distance mesurée en fonction de la distance réelle.

bande réfléchissante de 6 cm, on sait que la distance maximale balise/capteur est la demie-diagonale du terrain soit 3.6 m.

A cette distance, s'il faut que le laser reste au moins 1 ms sur les 6 cm réfléchissant le laser, cela nous donne une vitesse de rotation maximale de 2.6 Hz. Si l'on place la balise réfléchissante à 2.1m du capteur (ce qui correspond à l'expérience réalisée) nous retrouvons les 4 Hz limites.

Afin d'améliorer ce capteur, nous devons donc concentrer nos efforts sur deux points :

- Améliorer la conception mécanique du capteur mais à ce stade et avec nos moyens, cela devient un problème reposant sur des détails et petits composants. Un tel objectif devient vite chronophage et sans garantie de succès.
- Changer l'ensemble laser/photodiode en remplaçant l'Omron E3Z-LR81 par un modèle plus performant, cependant synonyme de plus coûteux.

4.4 Montage Spécial (Avril 2015)

4.4.1 Réalisation

Mécanique

Pour ce montage, nous avons souhaité vérifier le bon fonctionnement d'un système dont la vitesse de rotation n'aurait pas besoin d'être constante. Pour cela, plutôt que d'estimer la position angulaire du laser par différence temporelle entre top tour et montée du laser, nous avons utilisé un moteur avec un codeur incrémental précis.

Les dimensions de ce moteur avec ensemble de réduction et codeur incrémental à 2500 tops par tours dépassent les 8cm imposés par la Coupe de France de Robotique. Ce montage est donc uniquement réalisé en tant que test.

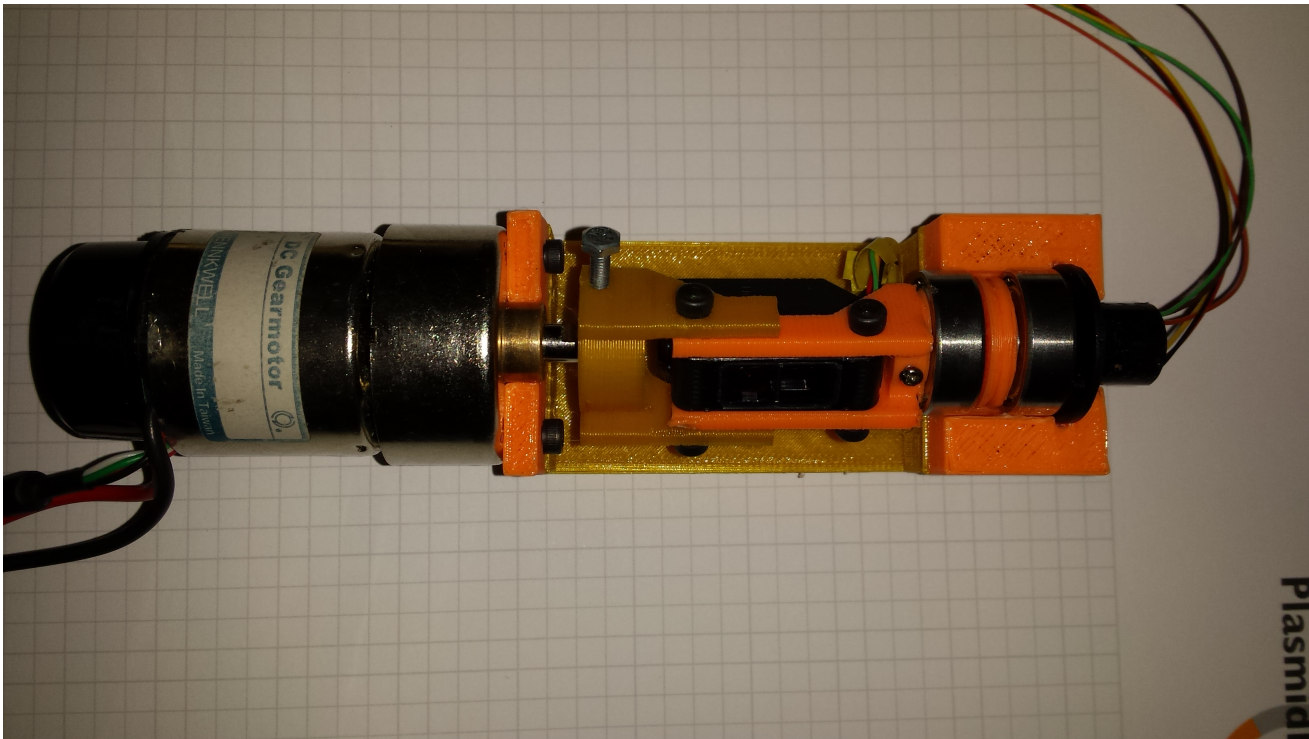


FIGURE 4.12 – Prototype de test

4.4.2 Résultats

Malgré la mauvaise qualité de la mécanique que nous avons réalisée, nous avons fait des mesures de position angulaire sachant que la précision angulaire $\delta\theta$ dépend directement du codeur incrémental

