

Bibliographie scientifique

Systemes de positionnement d'un robot dans le cadre de la coupe Eurobot

Auteur : Sébastien GROS

Année : 2007

Organisme : Club ROBOTIK2000

Fonction : vice président

Site Internet : <http://clubrobot2000.free.fr/site>

Sommaire

Sommaire	2
Introduction	3
1 Contexte général.....	4
2 Principales technologies utilisées.....	5
2.1 Les ultrasons (US).....	6
2.1.1 Principe.....	6
2.1.2 Avantages et inconvénients.....	7
2.2 Infrarouge (IR)	7
2.2.1 Principe.....	7
2.2.2 Avantages et inconvénients.....	8
2.3 Laser.....	8
2.3.1 Principe.....	8
2.3.2 Avantages et inconvénients.....	9
2.4 Télémètre Laser.....	9
2.4.1 Principe.....	9
2.4.2 Avantages et inconvénients.....	9
2.5 Détermination de la position	10
2.5.1 Cas où les distances robot – balises sont connues.....	10
2.5.2 Cas où les angles entre les balises sont connus.....	14
3 Système de positionnement par Ultrasons	19
3.1 Les Ultrasons en théorie.....	19
3.1.1 Définition	19
3.1.2 Vitesse de déplacement du son.....	19
3.1.3 Atténuation du signal sur la distance.....	20
3.1.4 Puissance du signal.....	21
3.2 La chaîne d'émission.....	22
3.2.1 Générer un signal à la fréquence adaptée.....	22
3.2.2 Codage de l'information sur la porteuse	24
3.2.3 Protocole de communication.....	24
3.2.4 Mise en forme du signal / amplification du signal.....	25
3.2.5 Mode d'émission.....	25
3.3 La chaîne de réception.....	26
3.3.1 Filtrage	26
3.3.2 Amplification	32
3.3.3 Redressement et mise aux niveaux logiques.....	33
Conclusion.....	35
Table des figures	36
Références	37
Annexe : Codes Matlab pour les courbes présentées	38

Introduction

Le but de ce document est de faire une étude scientifique d'un système de positionnement pour un robot mobile dans le cadre de la coupe européenne de robotique. En effet, la connaissance de la position du robot est un point capital lorsque l'on souhaite faire un robot « intelligent », c'est-à-dire plus évolué qu'un automate.

Pour cela, deux solutions sont possibles. La première consiste à faire de l'odométrie, c'est à dire à relever la position des roues très régulièrement. En connaissant la position initiale du robot, on peut alors déterminer sa position à chaque instant. La deuxième consiste à utiliser un système de localisation avec des balises afin de trianguler la position du robot. Cette première solution ne sera pas étudiée ici, et nous nous consacrerons à la deuxième solution.

Nous ferons d'abord une courte présentation de cette coupe de robotique et de la réglementation en place pour les systèmes de localisation. Nous verrons ensuite de manière théorique les principaux systèmes existant ainsi que les deux méthodes de calcul de la position du robot. L'utilisation de l'une ou l'autre de ces méthodes étant dépendante du système mis en place.

Enfin dans une dernière partie, nous étudierons en détail un système basé sur la mesure des distances entre le robot et les balises grâce à des ultrasons.

1 Contexte général

Cette étude se déroule donc dans l'optique de la coupe de robotique [Eurobot](#). Historiquement, cette compétition a débuté en France il y a maintenant plus de dix ans, et a été initiée par le groupe [Planète Science](#) en partenariat avec l'émission E=M6 qui se chargeait de diffuser les matchs des phases finales. Cette compétition est aujourd'hui européenne. Dans ce cadre, différents pays organisent des sélections nationales, puis les trois meilleurs équipes de chaque pays sont sélectionnées pour s'affronter lors des phases finales européennes.

Le thème de la compétition et le règlement change chaque année, mais certains points sont standards et identiques d'année en année. Par exemple, les matchs ont toujours une durée de 90 secondes, la table (comme présenté ci-dessous) mesure 3 m par 2,10 m, ...

De plus les équipes ont la possibilité d'utiliser un système de balise pour se repérer sur le terrain. Ces balises seront alors disposées autour du terrain comme cela est présenté sur le schéma et seront contraintes à un volume de 8x8x16 cm.

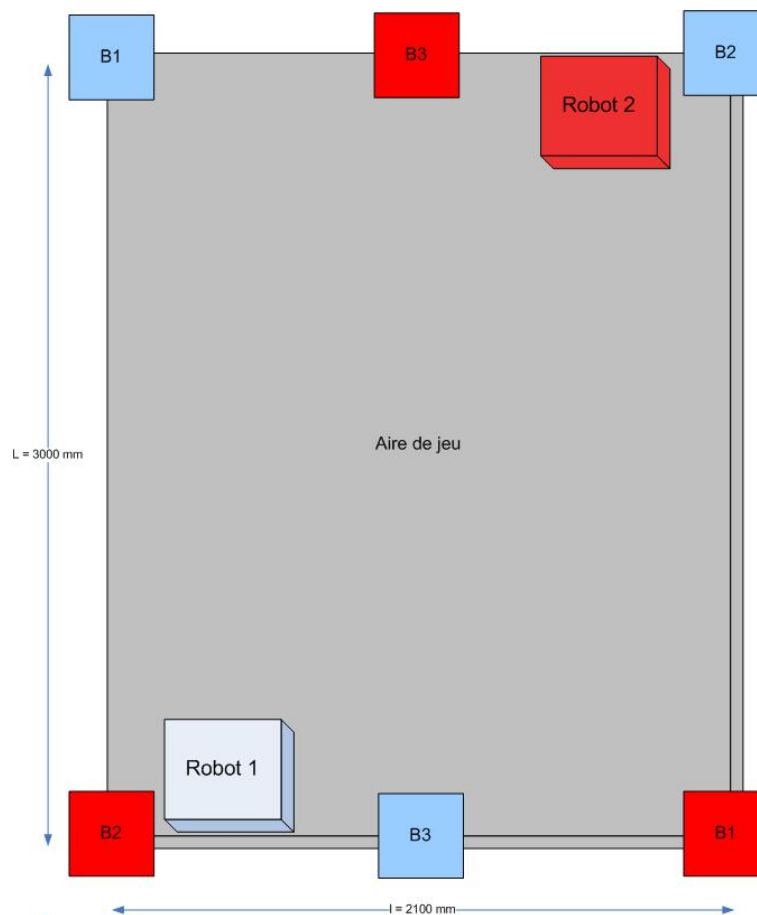


Figure 1 : schéma de la table de jeu

Avec B1, B2 et B3 les balises. B3 est positionné au milieu du petit côté.

A noter que la taille de la table, sa forme et la position des balises sont présentées par rapport au règlement de 2007 [1] et ne tiennent donc pas compte des éventuelles évolutions du règlement.

2 Principales technologies utilisées

Il existe deux méthodes pour connaître la position du robot :

- La première consiste à mesurer les distances (d_1 , d_2 et d_3) entre le robot et les trois balises.

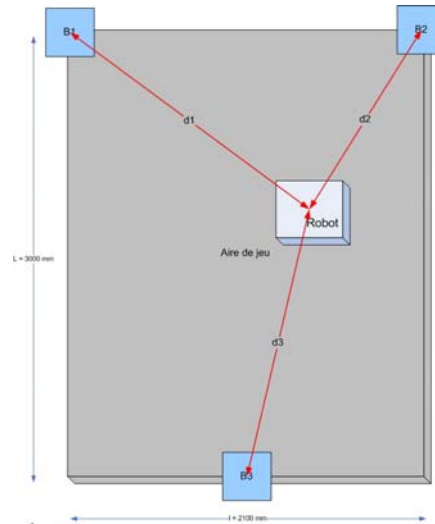


Figure 2 : Mesure des distances

- La deuxième consiste quant à elle à mesurer les angles (α , β et γ) vus par le robot entre les trois balises.

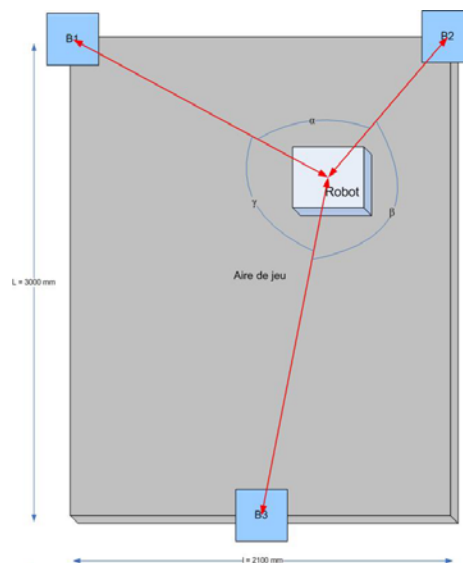


Figure 3 : Mesure des angles

Pour ces deux techniques de positionnement, plusieurs technologies sont possibles, avec chacune leurs avantages et inconvénients :

- Les ultrasons (US) : mesure des distances
- Les infrarouges (IR) : mesure des angles et orientation
- Un laser : mesure des angles et orientation
- Un télémètre laser : mesure des distances, angles et orientation

Nous allons maintenant passé en revu certaines de ces techniques, puis nous verrons comment déterminer la position du robot avec ces seules données.

2.1 Les ultrasons (US)

2.1.1 Principe

Depuis le robot, on envoie un signal ultrasonique dans toutes les directions grâce à des émetteurs ultrasons. Dans le même temps, on envoie aux balises un signal IR ou HF (signal très rapide comparé aux US) afin de signaler aux balises le départ des US.

Sur les balises : Après réception du signal de top départ, on attend de recevoir les ultrasons, puis on détermine le temps mis par le signal US pour arriver jusqu'aux balises d'après le temps écoulé entre le top de départ et le moment auquel est reçu le signal US.

Connaissant alors le temps de parcours des US (t) et leur vitesse dans l'air ($v = \sim 344$ m/s), on peut alors déterminer les distances (d_i) séparant le robot de chacune des trois balises par la simple formule :

$$d_i = t_i * v$$

La distance calculé est alors renvoyé au système de localisation (en général un signal HF).

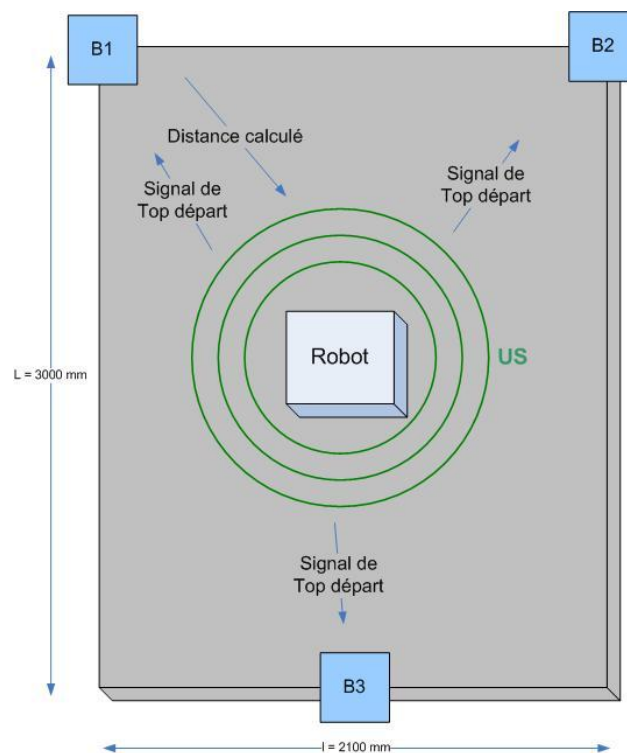


Figure 4 : Schéma de principe d'un système à ultrason

2.1.2 Avantages et inconvénients

La solution par ultrason a pour avantages d'être bon marché et d'utiliser un principe relativement simple.

Malheureusement, elle a aussi quelques inconvénients :

- Très perturbé si un ou plusieurs autre systèmes à US sont proches.
- Peut être perturbé par le bruit ambiant si celui-ci est élevé (ex : cri du public, corne de brume, ...)
- Sensible au phénomène d'écho.
- La vitesse du son varie en fonction de la température de l'air.

