



# Faire des balises laser en buvant des bières

Olivier MATZ <[zer0@droids-corp.org](mailto:zer0@droids-corp.org)>

<http://microb-technology.org>

v0.8 - 2010-06-24

# Table des Matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Résumé</b>  | <b>5</b>  |
| <b>2 Introduction</b>  | <b>6</b>  |
| 2.1 La problématique   | 6         |
| 2.2 État du lard   | 6         |
| 2.3 Les deux grandes classes de balises                      | 8         |
| 2.4 Plan de la suite   | 9         |
| 2.5 Bière  | 9         |
| <b>3 Contraintes et objectifs</b>                            | <b>10</b> |
| 3.1 Légende  | 10        |
| 3.2 Commun à tout le système                                 | 10        |
| 3.3 Localisation du robot adverse                            | 10        |
| 3.4 Localisation du robot bienfaiteur (le notre)             | 11        |
| <b>4 Triangulation: un peu de théorie</b>                    | <b>12</b> |
| 4.1 Pour un système mesurant des distances                   | 12        |
| 4.2 Pour un système mesurant des angles                      | 12        |
| 4.2.1 Quelle information a-t-on avec l'angle d'une balise ?  | 12        |
| 4.2.2 Quelle information a-t-on avec l'angle de 2 balises ?  | 12        |
| 4.2.3 Avec 3 balises ?                                       | 13        |
| 4.2.4 Est-il toujours possible de déterminer sa position ?   | 14        |
| 4.2.5 Quelle est l'influence d'une erreur de mesure ?        | 15        |
| 4.2.6 Quelle est la meilleure disposition pour les balises ? | 19        |
| 4.3 Système hybride mesurant l'angle et la distance          | 25        |
| 4.3.1 Calcul de la position                                  | 26        |
| 4.3.2 Erreur de positionnement                               | 27        |
| 4.3.3 Petite Bière   | 29        |
| 4.4 Je vous mets une petite conclusion ?                     | 29        |
| <b>5 Le système choisi: une balise laser</b>                 | <b>30</b> |
| 5.1 Overviou   | 30        |
| 5.2 Sur notre robot copain                                   | 32        |
| 5.2.1 Lasers tournants                                       | 32        |
| 5.2.2 Récepteurs IR  | 33        |
| 5.2.3 Support pour la balise adverse                         | 33        |
| 5.3 Balise réceptrices                                       | 34        |
| 5.4 Quelques considérations de faisabilité                   | 34        |
| 5.4.1 Bande passante du montage photodiode                   | 34        |
| 5.4.2 Temps de réponse du message en infrarouge              | 35        |
| 5.4.3 Choix de la LED IR et du transistor                    | 36        |
| 5.4.4 Choix de la photodiode                                 | 37        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 5.4.5     | Peut-on faire une mesure tout en se déplaçant ?                         | 37        |
| 5.4.6     | La balise adverse est-elle réalisable avec ce système ?                 | 37        |
| 5.4.7     | Mesure différentielle des lasers, et filtrage                           | 38        |
| 5.4.8     | Filtrage logiciel du laser  | 39        |
| 5.4.9     | Synchronisation de l'émission des balises                               | 39        |
| 5.4.10    | Placement des balises sur le terrain                                    | 39        |
| 5.4.11    | Choix d'une moustache élégante, et petite bière                         | 40        |
| 5.4.12    | Le laser virtuel  | 41        |
| 5.4.13    | Déduire la distance du temps entre les deux lasers                      | 42        |
| 5.4.14    | Alignement et réglage des lasers  | 43        |
| <b>6</b>  | <b>Réalisation</b>  | <b>45</b> |
| 6.1       | D'abord un prototype simple   | 45        |
| 6.1.1     | Description   | 45        |
| 6.1.2     | Électronique  | 46        |
| 6.2       | Réalisation de la version finale  | 47        |
| 6.2.1     | Schéma de principe de la tourelle                                       | 47        |
| 6.2.2     | Détails sur l'alimentation du laser                                     | 48        |
| 6.2.3     | Balise fixe et balise adverse   | 49        |
| 6.2.4     | Code des balises réceptrices  | 51        |
| 6.2.5     | Code de la tourelle du robot  | 53        |
| <b>7</b>  | <b>Tests</b>  | <b>55</b> |
| <b>8</b>  | <b>Conclusion</b>   | <b>57</b> |
| <b>9</b>  | <b>Points à développer dans les versions ultérieures de ce document</b> | <b>58</b> |
| <b>10</b> | <b>Références</b>   | <b>59</b> |
| 10.1      | Bières  | 59        |
| 10.2      | Eurobot   | 59        |
| 10.3      | Microb Technology   | 59        |
| 10.4      | Autres systèmes de balises  | 59        |
| 10.4.1    | Balises laser   | 59        |
| 10.4.2    | Balise IR   | 59        |
| 10.4.3    | Balise US   | 59        |
| 10.4.4    | Autres balises  | 60        |
| 10.5      | Quelques équipes concurrentes citées                                    | 60        |
| 10.6      | Datasheets  | 60        |
| 10.7      | Autre références  | 60        |
| <b>11</b> | <b>Remerciements et Greetz</b>  | <b>61</b> |

# 1 Résumé

*Ce document décrit comment fonctionnent les balises lasers que nous (Microb Technology) avons conçues pour l'année 2010 pour la Coupe de France de Robotique. Au final, la précision était de l'ordre de 2 cm et 0.5° pour une mesure à l'arrêt. Cependant, le système a été assez peu testé par manque de temps, et le projet aurait mérité d'être poursuivi pour terminer les mesures afin de caractériser correctement l'erreur de positionnement.*

*Pendant la compétition, la carte a grillé et nous avons dû réinstaller la balise de 2009. La raison d'être de ce document est de fournir à qui voudra les informations pour réaliser un système équivalent.*

## 2 Introduction

Depuis ma première participation à Eurobot, les tentatives avec mes différentes équipes pour faire des balises ont été nombreuses. En général, c'est un projet qui est souvent considéré comme secondaire: on préfère (à raison d'ailleurs) avoir un robot qui roule droit et qui marque des points plutôt qu'un robot qui sait où il est.

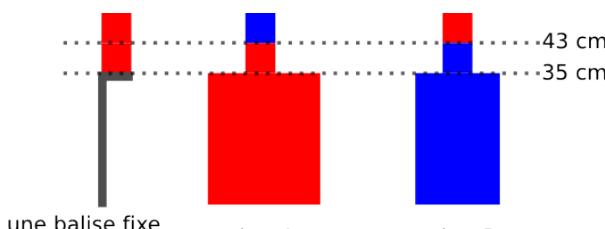
On se rend compte après coup, que ça ne servait à rien d'avoir des super balises, si le robot un peu capricieux n'a pas bougé de son aire de départ. Ne riez pas, c'est arrivé.

Dans le cadre d'Eurobot, les balises sont principalement utilisées pour deux fonctions: le repérage du robot adverse (l'évitement de l'adversaire étant devenu une obligation depuis quelques années), et la mesure de position de son propre robot. Certaines années, les balises peuvent être placées sur des éléments de jeu: c'était le cas en 2009 où on pouvait placer des balises sur les distributeurs de palets. On peut imaginer aussi des balises servant à la détection d'éléments de jeu (une caméra par exemple). Dans ce document, nous ne traiterons que les 2 cas principaux: repérage de notre robot et du robot adverse.

### 2.1 La problématique

Rappelons pour ceux qui n'ont rien suivi qu'[Eurobot](#) est une compétition de robotique dans laquelle s'affrontent deux robots autonomes. Ce concours est organisé en France par [Planète Sciences](#).

Dans le cadre de ce concours, chaque équipe peut, si elle le souhaite, disposer une balise sur le robot adverse (un emplacement doit être prévu à cet effet), et plusieurs balises fixes, comme dans le schéma ci-dessous. On peut se reporter par exemple au [Règlement 2010](#) pour plus de précisions.



*Hauteurs des différentes balises.*

La problématique est donc: concevoir un système qui permet de connaître la position du robot allié et celle du robot adverse en utilisant au mieux ces emplacements de balises.

### 2.2 État du lard

Les principaux types de balises que l'on rencontre à la coupe de France / Eurobot sont:

- **Les balises IR "statiques":** émetteur sur les balises fixe et le robot adverse, récepteur sur le robot ami. Ces balises mesurent en général un angle et peuvent donner une approximation de la distance. RCVA l'utilise depuis longtemps et semble avoir une bonne estimation de la position de l'adversaire.

La portée est relativement bonne (au moins 2m), cependant, le système reste moyennement précis: par exemple, pour l'évitement de l'adversaire, RCVA ne s'en sert que pour ralentir et le couple avec des capteurs ultrason pour finaliser la détection. Il ne faut pas espérer faire de la triangulation avec ce système.

Notre [balises Microb 2004](#) utilisaient ce principe. On peut trouver d'autres exemples tels que les fameuses [balises IR fribotte](#), les [balises IR Pobot](#) ou les [balises IR de Totofweb](#).



*Les balises Microb de 2004*

- **Les balises IR rotative:** c'est ce que nous avons utilisé chez Microb en 2008 et 2009 (et finalement en 2010 aussi). Voir ce lien pour la doc des [balises Microb 2009](#). Dans notre cas, elles n'ont servi qu'au repérage du robot adverse, sur lequel nous avions placé un catadioptre cylindrique, avec une bonne fiabilité. A noter que le lien suivant ([détecteur laser](#)) a en partie inspiré ce système, montrant qu'un laser pourrait être utilisé en lieu et place du capteur IR.

Ce système possède un très bon rapport performance/complexité, ce qui explique sa popularité croissante ces dernières années auprès de quelques équipes. La portée de ce système (dans notre cas) dépasse légèrement le mètre, notamment à cause de la différence de hauteur entre le miroir rotatif et la balise adverse, sinon on pourrait atteindre plusieurs mètres.



*La tourelle Microb de 2009 (c'est un capteur IR, pas un laser !)*

- **Les balises US:** la plupart mesurent une distance. Elles ont été utilisées par différentes équipes avec succès, voir notamment les [balises Serinus 2005](#), ou les [balises Turag 2009](#). Un bon candidat pour de nouvelles balises. Un bon document à lire sur le sujet est le [rapport balises clubElek 2007](#).

Certaines équipes placent plusieurs capteurs afin de connaître l'angle approximatif du robot adverse (en plus de la distance qui elle est assez précise), c'est le cas d'APBTeam en 2010.

*La balise de Turag en 2009*

- **Les balises vidéo:** utilisées par certaines équipes (récemment TMT en 2009), le principe est de reconnaître un motif sur les balises fixes et sur la balise adverse, et d'en déduire sa position selon sa taille et sa position sur l'image. Certaines équipes ont utilisé des miroirs coniques ou sphériques pour que la caméra voit à 360°. C'est le cas des [balises vidéo Pobot](#) (encore eux).

Je crois avoir vu passer aussi (en coupe d'Europe 2005) des balises vidéos dont la caméra était sur l'emplacement des balises fixes, et communiquaient avec le robot via Wifi.

- **Les balises mixtes US/IR:** voir les [balises servoBeacon APBTeam](#).
- **Les balises radioactives** proposées un 1er avril APBTeam. Voici un lien vers la description des [balises radioactives](#).

*La balise radioactive de APBTeam*

• **Les balises radio:** en théorie on pourrait faire pas mal de choses avec ce système. Cependant, il faut des compétences relativement bonnes dans le domaine pour commencer à envisager quelque chose, ce qui n'est pas notre cas.

Je n'ai pas vu grand chose sur le sujet, si ce n'est une page de discussion sur les [balises radio APBTeam](#), ainsi que Romain de l'ENSSAT qui bossait --si j'ai bien compris-- sur un système de ce type cette année en 2010.

• **Les balises laser télémétriques:** utilisées notamment par le [CRAP](#) en 2008: il s'agissait semble-t-il d'un télémètre laser tournant qui mesurait la distance avec les balises (des catadioptres, ou des boîtes de rillettes pour certains matchs).

Ce système est probablement le plus précis que j'ai pu observer jusqu'à présent. Cependant il semble cher à cause du télémètre laser, et la contrainte sur les classes de laser depuis 2009 complique encore la tâche.

• **Les balises laser** (non télémétriques): expérimentées par Tof et moi en 2003 et 2004 à Eirbot, ces balises avaient vraiment un bon potentiel. Le [Rapport Eirbot 2003](#) détaille un peu le fonctionnement de ces balises. Au final, nous avions une précision de l'ordre de +/- 10cm, ce qui est honorable, mais il existait de nombreuses pistes pour améliorer le système.

Le [rapport balises CPLN 2006](#) contient des informations intéressantes sur les balises laser. On retrouve aussi un autre exemple d'utilisation des lasers dans les [balises laser Pobot...](#) vous noterez que ces mecs là ont tout essayé :)



*La balise goniométrique de Pobot*

Beaucoup de systèmes différents ont déjà été essayé par des équipes, et il est probable que quelques systèmes m'aient échappé. Il manque encore celui qui repère l'autre robot en mesurant la déformation de l'espace-temps qu'il produit. Il faudra penser à soumettre l'idée à APBTeam pour le prochain 1er avril.

## 2.3 Les deux grandes classes de balises

On peut catégoriser les types de balises en trois grandes espèces:

- celles qui mesurent une distance
- celles qui mesurent un angle
- la troisième catégorie, la plus importante, celles qui ne mesurent rien du tout

Parfois un système appartient aux deux premières espèces à la fois. En général, la mesure est effectuée relativement au robot confédéré (par opposition à un robot ennemi), mais il peut aussi être sur les balises fixes (comme sur les [balises laser Pobot](#)). Nous verrons dans la section [Triangulation: un peu de théorie](#) quels sont les avantages et inconvénients de ces méthodes.

## 2.4 Plan de la suite

Maintenant que nous avons fait le tour de ce qui se faisait, nous allons rentrer dans le vif du sujet. Le vif du sujet, c'est la conception d'un système de balise performant et répondant à la problématique. La première étape est donc de décrire le besoin. Ensuite, nous ferons un peu de théorie sur la triangulation, puis nous détaillerons les différentes étapes de la conception menant petit à petit au système de balise Microb 2010. La dernière partie traitera de la réalisation et des tests.

## 2.5 Bière

A ce stade, il est probable que le lecteur ait particulièrement soif. Si ce n'est déjà fait, il pourra librement ouvrir une petite bière, après tout, il a quand même lu toute l'intro. Une bière blanche sera particulièrement adaptée pour commencer, comme par exemple la [Blanche de Namur](#), qui distille des parfums d'écorce d'orange et de coriandre.



*Un autre type de balise. Ah non c'est une bière.*

### 3 Contraintes et objectifs

Les règlements de cette année (2010) imposent *a priori* des contraintes plus sérieuses que les autres années. En effet, le nombre important d'obstacles sur le terrain (7 épis de maïs fixes) et l'espace restreint entre ceux-ci imposent tout au long du match une précision à moins de 5 cm près, sinon c'est la collision. Cette précision est atteignable avec de l'odométrie (au prix d'une vitesse modérée et/ou de recalages courants), mais un choc avec l'adversaire en plein milieu du terrain peut être fatal, car on est parfois complètement encadré par des obstacles.

Des bonnes balises pourraient faire gagner un temps précieux cette année, alors c'est peut-être le moment de faire la killer-balise. Ci-dessous une liste des différents points, classés par ordre d'importance.

#### 3.1 Légende

- (+++): indispensable
- (++) : souhaitable
- (+): bonus

#### 3.2 Commun à tout le système

|   |   |
|---|---|
| Conformité avec le règlement: dimensions, sécurité (laser), autonomie | +++   |
| Relativement bon marché   | +++   |
| Fiabilité   | Insensible à l'environnement (lumière ou capteurs d'un autre robot par exemple) tel qu'il peut exister sur l'aire de jeu pendant la compétition |
|   | Robuste: pas de chose excessivement complexes, particulièrement au niveau mécanique.  |

#### 3.3 Localisation du robot adverse

Que la mesure soit absolue sur l'aire de jeu, ou bien relative (par rapport à la position de notre robot), elle doit permettre un évitement de l'adversaire: cela impose une portée, une fréquence de rafraîchissement et une précision minimum.