$$\delta\theta = \frac{360}{2500} = 0.14^\circ \quad (4.1)$$

Données

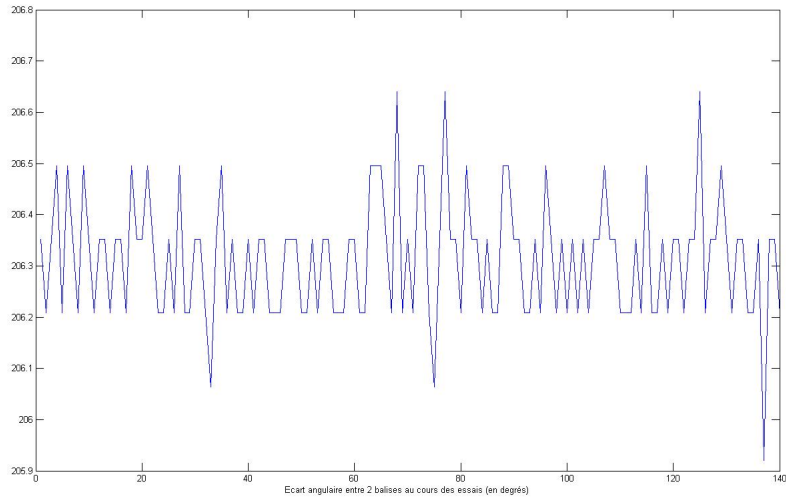


FIGURE 4.13 – Tracé au cours du temps de l'écart angulaire entre 2 balises

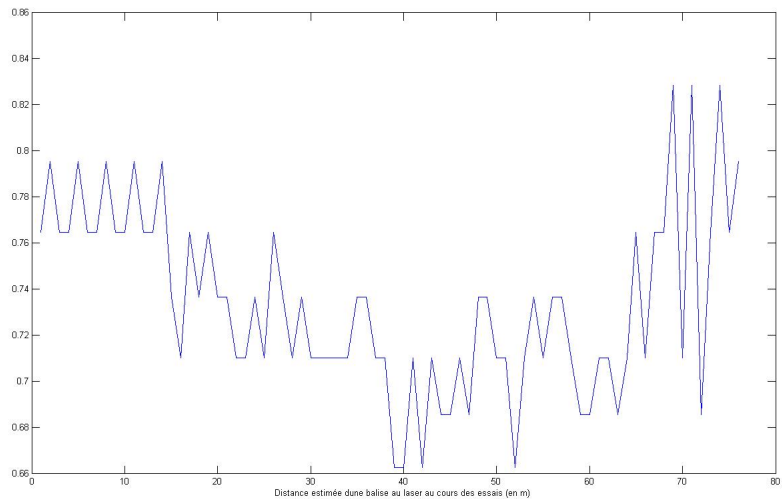


FIGURE 4.14 – Tracé au cours du temps de la distance mesurée entre le laser et une balise

Interprétation

On remarque que même avec une mauvaise conception, les mesures angulaires sont bien meilleures avec un écart type de 0.12° .

Les mesures de distances ne sont en revanche guère meilleures et varient dans une plage de 20 cm. Ce qui s'explique par la grande précision angulaire demandée pour la mesure des distances lorsque la balise est éloignée du laser.

Nous retiendrons de ce montage que l'utilisation d'un unique top tour et du temps afin de mesurer les angles alors que la vitesse de rotation n'est pas constante est à l'origine de tous nos problèmes.