2.2 Infrarouge (IR)

2.2.1 Principe

Chaque balise est équipée d'émetteurs IR. Les balises émettent en permanence un code qui leur est propre sur toute l'air de jeu.

Le robot est lui équipé de récepteur IR disposé de manière à capter sur 360°, permettant ainsi de voir tout autour du robot. Plus le nombre de récepteur sera grand et plus le système sera précis.

Connaissant alors la position de chaque capteur (récepteur IR) et sachant quels capteurs est en train de recevoir le code des balises, on peut alors déterminer les angles entre les balises et l'orientation du robot.

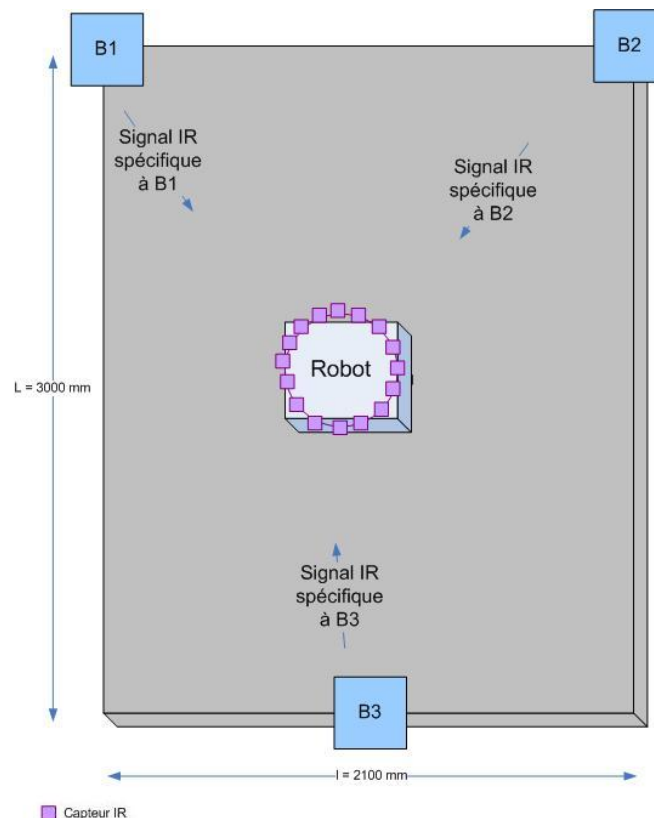


Figure 5 : schéma de principe d'un système infrarouge

2.2.2 Avantages et inconvénients

Il s'agit d'une solution simple à mettre en œuvre car le principe reste simple et les composants sont courants et bons marchés. De plus les balises ne communiquent pas entre elles. Avec le robot, la communication n'est que dans un seul sens, ce qui évite d'avoir à mettre en place une liaison et un protocole de communication évolué.

En revanche cette solution est elle aussi très perturbable si d'autres systèmes IR sont présents à proximité, ce qui est bien souvent le cas lors de la coupe de robotique. De plus la précision du système dépend du nombre de récepteur qu'il est possible d'installer.

Une deuxième solution dérivée de celle-ci est couramment utilisée afin de simplifier les balises au maximum. Dans ce cas, Les émetteurs IR sont disposés sur le robot au même titre que les récepteurs. Ce qui permet d'utiliser des balises complètement passives qui se contentent de réfléchir le signal IR. Cette solution simplifie donc grandement les balises, en revanche elle ne permet pas en elle-même de distinguer une balise d'une autre, ce qui est un inconvénient majeur.

2.3 Laser

2.3.1 Principe

Dans ce cas, le principe consiste à faire tourner un laser (à vitesse constante et connu avec précision) sur le dessus du robot. Les balises sont alors équipées de photodiodes (adaptées au laser utilisé) afin de détecter le passage du laser. Lorsqu'une balise détecte le passage du laser, elle renvoie alors l'information au système de localisation (situé sur le robot) qui peut alors déduire les angles entre les balises. On peut également déterminer l'orientation du robot si l'on est capable de connaître l'angle entre une balise et l'avant du robot, ce qui revient à être capable de connaître à tout instant l'orientation du laser par rapport à l'avant du robot.

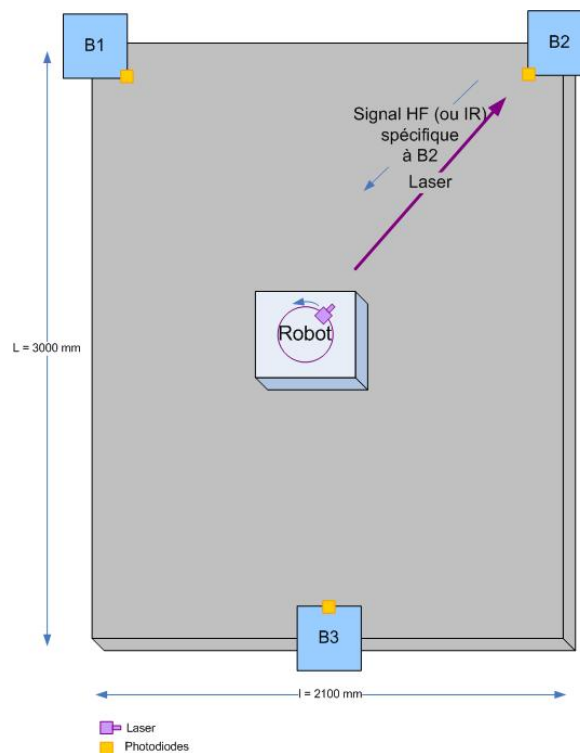


Figure 6 : schéma de principe d'un système à Laser

2.3.2 Avantages et inconvénients

On voit ici un principe théorique simple qui permet d'avoir une grande précision dans la mesure des angles. De plus ce système est peu perturbable.

En revanche, cette technique requiert une grande précision mécanique car le laser doit tourner parfaitement horizontalement. Il faut également asservir très précisément la vitesse de rotation du laser.

Comme pour le système IR on peut là aussi utiliser une variante de ce système afin de simplifier les balises à de simples objets réfléchissant. Dans cas, le récepteur photodiode est placé sur le robot et doit être le plus proche possible du faisceau laser afin de le capter lorsque celui-ci est réfléchi par la balise.

Encore une fois, ce système ne permet pas d'identifier la balise qui est touché.

Remarque :

Mécaniquement, il n'est pas aisé de faire tourner en continu un système tel qu'un laser car celui-ci est connecté à des câbles. Une solution simple consiste donc à utiliser un petit miroir pour refléter le faisceau laser. Ainsi le laser est fixe, et il suffira de faire tourner le miroir, la seule contrainte est alors que le faisceau laser entre le robot et les balises soit parfaitement horizontal.

2.4 Télémètre Laser

2.4.1 Principe

Le principe est similaire à celui de l'utilisation d'un laser que nous venons de voir, à la différence que cette fois ci, lorsque le laser du télémètre passe devant les balises il peut mesurer la distance de manière très précise.

2.4.2 Avantages et inconvénients

Cette solution a pour avantages d'une part d'être très peu sensible au interférence, et d'autre part, elle permet d'obtenir à la fois les angles entres les balises et les distances séparant le robot des balises. Cela permet ensuite de calculer la position du robot dans toute circonstance et avec la méthode la plus adaptée en fonction des mesures qui ont été réussies.

Les inconvénients sont les mêmes que dans le cas du laser, avec en plus le coût d'un télémètre laser (de l'ordre de 200 € minimum), ce qui est un inconvénient majeur lorsque le budget est peu élevé.

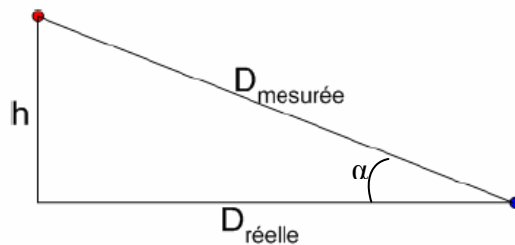
2.5 Détermination de la position

Comme nous l'avons vu précédemment, nous avons à notre disposition pour le calcul des coordonnées du robot soit les distances entre le robot et les balises, soit les angles vus entre les balises. Excepté dans le cas du télémètre où on a la possibilité d'avoir toutes ces informations. Voyons donc comment résoudre notre problème dans chacun de ces deux cas.

2.5.1 Cas où les distances robot – balises sont connues

Détermination de la distance réelle à partir de la distance mesurée :

Si les mesures de distance ne sont pas effectuées de manière parfaitement horizontale, alors une erreur de mesure sera introduite dans le problème.



Connaissant la hauteur séparant les points de départ et d'arrivée du signal de mesure (US, télémètre laser), on peut corriger cette erreur de la manière suivante :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{h}{D_{\text{mesurée}}}\right)$$

$$D_{\text{réelle}} = \cos(\alpha) * D_{\text{mesurée}}$$

Dans ce cas, nous n'avons à notre disposition que la mesure des distances, il nous faudra donc déterminer la position du robot en fonction de ces seules données. Sur le schéma suivant sont définis tous les angles et distances qui seront utilisés par la suite.

Rappel :

- longueur du terrain : $L = 3000$ mm
- largeur du terrain : $l = 2100$ mm

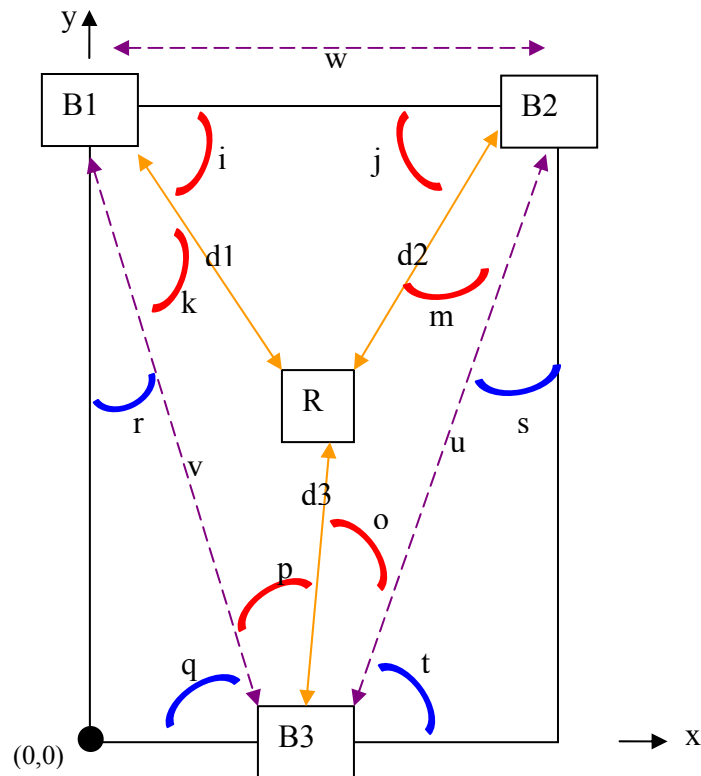


Figure 7 : Représentation des angles et distances utilisés lors de la mesure des distances

B1, B2, B3 : les balises

R : le robot

$d1, d2, d3$: les distances balises-robot mesurées

i, j, k, m, o, p : les angles inconnus

q, r, s, t : les angles connus

u, v, w : les distances entre les balises : connues

Le coin en bas à gauche représente le point de coordonnées (0, 0).

On pourra localiser le robot d'après au moins un des 3 triangles : (B1, R, B3), (B1, R, B2), (B2, R, B3).

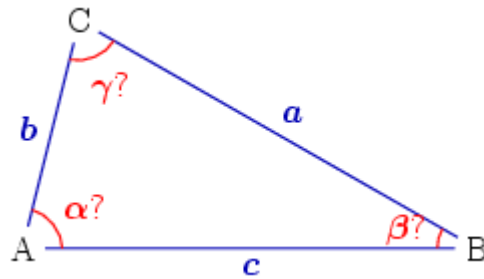
Il suffit pour cela de mesurer 2 des distances afin d'avoir un triangle utilisable et de pouvoir ainsi positionner le robot. Une fois que le triangle à utiliser a été choisi, il faut alors déterminer au moins un des angles de ce triangle afin de pouvoir par la suite déterminer la position du robot.