D'autre part, connaître la position du robot à plus longue distance permettrait aussi d'avoir des informations pertinentes sur ce qu'a fait l'adversaire, permettant de faire de meilleurs choix stratégiques au cours du match.

|                               |                           |     |
|-------------------------------|---------------------------|-----|
| Portée max                    | 1m                        | +++ |
|                               | 2m                        | ++  |
|                               | 3m                        | +   |
| Portée min                    | 30cm                      | +++ |
| Précision                     | +/- 10 cm à courte portée | +++ |
|                               | +/- 3 cm à courte portée  | +   |
|                               | +/- 10 cm à longue portée | +   |
| Temps de mesure               | inférieur à 200ms         | +++ |
|                               | inférieur à 100ms         | ++  |
|                               | inférieur à 50ms          | +   |
| Indication du cap             |                           | +   |
| Indication du vecteur vitesse |                           | +   |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Fiabilité | Insensible (ou peu sensible) au mouvement de notre robot | ++ |
|-----------|--|----|

### 3.4 Localisation du robot bienfaiteur (le notre)

L'objectif principal est de pouvoir éviter les recalages, qui prennent du temps, et récupérer sans problème d'un choc accidentel avec un adversaire.

|                                |  |     |
|--------------------------------|--|-----|
| Précision de la position (x,y) | +/- 5cm  | +++ |
|                                | +/- 2cm  | ++  |
|                                | +/- 1cm  | +   |
| Précision du cap               | +/- 1°   | +++ |
|                                | +/- 0.5°   | ++  |
| Fiabilité                      | Insensible (ou peu sensible) au mouvement de notre robot               | +   |
|                                | Mesure valide aux endroits stratégiques pouvant nécessiter un recalage | +++ |
|                                | valide quel que soit l'endroit sur le terrain                          | +   |

## 4 Triangulation: un peu de théorie

Cette section est en partie une traduction d'un document que j'ai écrit en 2008 sur le [prototype balises Micr0B 2008](#). Certains y auront peut-être une vague impression de déjà vu, mais pas mal de choses ont été ajoutées depuis.

### 4.1 Pour un système mesurant des distances

C'est le cas le plus évident. Si on sait que le robot allié est à une distance  $d$  d'une balise  $B$ , alors il est sur le cercle de centre  $B$  et de rayon  $d$ . Avec deux balises, le robot est à l'intersection de ces deux cercles... enfin à l'une des intersections. En effet, sauf dans le cas particulier où les deux balises et le robot sont alignés, il y a deux points d'intersection entre ces deux cercles.

Un système qui se contente de deux balises et qui se base sur l'odométrie pour déterminer l'intersection valide paraît réalisable, sinon il faut ajouter une troisième balise qui ne soit pas alignée avec les deux autres.

Deux choses à noter cependant:

- un tel système ne permet pas de connaître l'angle du camarade robot, à moins de faire plusieurs mesures en se déplaçant. A mon sens c'est éliminatoire pour la killer-balise.
- l'algorithme utilisé doit être tolérant aux erreurs de mesure: elles peuvent entraîner un problème sans solution, par exemple si les distances mesurées sont plus courtes que les distances réelles, les cercles pourraient ne pas avoir d'intersection entre eux.

### 4.2 Pour un système mesurant des angles

Ce cas est un peu plus complexe, et plus intéressant à étudier, car moins intuitif que le précédent. Nous verrons que là encore, nous aurons besoin de connaître les angles des 3 balises fixes pour connaître la position  $(x,y,a)$  sur le terrain.

#### 4.2.1 Quelle information a-t-on avec l'angle d'une balise ?

A peu près rien, en tout cas en ce qui concerne la position dans un repère cartésien sur le terrain. Par contre, il est parfois utile de connaître un cap: par exemple en 2002 pour atteindre les paniers ou plus récemment les distributeurs d'éléments de jeu en 2008 ou 2009.

Si on a déjà une information, par exemple la position  $(x,y)$  du robot, on peut alors déterminer l'angle du robot (un petit  $\arctan$ ).

#### 4.2.2 Quelle information a-t-on avec l'angle de 2 balises ?

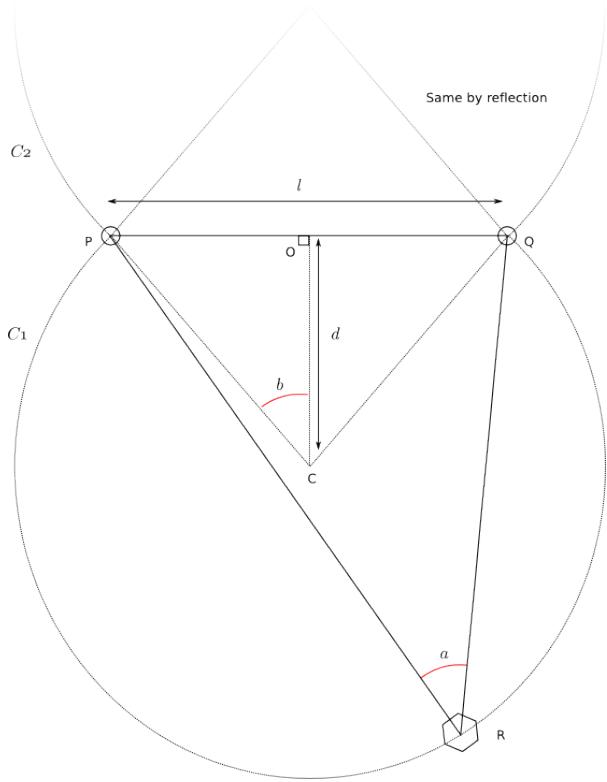
Question intéressante. Si on regarde le [Théorème de l'angle inscrit](#) sur wikipedia, on a un gros morceau de la solution.

Avant, voici quelques autres références pertinentes:

- [Le cercle](#)
- [Théorème de l'angle inscrit et de l'angle au centre](#)

Sur la figure ci-dessous:

- $P$  et  $Q$  sont les 2 balises
- $R$  est notre robot copain
- $O$  est le milieu de  $PQ$
- $a$  est l'angle  $PRQ$



*Le théorème de l'angle inscrit appliqué à nos balises*

Les données connues sont l'angle  $a$ , ainsi que les positions de  $P$  et  $Q$ . On sait d'après le théorème que si  $a$  a une valeur constante, le robot  $R$  peut être situé sur n'importe quel point d'un des 2 cercles  $C1$  et  $C2$  ( $P$  et  $Q$  exclus).

Alors comment connaître  $C1$  et  $C2$  ?

On sait que le centre du premier arc  $C1$  (et  $C2$  par réflexion) est situé sur la médiatrice de  $PQ$ . Mais où ? Toujours d'après ce même article, on sait que l'angle  $b$  est le même que l'angle  $a$  (je ne fais pas la démonstration ici). On a donc juste à trouver sur quel point de la médiatrice on a  $a = b$ .

Ça se calcule bien d'ailleurs.

$$d = l / 2 \cdot \tan(a)$$

Dans certains cas, un des deux arcs peut être éliminé car il est alors hors du terrain. Mais pas toujours. En fait, la mesure de l'angle  $a$  doit être orientée, permettant de différencier facilement de quel côté de la ligne  $PQ$  le robot affilié se trouve. En conclusion, avec 2 balises, on est situé sur un arc de cercle qui passe par les 2 balises. Il nous manque donc encore de l'information pour connaître notre position.

### 4.2.3 Avec 3 balises ?

Avec 3 balises,  $A$ ,  $B$  et  $C$ , on a 3 fois le cas de la section précédente, avec les angles suivants:

- $ARB$
- $BRC$
- $CRA$

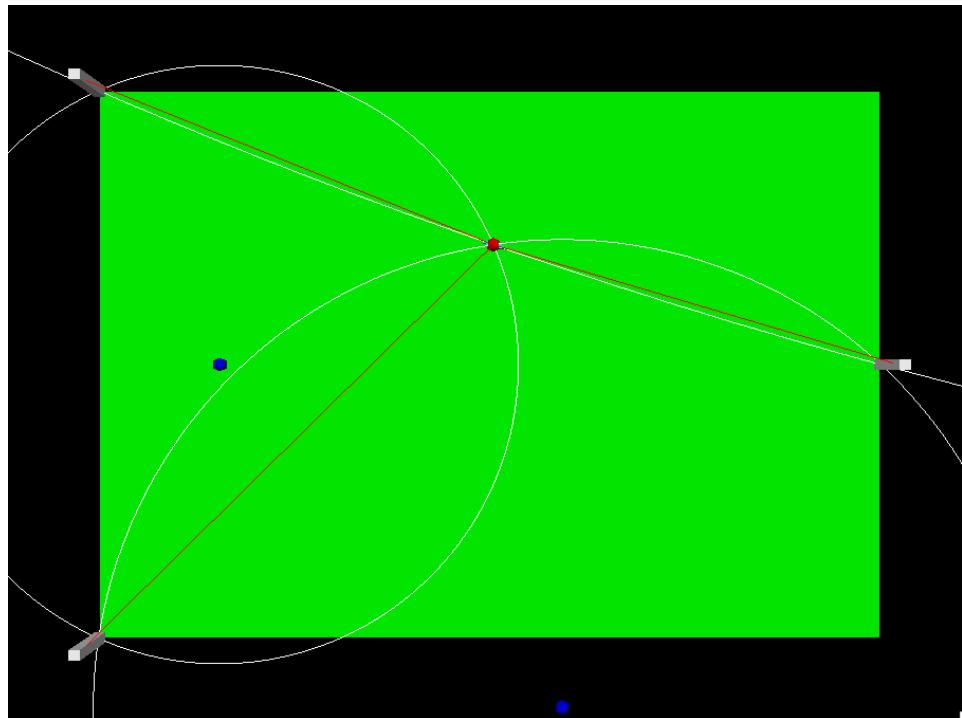
Cela signifie que  $R$  est situé à l'intersection des 3 cercles. Seuls 2 cercles sont en fait suffisants, car on sait par définition que l'un des points d'intersection est une balise, et donc  $R$  devrait être l'autre intersection.

Voici un bon document qui explique [comment trouver l'intersection entre 2 cercles](#).

Ci-dessous, un exemple avec 3 balises (comme disposées en 2010):

- Le point rouge est le robot

- Les points bleus sont les centres des 3 cercles
- Les lignes rouges montrent les angles des balises vues par le robot
- Les cercles blancs permettent de localiser le robot

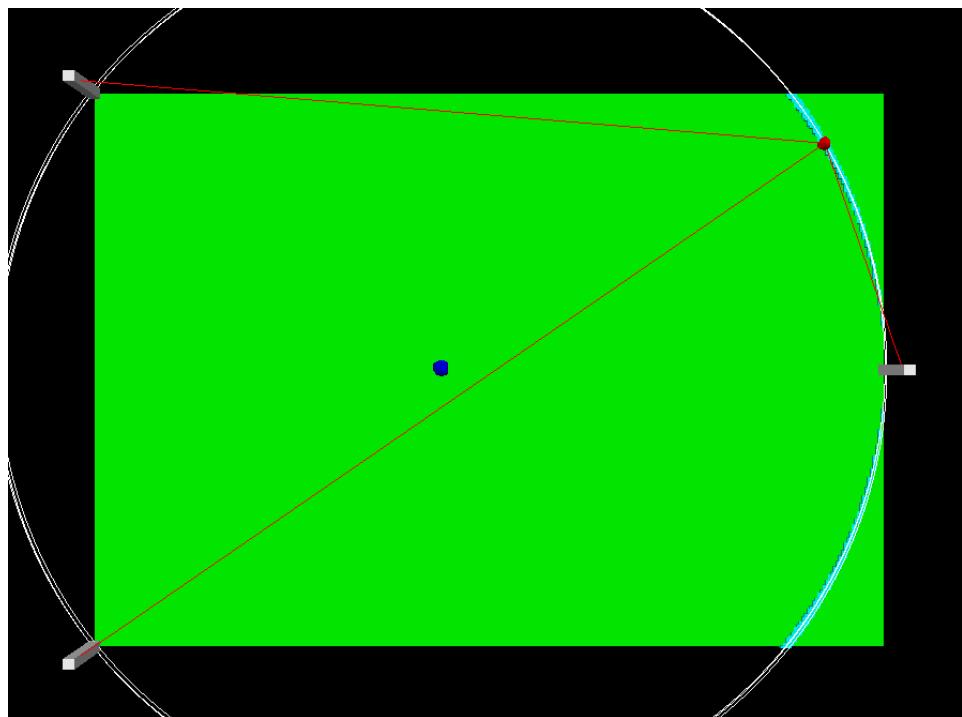


*Le robot est à l'intersection des cercles.*

#### 4.2.4 **Est-il toujours possible de déterminer sa position ?**

Non, cela dépend de la position des balises, et ce, même si la mesure est très précise.

S'il existe un cercle qui passe par toutes les balises, et si le robot est sur ce cercle, alors les mesures d'angles seront les mêmes quelle que soit sa position sur chacun des fragments de cercle entre les balises. En définitive impossible de savoir où on est, sinon qu'on est sur un arc de cercle.



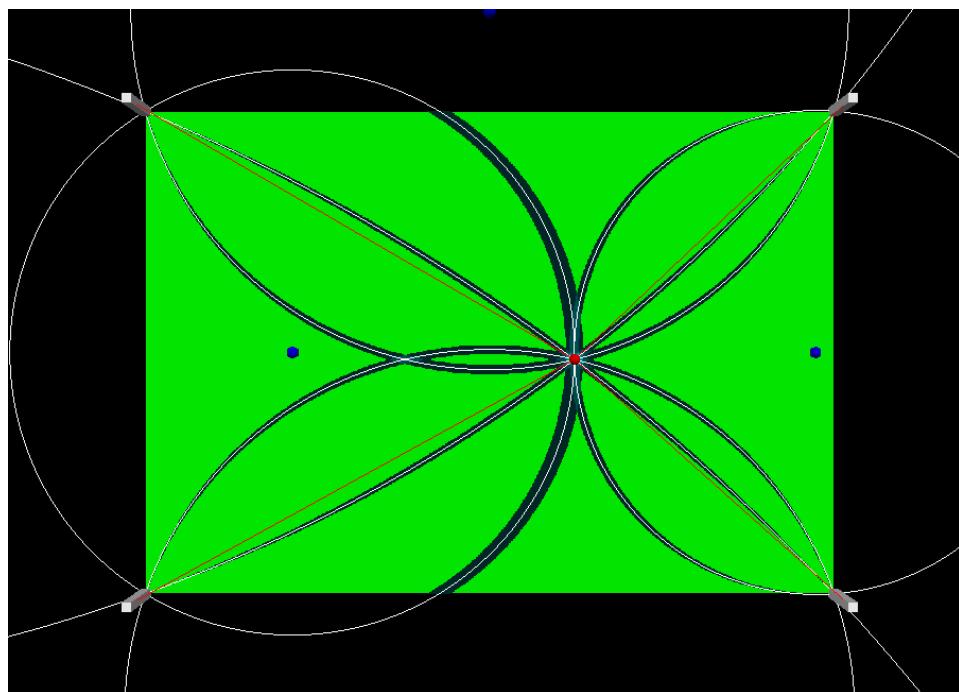
*Si le robot est sur ce cercle, impossible de déterminer sa position.*

Sur l'image ci-dessus, on peut voir en bleu ciel la zone où le robot pourrait être si l'erreur de mesure est de 1°. Le point rouge est sa position réelle.

Plus on s'approche de ce *cercle-de-la-mort*, moins la position x,y calculée est précise. Évidemment, plus la mesure d'angle est minutieuse, moins ce phénomène est visible aux alentours du cercle, cependant, il faudra absolument en tenir compte lors de l'écriture du programme, afin de déterminer des zones dans lesquelles la mesure de position ne pourra pas se faire.

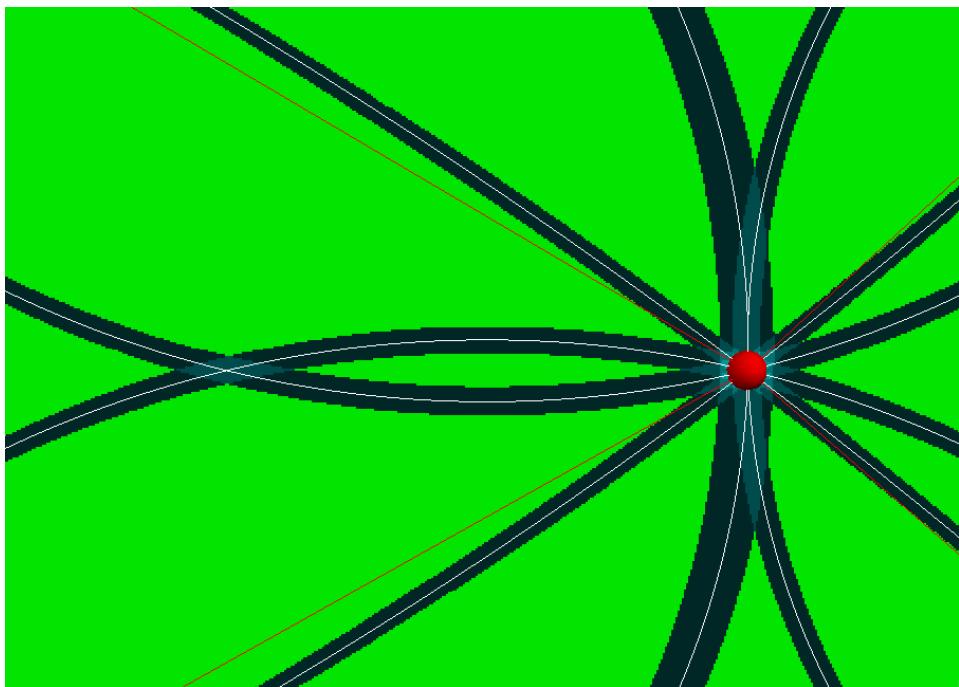
#### 4.2.5 Quelle est l'influence d'une erreur de mesure ?