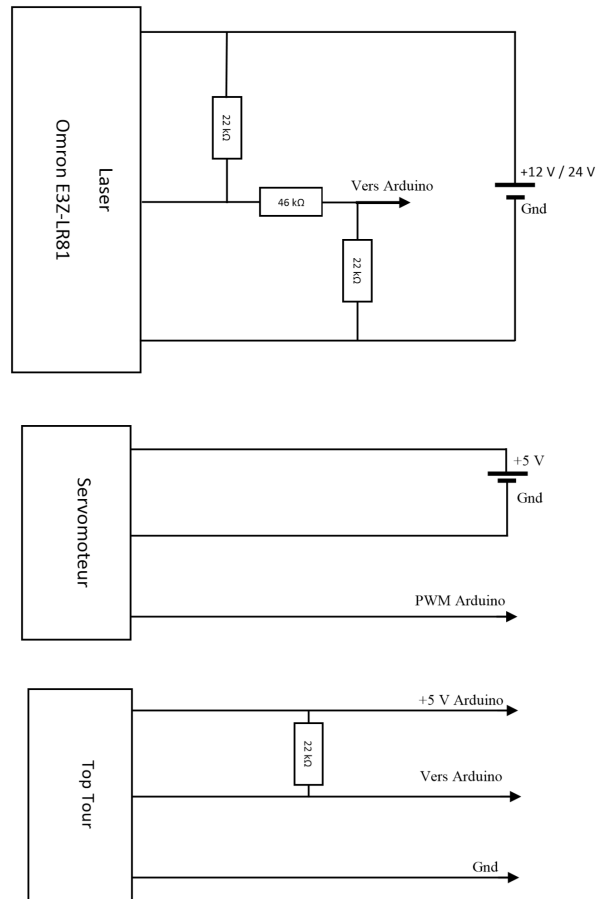


FIGURE 4.15 – Schéma électronique modifié

4.5 Prototype 2 modifié (Avril 2015)

4.5.1 Réalisation

Mécanique

Pour ce montage, nous avons repris le prototype N°2 (voir partie 4.3) et avons remplacé le moteur à courant continu par un servomoteur dont nous avons modifié le rapport de réduction (voir partie 3.1).

Nous espérons ainsi :

- Améliorer la constance de la vitesse de rotation
- Permettre à notre capteur de tourner à une faible vitesse de rotation de l'ordre de quelques Hertz.

Nous avons vu précédemment que plus le laser tourne vite, moins les imperfections de la mécanique ne se font sentir (voir partie 4.3.2). Cependant, le laser ne pouvant fonctionner qu'à faible vitesse de rotation (voir partie 4.3.2), nous devons tourner lentement dans un test sur terrain réel et subissons de nouveau les problèmes mécaniques.

Électronique

Nous agissons sur le servomoteur via une entrée PWM.

4.5.2 Résultats

Données

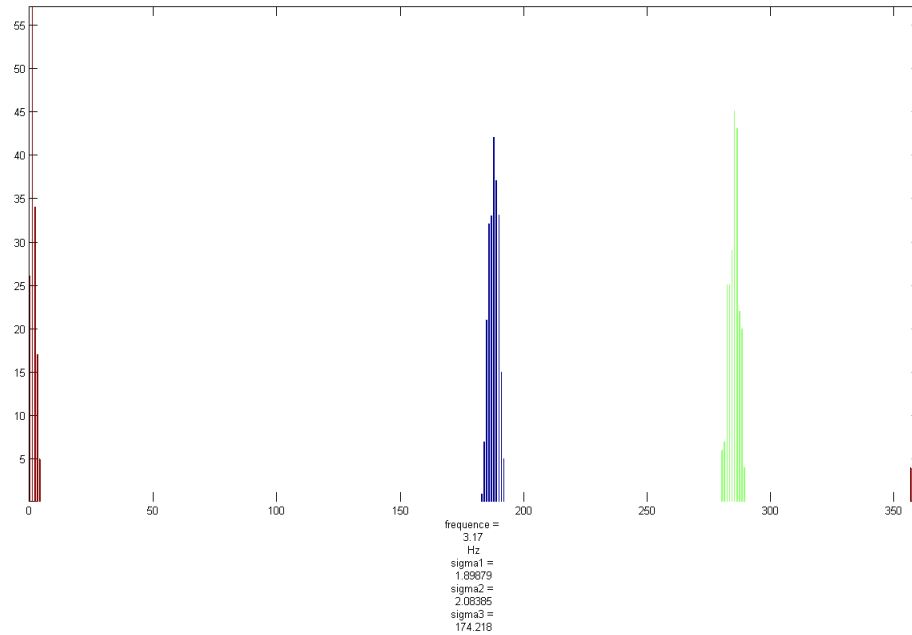


FIGURE 4.16 – Tracé au cours du temps de la distance mesurée entre le laser et une balise

Interprétation

Nous avons réussi à l'aide du rapport de réduction à faire fonctionner notre capteur dans le cas réel. Les précisions angulaires sont cependant insatisfaisantes. On observe aussi une périodicité de la vitesse de rotation et des erreurs de mesure. Cette période est d'une dizaine de tours. Voici les hypothèses qui pourraient expliquer cette irrégularité périodique de vitesse de rotation :

- Le système entre en résonance
- La rotation du capteur présente un balourd qui crée ces oscillations
- Dans les roulements à billes qui sont graissés, tous les 10 tours, les billes se retrouvent dans la même configuration, ce qui explique la fréquence d'oscillation.