2.5.1.1 Détermination des angles d'un triangle connaissant les 3 cotés

$$\alpha = \arccos\left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}\right)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{c^2 + a^2 - b^2}{2ca}\right)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}\right)$$



Il suffit alors d'appliquer ces formules à nos triangles afin d'être capable de déterminer les angles **i, j, k, m, o, p**.

Les balises étant fixes, les données suivantes sont connues et constantes :

- Les distances **u, v, w** :

$$u = \sqrt{L^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} = 3178.44 \text{ mm}$$

$$v = u = 3178.44 \text{ mm}$$

$$w = l = 2100 \text{ mm}$$

- Les angles **q, r, s, t** :

$$q = \cos\left(\frac{\left(\frac{w}{2}\right)}{v}\right) = 70.71^\circ$$

$$r = \cos\left(\frac{L}{v}\right) = 19.29^\circ$$

$$s = r = 19.29^\circ$$

$$t = q = 70.71^\circ$$

2.5.1.2 Calcul de x et y dans chacun des 3 triangles

Cas du triangle (B1, R, B3) :

$$x = \frac{w}{2} + \cos(180 - (p + q)) * d3 \quad \text{ou} \quad x = \cos(-90 + r + k) * d1$$

$$y = \sin(180 - (p + q)) * d3 \quad \text{ou} \quad y = L + (\sin(-90 + r + k) * d1)$$

Cas du triangle (B1, R, B2) :

$$x = \cos(i) * d1 \quad \text{ou} \quad x = l + (-\cos(j) * d2)$$

$$y = L + (\sin(i) * d1) \quad \text{ou} \quad y = L + (\sin(-j) * d2)$$

Cas du triangle (B2, R, B3) :

$$x = \frac{w}{2} + \cos(o + t) * d3 \quad \text{ou} \quad x = l + (\cos(-90 - s - m) * d2)$$

$$y = \sin(o + t) * d3 \quad \text{ou} \quad y = L + (\sin(-90 - s - m) * d2)$$

On remarque qu'il suffit de ne calculer qu'un seul des trois angles de chacun des triangles afin de déterminer la position (x, y) du robot. Il suffit alors de calculer celui qui nous arrange le plus, c'est-à-dire celui qui permettra de faire le calcul le plus court, et donc le plus rapide. Le triangle $(B1, R, B2)$ est le plus intéressant du point de vue simplicité des calculs.

On voit donc qu'il est possible de se positionner avec seulement un triangle, ce qui signifie également qu'il suffit de ne mesurer que deux des trois distances et de ne calculer qu'un seul des trois angles du triangle choisi afin de se positionner. D'une part, cela permet de tolérer qu'une mesure soit ratée à chaque cycle d'acquisition, et d'autre part cela permet de déterminer rapidement la position du robot car toutes les inconnues n'ont pas besoin d'être calculé.

2.5.1.3 Optimisation du positionnement

Dans le cas où l'on reçoit les 3 distances, on peut choisir de calculer les 3 positions possibles du robot d'après les 3 triangles. On obtiendra alors les 3 jeux de coordonnées suivants : $(x1, y1)$, $(x2, y2)$, $(x3, y3)$.

Dans ce cas, on peut alors préciser la position réelle du robot (x, y) simplement en moyennant les résultats obtenus :

$$x = \frac{x1 + x2 + x3}{3}$$

$$y = \frac{y1 + y2 + y3}{3}$$

2.5.1.4 Détermination de l'orientation

On choisi d'appeler l'orientation du robot θ .

A défaut de pouvoir obtenir directement l'information d'orientation du robot, cette information peut être déterminée en utilisant deux positions successives :

$(x1, y1)$: la position à l'instant i

$(x2, y2)$: la position à l'instant $i + 1$

$$dx = x2 - x1$$

$$dy = y2 - y1$$

$$h = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{h}{dx}\right) \quad \text{ou} \quad \theta = \arcsin\left(\frac{h}{dy}\right)$$

On obtient alors l'angle θ :

- La direction du robot dans le cas d'un déplacement rectiligne.
- La direction de la tangente à la trajectoire dans le cas d'un déplacement curviligne.

Dans le cas d'un déplacement en marche arrière du robot, il faut alors ajouter 180° à l'angle calculé afin d'obtenir l'orientation réelle du robot. De plus, pour déterminer cette orientation, on assume que le robot se déplace uniquement de manière rectiligne ou curviligne

en avant ou arrière. Dans le cas d'un robot qui pourrait également se déplacer de manière transversale (comme un crabe), il faudrait alors tenir compte de ce paramètre pour l'interprétation des résultats.

2.5.2 Cas où les angles entre les balises sont connus

Rappel :

- longueur du terrain : $L = 3000$ mm
- largeur du terrain : $l = 2100$ mm

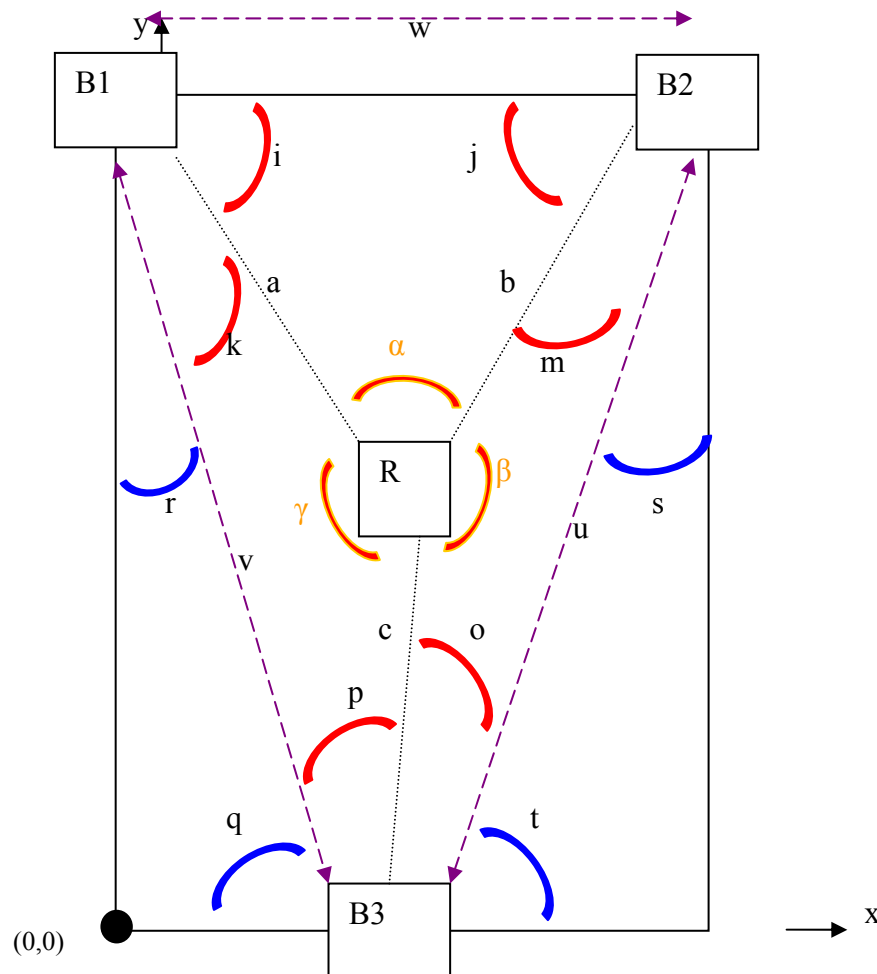


Figure 8 : Représentation des angles et distances utilisés lors de la mesure des angles

B1, B2, B3 : les balises

R : le robot

α, β, γ : les angles inter balises mesurés

a, b, c : les distances balises-robot inconnues

i, j, k, m, o, p : les angles inconnus

q, r, s, t : les angles connus

u, v, w : les distances entre les balises, connues

Dans ce cas de figure, nous sommes dans une situation assez délicate puisque nous n'avons pas beaucoup de donnée connues à notre disposition. Nous ne connaissons que les

angles (vus par le robot) entre les balises, et les données constantes. Avant de pouvoir se positionner, il faut donc en premier lieu obtenir plus d'information. Dans ce cadre voyons maintenant comment déterminer la valeur de l'angle j [9] d'après les seules données connues.

2.5.2.1 Recherche de l'angle j

D'après le théorème du sinus, on peut tirer les équations suivantes :

$$\frac{v}{\sin(\gamma)} = \frac{a}{\sin(p)} = \frac{c}{\sin(k)} \quad (1)$$

$$\frac{w}{\sin(\alpha)} = \frac{a}{\sin(j)} = \frac{b}{\sin(i)} \quad (2)$$

$$\frac{u}{\sin(\beta)} = \frac{b}{\sin(o)} = \frac{c}{\sin(m)} \quad (3)$$

On peut tirer de ces équations les 3 distances inconnues a , b et c :

$$\text{De (1) : } a = \frac{v}{\sin(\gamma)} * \sin(p) \quad \text{et} \quad c = \frac{v}{\sin(\gamma)} * \sin(k)$$

$$\text{De (2) : } a = \frac{w}{\sin(\alpha)} * \sin(j) \quad \text{et} \quad b = \frac{w}{\sin(\alpha)} * \sin(i)$$

$$\text{De (3) : } b = \frac{u}{\sin(\beta)} * \sin(o) \quad \text{et} \quad c = \frac{u}{\sin(\beta)} * \sin(m)$$

Rassemblons ces équations :

$$1. \quad a = \frac{v}{\sin(\gamma)} * \sin(p) = \frac{w}{\sin(\alpha)} * \sin(j)$$

$$2. \quad b = \frac{w}{\sin(\alpha)} * \sin(i) = \frac{u}{\sin(\beta)} * \sin(o)$$

$$3. \quad c = \frac{v}{\sin(\gamma)} * \sin(k) = \frac{u}{\sin(\beta)} * \sin(m)$$

On utilise maintenant l'équation 2. :

$$\frac{w}{\sin(\alpha)} * \sin(i) = \frac{u}{\sin(\beta)} * \sin(o)$$

On réécrit les termes i et o afin de n'avoir plus que j comme inconnue :

$$i = 180 - j - \alpha$$

$$j + m = 90 - s$$

$$\text{et : } m = 180 - o - \beta$$

$$\text{donc : } j + 180 - o - \beta = 90 - s$$

$$\Rightarrow o = j + s - \beta + 90$$

On peut alors réécrire l'équation 2. :

$$\frac{u}{\sin(\beta)} * \sin(j + s - \beta + 90) = \frac{w}{\sin(\alpha)} * \sin(180 - j - \alpha)$$

$$\Leftrightarrow \frac{u}{\sin(\beta)} * \sin(j + s - \beta + 90) = -\frac{w}{\sin(\alpha)} * \sin(j + \alpha - 180)$$

$$\Leftrightarrow A * \sin(j + \varphi_1) = -B * \sin(j + \varphi_2)$$

avec:

$$A = \frac{u}{\sin(\beta)} \quad B = \frac{w}{\sin(\alpha)}$$

$$\varphi_1 = s - \beta + 90 \quad \varphi_2 = \alpha - 180$$

$$\Leftrightarrow A * \sin(j + \varphi_1) = -B * \sin(j + \varphi_2)$$

$$\Leftrightarrow A[\sin(j) * \cos(\varphi_1) + \cos(j) * \sin(\varphi_1)] = -B[\sin(j) * \cos(\varphi_2) + \cos(j) * \sin(\varphi_2)]$$

$$\Leftrightarrow \sin(j)[A * \cos(\varphi_1) + B * \cos(\varphi_2)] = -\cos(j)[A * \sin(\varphi_1) + B * \sin(\varphi_2)]$$

$$\Leftrightarrow U * \sin(j) = -V * \cos(j)$$

avec:

$$U = A * \cos(\varphi_1) + B * \cos(\varphi_2)$$

$$V = A * \sin(\varphi_1) + B * \sin(\varphi_2)$$

rappelons que : $\sin(x) = \sqrt{1 - \cos^2(x)}$

$$\Leftrightarrow U \sqrt{1 - \cos^2(j)} = -V \cos(j)$$

$$\Leftrightarrow U^2 - U^2 \cos^2(j) = V^2 \cos^2(j)$$

$$\Leftrightarrow U^2 - U^2 \cos^2(j) - V^2 \cos^2(j) = 0$$

$$\Leftrightarrow \cos^2(j) = \frac{U^2}{U^2 + V^2}$$

$$\Leftrightarrow \cos(j) = \sqrt{\frac{U^2}{U^2 + V^2}}$$

$$\Leftrightarrow j = \arccos\left(\sqrt{\frac{U^2}{U^2 + V^2}}\right)$$

On peut alors en déduire l'angle j en remplaçant U et V par A, B, φ_1 et φ_2 :

$$j = \arccos\left(\sqrt{\frac{(A * \cos(\varphi_1) + B * \cos(\varphi_2))^2}{(A * \cos(\varphi_1) + B * \cos(\varphi_2))^2 + (A * \sin(\varphi_1) + B * \sin(\varphi_2))^2}}\right)$$

Puis en revenant aux variables réelles, ce calcul s'exprime alors ainsi :

$$j = \arccos \left(\frac{\left(\left(\frac{u}{\sin(\beta)} \right) * \cos(s - \beta + 90) + \left(\frac{w}{\sin(\alpha)} \right) * \cos(\alpha - 180) \right)^2}{\left(\left(\frac{u}{\sin(\beta)} \right) * \cos(s - \beta + 90) + \left(\frac{w}{\sin(\alpha)} \right) * \cos(\alpha - 180) \right)^2 + \left(\left(\frac{u}{\sin(\beta)} \right) * \sin(s - \beta + 90) + \left(\frac{w}{\sin(\alpha)} \right) * \sin(\alpha - 180) \right)^2} \right)$$

Les variables u , s et w sont des constantes, et α et β ayant été mesuré, il n'y a plus d'inconnu dans cette équation, on peut donc calculer l'angle j .