Ci-dessous, un exemple avec une erreur de mesure +/- 1 degré (notez au passage le changement dans la disposition des balises, pour l'exemple). Au lieu de se situer à l'intersection de plusieurs cercles, on se situe à l'intersection de plusieurs zones à peu près circulaires, mais avec une épaisseur.



Avec une précision de +/- 1 degré, le robot est à l'intersection de zones circulairoïdaliformes (les gros ronds là).

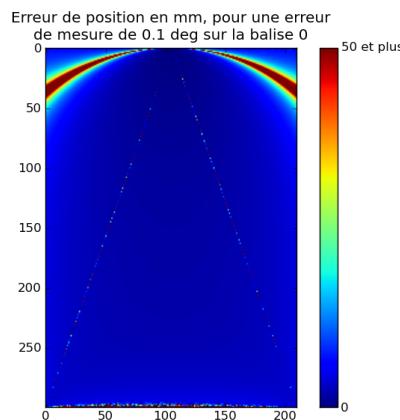
An grossissant l'image, on s'aperçoit que l'intersection de toutes ces zones (le bleu le plus clair sur l'image) constitue la zone dans laquelle se situera la position calculée du robot, dans le cas d'une erreur de mesure de +/- 1 degré.

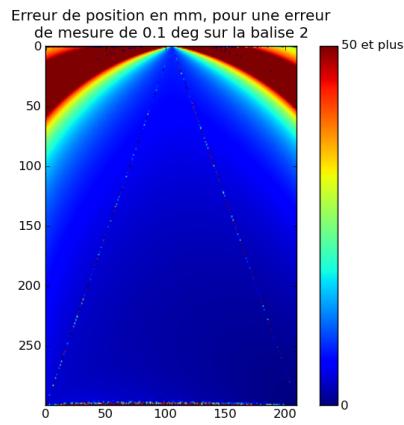
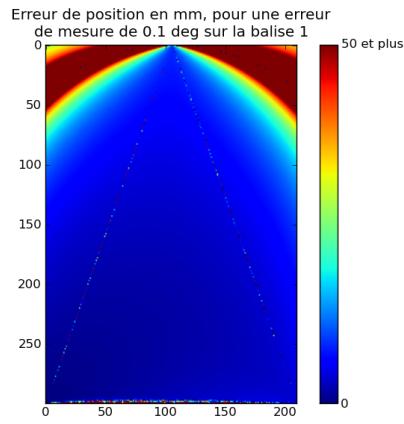


*On s'approche un peu.*

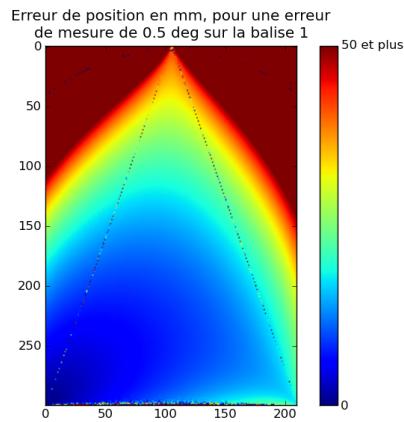
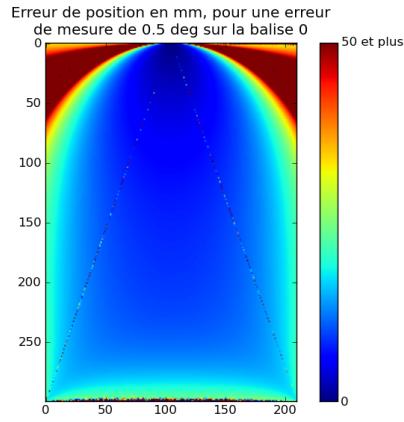
Voici quelques images générées montrant quelle est l'erreur de mesure en mm pour une erreur de mesure d'angle sur les différentes balises. On retrouve toujours le fameux cercle, et aussi un petit artefact du à l'algorithme utilisé: il s'agit du triangle qui relie les 3 balises entre elles. En effet, ces position sont dans le cas particulier où le cercle qui passe par les 2 balises est de rayon infini, et est en fait une droite.

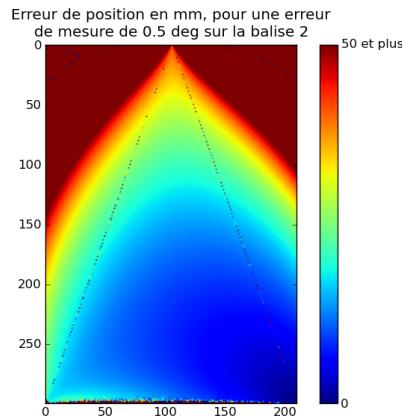
On pourrait résoudre ce problème en gérant un peu mieux le cas particulier, mais ce n'est pas (encore) l'objectif. Voyons quels sont les résultats si on considère une mesure à +/- 0.1 degré. Dans les graphiques ci-dessous, l'erreur est représentée par la couleur. Cette erreur est saturée à 50 mm, ce qui signifie que toutes les zones rouges ont une erreur de positionnement supérieure à 50 mm).



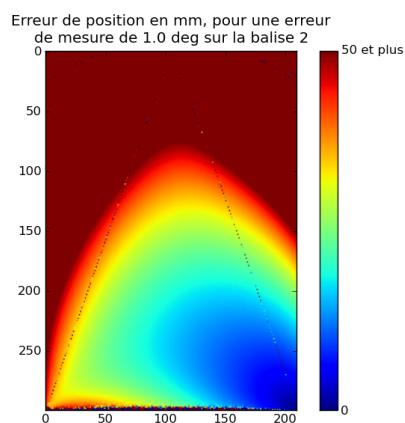
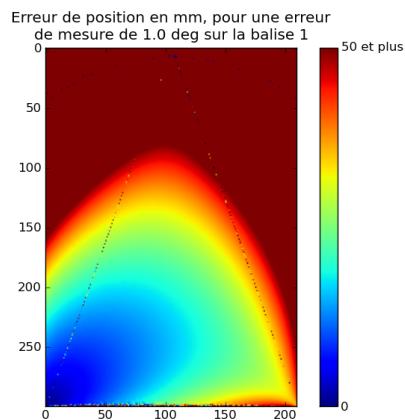
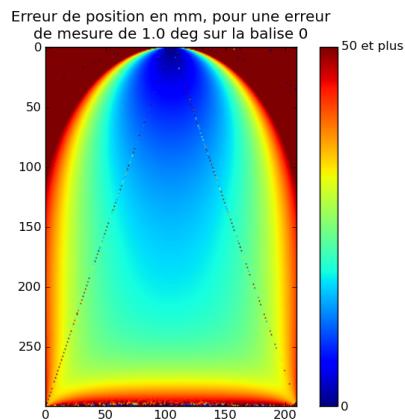


Si on diminue la précision à +/- 0.5 degré:





On diminue encore la précision à +/- 1.0 degré:



Il en résulte deux conclusions intéressantes:

1. Il est primordial d'avoir une très bonne précision de mesure (de l'ordre de 0.1 degré), mais ça, on s'en doutait... peut-être pas à ce point cela dit
2. Il existe des zones où l'erreur de mesure est beaucoup moins influente. Ce qui signifie que dans le cas où on serait limité par la précision du système, il serait toujours possible de faire des recalages balises lorsque le robot est dans cette zone.

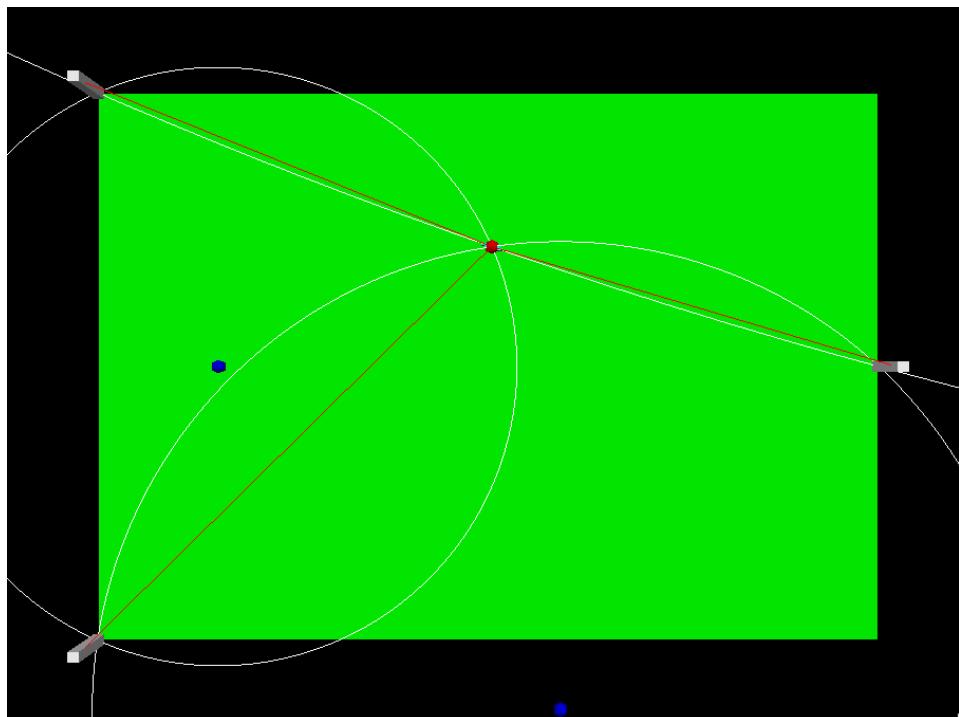
#### 4.2.6 Quelle est la meilleure disposition pour les balises ?

Nous l'avons vu un peu plus haut, avec certaines dispositions de balises, typiquement celle de cette année et des quelques années précédentes, il existe des position sur le terrain où la mesure de position ( $x,y$ ) est impossible (voir *cercle-de-la-mort* plus haut).

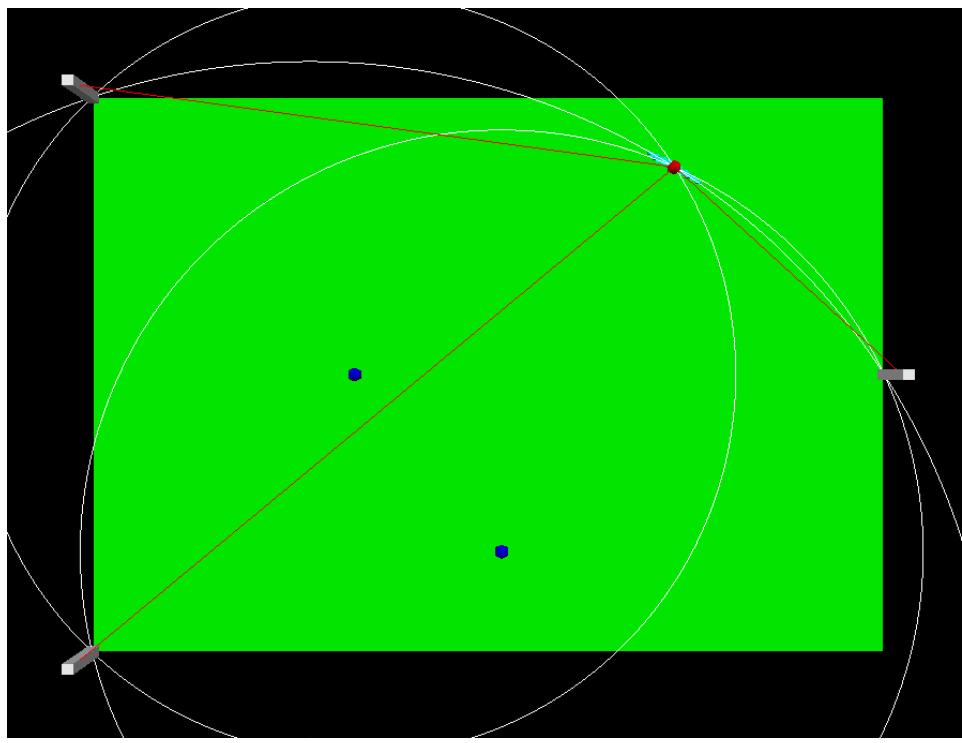
Dans les quelques images ci-dessous, la zone bleu ciel représente la zone dans laquelle se situera la position calculée du robot. Bien sûr, la probabilité d'être en bordure de cette zone dépend de la probabilité d'avoir une erreur maximale sur la mesure d'angle (on peut légitimement penser que l'erreur de mesure forme une gaussienne centrée sur 0). On pourra donc considérer cette zone comme les limites maximales d'erreur.

- Avec une disposition en D

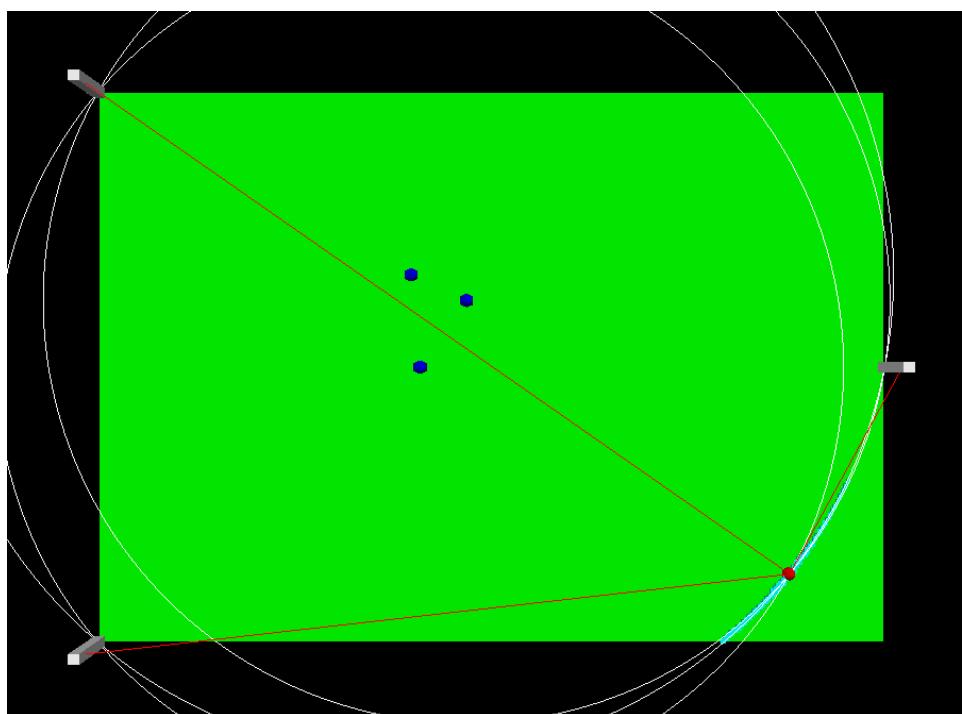
La disposition dite "en D" (c'est surtout moi qui le dit) est relativement précise, sauf au abords du *cercle-de-la-mort* (the *circle-de-la-death* en anglais).



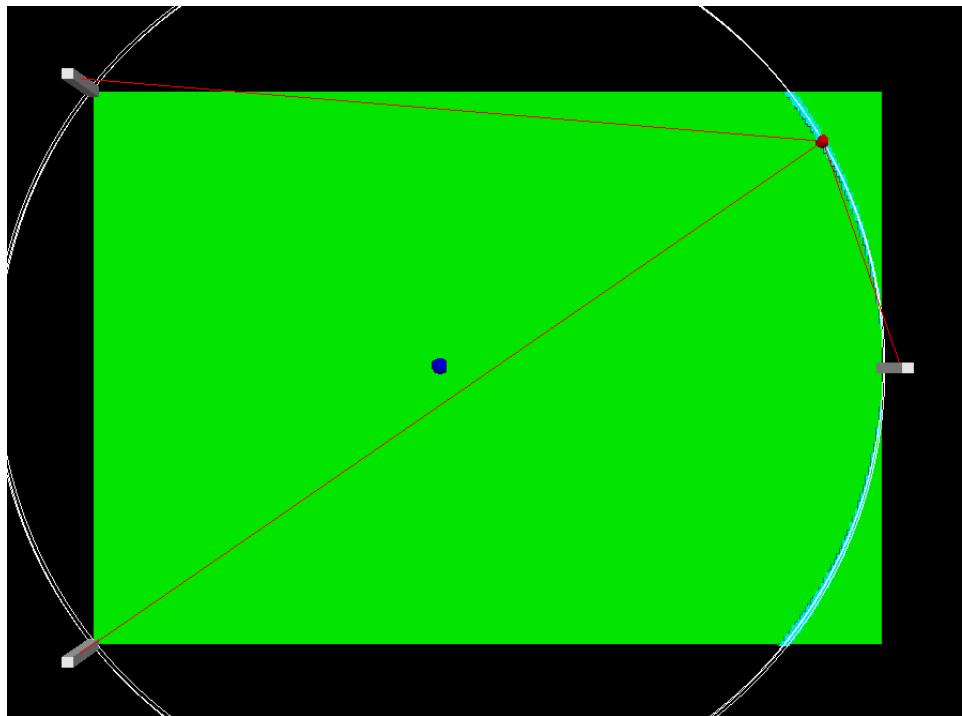
+/- 1 degré de précision, le résultat en ( $x,y$ ) est plutôt bon



$\pm 1$  degré de précision, le résultat en  $(x,y)$  est environ 10cm car on est proche du cas indéfini (le cercle-de-la-mort toujours).