4.6 Prototype final :

Ici, la mécanique ne change pas, mais on fait évoluer l'électronique de manière à être le plus proche possible de l'objectif de la coupe :

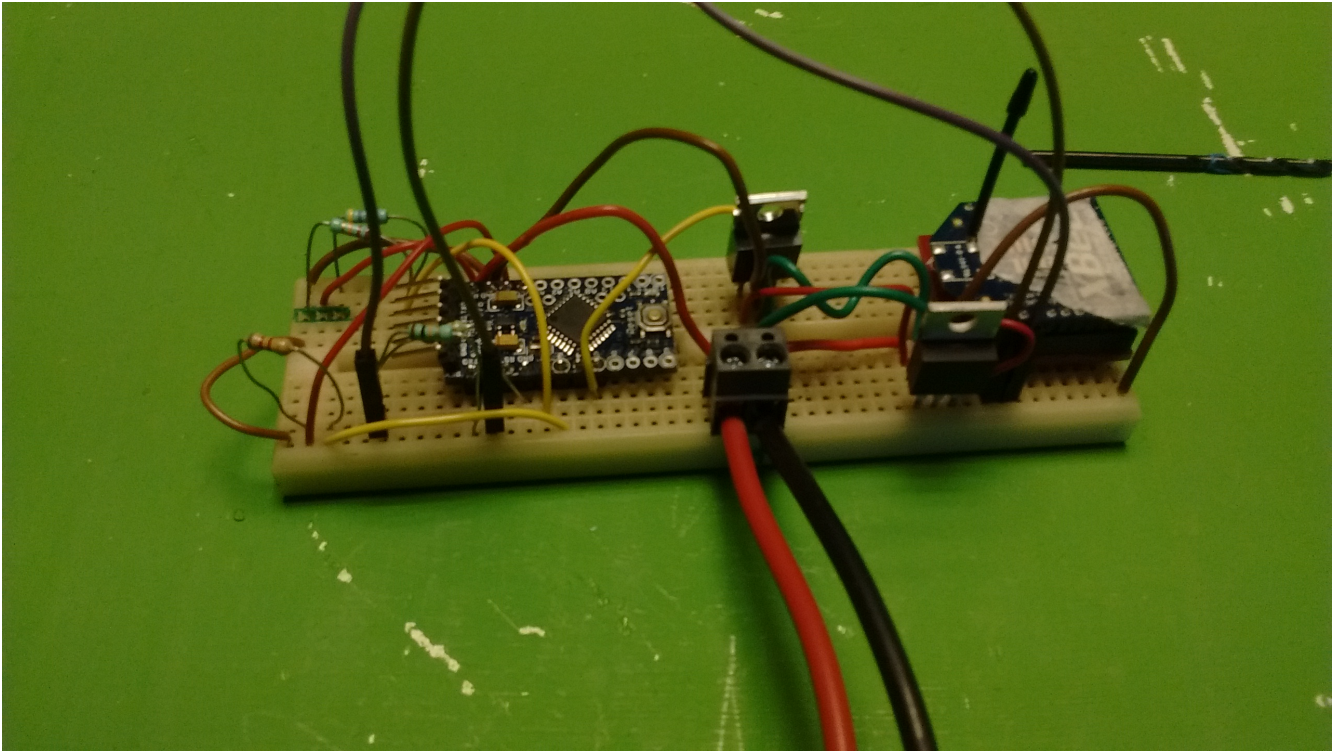


FIGURE 4.17 – Montage électrique final

Ici, on veut assurer un lien sans fil à travers un module Xbee fonctionnant en 3.3V. l'arduino mini pro utilisé fonctionnant en 5V et ne possédant pas de régulateur 3.3V, on en intègre un. De plus, on a constaté auparavant que le régulateur 5V de l'arduino ne suffit pas à alimenter le servomoteur, on en intègre donc un également. On place ensuite les pont diviseurs pour le capteur et pour le TX de l'arduino vers le Xbee. Le circuit est prévu pour être alimenté en 10-12V (on utilise une batterie de 11.4V)

4.7 Idées pour le produit fini

Nous comptons réaliser un dernier prototype pendant le peu de temps qu'il nous reste en nous focalisant sur plusieurs points :

- Remplacer l'unique top tour par 4 top tours placés à 90° afin de limiter les erreurs dues aux différences temporelles.
- Améliorer le système de mise en rotation du capteur en réalisant un asservissement sur la vitesse de rotation. Plus les balises sont loin, plus on tourne lentement pour les détecter, et plus les balises sont proches, plus on tourne vite pour gagner en constance de vitesse de rotation.
- Remplacer le laser omron E3Z-LR81 par un autre capteur déjà commandé mais en attente de réception.
- Réaliser le PCB assez compact pour faire rentrer la partie électronique dans la balise.