Rappelons aussi que l'angle i peut s'exprimer ainsi :

$$i = 180 - \alpha - j$$

Remarque :

On peut également calculer directement i de la même manière. Pour cela il suffit de remplacer la longueur u par la longueur v et l'angle β par l'angle γ dans le calcul précédent.

Comme les distances u et v sont identiques, seul les angles β et γ diffèrent entre ces deux calculs. On écrit alors i :

$$i = \arccos \left(\frac{\left(\left(\frac{v}{\sin(\gamma)} \right) * \cos(r - \gamma + 90) + \left(\frac{w}{\sin(\alpha)} \right) * \cos(\alpha - 180) \right)^2}{\left(\left(\frac{v}{\sin(\gamma)} \right) * \cos(r - \gamma + 90) + \left(\frac{w}{\sin(\alpha)} \right) * \cos(\alpha - 180) \right)^2 + \left(\left(\frac{v}{\sin(\gamma)} \right) * \sin(r - \gamma + 90) + \left(\frac{w}{\sin(\alpha)} \right) * \sin(\alpha - 180) \right)^2} \right)$$

On pourra alors obtenir j à partir de i :

$$j = 180 - \alpha - i$$

Maintenant que nous connaissons les 3 angles de ce triangle ainsi que la valeur d'un côté (coté B1B2), on peut en déduire les longueurs des deux côtés manquants d'après la formule du sinus déjà énoncée précédemment :

$$\frac{w}{\sin(\alpha)} = \frac{a}{\sin(j)} = \frac{b}{\sin(i)}$$

Donc :

$$a = \frac{w}{\sin(\alpha)} * \sin(j)$$

$$b = \frac{w}{\sin(\alpha)} * \sin(i)$$

On peut alors calculer la position du robot comme énoncé au [paragraphe 2.5.1.2](#) :

$$x = \cos(i) * a \quad \text{ou} \quad x = l + (\cos(180 + j) * b)$$

$$y = L + (\sin(i) * a) \quad \text{ou} \quad y = L + (\sin(180 + j) * b)$$

2.5.2.2 Calcul dans le cas des deux autres triangles

Dans le cas précédent, nous nous sommes placés dans le triangle (R, B1, B2) afin de déterminer la position du robot. Si l'on souhaite se placer dans un des deux autres triangles, il faudra alors réaliser les mêmes calculs, et on trouvera alors :

Cas du triangle (R, B1, B3) :

$$k = \arccos \left(\frac{\left(\left(\frac{w}{\sin(\alpha)} \right) * \cos(r - \alpha + 90) + \left(\frac{v}{\sin(\gamma)} \right) * \cos(\gamma - 180) \right)^2}{\left(\left(\frac{w}{\sin(\alpha)} \right) * \cos(r - \alpha + 90) + \left(\frac{v}{\sin(\gamma)} \right) * \cos(\gamma - 180) \right)^2 + \left(\left(\frac{w}{\sin(\alpha)} \right) * \sin(r - \alpha + 90) + \left(\frac{v}{\sin(\gamma)} \right) * \sin(\gamma - 180) \right)^2} \right)$$

Et :

$$p = \arccos \left(\frac{\left(\left(\frac{u}{\sin(\beta)} \right) * \cos(s - \beta + 90) + \left(\frac{v}{\sin(\gamma)} \right) * \cos(\gamma - 180) \right)^2}{\left(\left(\frac{u}{\sin(\beta)} \right) * \cos(s - \beta + 90) + \left(\frac{v}{\sin(\gamma)} \right) * \cos(\gamma - 180) \right)^2 + \left(\left(\frac{u}{\sin(\beta)} \right) * \sin(s - \beta + 90) + \left(\frac{v}{\sin(\gamma)} \right) * \sin(\gamma - 180) \right)^2} \right)$$

Cas du triangle (R, B2, B3) :

$$m = \arccos \left(\frac{\left(\left(\frac{w}{\sin(\alpha)} \right) * \cos(s - \alpha + 90) + \left(\frac{u}{\sin(\beta)} \right) * \cos(\beta - 180) \right)^2}{\left(\left(\frac{w}{\sin(\alpha)} \right) * \cos(s - \alpha + 90) + \left(\frac{u}{\sin(\beta)} \right) * \cos(\beta - 180) \right)^2 + \left(\left(\frac{w}{\sin(\alpha)} \right) * \sin(s - \alpha + 90) + \left(\frac{u}{\sin(\beta)} \right) * \sin(\beta - 180) \right)^2} \right)$$

Et :

$$o = \arccos \left(\frac{\left(\left(\frac{v}{\sin(\gamma)} \right) * \cos(r - \gamma + 90) + \left(\frac{u}{\sin(\beta)} \right) * \cos(\beta - 180) \right)^2}{\left(\left(\frac{v}{\sin(\gamma)} \right) * \cos(r - \gamma + 90) + \left(\frac{u}{\sin(\beta)} \right) * \cos(\beta - 180) \right)^2 + \left(\left(\frac{v}{\sin(\gamma)} \right) * \sin(r - \gamma + 90) + \left(\frac{u}{\sin(\beta)} \right) * \sin(\beta - 180) \right)^2} \right)$$

Pour ces deux autres triangles, on déduit la position du robot de la même manière que précédemment, c'est-à-dire grâce à la formule du sinus, puis par les formules de positionnement énoncées au [paragraphe 2.5.1.2](#).

3 Système de positionnement par Ultrasons

Nous allons maintenant étudier plus précisément un système utilisant des ultrasons, donc basé sur la mesure des distances entre le robot et les balises. Nous verrons d'abord l'aspect théorique des ultrasons, puis je proposerai une solution pour concevoir ce système d'un bout à l'autre de la chaîne de transmission.

3.1 Les Ultrasons en théorie

3.1.1 Définition

Le terme ultrason définit tout son, ou vibration acoustique, à une fréquence telle qu'il n'est pas audible par l'oreille humaine. C'est-à-dire un son dont la fréquence est supérieure à 20 kHz. Les ultrasons sont régis par les mêmes lois que les ondes sonores [8].

3.1.2 Vitesse de déplacement du son

La vitesse de ce type d'onde est de l'ordre 344 m/s à une température de 22,5°C. Il s'agit d'une vitesse approximative qui suffit pour la plupart des applications, mais ne permet pas d'être précis en toute circonstance, ce qui est très gênant dans le cadre d'un système chargé d'effectuer des mesures précises.

Il faut donc tenir compte du fait que la vitesse du son varie en fonction de la température selon l'équation suivante [2] :

$$v(T) = 331,3176 * \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad \text{Où } v(T) \text{ est la vitesse en m/s et } T \text{ en } ^\circ\text{C}$$

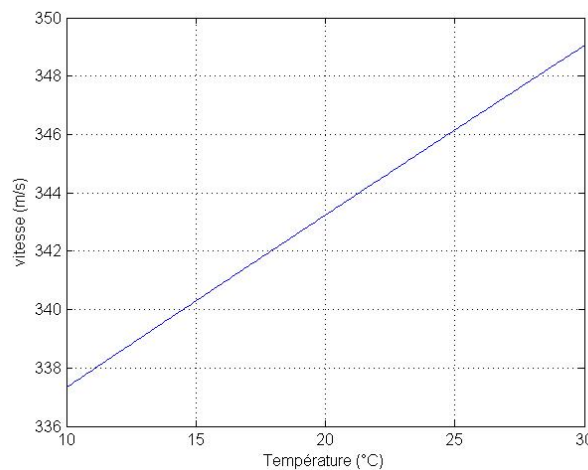


Figure 9 : vitesse des US en fonction de la température

Comme le montre la courbe ci-dessous, si l'on utilise la vitesse du son approximative, on aura une erreur de mesure qui sera d'autant plus grande que la température diffère de 22,5°C et que la distance mesurée est grande.

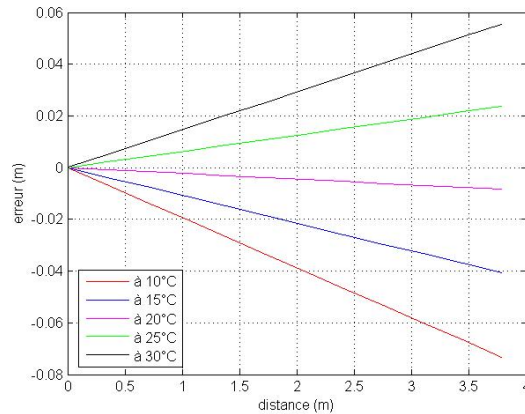


Figure 10 : erreur sur la distance mesurée en fonction de la température

On voit qu'à une température de 25 °C on a déjà une erreur de mesure d'environ 2 centimètres sur une distance de 3 mètres, ce qui est déjà trop pour pouvoir faire des mesures précises. Dans notre application, Il faut donc mieux calculer cette vitesse en fonction de la température afin d'avoir des mesures précises. Pour cela, il faudra intégrer un capteur de température au système de localisation. Ce capteur devra avoir une précision inférieure ou égale à 1°C afin de pouvoir réellement réaliser des mesures précises. Par exemple, le capteur TMP37 de chez [analog devices](#) convient bien à cette application et est simple d'utilisation.