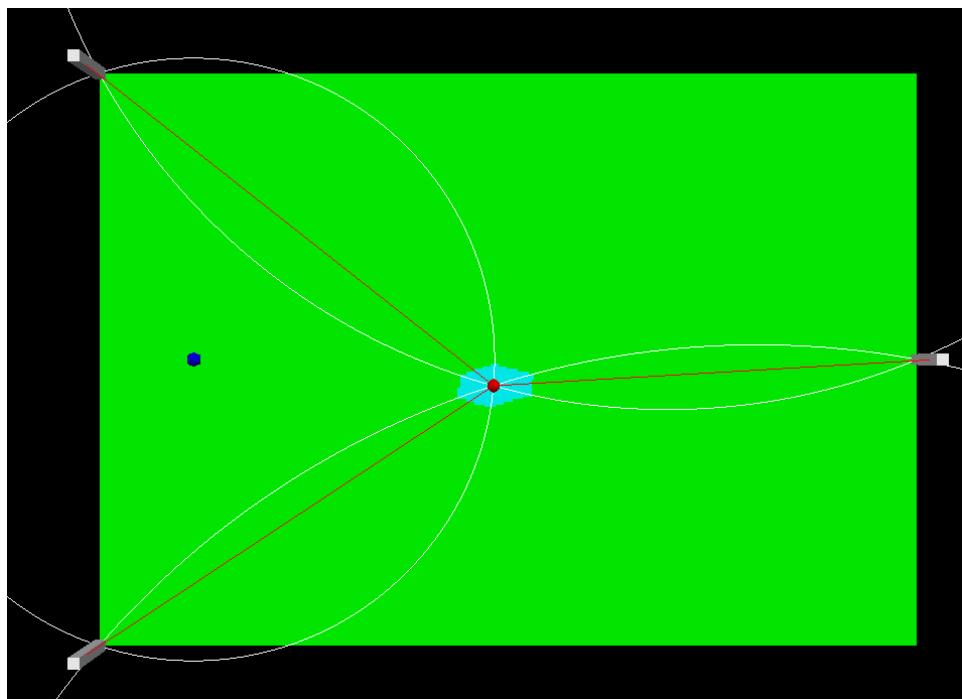


$\pm 1$  degré de précision, le résultat en  $(x,y)$  est environ 40cm

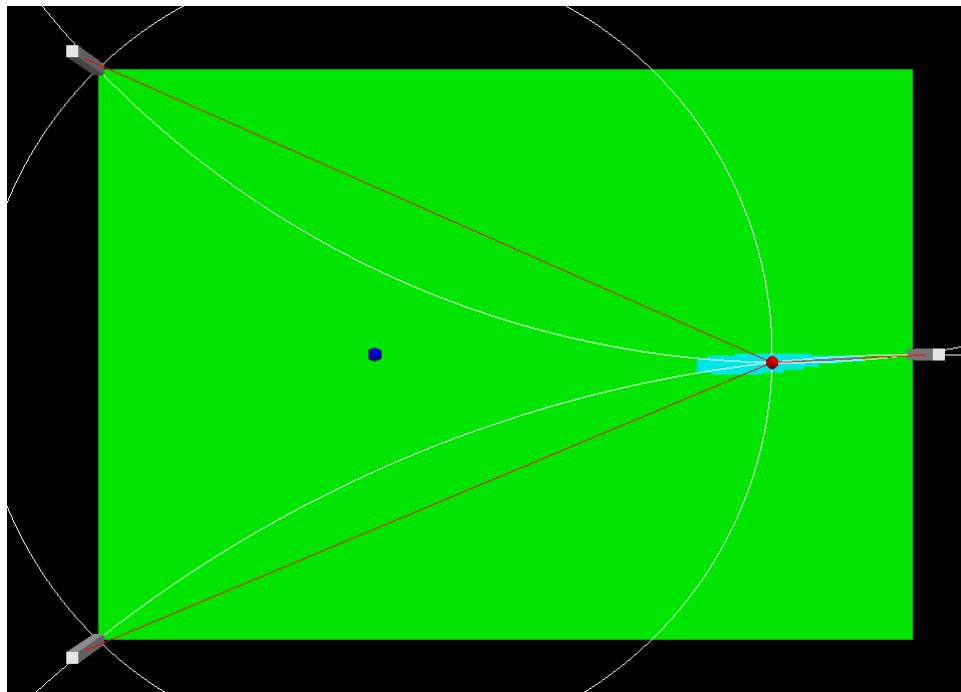


*+/- 1 degré de précision, un des pires cas*

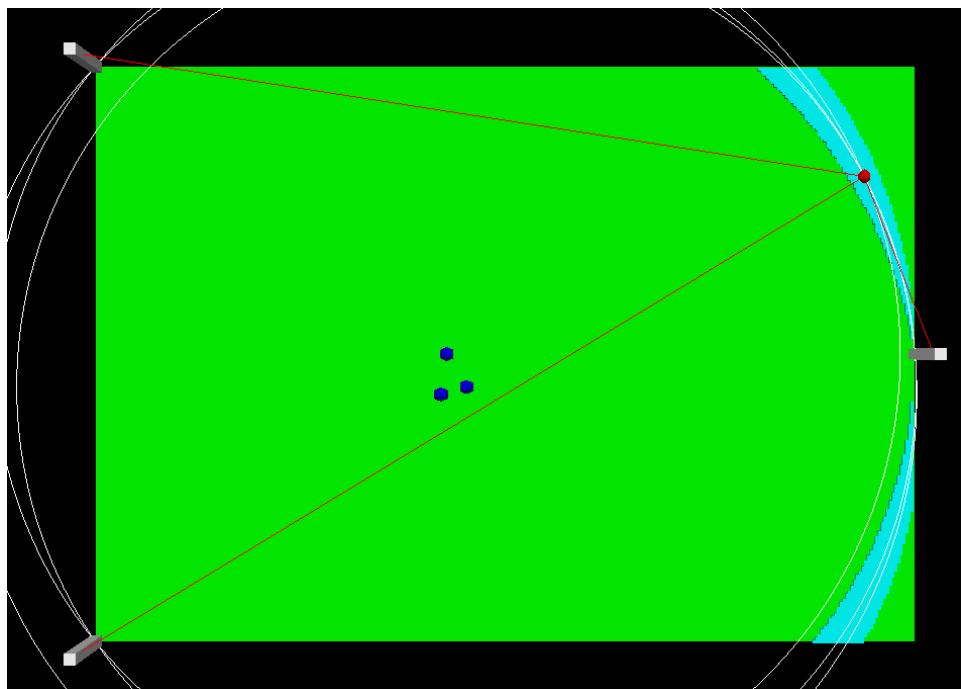
Si la précision de la mesure angulaire est de +/- 5 degrés, ça peut encore rester correct à certains endroits, mais on arrive à des cas très mauvais sur certaines positions.



*+/- 5 degrés, ça reste pas trop mal*



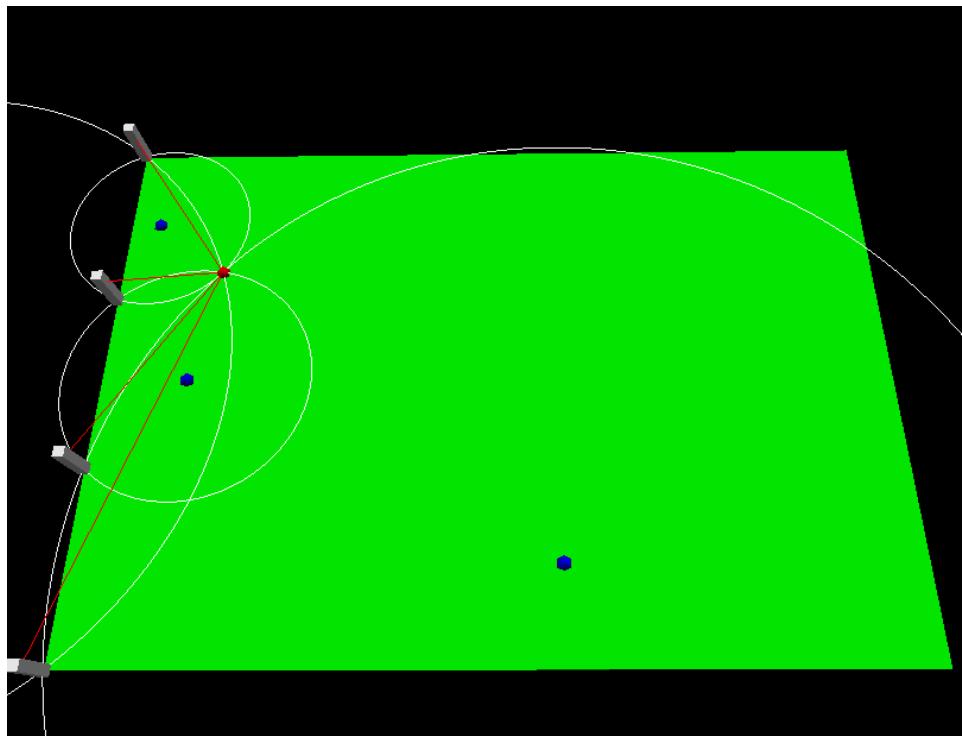
*un autre exemple avec +/- 5 degrés.*



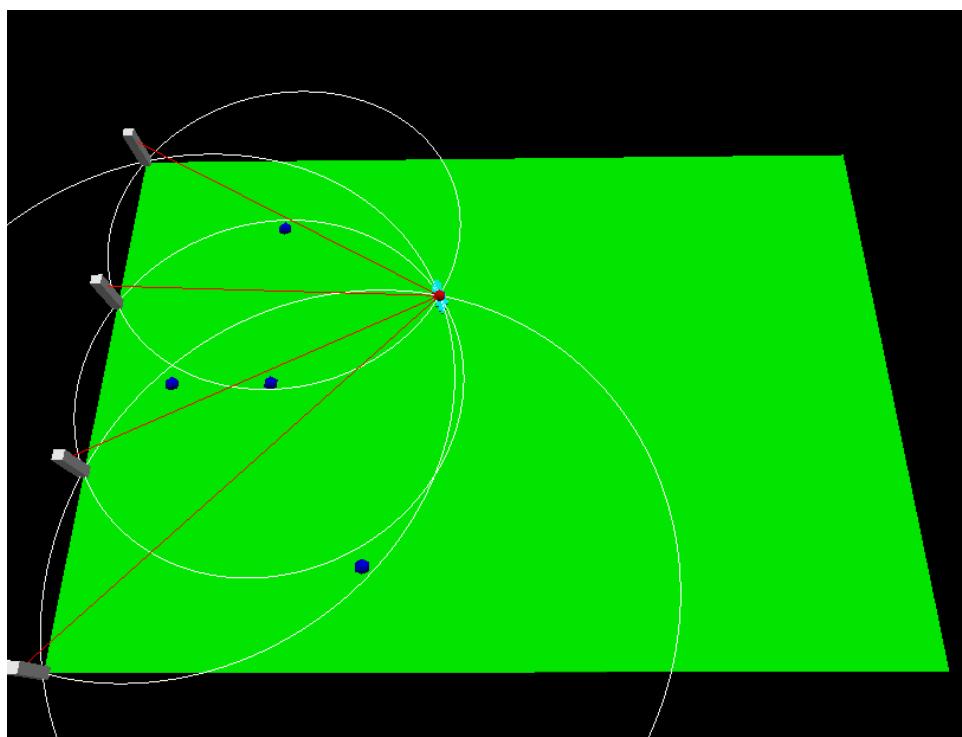
*+/- 5 degrés, on ne sait plus du tout où on est :)*

- Avec une disposition en I

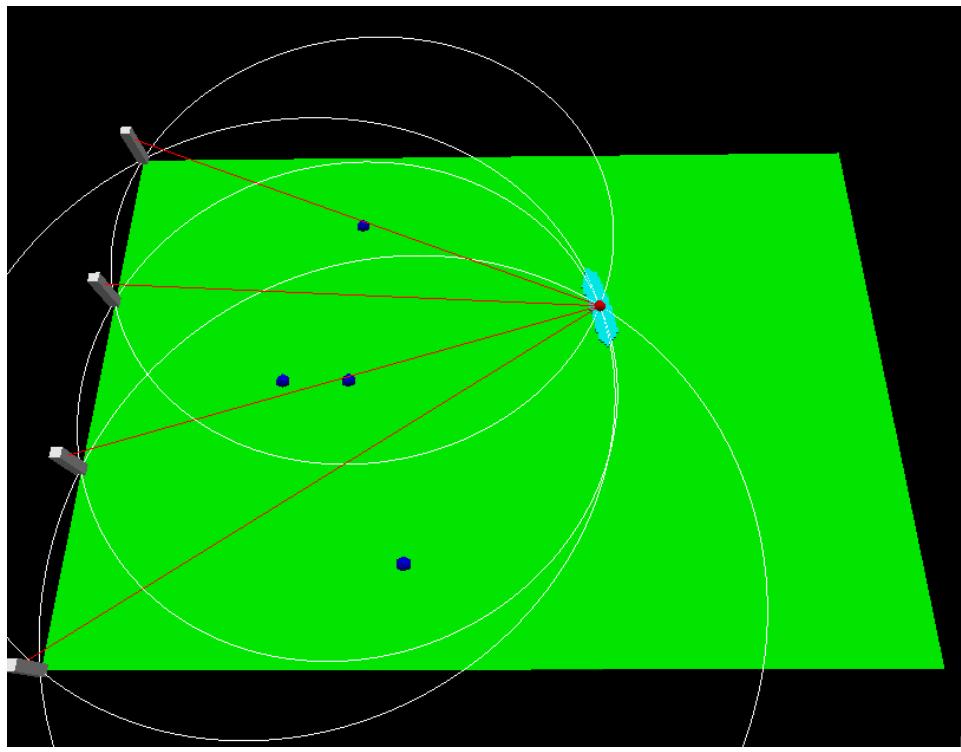
C'est la disposition des balises de 2003 (déjà 7 ans). Une des meilleures si on est proches du côté des balises, mais moins précise lorsqu'on s'en éloigne. Il n'y a pas de point indéfini, et il n'y a pas besoin (en théorie) de système pour reconnaître les balises: on sait que l'angle entre la dernière et la première balise est toujours  $> 180^\circ$ . Dans ce cas là, il faut toujours capter les quatre balises sinon on ne sait plus dire laquelle a été perdue. Cette disposition est tout de même moins précise en moyenne.