Chapitre 5

Traitement des données

5.1 Liaison entre le robot et le capteur

La liaison entre le robot et l'arduino est assurée par des modules Xbee serie 2.

Sur ces derniers, on utilise uniquement la liaison série : Ils sont mis en place de telle façon que le pc (coordinateur) reçoivent les infos venant de toutes les balises (routeurs)

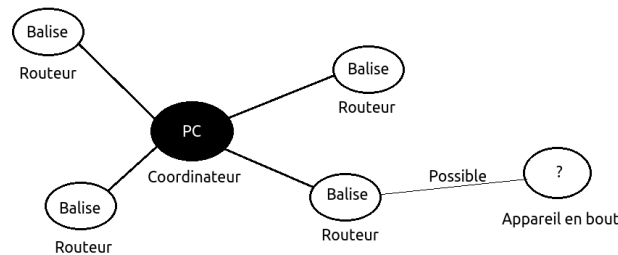


FIGURE 5.1 – Schéma de principe d'un réseau Xbee 2

Une fois les xbee placés sur le même réseau, les données envoyées via la liaison série d'un routeur sont reçues par le coordinateur. Il faut cependant être prudent et placer des delays entre les émissions pour éviter les surcharges.

5.2 Filtre de Kalman

Une fois les données acheminées au robot principal, ce dernier va procéder à une fusion de données. A défaut d'avoir pu disposer du robot fonctionnel à temps pour notre soutenance, nous avons réalisé un filtre de Kalman linéaire en faisant l'hypothèse que l'odométrie du robot nous fournirait les dérivées temporelles en position \dot{x} et \dot{y} .

En outre, nous avons simulé le fonctionnement de notre capteur en ajoutant un bruit sur les mesures angulaires des balises pour une position du robot donnée.

En ce qui concerne la création du filtre de Kalman, en supposant notre système linéaire, on commence par modéliser notre système sous la forme d'une équation de mesure :

$$Y = HX + B$$

Avec

$$Y = \begin{pmatrix} \dot{x}_{odo} \\ \dot{y}_{odo} \\ x_{bal} \\ y_{bal} \end{pmatrix}; H = I_4; X = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ x \\ y \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix}$$

Ainsi qu'une équation d'état :

$$X_{k+1} = AX_k$$

Avec

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ Te & 0 & 1 & 0 \\ 0 & Te & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{car} \quad x((k+1).Te) = x(k.Te) + Te \times \dot{x}(k.Te)$$

Où Te est la période d'échantillonnage.

Afin de réaliser le filtre de Kalman, il reste deux matrices à déterminer :

- R : la matrice de covariance du bruit de mesure.
- Q : la matrice de covariance du bruit de commande.

Avec

$$R = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_y^2 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad Q = \begin{pmatrix} \epsilon_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \epsilon_y \end{pmatrix}$$

- $\sigma_x = \sigma_y$ est l'écart type du bruit de l'odométrie
- $\sigma_x = \sigma_y$ est l'écart type du bruit du capteur
- $\epsilon_x = \epsilon_y$ est la variance maximale de l'erreur autorisée sur la modélisation de la vitesse du robot (équation d'état)
- $\epsilon_x = \epsilon_y$ est la variance maximale de l'erreur autorisée sur la modélisation de la position du robot (équation d'état)

En faisant varier ces différents paramètres (voir code matlab en annexe), nous obtenons des résultats convaincants. En supposant que notre capteur tourne à 10 Hz et qu'il mesure les angles des balises réfléchissantes à $\pm 3^\circ$ près. Cette hypothèse revient à dire que nous avons conservé le prototype n°2 en remplaçant l'ensemble laser/photodiode par un autre plus réactif : le WL100 LF1131 de Sick.

Voici les paramètres de la simulation n°1 :

- La table mesure $300cm_{axe x}$ sur $200cm_{axe y}$
- Le robot a pour position initiale $x_0=50\text{ cm}$ et $y_0=20\text{ cm}$
- Le robot se déplace à la vitesse constante $\dot{x} = 20\text{ cm/s}$ et $\dot{y} = 10\text{ cm/s}$