3.1.3 Atténuation du signal sur la distance

Pour des fréquences inférieures à 50 kHz, l'affaiblissement d'un signal peut être décrit par la formule suivante [2] :

$$a(f) = 32,8 * 10^{-6} * f \quad \text{Ou } a(f) \text{ est l'affaiblissement en dB/m et } f \text{ la fréquence en Hz}$$

L'atténuation à une distance 'd' s'écrit alors :

$$Att(d, f) = d * a(f) \quad d \text{ s'exprimant en mètre, } Att(d, f) \text{ s'exprime alors en dB}$$

Par exemple, dans le cas de la coupe de robotique où la table fait 3 m de long et avec des ultrasons à 40 kHz, l'atténuation à 3m du signal sera de :

$$Att(3, 40kHz) = d * a(40kHz) = 3 * 32,8 * 10^{-6} * 40000 = 3,936 \text{ dB}$$

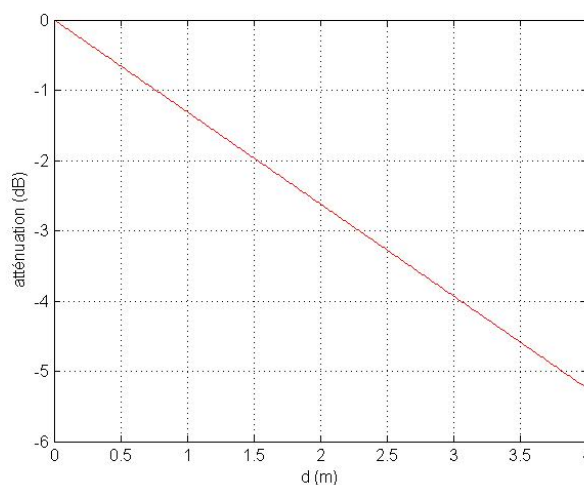


Figure 11 : atténuation des US en fonction de la distance

3.1.4 Puissance du signal

La puissance du signal à l'émission est défini comme :

$$P = \frac{V^2}{R} \quad \text{Exprimé en Watt}$$

Avec :

V : la tension d'alimentation de l'émetteur

R : l'impédance de l'émetteur

Grâce à l'atténuation calculée précédemment, on peut calculer la puissance du signal en fonction de la distance de la manière suivante :

$$P(d) = \frac{(V - 10^{(-Att(d,f))})^2}{R} \quad \text{Exprimé en Watt}$$

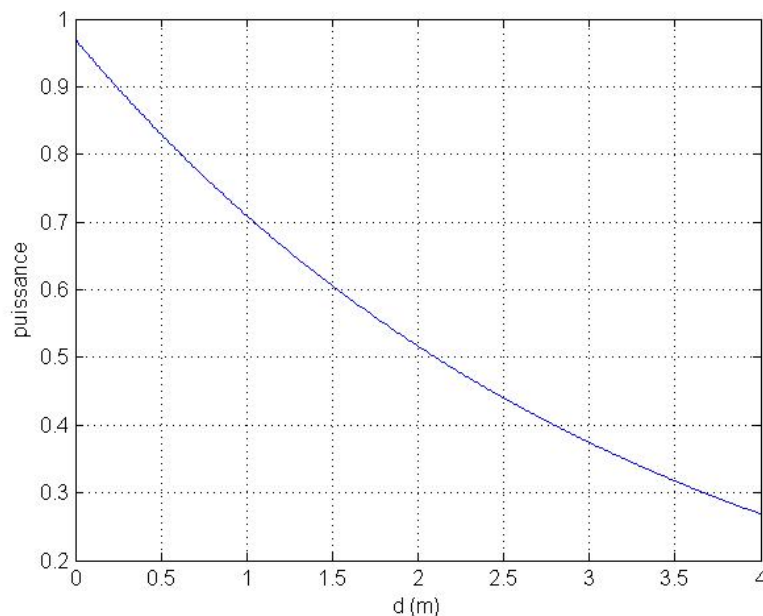


Figure 12 : Puissance en fonction de la distance

Courbe réalisé pour un émetteur alimenté fonctionnant en 30 V et ayant une impédance de 1000 Ω.

Connaissant la sensibilité du récepteur, on peut alors déterminer la portée du système tant que la distance 'd' respect l'inégalité suivante :

$$P(d)_{dB} \geq S$$

Avec :

S : la sensibilité du récepteur en dB

$P(d)_{dB}$: la puissance du signal à une distance d en dB

3.2 La chaîne d'émission

La chaîne d'émission se situe sur le robot, elle a pour but d'émettre le signal ultrasonique à destination des balises. En pratique, il ne suffit pas seulement d'envoyer des ultrasons, car les balises doivent pouvoir être sûr que le signal qu'elles reçoivent provient bien du système de localisation du robot et non pas d'un autre d'un autre système ou d'un autre robot. Il faudra donc pour cela envoyer une trame de données codée sur le signal ultrasonique transmit. Nous allons donc voir comment créer le signal ultrason à émettre, et comment coder une trame de données dessus.

3.2.1 Générer un signal à la fréquence adaptée

Pour pouvoir émettre des ultrasons, il faut fournir aux émetteurs un signal à la bonne fréquence. Les émetteurs les plus courant sur le marché fonctionnent à 40 kHz, mais on peut aussi en trouver fonctionnant à des fréquences plus faibles ou plus élevées (25.5 kHz, 32 kHz, 125 kHz,...).

Deux solutions sont alors possibles :

La première consiste à générer ce signal avec le générateur de signaux PWM intégré au microcontrôleur (si celui-ci en possède une et est capable de générer la fréquence appropriée). Il faut alors réglé le rapport cyclique (duty cycle)¹ du signal à la moitié de sa période afin d'obtenir un signal périodique carré. L'avantage de cette solution est qu'elle ne nécessite aucun composant supplémentaire.

La deuxième solution consiste à utiliser un composant particulier pour générer cette fréquence. On utilisera alors un composant bien connu : le NE555. Il s'agit d'un composant spécialisé qui permet de générer toute sorte de signaux. Le type du signal produit dépendra du montage électronique réaliser avec le composant. Pour notre besoin, nous choisissons de générer un signal carré. Il faudra alors réaliser le montage suivant [5] :

¹ Le duty cycle, ou rapport cyclique est le rapport du temps à 1 d'un signal binaire par rapport à sa période

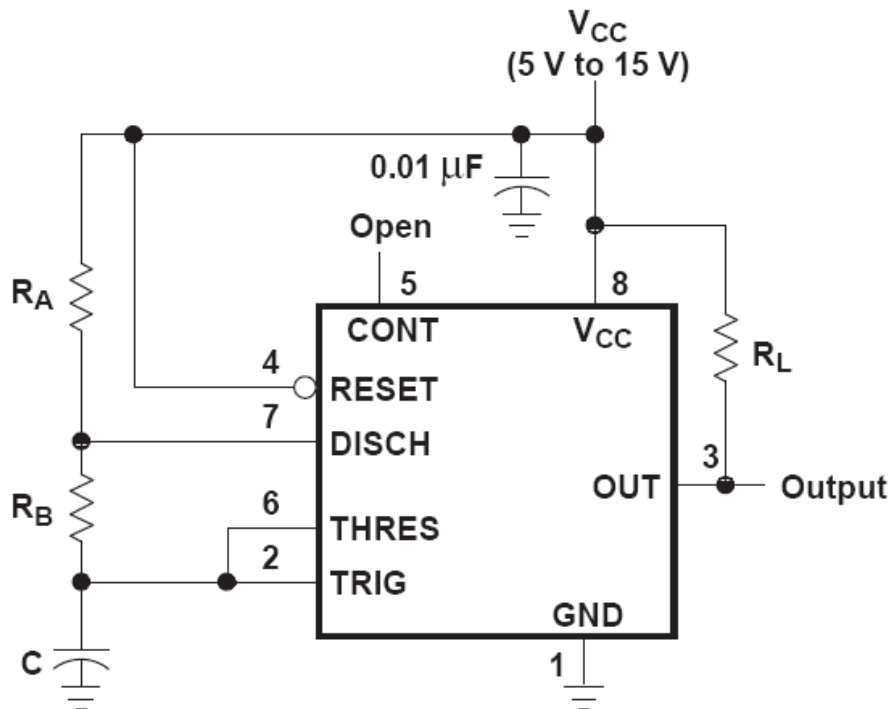


Figure 13 : Montage d'un NE555 pour générer un signal périodique carré

R_L est une résistance de charge de $1\text{ k}\Omega$

La fréquence du signal produit dépend alors des formules suivantes :

- Le temps du signal à l'état haut est défini par :

$$t_H = 0.693(R_A + R_B)C$$

- Le temps du signal à l'état bas :

$$t_L = 0.693R_B C$$

- La période et la fréquence sont alors :

$$T = t_H + t_L = 0.693(R_A + 2R_B)C$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)C}$$

On pratique, on souhaite un signal de rapport cyclique $1/2$, il faut donc $R_A \ll R_B$ afin que t_H diffère très peu de t_L . Un rapport 1000 permet d'avoir un rapport cyclique de $1/2$.

Exemple pour obtenir une fréquence de 40 kHz :

On prend par exemple : $R_A = 100\ \Omega$ et $R_B = 100\text{ k}\Omega$

On trouve alors :

$$C = 1,8\text{ pF}$$

Le signal ainsi créé ne contient en soi aucune information puisqu'il est périodique, il nous faut donc coder l'information sur ce signal.

3.2.2 Codage de l'information sur la porteuse

Il nous faut maintenant choisir comment codé l'information sur ce signal porteur. La solution est d'utiliser une modulation pour coder les données sur la porteuse.

La solution la plus simple consiste à utiliser une modulation de type OOK (On-Off Keying). Ce type de modulation consiste à émettre la fréquence porteuse lorsque l'on souhaite émettre un '1' logique, et ne rien émettre lorsque l'on souhaite émettre un '0' logique.

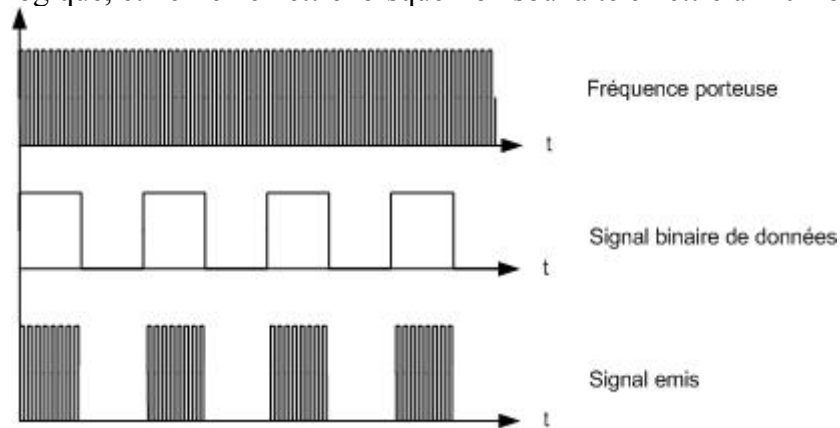


Figure 14 : principe de la modulation OOK

Il suffit alors en réception de détecter s'il y a ou non réception de la fréquence porteuse afin de reconnaître les bits '1' et '0' et ainsi de retrouver l'information originel.

3.2.3 Protocole de communication

Nous avons choisi d'utiliser un protocole RS-232 (liaison série) pour communiquer sur l'architecture à ultrasons. Nous choisissons ce protocole, car il permet de transmettre facilement tous types de données et est simple à mettre en place. De plus, la plupart des microcontrôleurs intègrent au moins un UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter). Nous n'avons donc pas à nous occuper de la gestion du protocole de communication. Il nous suffira, pour l'émission d'utiliser le signal Tx (le signal transmis par l'UART) comme signal de données dans notre chaîne d'émission, et dans la chaîne de réception, d'utiliser le signal reçu pour Rx (le signal reçu par l'UART).

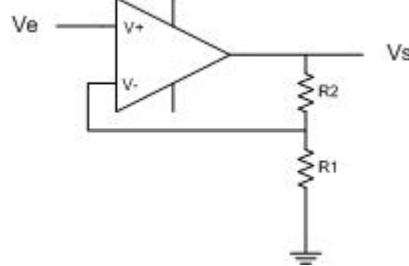
En ce qui concerne la commande des balises et le retour des informations vers le robot, notre choix c'est porté sur une liaison HF car c'est le type de signal le moins perturbable dans les conditions d'utilisation lors de la coupe de robotique. Pour cela nous avons également choisi un protocole RS-232 et nous avons utilisé un module radio de chez Radiometrix : le SPM2-433-28 [4]. Ce module permet de réaliser une liaison série de type RS-232 sans fil. En effet il intègre un UART RS-232 pour échanger des données avec un microcontrôleur et un module radio à 433 Mhz pour communiquer avec les autres modules de cette famille qui sont à porté. Il nous suffit donc de placer un de ces modules sur chacune de nos cartes (la carte de localisation et les balises).

Il nous faudra donc un microcontrôleur pouvant gérer deux UARTs simultanément. Pour cela, nous avons choisi le PIC18F6722 [7].

3.2.4 Mise en forme du signal / amplification du signal

La mise en place de cette modulation est très simple, puisqu'il suffit de multiplier le signal binaire de données par le signal porteur créé précédemment. Pour cela, il suffit d'utiliser une simple porte logique ET.

Il faut ensuite amplifier ce signal afin de pouvoir utiliser les émetteurs ultrasons au maximum de leurs possibilités. Pour cela, on utilise un AOP (Amplificateur Opérationnel), monter comme sur le schéma ci-dessous afin de réaliser l'amplification.