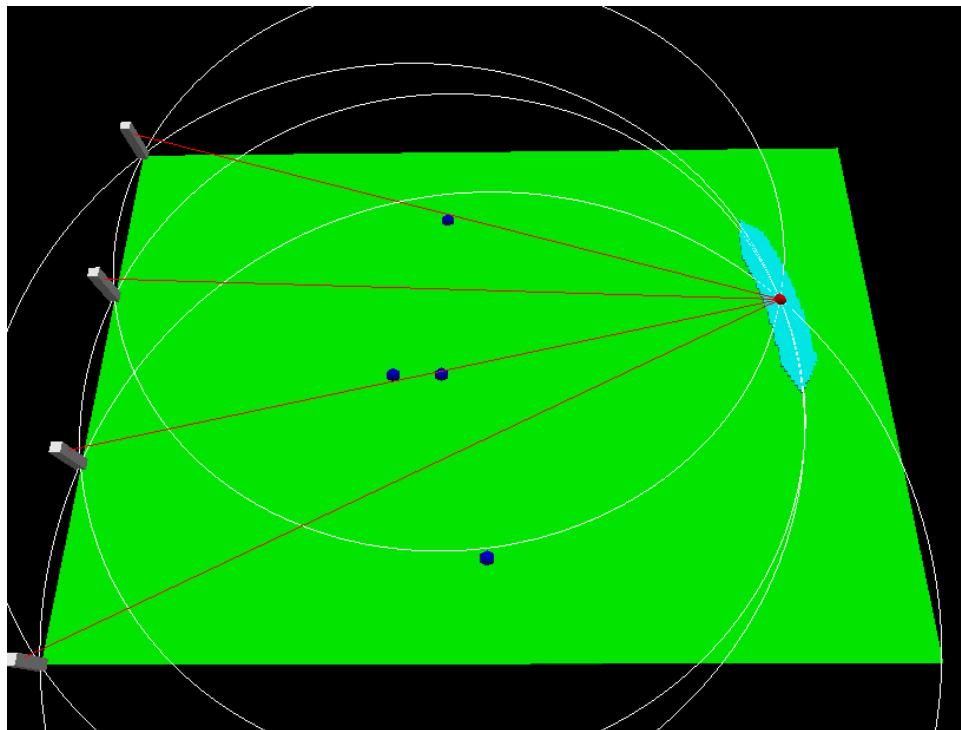
*+/- 1 degré de précision, proche des balises, la précision est bonne*



*+/- 1 degré de précision, un peu plus loin, moins précis*



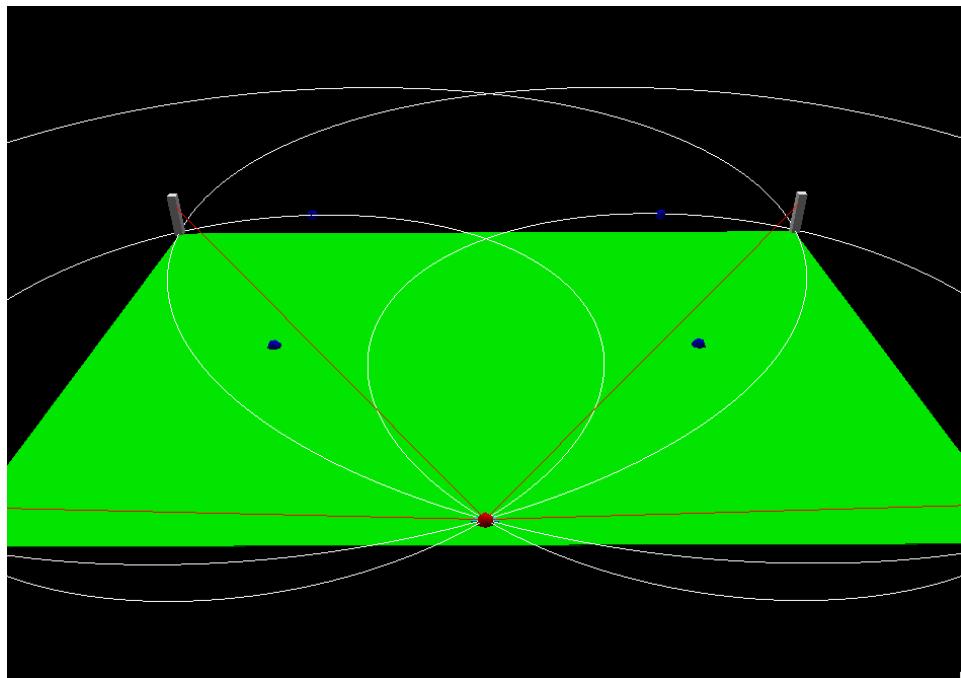
*+/- 1 degré de précision, encore plus loin*



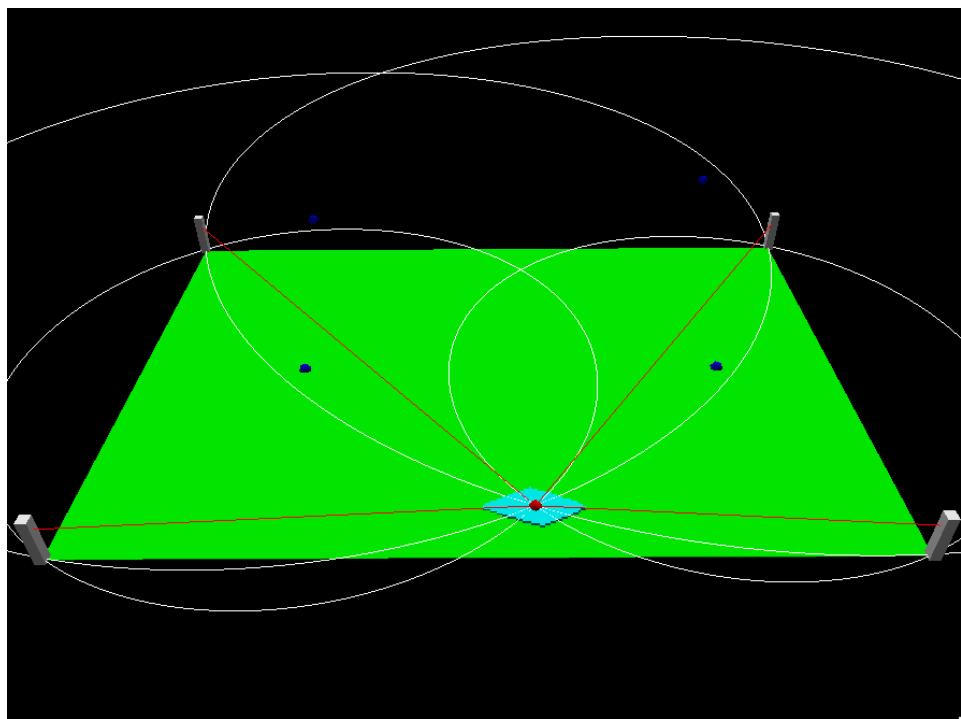
*+/- 1 degré de précision, trop loin...*

- Avec une disposition en X

La meilleure disposition quelle que soit les conditions... mais difficile à mettre en place, car il faut que chaque robot puisse placer ses balises...



$\pm 1$  degré



$\pm 5$  degrés

### 4.3 Système hybride mesurant l'angle et la distance

Si le système est capable de retourner à la fois une distance et un angle vers une balise, on y gagne sur plusieurs points:

1. Ce système peut être utilisé tel quel pour capter la position du robot adverse (l'angle ou la distance seul ne suffisant pas).
2. Deux balises suffisent (au lieu de trois) pour connaître la position de notre robot sur le terrain. Le fait d'avoir une troisième balise permettrait d'améliorer la précision, en sélectionnant le couple de balises utilisés pour se repérer. D'autre part, si une des 3 balises est masquée (par le robot adverse par exemple), il est toujours possible de faire le calcul de position.

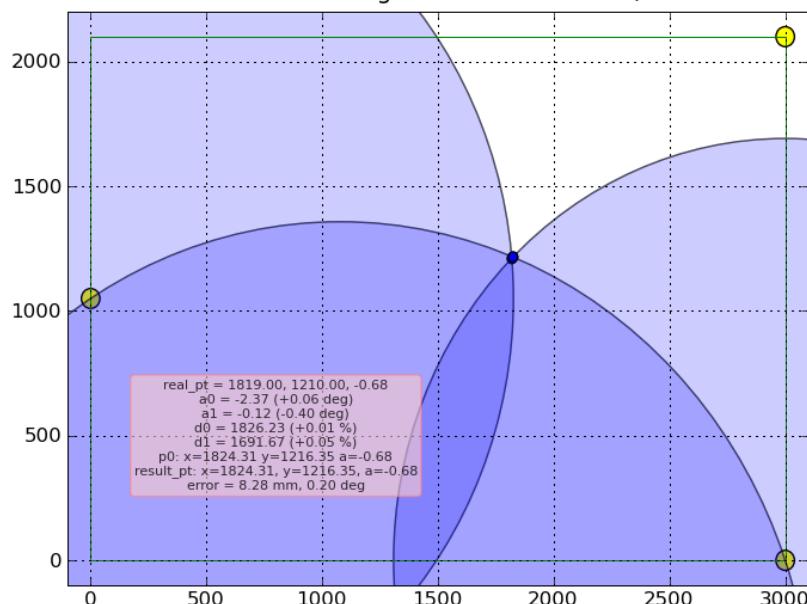
3. Il n'y a pas d'endroit sur le terrain où il n'est pas possible de calculer sa position. Cela rend le système est moins sensible à une erreur de mesure d'angle ou de distance: en effet, dans le cas où on ne mesure que l'angle, nous avons vu que s'approcher du cercle indéfini pénalise particulièrement la précision du positionnement. Dans le cas du système hybride, une erreur de mesure donnée se traduit par une erreur de positionnement du même ordre de grandeur, quelle que soit la position sur le terrain.

### 4.3.1 Calcul de la position

Comme on peut le deviner, le robot est situé à l'intersection de plusieurs cercles. Si l'on n'utilise que deux balises, le robot se place à l'intersection du cercle passant par les deux balises (que l'on déduit de l'angle entre les 2 balises), et des deux cercles ayant pour centre une balise et pour rayon la distance mesurée.

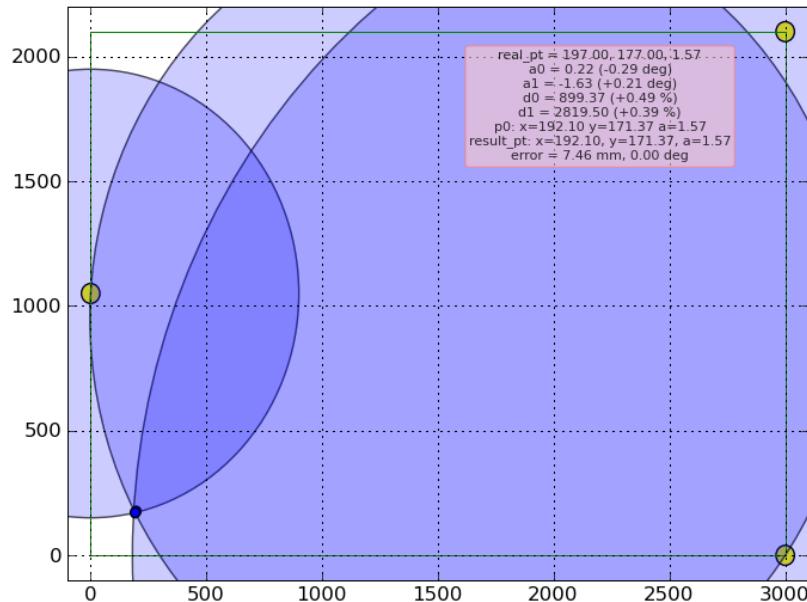
Comme des exemples sont plus parlants, voici deux figures pour illustrer ce qui vient d'être énoncé.

Erreur de position en mm, qd l'erreur d'angle aleatoire est comprise  
erreur -0.5 et 0.5 deg et de distance de +/- 0.50 %



*Le robot est à l'intersection de plusieurs cercles.*

Erreur de position en mm, qd l'erreur d'angle aleatoire est comprise  
erreur -0.5 et 0.5 deg et de distance de +/- 0.50 %

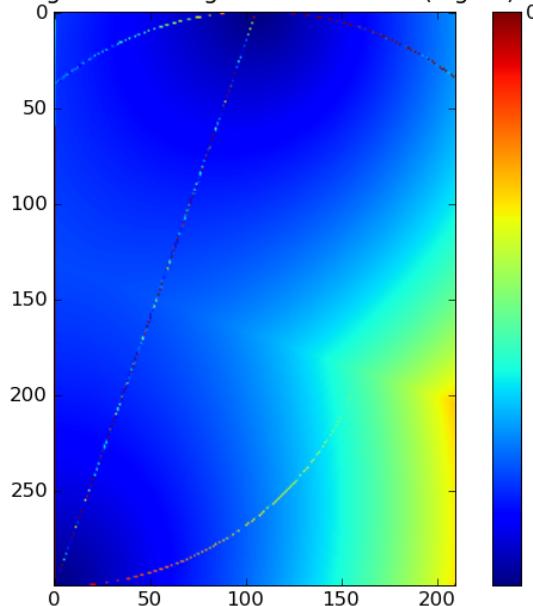


*Un autre exemple.*

#### 4.3.2 Erreur de positionnement

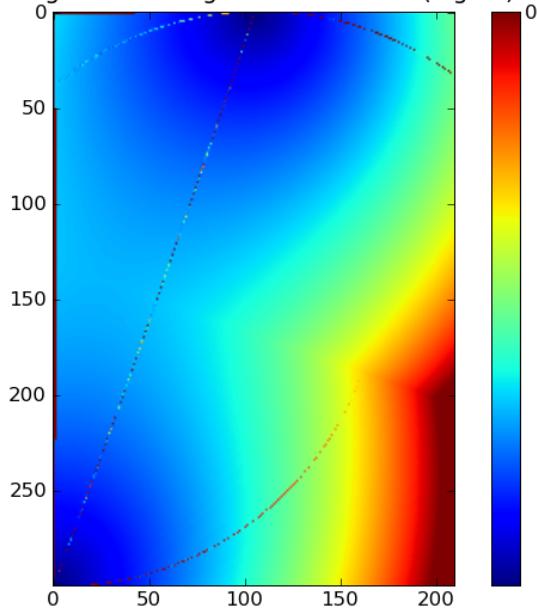
En plus des deux figures précédentes, voici un petit graphique montrant l'influence d'une erreur de mesure. On considère dans ce cas qu'on n'utilise que deux balises (situées près des zones bleu foncées).

Erreur de position en mm, pour une erreur  
d'angle de 0.5 deg et dist de 0.5 % (algo 0)



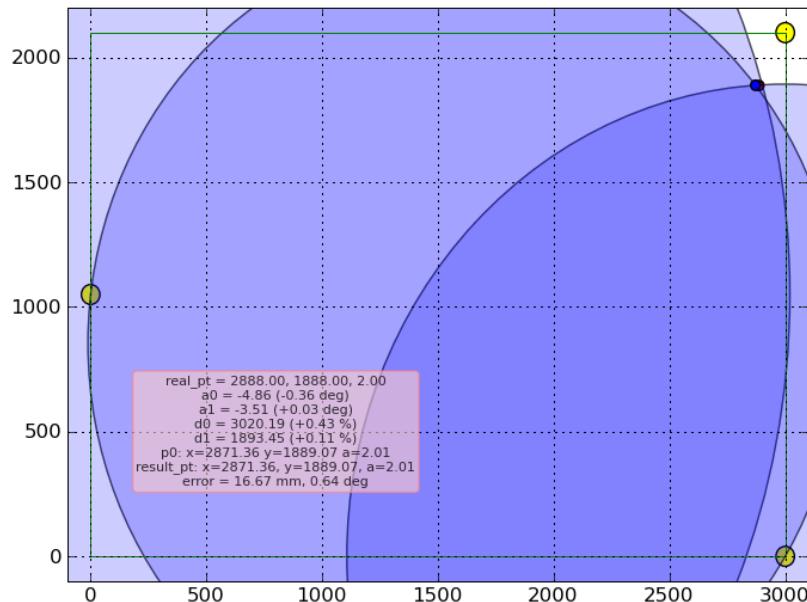
*L'effet de l'erreur de mesure dépend de la position sur le terrain.*

Erreurs de position en mm, pour une erreur d'angle de 1.0 deg et dist de 0.5 % (algo 0)



*L'angle est la donnée la plus sensible.*

Erreurs de position en mm, qd l'erreur d'angle aleatoire est comprise  
erreurs -0.5 et 0.5 deg et de distance de +/- 0.50 %



*En introduisant une erreur aléatoire, et même placé dans un endroit critique, l'erreur de position reste tout à fait tolérable.*

Avec une erreur de cet ordre, le robot reste quand même positionné au pire à 4cm près, et à moins de 2cm sur une bonne partie du terrain.

Pour obtenir ce résultat, l'algorithme détermine les 3 cercles:

1. le cercle passant par les 2 balises
2. le cercle de centre B1 (balise 1) et de rayon R1
3. le cercle de centre B2 (balise 2) et de rayon R2

Le robot est situé à l'intersection de ces cercles, cependant pour le calcul nous n'utilisons que deux cercles sur les 3. Les tests montrent que la précision est la meilleure lorsque l'on choisit de calculer l'intersection entre 1 et 2 si le robot est plus proche de B1, ou bien entre 1 et 3, si il est plus proche de B2.

### 4.3.3 Petite Bière

La précédente bière devrait être terminée, sinon c'est que vous lisez trop vite, sans prendre le temps de vous imprégner des détails. Ou alors vous buvez trop lentement, sans prendre le temps de vous imprégner. Dans ce cas merci de finir votre bière avant de continuer.

Une petite Hoegaarden Grand Cru par exemple permet de continuer sur une bière relativement légère (du moins en apparence, puisqu'elle affiche 8.5° au compteur). Une particularité de cette excellente bière fruitée, qui ne doit pas être confondue avec sa petite soeur blanche, plus banale, est d'être trouble: comme elle n'est pas filtrée, on peut observer des particules en suspension dans le verre.



La Hoegaarden Grand Cru et son verre.

Continuons.

## 4.4 Je vous mets une petite conclusion ?

Oui, s'il vous plaît.

Quel que soit le système, la mesure d'angle (ou de distance) doit être la plus précise possible (on s'y attendait un peu). En fait, on se rend compte que +/- 0.5 degré de précision n'est pas suffisant dans le cas d'un système qui ne se base que sur les mesures d'angles.

Le système hybride semble le plus efficace et réunit un certain nombre d'avantages que nous avons évoqués plus haut. Nous nous orienterons si possible vers une solution qui permet de retourner à la fois l'angle et la distance.