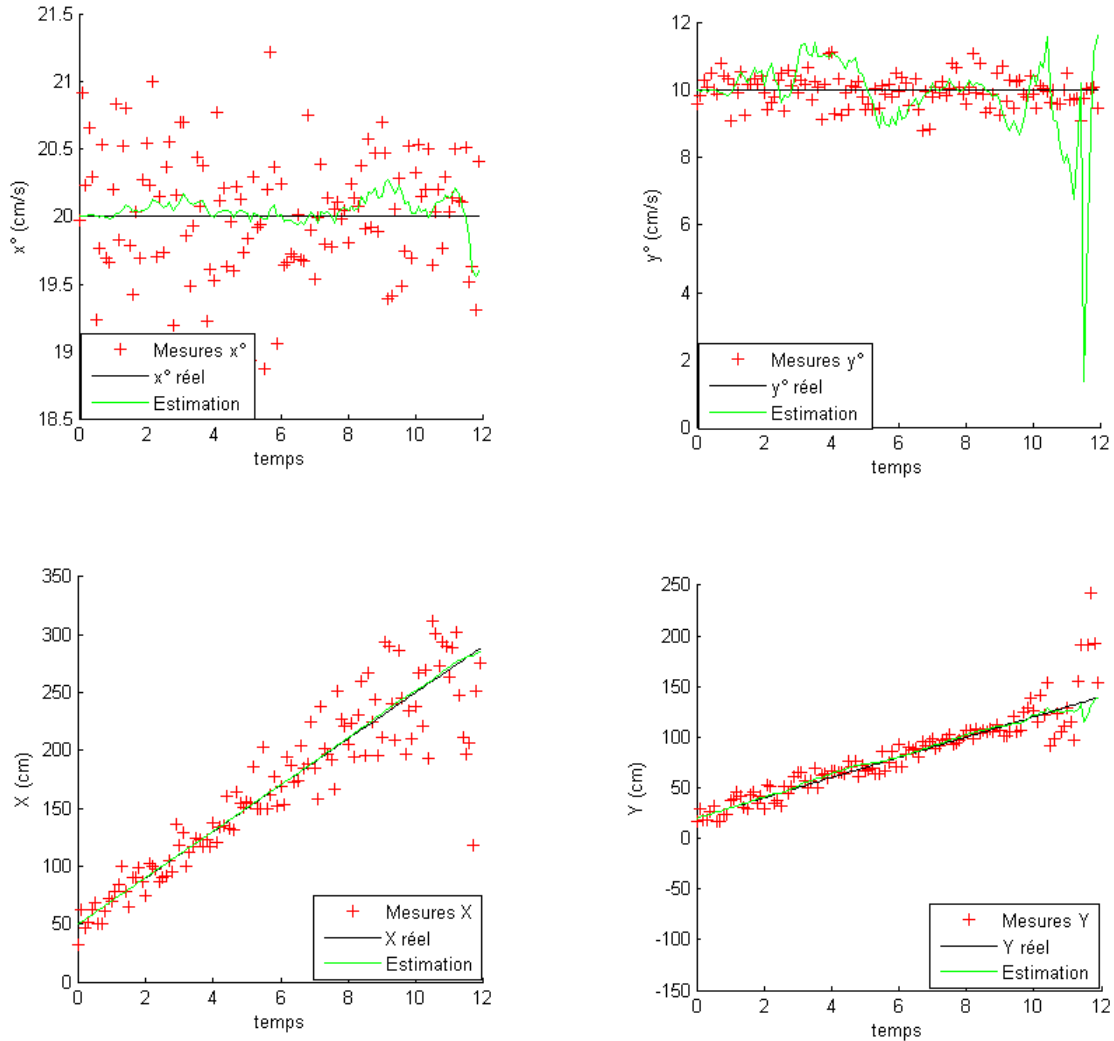


FIGURE 5.2 – Simulation n°1 : Estimation faite par un filtre de Kalman de positions pour une vitesse constante

On voit bien sur cette estimation qu'à mesure que x et y augmentent, on se rapproche du "cercle de la mort" vu en partie 2.3, les mesures sont alors de plus en plus bruitées.

En dehors de ce cercle, le x estimé est très correct, on répond bien au cahier des charges avec une erreur inférieure à 5cm.

Voici les paramètres de la simulation n°2 :

- La table mesure $300cm_{axe x}$ sur $200cm_{axe y}$
- Le robot a pour position initiale $x_0=50$ cm et $y_0=70$ cm
- Le robot se déplace en réalisant une ellipse qui passe près du cercle de la mort afin d'étudier son influence sur la prévision.
- La précision angulaire du capteur est de $\pm 1^\circ$

