

LFSAB1508 : RAPPORT FINAL

Système de positionnement à bande ultra-large (UWB)



Année Académique 2017-2018
Groupe 9

Fievez Thibault - 2545-1500
Santacatterina Simon - 2156-1500
Van der Wielen Loïc - 5487-1500
Vryghem Pauline - 6159-1500

Table des matières

1	Introduction	2
2	Spécification du système	4
3	Etude fonctionnelle	5
3.1	Principe de localisation	5
3.2	Estimation de TDOA avec la corrélation	6
3.3	Effet des obstacles sur le champ émis	8
4	Implémentation	11
4.1	Vision globale du fonctionnement des méthodes implémentées	11
4.1.1	Extraction des TDOA	11
4.1.2	Localisation	17
4.1.3	Trajectoire	18
4.2	Validation des résultats intermédiaires	21
4.2.1	Données extraites de l'étape d'extraction	21
4.2.2	Données de localisation	21
4.2.3	Trajectoire	22
5	Réalisation et caractérisation du système	24
6	Conclusion	25
7	Bibliographie	26
8	Annexe	27
8.1	Code MATLAB	27
8.1.1	Script d'exécution	27
8.1.2	Exécution de la multilatération	27
8.1.3	Élimination des outliers, approximation de la trajectoire et affichage des résultats	29

1 Introduction

Les systèmes de localisation par multilatération ont déjà fait leurs preuves lors de la Seconde Guerre mondiale en l'occurrence avec le système GEE anglais. D'autres applications de ce système furent encore utilisées jusqu'à récemment¹ mais finirent par être remplacées par des systèmes de type GPS faisant appel à des satellites.

A l'ère du smartphone et de la connectivité, l'utilité de la multilatération resurgit grâce à la possibilité de fonctionner, contrairement aux systèmes satellitaires, à l'intérieur de bâtiments et de manière plus précise que ces derniers. En outre, la multilatération trouve son utilité dans de nombreux domaines tels que la conquête spatiale grâce à sa facilité de mise en oeuvre ou encore l'industrie pour le suivi de colis.

Dans le cadre de ce projet, les techniques mises en oeuvre ont pour but d'approximer la trajectoire que suit une balise émettrice UWB². La multilatération est basée sur l'utilisation de TDOA (Time Difference Of Arrival). Une première grande partie de ce projet consiste donc à l'extraction de celles-ci à partir de signaux reçus. Il est ensuite question d'approximer les points de la trajectoire numériquement. Enfin, dans le but de se rapprocher au mieux du positionnement réel de l'émetteur, les points extrêmes dûs aux potentiels obstacles sont traités par des méthodes numériques implémentées sur base de critères statistiques.

La figure 1 illustre la structure du traitement des données et reprend les principales étapes du raisonnement. Soit l'extraction, la localisation et le calcul de la trajectoire. Chacune de ces parties clés seront étudiées et développées dans la suite du document par une approche à la fois qualitative et quantitative. En outre ce rapport a également pour but de familiariser le lecteur aux notions de télécommunications et aux notions mathématiques nécessaires pour la compréhension de la réalité "physique" sous-jacente à l'utilisation d'onde électromagnétique.