Le gain de montage est alors le suivant :

$$G = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

On adaptera alors le gain de cet amplificateur en fonction de la tension du signal en entrée, qui sera de 5V puisqu'il provient d'une porte logique ET, et de la tension souhaité en sortie, qui elle dépendra la tension d'alimentation des émetteurs ultrasons utilisés.

3.2.5 Mode d'émission

Rappelons que l'on souhaite émettre les ultrasons dans toutes les directions autour du robot. Pour cela, deux techniques sont possibles.

La première consiste à placer les émetteurs sur un cercle centré sur le centre du robot. Le nombre d'émetteur à utiliser dépendra alors de la taille du cercle utilisé (de la place disponible) et de l'angle du cône d'émission des émetteurs choisis. Le but étant d'émettre tout autour du robot. Si l'on appelle N le nombre d'émetteur et α l'angle d'émission d'un émetteur, on peut alors déterminer le nombre d'émetteur de la manière suivante :

$$N = \frac{360}{\alpha}$$

Et l'espacement β des émetteurs sur le cercle :

$$\beta = \frac{360}{N}$$

La deuxième méthode consiste quant à elle à n'utiliser qu'un seul émetteur et un réflecteur conique pour rayonner les ultrasons de manière omnidirectionnelle [2] [6].

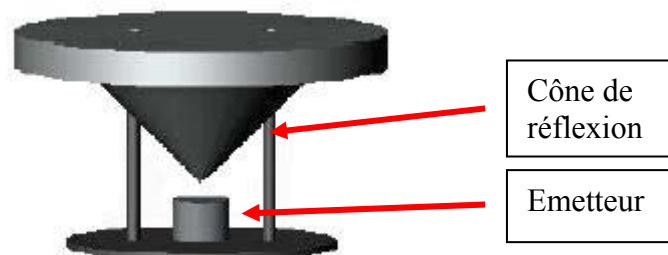


Figure 15 : émetteur ultrasonique et son cône de réflexion

D'après les tests réalisés avec des cônes en plâtre, plomb et aluminium [2] [6], la matière dans laquelle est réalisé le cône a très peu d'influence sur la propagation du signal.

Contrainte :

Le cône doit être parfaitement centré sur l'émetteur

Avantages :

Cette solution n'utilise qu'un seul émetteur, ce qui permet un gain de place, d'autre part, cela permet de diffuser uniformément le lobe principal (celui qui porte le plus de puissance) du signal.

Rappel :

$$P = \frac{V^2}{R} \quad \text{Exprimé en Watt}$$

La puissance angulaire peut alors être défini comme suit :

$$P_{ang} = \frac{P}{360} \quad \text{Exprimé en Watt / degré}$$

3.3 La chaîne de réception

La chaîne de réception se trouve sur les balises, son rôle est de récupérer le signal émis par le robot et de l'interpréter. Pour cela, il faut d'abord filtrer le signal afin de ne garder que la fréquence qui nous intéresse, puis il faudra décoder l'information présente sur la fréquence porteuse.

3.3.1 Filtrage

Tout d'abord il faut filtrer le signal que l'on reçoit afin de ne garder que le signal qui nous intéresse et d'éliminer, en tous cas d'atténuer, les autres fréquences captées. Pour cela nous allons utiliser deux filtres en cascade de type *Sallen Kay* d'ordre 2. Le premier sera un filtre passe bas, et sera suivi d'un passe haut, le tout afin de réaliser un filtre passe bande.

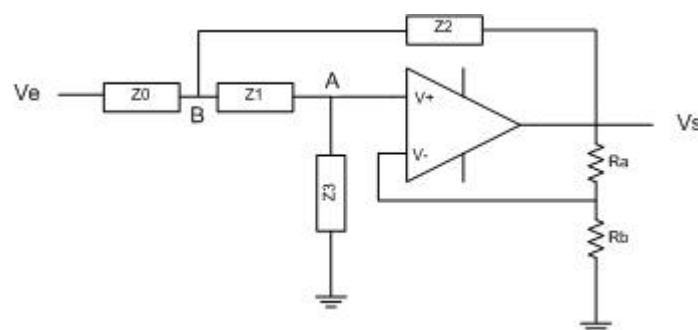


Figure 16 : Schéma général d'un filtre de type Sallen Kay

Résolution du système :Calcul de V_A :

$$V^+ = V^-$$

$$V^- = \frac{RaVs}{Ra + Rb}$$

$$\Rightarrow V_A = V^+ = V^- = \frac{RaVs}{Ra + Rb} = \frac{V_S}{K} \quad \text{avec: } K = \frac{Ra + Rb}{Ra} = 1 + \frac{Rb}{Ra}$$

Calcul de V_B :

$$V_B = V_A \frac{Z_1 + Z_3}{Z_3} = \frac{V_S}{K} \frac{Z_1 + Z_3}{Z_3}$$

En appliquant le théorème de Millman (loi des nœuds) en B on trouve également :

$$V_B = \frac{\frac{Ve}{Z_0} + \frac{V_A}{Z_1} + \frac{Vs}{Z_2}}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}}$$

En remplaçant V_A et V_B par leur expression en fonction de V_S , on trouve alors la fonction de transfert suivante :

$$H = \frac{Vs}{Ve} = K \frac{Z_2 Z_3}{Z_0 Z_3 (1 - K) + Z_0 (Z_1 + Z_2) + Z_2 (Z_1 + Z_3)}$$

Filtre passe bas :Pour avoir un filtre passe bas, on prendra des résistances pour Z_0 et Z_1 , et des capacités pour Z_2 et Z_3 .

On aura donc le schéma suivant :

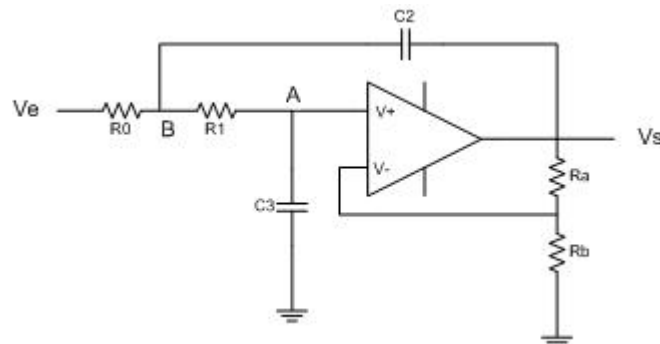


Figure 17 : Schéma d'un filtre passe bas de type Sallen Kay

La fonction de transfert sera alors :

$$H = K \frac{1}{C_2 C_3 (j\omega)^2}$$

$$R_0 \frac{1}{jC_3 \omega} (1-K) + R_0 \left(R_1 + \frac{1}{jC_2 \omega} \right) + \frac{1}{jC_2 \omega} \left(R_1 + \frac{1}{jC_3 \omega} \right)$$

$$\Leftrightarrow H = K \frac{1}{R_0 C_2 (1-K) j\omega + R_0 R_1 C_2 C_3 (j\omega)^2 + R_0 C_3 j\omega + R_1 C_3 j\omega + 1}$$

$$\Leftrightarrow H = K \frac{1}{1 + j\omega (R_0 C_2 (1-K) + R_0 C_3 + R_1 C_3) + R_0 R_1 C_2 C_3 (j\omega)^2}$$

Sachant que la forme général d'un filtre passe bas d'ordre 2 est :

$$H = K \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{Q\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0} \right)^2}$$

On aura donc un filtre avec les caractéristiques suivantes :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_0 R_1 C_2 C_3}}$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_0 R_1 C_2 C_3}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_0 R_1 C_2 C_3}}{(R_0 C_2 (1-K) + R_0 C_3 + R_1 C_3)}$$

On obtient alors une fréquence de coupure et un facteur de qualité (Q) tout deux dépendant de nos composants R et C. Ce qui n'est pas du tout pratique car on souhaiterait pouvoir régler ces paramètres indépendamment l'un de l'autre.

Posons :

$$C = C_2 = C_3$$

$$R = R_0 = R_1$$

Les paramètres f_0 et Q deviennent alors :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$Q = \frac{1}{3-K} \quad \text{rappel: } K = 1 + \frac{Rb}{Ra}$$

Ainsi on pourra régler ces paramètres de manière indépendante.

Exemple pour un filtre passe bas avec $f_0 = 40 \text{ kHz}$:

Il suffit de choisir la valeur de condensateurs, puis de calculer celle des résistances.

On choisi arbitrairement $C = C_2 = C_3 = 10 \text{ nF}$

Il ne nous reste alors plus qu'à déterminer la valeur de R :

$$f_0 = 40.10^3 \text{ Hz} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\omega_0 = 251,327.10^3 \text{ rad / s}$$

$$R = \frac{1}{40.10^3 * 2\pi * C} = 397,88 \Omega$$

On choisi un $Q=2/3$ soit $K = 1,5$. Cela implique $R_a = 2 * R_b$

Avec ces valeurs, on obtient un filtre passe bas avec la réponse suivante :

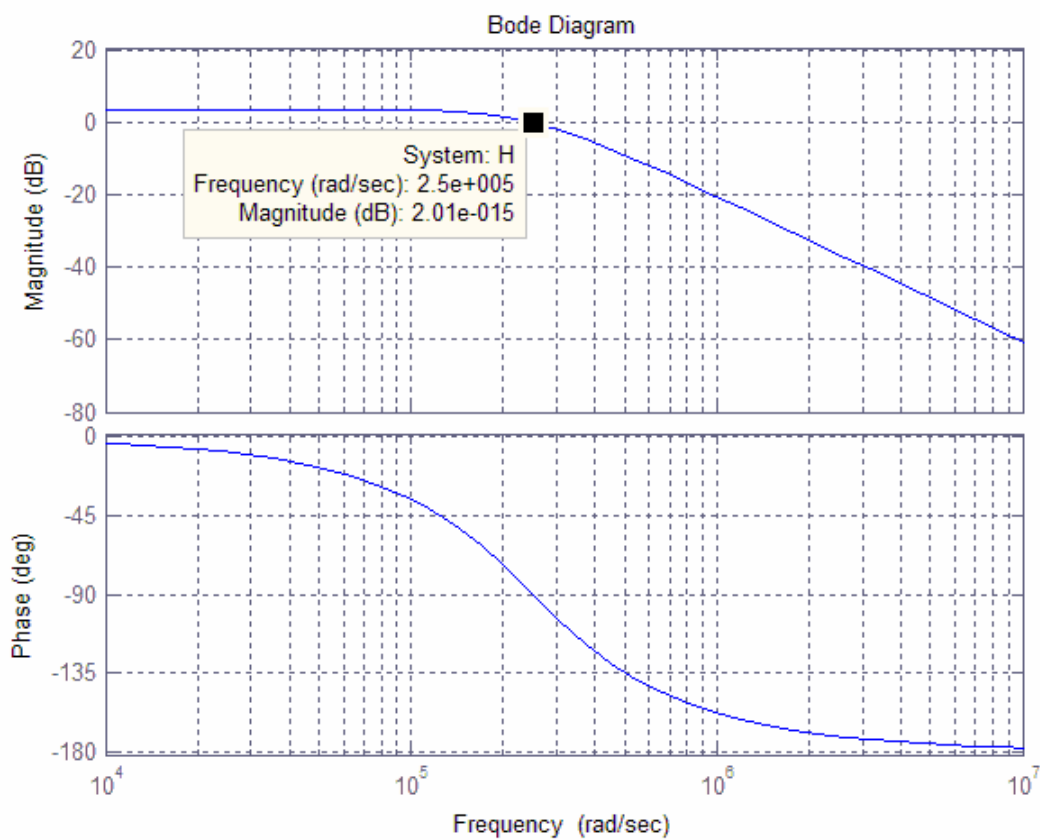


Figure 18 : Réponse du filtre passe bas

Filtre passe haut :

Pour réaliser un filtre passe haut à partir d'un montage Sallen Kay, on prendra des capacités pour Z_0 et Z_1 et des résistances pour Z_2 et Z_3 .