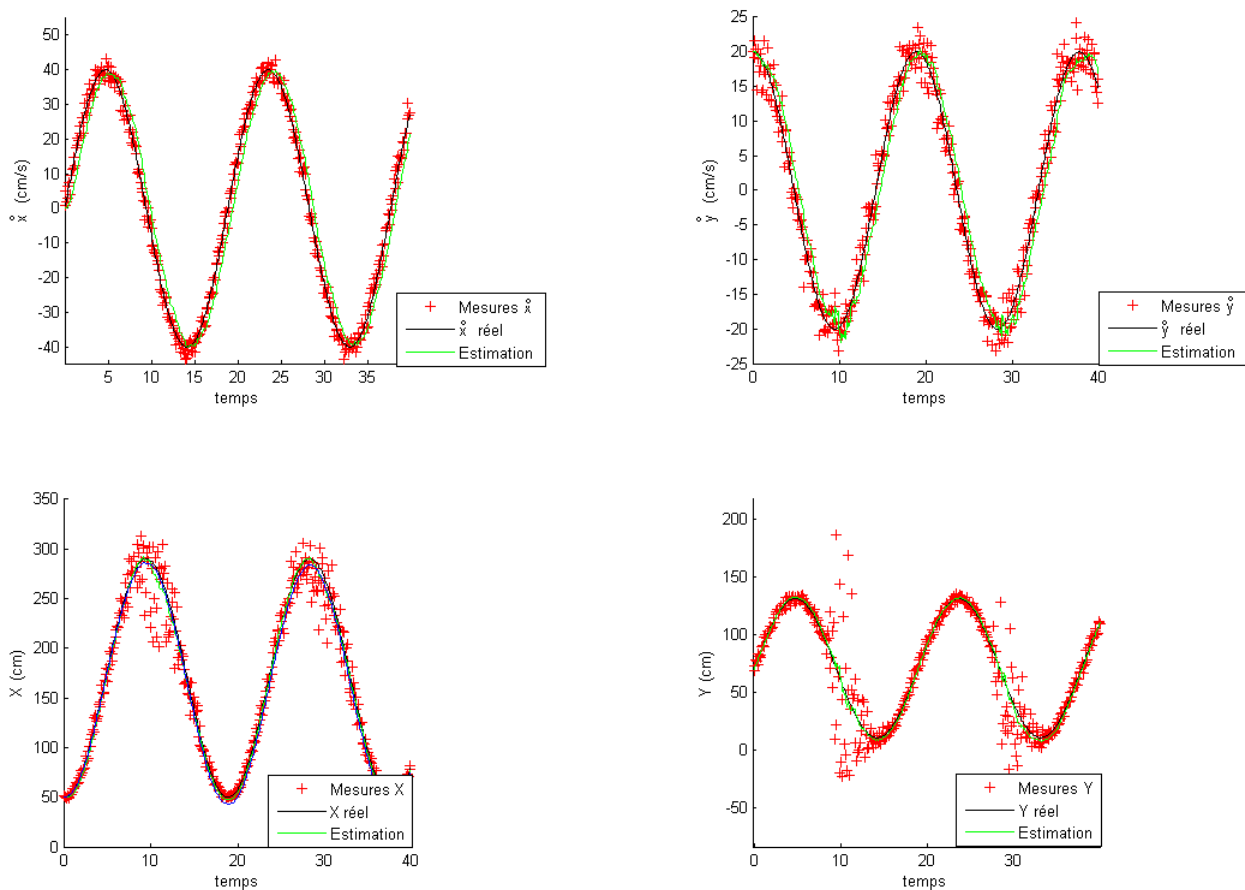


FIGURE 5.3 – Simulation n°2 : Estimation faite par un filtre de Kalman de positions pour une vitesse \dot{x} sinusoïdale

A nouveau, on observe que lorsque x s'approche de $300cm$, les mesures sont de plus en plus bruitées. Il s'agit là de l'effet de la proximité du "cercle de la mort".

Pour mieux saisir les avantages liés à l'utilisation de la balise en complément de l'odométrie, nous avons tracé les erreurs de positionnement en x en fonction du temps. Nous comparons ainsi l'erreur résultant de l'emploi seul de l'odométrie et l'erreur commise par l'estimation via le filtre de kalman.