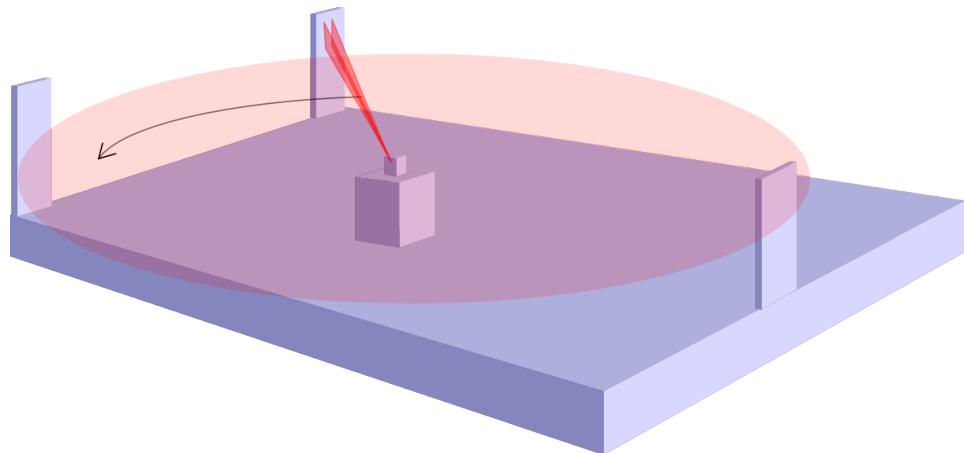
Dans tous les cas, il faut garder à l'esprit que la balise, même dans un cas favorable semble peu précise face à l'odométrie, qui permet de détecter sans problème des déplacements de l'ordre du millimètre. La balise ne remplace donc pas le positionnement déduit des roues codeuses, mais le complète car elle devrait permettre de recalibrer l'odométrie et compenser sa dérive.

# 5 Le système choisi: une balise laser

## 5.1 Overviou

Fin du suspense, voici maintenant quel est le système choisi pour répondre au cahier des charges.

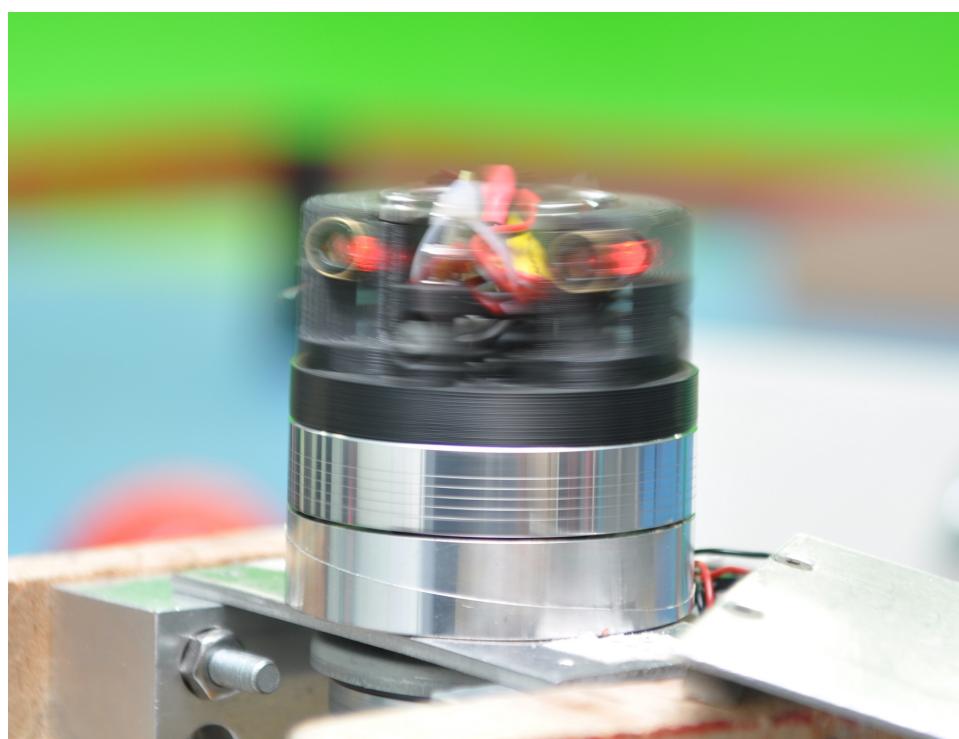
Ci-dessous, le schéma représentant le système de balise dans sa globalité. Le robot est équipé d'une tourelle rotative sur laquelle sont fixés deux lasers. Chacun de ces lasers émet une ligne verticale. Vu de haut, les deux rayons lasers sont parallèles. Les deux lignes verticales formées sur un mur sont parallèles elles aussi.



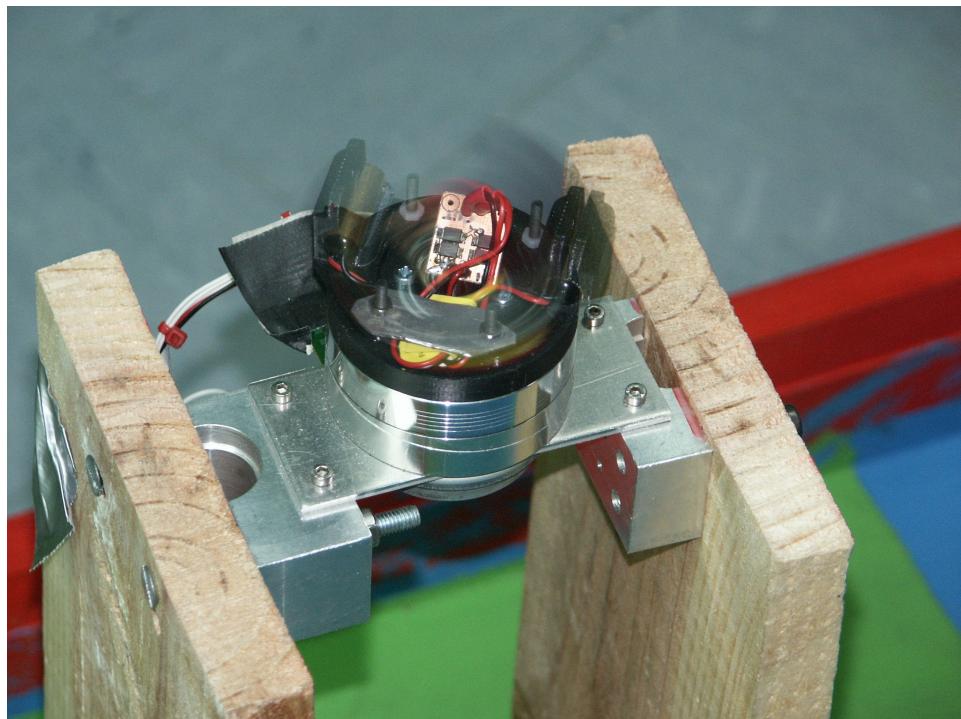
*Admirez le superbe défaut de perspective (ce n'est pas de la vraie 3D).*

Les lasers viennent donc illuminer des photodiodes placées sur les balises fixes et la balise adverse. La balise mesure le temps entre le passage des deux lasers. Connaissant la vitesse de rotation de la tourelle (elle est asservie à une consigne constante), la balise peut déduire la distance entre elle et la tourelle.

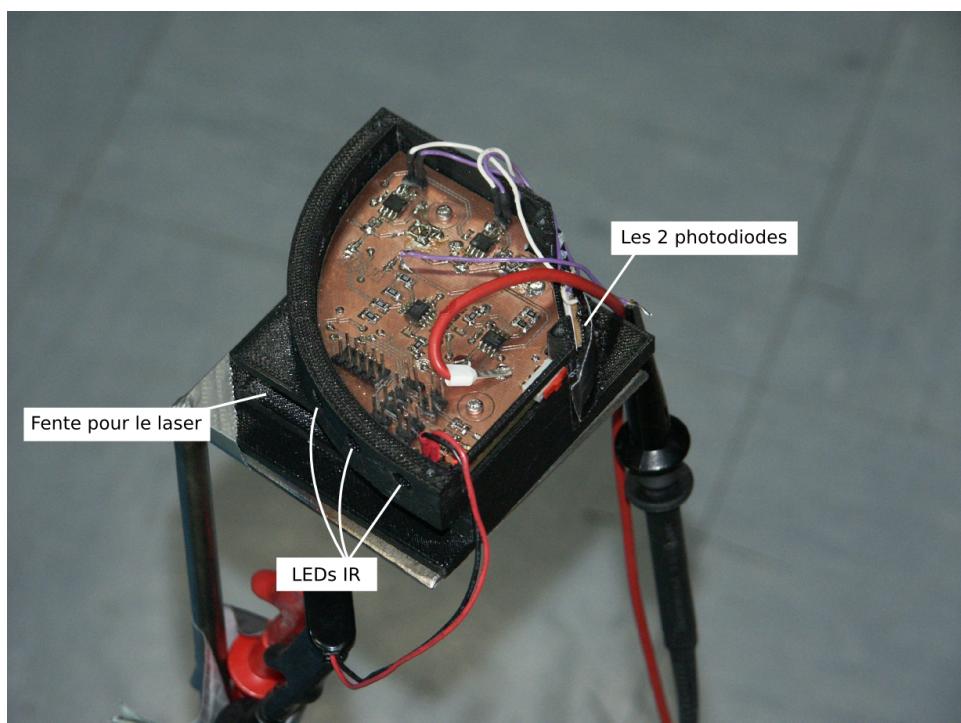
La balise répond de manière synchrone via une trame IR modulée, contenant l'identifiant de la balise, la distance mesurée, et une somme de contrôle. Cette trame est reçue sur les récepteurs IR du robot, il suffit alors de regarder l'angle courant de la tourelle (nous verrons plus loin que c'est un tout petit peu plus subtil en fait). Le robot connaît donc bien la distance et l'angle de la balise.



*La tourelle finale en action sur le robot en bois.*



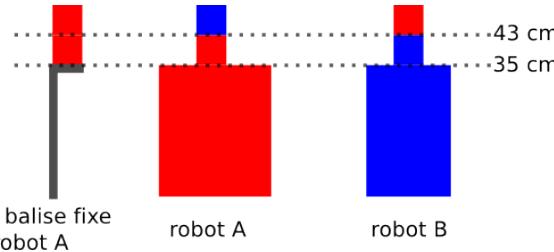
*La même, sous un autre angle.*



*Une des balises fixe.*

Rappelons les hauteurs des balises selon le règlement 2010:

- balise camarade, sur notre robot partisan: entre 35 cm et 43 cm de hauteur, et inclus dans un carré de 8 cm par 8 cm. Éventuellement n'importe où dans le périmètre du robot en dessous de 35 cm.
- balises fixes: entre 35 cm et 51 cm, dans un carré de 8 cm par 8 cm de large.
- balise adverse: entre 43 cm et 51 cm, ans un carré de 8 cm par 8 cm de large.



*Hauteurs des différentes balises (on la remet pour ceux qui l'avaient loupé au début).*

## 5.2 Sur notre robot copain

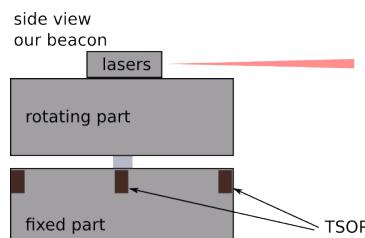
Tout d'abord, une description des éléments que nous placerons sur notre robot.

### 5.2.1 Lasers tournants

Comme indiqué plus haut, les lasers tournent à une vitesse connue et constante, 20 tr/s. La particularité de ces lasers est qu'ils n'émettent pas un point mais une ligne verticale, d'un peu moins de un mètre à 3 mètres de distance (l'angle d'ouverture du laser est de 15°). La référence du laser [FLL5-0.4P-635-15](#): il s'agit bien entendu d'un laser classe 1 comme le stipule le règlement. Il coûte aux alentours de 50 euros hors frais de port.

Émettre une ligne verticale permet de compenser une possible erreur d'assiette sur la tourelle, ainsi que la différence de hauteur dans le cas de la balise adverse (voir les hauteurs des balises dans le paragraphe précédent). En 2003, à Eirbot, nous utilisions une rangée de photodiode et plusieurs pointeurs lasers. La solution de cette année est bien meilleure car elle simplifie l'électronique de la balise statique.

Le laser doit être situé au plus proche en dessous des 43 cm, de la même manière, nous verrons que sur la balise adverse, les photodiodes des balises réceptrices devront être au plus proche au dessus des 43 cm. Ceci bien sûr afin de limiter l'angle du laser, qui ne sera pas exactement horizontal, mais très légèrement incliné vers le haut.



*La tourelle laser et les récepteurs IR sur notre robot*

Nous avions différents choix pour alimenter le laser:

- un [slip ring](#) (collecteur tournant)
- embarquer son alimentation sur la partie tournante
- utiliser un transformateur (dans le cas d'une tête de lecture)

La première solution est d'une part coûteuse, et d'autre part supporte difficilement des vitesses de rotation élevées. De même, embarquer une petite batterie pourrait poser des problèmes d'équilibrage à haute vitesse de rotation ; qui plus est, si le système avait eu sa propre alimentation, il n'aurait pas été coupé par l'arrêt d'urgence du robot, ce qui est assez border-line au niveau du règlement (on n'a pas demandé cela dit).

Avec une tête de lecture de magnétoscope, il est possible d'atteindre 40 tr/s, voir le [Rapport Eirbot 2003](#). D'autre part, la mécanique de ces pièces est particulièrement bien réalisée.



*Un tambour de tête de lecture de magnétoscope, les bobines du moteur brushless (démontées), et mes genoux.*

Nous optons donc pour ce choix, sachant que toutes les têtes de magnétoscope ne sont pas aussi faciles à utiliser les unes que les autres. Heureusement, beaucoup de gens cherchent à se débarrasser de ces engins actuellement. Il faut trouver un tambour qui ait la partie rotative vers le haut, et disposant déjà d'une électronique de contrôle pour le moteur brushless (à moins d'être motivé pour la refaire, ce qui n'était pas notre cas). Il faut aussi que l'électronique fournit un moyen de contrôler le moteur, en l'occurrence un top-tour, ce qui nous permet:

- de conserver une vitesse de rotation constante grâce à un asservissement de vitesse.
- de connaître l'angle du laser lorsque le signal émis par une balise fixe ou adverse sera reçu par les TSOP (récepteurs IR, voir plus bas).

### **5.2.2 Récepteurs IR**

En dessous du laser, sur une partie fixe, on place environ 8 récepteurs IR du style TSOP 17xx ou 18xx, de manière à recevoir les signaux de toutes les directions. Ces capteurs effectuent la démodulation des signaux émis par les balises fixes et adverse. Pour plus de détails, voir la documentation [TSOP 17xx](#).

En 2003, nous avions choisi de n'avoir qu'un TSOP, mais qui tournait avec le laser. Par certains côtés, ce choix est plus astucieux, car il évite de dupliquer ces composants, et limite les parasites (on ne capte que les rayons IR arrivant depuis la direction de la balise que l'on vient d'illuminer). Cependant, ce choix impose de pouvoir transmettre une information, en plus de l'alimentation, entre la partie rotative et la partie fixe, ce qui peut être rebutant pour des brûlures en électronique comme nous.

Sinon, on ne veut pas que les signaux émis par les balises fixes et la balise adverse ne se perturbent. Il faudra donc:

1. soit travailler sur 2 fréquences différentes (et en conséquence dupliquer les récepteurs).
2. soit mettre en place un système de synchronisation pour éviter que 2 balises émettent en même temps.

Nous n'avons pas trouvé de bonne méthode de synchronisation. Nous allons donc travailler à 2 fréquences, 455 Khz pour les balises fixes (utilisation de [TSOP7000](#), nous en reparlerons plus loin) et 56 Khz pour la balise adverse. Avoir le choix entre plusieurs fréquences de modulation aurait été prudent pour éviter les perturbations de l'adversaire. Pour des raisons de coûts et de place, nous avons choisi de simplement nous assurer que le codage des signaux serait efficace (codage manchester et intégration d'une somme de contrôle).

### **5.2.3 Support pour la balise adverse**

Comment fixer le support pour poser la balise adverse sur notre robot ? En effet, la partie haute de la tourelle bienfaisante est mobile, et l'adversaire n'appréciera pas que ça balise tourne aussi... Donc soit on tolérera un petit angle mort sur la balise, soit il faudra utiliser une autre méthode.