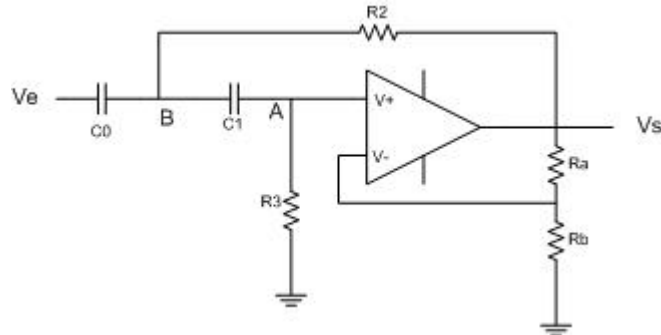


Figure 19 : Schéma d'un filtre passe haut de type Sallen Kay

La fonction de transfert du filtre passe haut sera :

$$H = \frac{V_s}{V_e} = K \frac{R_2 R_3}{\frac{1}{jC_0 \omega} R_3 (1 - K) + \frac{1}{jC_0 \omega} \left(\frac{1}{jC_1 \omega} + R_2 \right) + R_2 \left(\frac{1}{jC_1 \omega} + R_3 \right)}$$

$$\Leftrightarrow H = K \frac{C_0 C_1 R_2 R_3 (j\omega)^2}{1 + (C_1 R_3 (1 - K) + C_1 R_2 + C_0 R_2) j\omega + C_0 C_1 R_2 R_3 (j\omega)^2}$$

Sachant que :

$$H = K \frac{\left(\frac{j\omega}{\omega_0} \right)^2}{1 + \frac{j\omega}{Q\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0} \right)^2}$$

On retrouve alors les mêmes paramètres que pour le filtre passe bas :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_0 C_1 R_2 R_3}}$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_0 C_1 R_2 R_3}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{C_0 C_1 R_2 R_3}}{(C_1 R_3 (1 - K) + C_1 R_2 + C_0 R_2)}$$

En utilisant le même principe pour choisir les composants :

$$C = C_0 = C_1$$

$$R = R_2 = R_3$$

On retrouve alors :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$Q = \frac{1}{3 - K}$$

En utilisant les mêmes valeurs pour les paramètres f_0 et Q ainsi que pour les composants R et C , on obtient alors un filtre passe haut avec la réponse suivante :

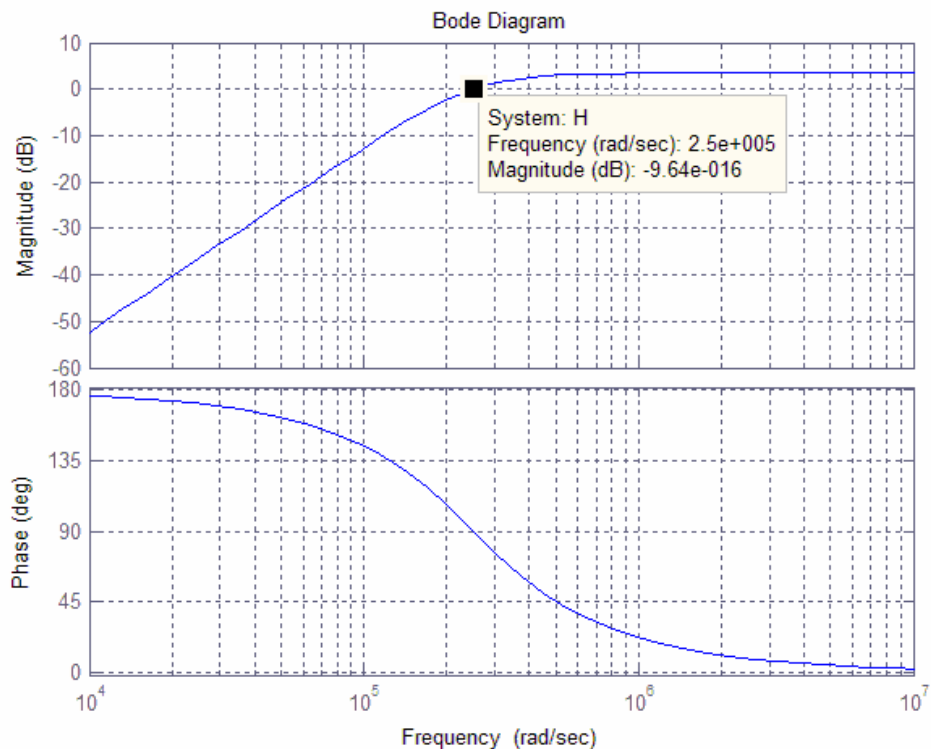


Figure 20 : Réponse du filtre pas haut

En mettant ces deux filtres en cascade, on obtient alors un filtre passe bande ayant la réponse suivante :

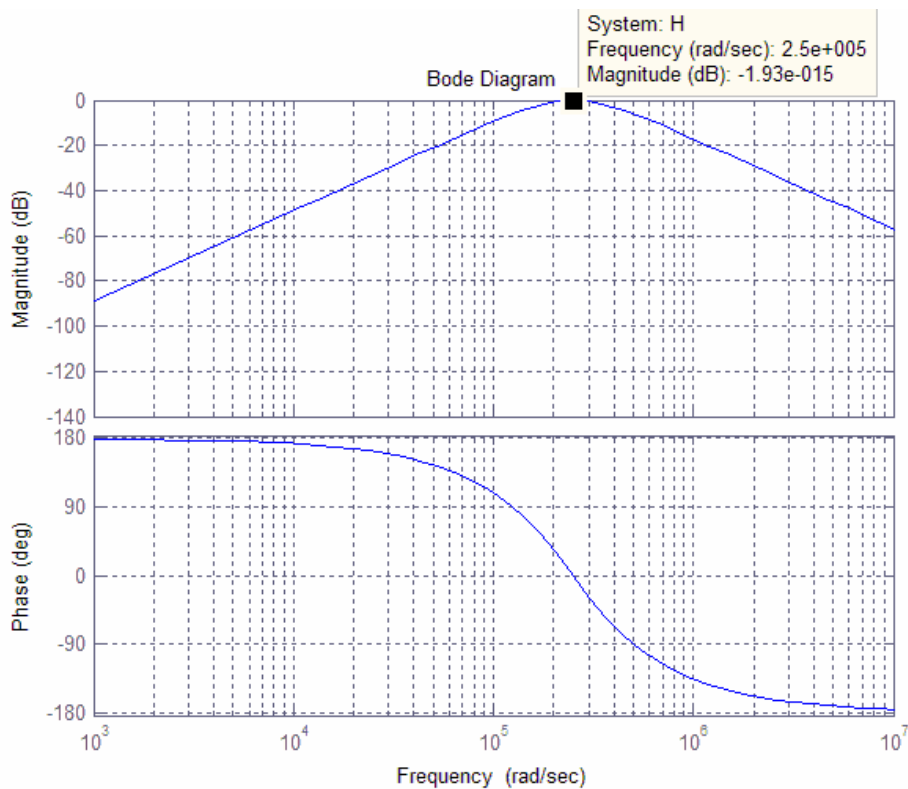


Figure 21 : filtre passe bande réalisé par la mise en cascade du passe bas et du passe haut

Le filtre ainsi obtenu permet d'atténuer toutes les fréquences, sauf la fréquence f_0 , fréquence centrale de notre filtre, ce qui correspond bien à notre attente.

Remarque :

Ce filtre à une bande passante très étroite, ce qui nous permet de ne garder que la fréquence sélectionnée f_0 . Si l'on souhaite une bande passante plus large, on pourra soit :

- augmenter le gain K du filtre, mais comme on l'a vu, le gain influence directement le coefficient de qualité Q . le gain K ne devra donc pas être supérieur ou égale à 3 sous peine de rendre le filtre instable,
- réduire la fréquence de coupure du filtre passe bas et augmenter celle du filtre passe haut, ce qui aura pour effet d'élargir la bande passante.

3.3.2 Amplification

Ensuite, afin d'amplifier le signal reçu à un niveau analysable, on place un étage d'amplification à base d'AOP avec un montage type amplificateur non inverseur.

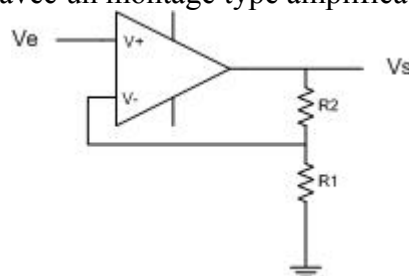


Figure 22 : Amplificateur non inverseur

La fonction de transfert de ce montage est :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_e$$

En pratique, on pourra remplacer R_1 ou R_2 par un potentiomètre afin de pouvoir ajuster manuellement le gain nécessaire.

Afin de réaliser un système auto ajustable, on pourra utiliser un potentiomètre numérique permettant alors au système de faire varier ce gain de manière autonome. Pour cela, il faudra piloter ce potentiomètre en fonction du niveau de tension du signal en sortie de l'AOP par rapport à celui souhaité. Le micro contrôleur devra donc recevoir sur une entrée analogique le signal en sortie de l'amplificateur, et on comparant cette valeur à celle attendu, il pourra faire varier le potentiomètre pour ajuster le gain du système.

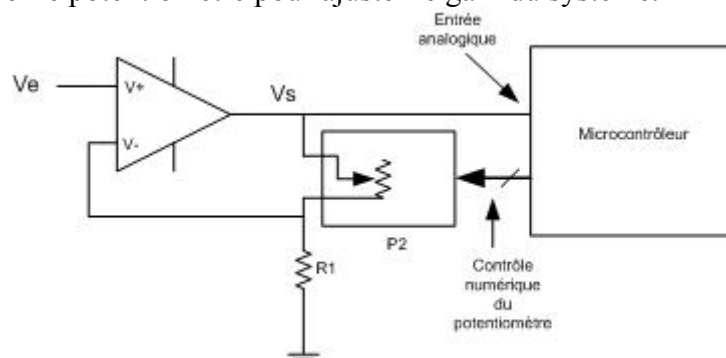


Figure 23 : Amplificateur avec réglage numérique

La fonction de transfert est alors :

$$V_s = \left(1 + \frac{P_2}{R_1}\right) V_e$$

3.3.3 Redressement et mise aux niveaux logiques

Une fois les étapes précédentes franchies, on retrouve alors un signal interprétable. C'est-à-dire un signal proche de celui émis. En émission nous avons utilisé une modulation de type OOK. Cela signifie qu'en réception nous devons interpréter un signal reçu comme un '1' logique, et pas de signal comme un '0' logique. Pour faire cette mise en forme, nous réalisons le montage suivant avec en entrée le signal provenant de l'amplificateur précédent. On aura alors en sortie de ce montage le signal binaire reconstitué.

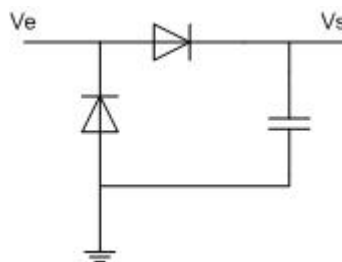


Figure 24 : Redresseur

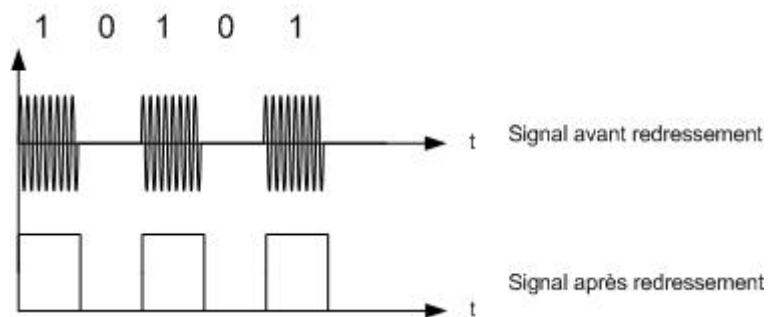


Figure 25 : Chronogrammes avant et après redressement

Comme nous utilisons un UART, Il nous faut avoir des signaux logiques avec des valeurs constantes au niveau logique TTL. Pour cela il suffit d'utiliser une porte logique (par exemple une porte ET) avec le signal provenant du redresseur en entrée, et la sortie pourra alors être envoyée directement sur la voie de réception (Rx) de l'UART du microcontrôleur de réception.