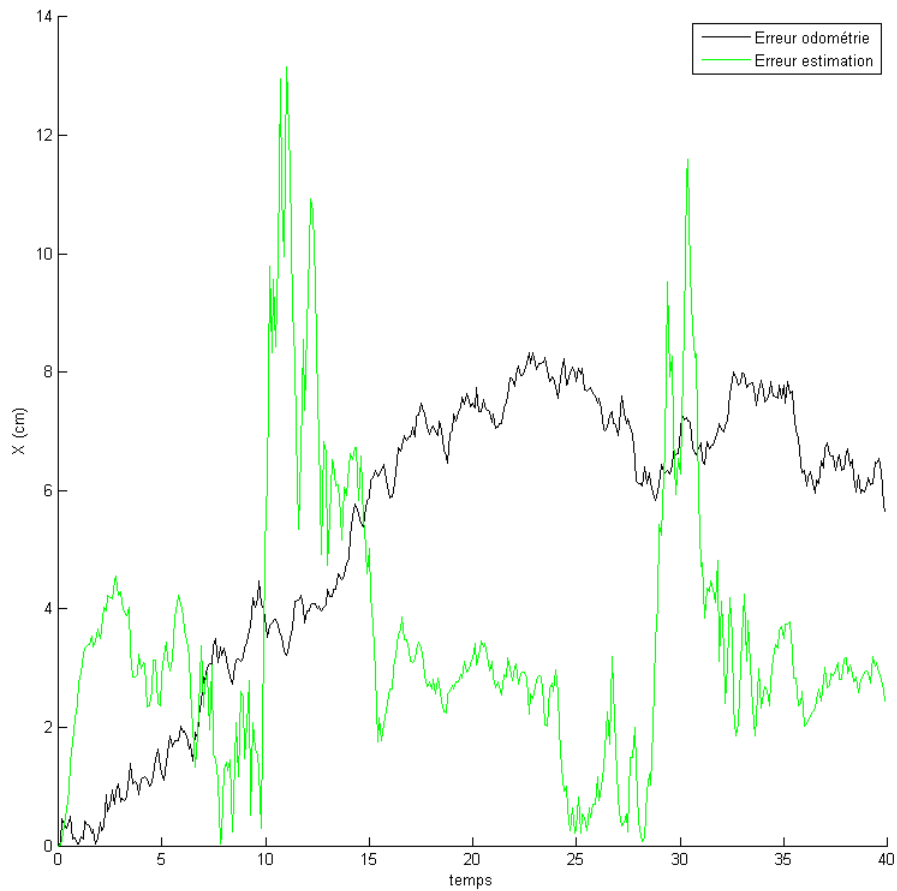


FIGURE 5.4 – Simulation n°2 : Evolution des erreurs en positionnement de l’odométrie et de l’estimateur en fonction du temps

En comparant ces erreurs, on remarque que l’odométrie seule gagne en erreur à mesure que l’on progresse dans le temps, elle les intègre. On observe que si dans un premier temps, l’estimation de la position est bonne, au fil du temps, on dépasse une erreur moyenne en position de 5cm ce qui dépasse le critère de précision énoncé dans le cahier des charges.

Avec notre estimateur, en revanche, on a une erreur oscillant globalement entre 0 et 4cm, car le capteur permet de ”recentrer” le robot. Bien évidemment, a $t=12s$ et $t=31s$, le robot entre dans le ”cercle de la mort” et l’odométrie seule est alors gagnante, il s’agira donc de considérer les données en fonction de notre positionnement.

Chapitre 6

Conclusion

Jusqu'ici, les précisions obtenues sur les mesures sont de l'ordre de $\pm 3^\circ$. Si notre but est toujours d'améliorer la précision des mesures angulaires, on remarquera que le filtre de Kalman nous permettra de compenser le bruit de mesure.

Nous avons pu voir lors de ce TER que perfectionner un système si petit était bien plus délicat que prévu, se révélant fortement chronophage. De nouvelles idées afin de résoudre les problèmes d'ordre mécanique sont actuellement en train d'être éprouvées, et le seront certainement pendant quelques mois de plus afin d'arriver, essai après essai, à optimiser la conception du capteur.

Au cours de ce TER, nous avons pu aborder des notions complexes de traitement du signal (Kalman) ainsi qu'en informatique industrielle (Communication sans fil, timing précis avec arduino). Ce qui a fortement souligné l'aspect interactif et complémentaire de ces différentes disciplines.

Au final, l'intransigeance d'un véritable cahier des charges nous a permis de réaliser à quel point un amoncellement de contraintes au premier abord facilement respectables, devient véritablement un jeu sur l'optimisation.

Bibliographie

- ferdinandpiette.com
- wikipedia.org
- faitmain.org/volume-2/xbee-arduino.html
- tel.archives-ouvertes.fr
- generationrobots.com
- Mémoire de Microb Technology
- Règlement officiel de la Coupe de France de Robotique
- "Une application du filtrage de Kalman à la fusion de données pour la localisation d'un robot mobile" Jan Operderbecke, Cécile Durieux
- "18 Triangulation Algorithms for Mobile Robot Positioning or for the Resection Problem : benchmarking, software, source code in C, and documentation" Vincent Pierlot, Marc Van Droogenbroeck

Remerciements

Nous souhaitons remercier nos encadrants M.HAESSIG Germain et M.BARBOT Jean-Pierre pour les conseils et l'aide qu'ils nous ont apportés. Sans oublier les membres du [Kro]bot pour l'aide indiscutable qu'ils nous ont apportée pour le prototypage rapide et les composants.