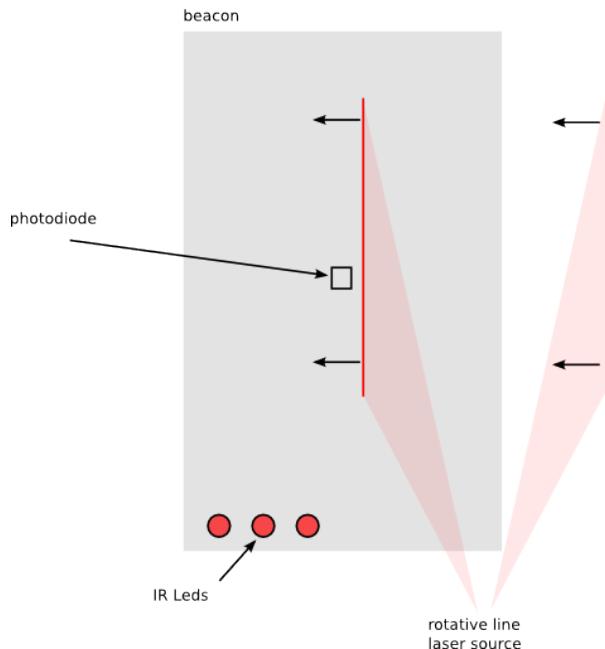
Nous avons essayé de placer un cylindre transparent fixe autour de la partie mobile, mais les lasers étaient déformés et la précision du système aurait été fortement compromise. Ce cylindre était en plastique, peut-être qu'en verre de bonne qualité ça n'aurait pas posé de problème.

Nous avons finalement opté pour un petit angle mort.

## 5.3 Balise réceptrices

Les balises fixes, au nombre de 2, sont relativement simples. Elles sont composées d'une photodiode (en fait deux, afin de faire une mesure différentielle), de l'électronique pour polariser et filtrer le signal, d'un microcontrôleur sérieux (c'est à dire un AVR, pas un PIC), et de LEDs IR.

Lorsque les lasers illuminent la photodiode, le microcontrôleur mesure le temps entre le passage du premier laser et le second. Il émet ensuite un signal codé en infrarouge qui sera capté par le système sur notre robot chéri. Le code contient un bit de start, un identifiant de la balise (2 bits), la distance (9 bits), et une somme de contrôle (4 bits). On peut noter que 9 bits pour la distance permet une précision maximal d'environ 0.65 cm.



*La balise fixe, avec sa photodiode et ses LEDs IR*

Lorsque notre robot dévoué capte le signal, il peut mesurer la position du laser, et connaître avec précision l'angle des balises fixes. La distance est obtenue en décodant le message reçu. Comme nous l'avons vu dans la section [Triangulation: un peu de théorie](#), deux balises fixes suffisent pour en déduire la position et le cap du robot.

## 5.4 Quelques considérations de faisabilité

### 5.4.1 Bande passante du montage photodiode

Imaginons que le laser tourne à 10 tours par seconde (c'est un minimum). A 3.50 mètres (environ la distance maximale entre le robot et une balise), on peut calculer la vitesse du rayon laser sur le cercle. D'abord le périmètre du cercle:

$$P = d \times 2 \times \pi = 3.5 \times 2 \times \pi \approx 22$$

Puis la vitesse  $V$  sur ce périmètre pendant une période  $T$ :

$$V = P/T \approx 22/10^(-1)$$

Soit, à 10 tr/s -> 220 m/s.

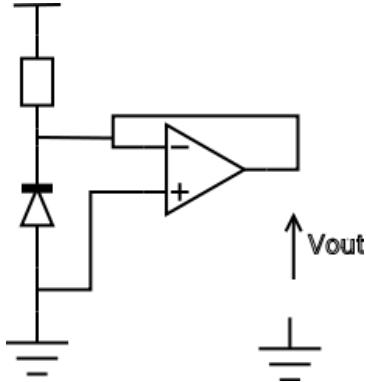
La photodiode mesure environ un demi centimètre (appelons cette longueur  $\lambda$ ). En admettant que la largeur de la ligne laser est nulle, la photodiode sera illuminée pendant:

$$t = \lambda/V \approx (5 \times 10^{-3})/220 \approx 21.74 \times 10^{-6}$$

Soit environ 21 microsecondes.

A noter qu'on sera plus proche des 5 microsecondes si on arrive à atteindre les 40 tours par secondes.

C'est compatible avec le temps de réponse d'une photodiode. Cependant, il est indispensable d'utiliser un montage amplificateur transimpédance. En effet, si on utilise un montage classique, la capacité parasite de la diode va faire que le montage va se comporter comme un passe-bas. On pourra consulter le [dossier sur les photodiodes](#) pour s'en convaincre.



*Schéma basique: on ne peut pas monter en fréquence*

L'objectif d'un montage transimpédance est de s'affranchir de ce phénomène, et donc de supporter des fréquences beaucoup plus élevées. En même temps, avec un système comme le nôtre, on reste loin des fréquences utilisées par exemple lors de transmissions over fibres optiques. On suppose donc que c'est largement possible.

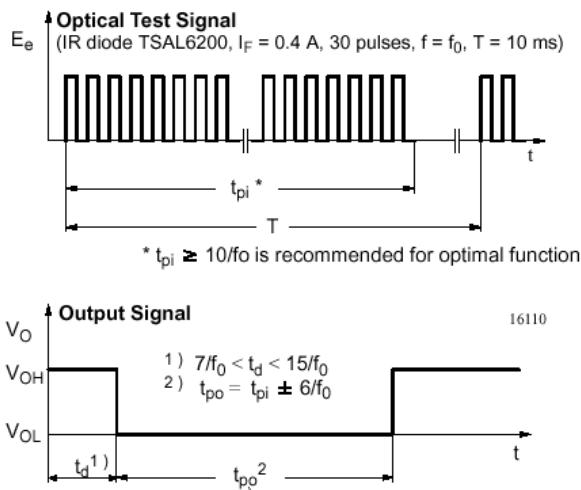
On trouvera des informations intéressantes sur la page wikipedia [Current to voltage converter](#).

En 2003, nous avions utilisé un OPA380, un amplificateur transimpédance idéal pour ce type de montage. Il est toujours fabriqué, et il n'y a pas de raison de changer.

Un autre problème potentiel posé par le temps d'illumination de la photodiode (entre 5 us et 21 us) est que le microcontrôleur qui va faire la lecture de ce port devra être très réactif pour ne pas "rater" le signal. Cela paraît réalisable sur un AVR, si le programme respecte certaines contraintes. Nous aborderons ce sujet plus loin dans le document.

#### 5.4.2 Temps de réponse du message en infrarouge

Le signal codé en infrarouge est modulé à quelques dizaines de kilohertz (entre 30 Khz et 56 Khz dans le cas des TSOP17xx et 455 Khz dans le cas des TSOP7000). Voici la forme du signal que nous souhaitons transmettre:



*Un exemple de signal IR envoyé par la balise fixe, et le signal décodé par le TSOP.*

D'après la documentation [TSOP 17xx](#), il faut environ 10 périodes pour que le signal soit correctement capté (seulement 6 sur les TSOP 18xx). A 30 Khz (le cas le pire), cela correspond à

330 us. Ce temps n'est clairement pas négligeable. A 40 tours par secondes (25 ms / tour), cela correspond à 4.75 degrés.

Nous nous trouvons face à notre premier vrai problème. Si on était sûr que le temps entre le début de l'émission de la trame IR modulée et le basculement de la sortie du TSOP était reproductible à 10 %, le problème ne serait pas trop grave: un décalage constant se compense sans problème. Mais s'il y a une gigue, alors c'est beaucoup plus ennuyeux. Or, d'après la doc, ce temps appelé *td* est compris entre 7 et 15 périodes...

**C'est un vrai problème, et voilà pourquoi le TSOP7000 est indispensable si on veut une mesure d'angle précise.** Ce composant a à peu près les mêmes caractéristiques qu'un TSOP17xx, sauf qu'il est modulé à 455 KHz au lieu de 30-56 KHz. Et du coup, une gigue de 6 ou 10 périodes sur le début signal de sortie devient largement moins gênante. D'après la documentation, le temps *Tdon* entre le début de l'émission de la trame IR modulée et le basculement de la sortie est compris entre 15 us et 36 us. Soit une gigue de +/- 10 us, correspondant à 0.15° à 40 tr/s. Problème résolu !!



Un TSOP7000

Le problème avec ce composant, **c'est qu'il n'est plus fabriqué**. Résultat, c'est très difficile de le trouver. J'ai pas mal cherché pour voir s'il existait d'autres composants équivalents. Voici quelques liens ou références issus de mes recherches. Ces composants sont très courants car présents dans beaucoup d'appareils TV et Hi-Fi. Il sont produits par différents fabricants, mais ils ont à peu près tous les mêmes caractéristiques (fréquence notamment: aucun ne monte au dessus de 56 KHz).

- [Vishay IR receiver modules](#)
- SFH5110 (Siemens)
- T2525 (Atmel)
- GP1U52X
- [Atmel U2538B](#) : c'est comme un TSOP, mais sans la photodiode. D'autre part, la fréquence du filtre est déterminée par une résistance et n'est pas fixe. Intérêt: ça peut se changer avec un switch au début sans avoir à doubler les composants. Même, en étant fou on aurait pu imaginer de changer en live la fréquence pour capter le robot adverse ou les balises fixes.

Par chance, nous avons pu nous en procurer (merci à [Eirbot](#) et [CVRA](#)).

#### 5.4.3 Choix de la LED IR et du transistor

Dans la documentation du TSOP7000, on nous conseille déjà une LED IR. Il s'agit de la [TSHF5410](#).

D'après ce qu'on peut trouver sur internet, les transistors classiques 2N2222A suffisent pour commander des LEDs, du moment qu'on ne lui demande pas de sortir un courant trop élevé. En regardant les schémas de la [balises IR de Totofweb](#), on voit qu'il utilise pour l'émetteur un transistor de puissance de type Darlington.

On trouve aussi d'autres exemples, comme dans cet article [DIY remote control based on PIC](#) où l'auteur utilise des MOSFET, comme le [BS170](#).

Au final, nous avons utilisé des 2N2222A sans trop de problème, mais sans vraiment comparer avec autre chose non plus.

#### **5.4.4 Choix de la photodiode**

Nous n'avons pas fait trop d'efforts pour la recherche de la photodiode. La documentation de la BPW34 indique notamment que sa longueur d'onde optimale est plus proche des 900 nm que des 635 nm du lasers. Il est d'ailleurs possible que la version réellement monté sur la carte que nous avons ne soit pas exactement celle-ci (il y a plusieurs versions de BPW34 assez proches).

#### **5.4.5 Peut-on faire une mesure tout en se déplaçant ?**

Une question pertinente est de savoir s'il est possible ou non de connaître sa position lorsqu'on se déplace, ou est-ce qu'il faut nécessairement s'arrêter pour faire la mesure.

L'erreur de mesure est liée au fait que la tourelle ne prend pas la mesure des caps des balises à un seul et même instant. Plusieurs paramètres influent sur l'erreur de positionnement lorsqu'on se déplace en translation:

- la position du robot : certaines positions sur le terrain accentuent l'erreur de mesure lorsqu'on se déplace
- la vitesse de déplacement du robot : plus on se déplace vite, plus l'erreur augmente.
- la vitesse de rotation de la tourelle : plus la tourelle tourne lentement, plus l'erreur augmente.
- la direction dans laquelle se déplace le robot agit sur l'erreur de déplacement.

J'avais fait des tests sur l'impact d'une erreur de mesure en déplacement pour un système de balises mesurant 3 angles, et non un système avec 2 balises fournissant angle + distance. Les résultats étaient assez mauvais (plusieurs centimètres d'erreur dans le pire des cas).

De la même manière, en rotation, Le robot est capable de tourner approximativement à 1 tr/s sur lui-même (peut-être un peu plus vite, mais c'est déjà assez rapide). En 20 millisecondes (environ la période de la tourelle dans le meilleur des cas), le robot a tourné 7 degrés. On peut se rapporter à la section [Triangulation: un peu de théorie](#) pour être convaincu que c'est très largement au dessus de ce qu'on peut tolérer pour avoir une mesure précise.

Il y a deux solutions à ce problème: ne pas faire de mesure lorsqu'on tourne, ou bien corriger la mesure en fonction de la vitesse de rotation instantanée. La carte mère pourrait en effet envoyer cette information régulièrement à la carte balise. Il semble beaucoup plus facile de corriger les mesures que dans le cas de la translation. Cependant, autant le problème pourrait être réglé pour déterminer la position (x,y), mais ce n'est pas le cas pour le cap. En effet, pendant le temps de la mesure (20 ms), plus la transmission à la carte mère (disons 10 ms), la mesure accuse un retard qui nous fait perdre une dizaine de degrés lorsqu'on est en train de tourner à 1 tour par seconde.

En conclusion, je dirai qu'il est préférable d'être à l'arrêt pour faire une mesure de qualité. D'autant que dans un match, il y a en général un certain nombre d'occasions où le robot est à l'arrêt et peut se recaler.

#### **5.4.6 La balise adverse est-elle réalisable avec ce système ?**

Par rapport aux balises fixes, la balise adverse a une contrainte supplémentaire, qui est de fonctionner sur 360° et non 90° ou 180° (selon que la balise fixe est dans un coin ou contre une bordure).

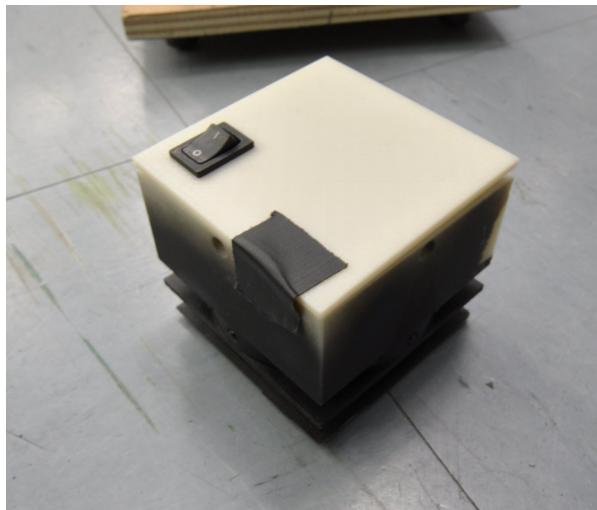
Cependant, on a aussi une contrainte en moins: la précision n'est pas aussi critique (5cm à 10cm de précision serait suffisant). Le robot adverse bouge, donc de toute façon il faut prendre de la marge lorsqu'on fait un évitemetnt.

Nous avons vu plus haut que les balises fixes fonctionnent en 455 KHz et la balise adverse en 56 KHz. Déjà, on sait que les deux types de balises ne se perturberont pas entre elles. Par contre, la fréquence étant 10 fois faible, la gigue du temps de réponse du capteur TSOP sera plus importante, ce qui constitue une première cause d'imprécision angulaire.

La balise placée sur le méchant robot ennemi se compose en fait de 4 balises fixes couvrant chacune un peu plus de 90°, sur chaque face d'un cube. Elles sont presque indépendantes, à ceci près: la première balise voyant passer les lasers place un bit à 1 sur une broche commune afin de prévenir les autres que c'est elle qui prend le contrôle des LEDs infrarouge. En effet, il est possible

dans certains cas que les lasers illuminent successivement deux faces différentes de la balise. Dans ce cas, il ne faudrait pas que deux trames potentiellement différentes partent simultanément ou avec un léger décalage.

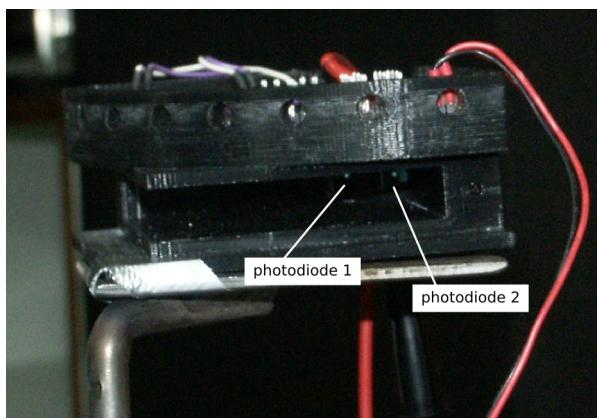
Dès que la balise aura reçu avec succès les 2 lasers sur une face, elle retournera un signal, ce qui implique que selon l'orientation de la balise, on ne capte pas toujours exactement le même point (à 2 cm près). Ce n'est pas très grave, car on n'est même pas sûr que le mat du robot adverse est réellement centré, et répétons le, il faut prendre de la marge lorsqu'on évite le robot hostile.



*La balise adverse, une fois terminée.*

#### **5.4.7 Mesure différentielle des lasers, et filtrage**

En ajoutant une photodiode sur les balises réceptrices, on peut augmenter la fiabilité de la mesure. La photodiode supplémentaire est placée à coté de la première, à la même hauteur.