Après cette étude, on peut alors proposer le schéma bloc suivant :

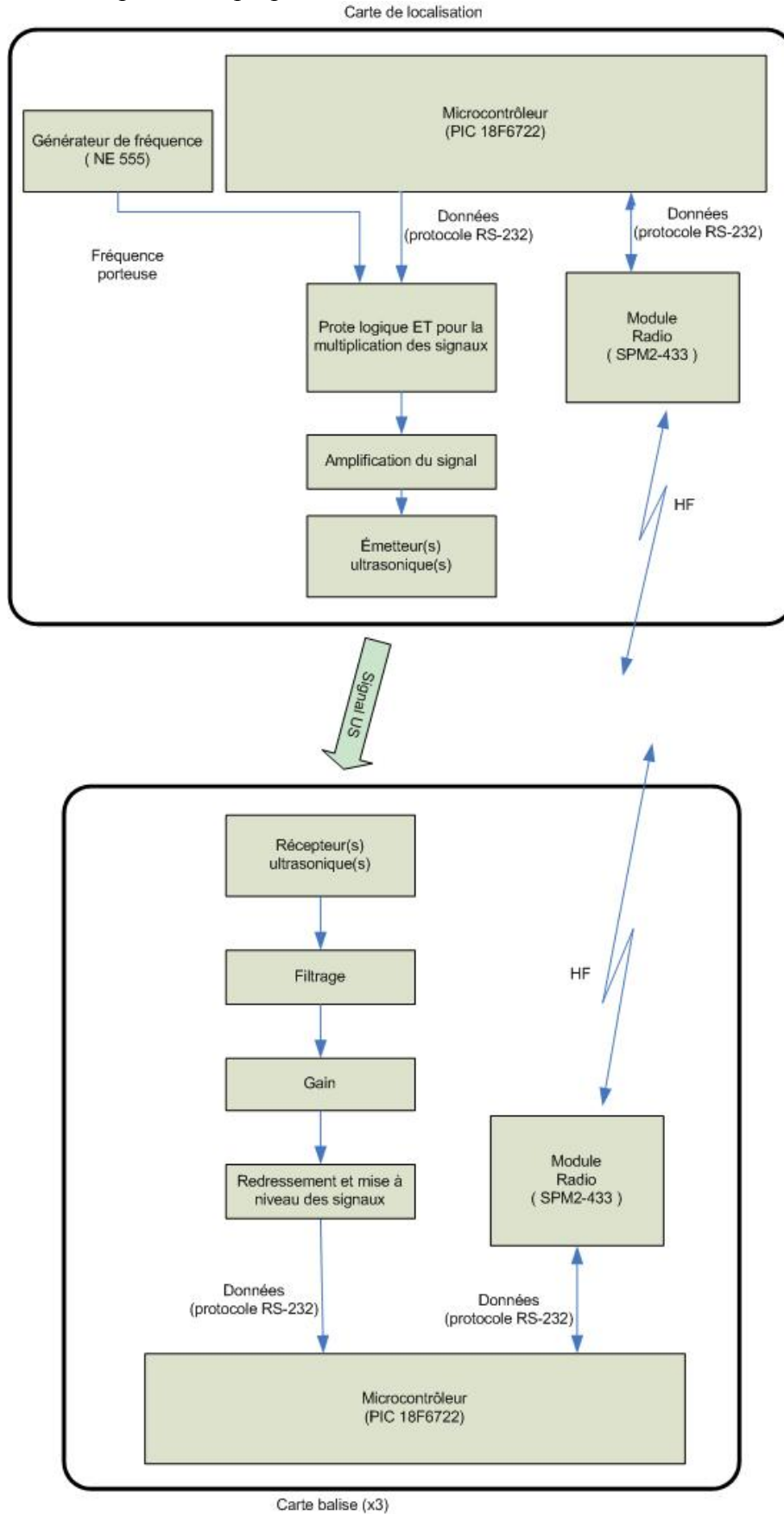


Figure 26 : schéma blocs global

Conclusion

Cette étude a permis d'étudier en profondeur la problématique de positionnement d'un robot mobile dans un environnement restreint et prédéfini. Ce qui est le cas dans le cadre de la coupe de robotique Eurobot. Pour cela, nous avons passé en revue les systèmes majeurs utilisés à l'heure actuelle, ce qui a permis d'en avoir une vue d'ensemble, avec les avantages et inconvénients de chaque solution. Cela nous a permis d'avoir les clés pour choisir le système à utiliser en fonction de nos propres contraintes et objectifs.

Nous avons choisi de concevoir un système utilisant des ultrasons pour mesurer les distances. Nous avons fait ce choix, d'une part car il s'agit d'une solution bon marché et que le budget de notre club de robotique est plutôt serré, et d'autre part, comme nous l'avons vu la mesure des distances est une solution qui tolère des ratés dans les mesures et permet donc d'être moins sensible aux perturbations du signal ultrason. Perturbations qui pourraient causer la perte et la non détection de certaines trames de données, et donc des mesures qui en découlent.

Enfin, nous avons donc réalisé l'étude détaillée de ce système afin de pouvoir concevoir point par point un tel système de localisation complet et fonctionnel, ce qui nous a permis d'arriver au schéma blocs global présenté [Figure 27](#) (page précédente).

Une fois cette étude faite, il ne reste alors plus que 3 étapes pour achever un tel projet :

- Réaliser le schéma électronique complet
- Réaliser le routage des cartes puis le soudage des composants
- Et enfin programmer les micros contrôleurs

Table des figures

Figure 1 : schéma de la table de jeu	4
Figure 2 : Mesure des distances	5
Figure 3 : Mesure des angles.....	5
Figure 4 : Schéma de principe d'un système à ultrason.....	6
Figure 5 : schéma de principe d'un système infrarouge	7
Figure 6 : schéma de principe d'un système à Laser.....	8
Figure 7 : Représentation des angles et distances utilisés lors de la mesure des distances.....	11
Figure 8 : Représentation des angles et distances utilisés lors de la mesure des angles	14
Figure 9 : vitesse des US en fonction de la température	19
Figure 10 : erreur sur la distance mesurée en fonction de la température.....	20
Figure 11 : atténuation des US en fonction de la distance	20
Figure 12 : Puissance en fonction de la distance.....	21
Figure 13 : Montage d'un NE555 pour générer un signal périodique carré.....	23
Figure 14 : principe de la modulation OOK.....	24
Figure 15 : émetteur ultrasonique et son cône de réflexion	25
Figure 16 : Schéma général d'un filtre de type Sallen Kay	26
Figure 17 : Schéma d'un filtre passe bas de type Sallen Kay	27
Figure 18 : Réponse du filtre passe bas.....	29
Figure 19 : Schéma d'un filtre passe haut de type Sallen Kay	30
Figure 20 : Réponse du filtre pas haut.....	31
Figure 21 : filtre passe bande réalisé par la mise en cascade du passe bas et du passe haut....	31
Figure 22 : Amplificateur non inverseur	32
Figure 23 : Amplificateur avec réglage numérique.....	32
Figure 24 : Redresseur.....	33
Figure 25 : Chronogrammes avant et après redressement.....	33
Figure 27 : schéma blocs global.....	34

Références

[1] Règlement Eurobot 2007 :

<http://www.eurobot.org/fr/rules.php>

[2] Frédéric Rivard, « Localisation relative de robots mobiles opérant en groupe », Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec Canada), 2005

<http://www.gel.usherbrooke.ca/laborius/papers/MemoireRivard.pdf>

[3] Filtre de Sallen Kay

<http://focus.ti.com/lit/an/sloa024b/sloa024b.pdf>

<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electro/sallen.pdf>

[4] Module radio SPM2 de RADIOMETRIX :

<http://www.radiometrix.co.uk/products/spm2.htm>

[5] documentation du composant NE555 :

http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/N/E/5/5/NE555.shtml

[6] Jonathan Bisson, François Michaud, Dominic Létourneau, « Relative Positioning of Mobile Robots Using Ultrasounds », Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec Canada)

[7] doc PIC18F6722

<http://www.microchip.com/>

Ou plus directement :

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39646b.pdf>

[8] Définition des ultrasons :

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Ultrason>

[9] Document sur un système de balise réalisé par un participant à la coupe Eurobot édition 2006 :

http://fsfcayne.free.fr/balises_eurobot06/Balises_CPLN_Eurobot_2006.pdf

Annexe : Codes Matlab pour les courbes présentées

Figure 9 : Vitesse de déplacement des US en fonction de la température :

```
t = 10:0.1:30; % variation de température entre 10 et 30°C par pas de 0,1
v = 331.3176 * sqrt(1 + (t./273)); % la vitesse en fonction de la température
plot(t, v); % tracé de la courbe
```

Figure 10 : Erreur sur la distance mesurée en fonction de la température :

```
% vitesse du son par défaut :
v0 = 344;
% variation de la température :
T2 = 10:5:30;
% temps de propagation :
t = 0:0.001:0.011;
% vitesse correspondant à chaque température :
V2= 331.3176 * sqrt(1 + T2/273);
% calcul de la distance approximé :
d0 = t .* v0;
% calcul des distances réelles :
D1 = V2(1) .* t;
D2 = V2(2) .* t;
D3 = V2(3) .* t;
D4 = V2(4) .* t;
D5 = V2(5) .* t;
% calcul de l'erreur :
err1 = D1 - d0;
err2 = D2 - d0;
err3 = D3 - d0;
err4 = D4 - d0;
err5 = D5 - d0;
plot(d0,err1,'r',d0,err2,'b',d0,err3,'m',d0,err4,'g',d0,err5,'k')
xlabel('distance (m)')
ylabel('erreur (m)')
grid on
legend('à 10°C','à 15°C','à 20°C','à 25°C','à 30°C', 'Location',
'SouthWest')
```

Figure 11 : Atténuation des US en fonction de la distance :

```
pas = 0.01
d = 0:pas:4;
f1 = 40e3;
% affaiblissement :
a1 = 32.8e-6 * f1;
% atténuation en fonction de la distance :
att1 = -d * a1;
figure(1)
plot(d,att1,'r')
xlabel('d (m)')
ylabel('atténuation (dB)')
grid on
```

Figure 12 : Puissance du signal US en fonction de la distance :

```

pas = 0.01
d = 0:pas:4;
V = 30;
R = 1000;
f1 = 40e3;
% affaiblissement :
a1 = 32.8e-6 * f1;
% atténuation en fonction de la distance :
att1 = -d * a1;
% puissance en fonction de la distance :
P = V/R - 10.^(att1/10);
pdisp = -P;
plot(d,pdisp,'b')
xlabel('d (m)')
ylabel('puissance')
grid on

```

Figure 18 : Filtre passe bas de type Sallen Kay :

```

function passebas(K, R0, R1, C2, C3)

A = R0*C2*(1-K) + R0*C3 + R1*C3;
B = R0*R1*C2*C3;
% fréquence de coupure :
Fc = 1/(2*pi*sqrt(R0*R1*C2*C3))

s = TF('s');
% fonction de transfert :
H = K/(1 + A*s + B*s^2);
bode(H);
grid on;

```

Figure 20 : Filtre passe haut de type Sallen Kay :

```

function passehaut(K, C0, C1, R2, R3)
close all

A = C1*R3*(1-K) + C1*R2 + C0*R2;
B = C0*C1*R2*R3;
C= C0*C1*R2*R3
% fréquence de coupure :
Fc = 1/(2*pi*sqrt(C0*C1*R2*R3))

s = TF('s');
% fonction de transfert :
H = K*((C*s^2)/(1 + A*s + B*s^2));
bode(H);
grid on;

```

Figure 21 : Filtre passe bande résultant :

```
function passebande(K,R0,R1,C2,C3,C0,C1,R2,R3)

A = R0*C2*(1-K) + R0*C3 + R1*C3;
B = R0*R1*C2*C3;
C = C1*R3*(1-K) + C1*R2 + C0*R2;
D = C0*C1*R2*R3;
% fréquence de coupure basse :
Fc_bas =1/(2*pi*sqrt(R0*R1*C2*C3))
% fréquence de coupure haute :
Fc_haut =1/(2*pi*sqrt(C0*C1*R2*R3))
% fréquence centrale :
Fc = (Fc_bas + Fc_haut)/2

s = TF('s');
% fonction de transfert :
H = (K/(1 + A*s + B*s^2)) * (K*((D*s^2)/(1 + C*s + D*s^2)));
bode(H);
grid on;
```