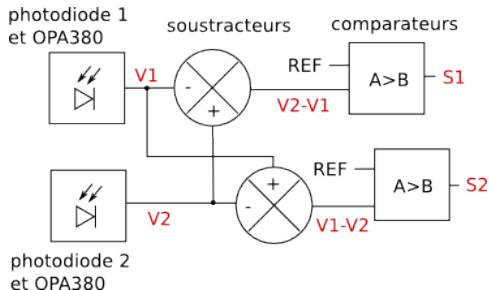


L'intérêt est multiple:

1. Il permet de faire une mesure différentielle, et donc de s'affranchir en partie du bruit lumineux ambiant. Soit  $V_1$  et  $v_2$  les tensions résultant des courants qui passent respectivement dans les photodiodes 1 et 2. On considère que lorsque le laser n'illumine aucune photodiode, les tensions  $V_1$  et  $V_2$  sont à peu près égales. Si le laser illumine une photodiode, alors on aura:  

$$abs(V_1 - V_2) > SEUIL$$
2. Il permet de s'assurer que c'est bien notre laser qui tape la photodiode. En effet, il tourne à une certaine vitesse, et donc on sait que le temps entre l'illumination de la photodiode 1 et de la photodiode 2 est borné (il dépend de la vitesse de rotation du laser et du placement du robot sur le terrain). Si une équipe avait, par hasard, exactement le même système que le nôtre, on pourrait imaginer de changer le sens de rotation du laser.

D'un point de vue électronique, on aura le schéma de principe suivant:



*Utilisation des comparateurs pour filtrer*

En fait, sur l'électronique finale, on ne se sert que de S1.

En plus du comparateur, nous avons un passe-haut en sortie de chaque OPA380, pour chacune des photodiodes, ainsi qu'un autre étage d'amplification. Cette partie est assez difficile à étalonner correctement: on observe parfois des rebonds en sortie de l'OPA380 lorsque l'éclairage est trop fort ou bien une absence de détection lorsqu'il est trop faible. Cependant, il est vrai qu'on a fait pas mal de tests "extrêmes" avec le spot dans la figure, ce qui est probablement un peu *too much* comme on dit dans le jargon.

Je pense néanmoins que quelqu'un d'expérimenté en électronique analogique (ça ne court plus les rues de nos jours) pourra faire mieux que nous sur cette partie.

#### 5.4.8 Filtrage logiciel du laser

- Dans le programme du microcontrôleur sur les balises fixes (et aussi sur la balise adverse), on ne valide la mesure que si la photodiode est illuminée pendant un temps borné. A 3 mètres, nous avons déjà calculé plus haut que la photodiode sera illuminée pendant 5 à 20 us (en fonction de la vitesse de rotation du moteur). A 30 cm, ce sera entre 50 et 200 us. On peut ignorer toute "illumination" qui ne rentre pas dans ces bornes.
- Dans le même esprit, si on connaît la vitesse de rotation du moteur (il est asservi en vitesse), alors on sait que le laser illuminera la photodiode 20 fois par secondes à intervalle constant (à la vitesse de rotation de notre robot près). Lorsqu'on vient de capter les 2 lasers, on peut ignorer toute autre variation lumineuse pendant les 50 prochaines millisecondes (un peu moins en vrai au cas où le robot tournerait sur lui-même dans le même sens).

#### 5.4.9 Synchronisation de l'émission des balises

On veut éviter que les balises fixes émettent en même temps en IR. Si les trames sont suffisamment courtes, cela ne peut pas arriver, mais il faudrait s'en assurer. La trame fait 16 bits, et elle est codée en manchester, c'est à dire que chaque bit en contient en fait 2. Il faut que chaque état soit modulé pendant une dizaine de périodes pour que le TSOP le capte correctement. Les tests montrent que les résultats sont meilleurs avec 15 périodes. A 455 Khz, la période est de 2.2us, calculons le temps de total de la trame émise  $T_t$ .

$$T_t \approx 2.2 \times 2 \times 15 \times 16 \approx 1056 \mu s$$

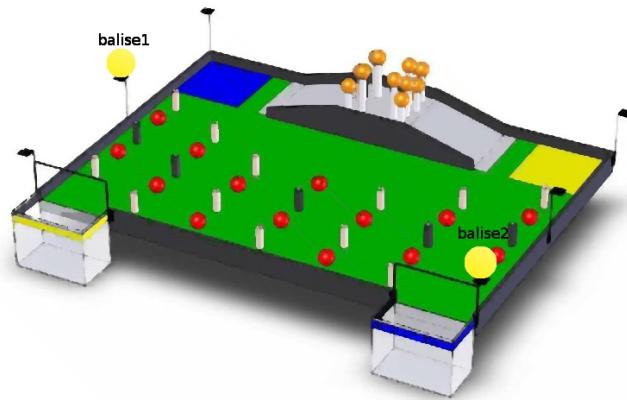
Cela représente un cinquantième de tour (environ 7°). Pas besoin de démonstration ici, on voit clairement que quelle que soit la position sur le terrain, l'angle entre deux balises pourra être plus petit que 7°. Il n'y a donc pas de synchronisation.

#### 5.4.10 Placement des balises sur le terrain

Les deux balises fixes seront placées:

- sur la petite bordure en face de notre aire de départ
- dans le coin proche de la zone de dépose adverse

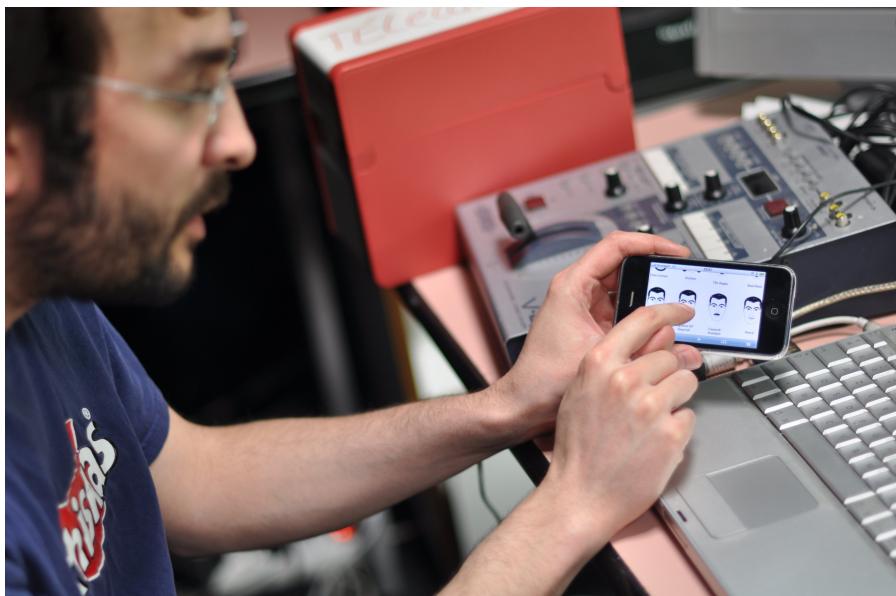
Cette combinaison semble la plus appropriée car elle offre une position relativement bonne sur une large partie du terrain (voir la section [Erreur de positionnement](#)), qui plus est on minimise les risques de masquage de la balise à cause de la pente du terrain.



*Placement des balises lorsqu'on démarre côté jaune.*

#### **5.4.11 Choix d'une moustache élégante, et petite bière**

En robotique, la moustache est un accessoire de style indispensable pour une bonne équipe. **Il est important d'organiser son choix de moustache avant la compétition: ensuite, il est trop tard.**



*Moi-même, en train de me documenter sur les différentes classes de moustache dans le monde moderne.*



*L'équipe Microb Technology en train de réfléchir au système de balises.*

Profitons de ce moment de détente pour ouvrir la bière suivante. Si vous n'avez pas fini la précédente, vous ne devez pas passer à la suite, c'est tricher. Je propose cette fois une petite [Kwak](#), à boire dans son verre du cocher !



*Aaaaaaaaaah !*

#### **5.4.12 Le laser virtuel**

Peut-être que certains lecteurs assidus auront remarqué ce petit problème. Dans la séquence suivante:

- Le premier laser illumine la photodiode
- Le second laser illumine la photodiode
- La balise fixe calcule la distance et émet la trame IR
- Les TSOP sur le robot compère capte la trame: lorsque le bit de start est reçu, on regarde où est la tourelle et hop, on a l'angle de la balise.

On n'est capable de répondre que lorsqu'on a capté le deuxième laser, et quand le calcul est terminé. C'est dommage, nous, ce qu'on voulait, c'était avoir l'angle de la tourelle lorsque le "laser virtuel" situé entre les 2 lasers gauche et droits est aligné sur la photodiode.

La solution est très simple. On a  $T_1$  le temps où arrive le premier laser, et  $T_2$  le moment où le second laser illumine la photodiode à son tour. Le "laser virtuel" aurait tapé à  $T_v = (T_2-T_1)/2$ . On sait que le calcul prend au maximum  $T_c$  et que le temps entre  $T_1$  et  $T_2$  est au maximum  $T_d$ . On peut

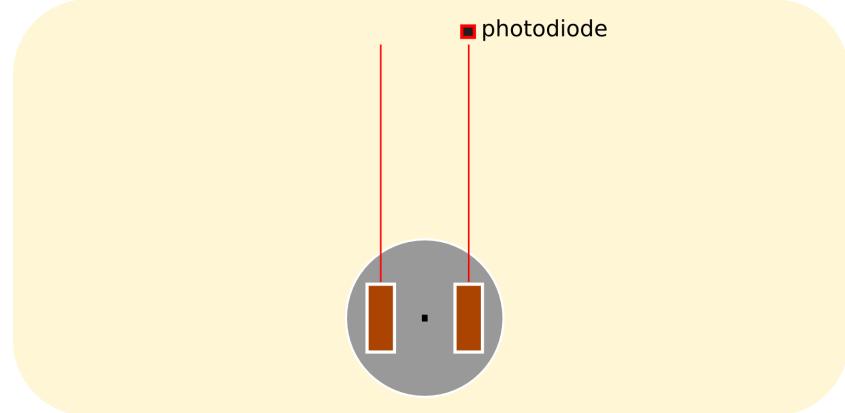
donc émettre à  $T_e$  tel que:

$$T_e = T_v + \max(T_d, \frac{T_c}{2})$$

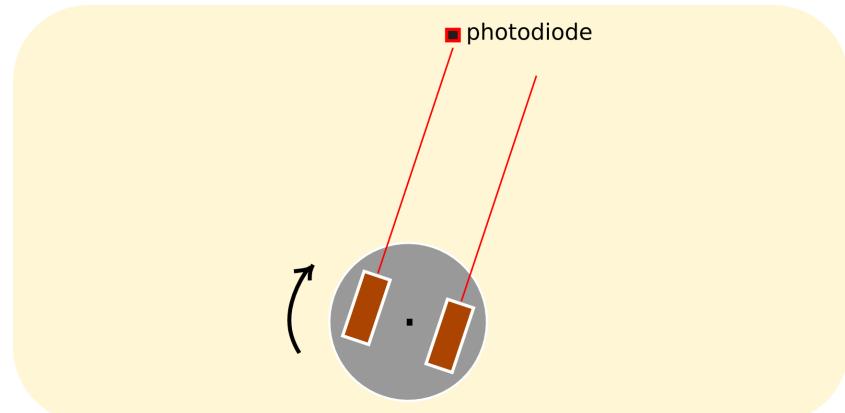
Comme la valeur  $T_e$  est fixe, il s'agit juste d'un offset à retrancher sur l'angle mesuré.

#### 5.4.13 Déduire la distance du temps entre les deux lasers

Connaissant la vitesse de rotation du laser ainsi que le temps entre le passage des deux lasers sur la photodiode, on souhaiterait connaître la distance qui sépare le centre de la tourelle de la photodiode. Nous avons supposé depuis le début que c'est possible, intuitivement ça semble assez crédible. Refaisons un peu de géométrie (hé oui désolé).

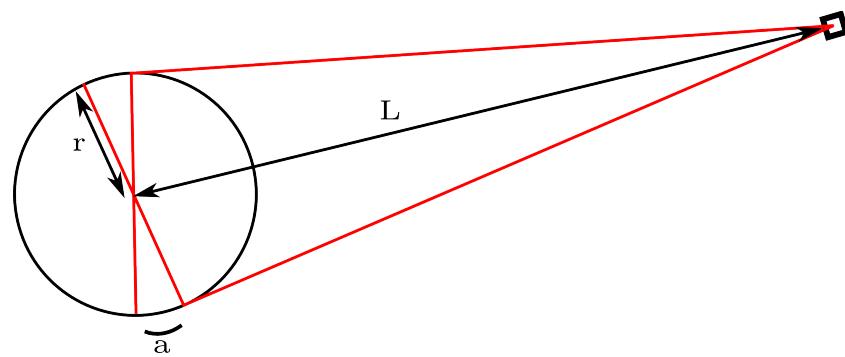


*Le premier laser illumine la photodiode*



*Quelques instants plus tard, le second laser illumine la photodiode à son tour.*

On peut représenter le problème avec la figure suivante:



$L$  est la distance cherchée,  $r$  est le rayon du cercle (donc  $2r$  est la distance entre les 2 lasers),  $a$  est l'angle parcouru.

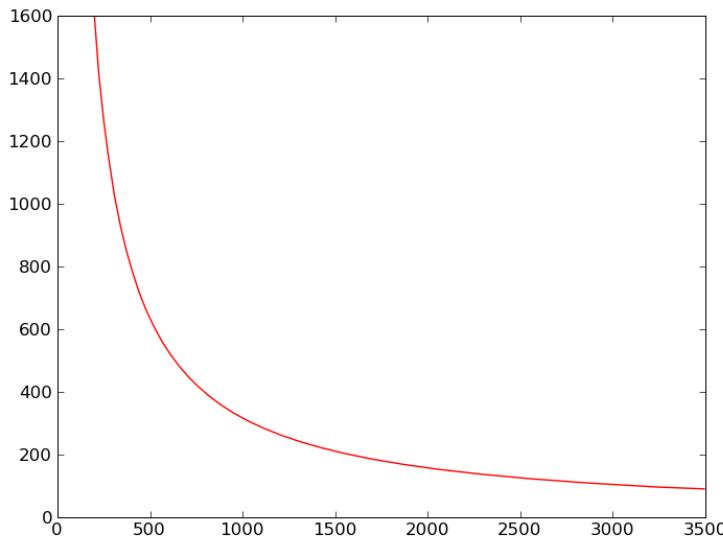
L'angle  $a$  dépend proportionnellement du temps mesuré, la vitesse de rotation étant fixe. On a donc:

$$\sin\left(\frac{a}{2}\right) = \frac{2 \cdot r}{L}$$

Donc:

$$L = \frac{d}{\sin(\frac{\alpha}{2})}$$

Au final, la courbe a une allure quelque peu hyperbolique, comme on peut le constater sur la figure suivante.



*La courbe théorique: en abscisse, la distance en mm, en ordonnée le temps entre les 2 lasers en microsecondes.*

Cet aspect hyperbolique favorise les mesures lorsqu'on est proche, en revanche, la précision se dégradera lorsque la distance sera grande: l'ordre de grandeur est qu'une variation d'une microseconde correspond à une variation de plus d'un cm lorsqu'on est au plus loin. Ce n'est pas si inquiétant, d'une part le microcontrôleur sait mesurer des temps avec une grande précision (la broche ICP est prévue pour capturer la valeur du timer sur un front), d'autre part si on est à 350 mm d'une balise, c'est qu'à coup sûr l'autre est plus proche. Le calcul de la distance n'utilisera que la distance la plus faible, comme indiqué dans le paragraphe [Erreur de positionnement](#).

#### 5.4.14 Alignement et réglage des lasers

Encore un point que nous avions négligé depuis le début: serons-nous capable de réaliser une mécanique suffisamment précise pour que les hypothèses concernant le parallélisme des lasers se vérifient ? Il y a deux réglages indépendants à effectuer:

1. Le parallélisme et la verticalité des lignes projetées, correspondant à la rotation des pointeurs lasers dans leur logement.
2. Le parallélisme des rayons lasers (tel qu'on les verrait en observant la balise vu de haut). Pour effectuer ce réglage, il faudra se placer face à un mur, bien à la perpendiculaire, et s'assurer que la distance entre les deux lignes projetées correspond bien à la même distance que celles qui séparent les deux pointeurs lasers.

Le premier point est le plus critique, car il signifie que selon l'endroit (en hauteur) des lignes qui illuminent la photodiode, la distance entre les deux lasers n'est pas la même, donc le temps mesuré est différent, impliquant une erreur sur la mesure de distance.

Le second point peut être corrigé logiciellement en effectuant un étalonnage manuel, puis on en déduira une interpolation linéaire à effectuer. Ce calcul donne des résultats très intéressants, nous le verrons dans le chapitre [Code des balises réceptrices](#). On pouvait aussi intégrer ça dans le calcul géométrique... j'ai essayé et ça m'a paru un peu trop puissant, en plus j'avais des mécaniciens bruyants à moins d'un mètre, ce qui n'a pas arrangé pas les choses.

Le système de fixation des lasers doit **impérativement** permettre un réglage fiable et précis de ces derniers. C'est une des clés pour obtenir une bonne précision. Une erreur de 1% sur la distance des lasers correspond à 1 cm d'erreur en distance à grande distance (en ordre de grandeur, je n'ai pas

fait de calcul précis).