1. 2010 pour LORAN-C

2. Ultra Wide Band

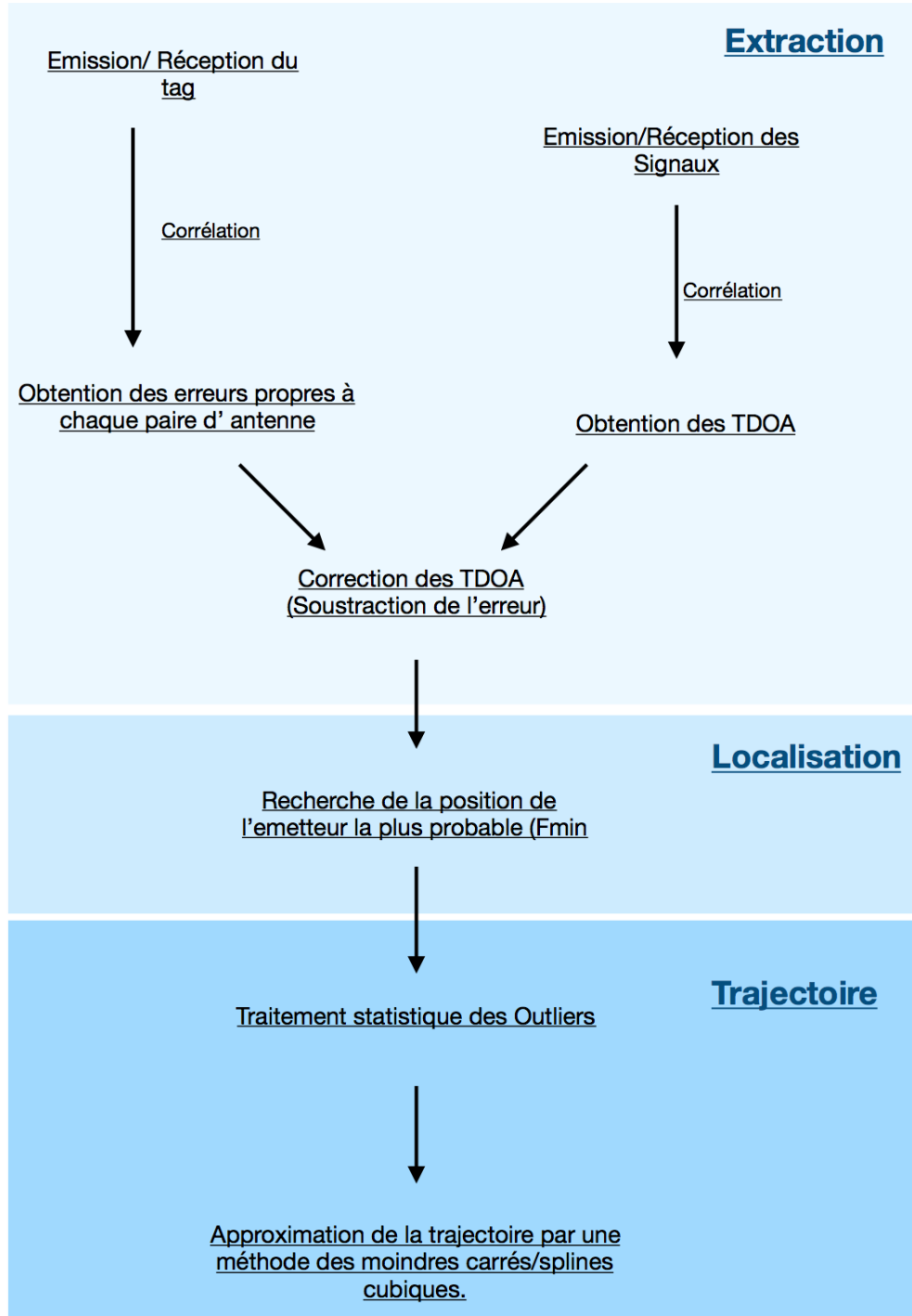


FIGURE 1 – Flow Chart Générale

2 Spécification du système

Fonction Le programme développé a pour but de localiser et approximer la trajectoire d'une balise émettrice se déplaçant au pas dans un espace clos (indoor).

Disposition du matériel expérimental Les tests sont réalisés dans une pièce où les antennes réceptrices sont fixes et sont situées approximativement aux 4 coins d'un rectangle de longueur 5.2 m et largeur 4.8 m . Les antennes étant situées aux 4 coins de la pièce. Le programme n'est pas testé pour une balise émettrice située en dehors du rectangle formé par les antennes mais devrait en toute logique rester fonctionnel. La photo de la figure 2 représente la salle dans laquelle les tests ont lieu.



FIGURE 2 – Laboratoire

Entrées Le système prend en entrée quatre signaux UWB dont le spectre est situé entre 3.2 et 4.8 GHz. Le signal reçu aux antennes est échantillonné à une fréquence de 3.2 GHz et 819200 échantillons sont fournis.

Sorties Les positions de l'émetteur sont fournies sous la forme de coordonnées (x, y) dans un vecteur. Une erreur de 5 à 10 % par rapport à la trajectoire réelle est acceptable. Il sera fait en sorte d'obtenir une erreur en dessous de la dizaine de centimètres pour les coordonnées (x, y) .

Contraintes matérielles La présence d'obstacle doit être prise en compte. De plus, l'erreur due au hardware se doit d'être éliminée. Les multiréflexions ne sont pas traitées par filtrage.

Procédures de mesure permettant de vérifier la conformité du produit final aux spécifications La comparaison et la vérification des résultats sont réalisées grâce à l'obtention des positions à l'aide d'un laser. Les mesures sont prises dans un cadre expérimental avec un ou plusieurs obstacles masquant plus ou moins les récepteurs.

3 Etude fonctionnelle

3.1 Principe de localisation

La localisation d'un émetteur mobile peut s'effectuer de deux manières différentes : par une méthode de TOA (Time Of Arrival) ou une méthode de TDOA³ (Time Difference of Arrival). La méthode basée sur l'évaluation de TDOA est préférable à celle basée sur les TOA car elle n'exige pas la connaissance du temps d'émission. Dans le cadre de ce projet, seule la méthode utilisant les TDOA est donc abordée.

L'évaluation de TDOA entre chaque paire de récepteurs permet la construction du lieu géométrique de points où se situe potentiellement l'émetteur. Le lieu recherché est tel que le TDOA est constant, il correspond donc à une hyperbole. En effet, l'hyperbole est par définition le lieu de points dont la différence des distances à deux points fixes (ici les deux récepteurs) est constante en valeur absolue.

En se basant sur le fait que l'émetteur doive appartenir à chacune des hyperboles construites sur base de chaque TDOA, l'unique point d'émission possible du signal se trouve à l'intersection de l'ensemble des hyperboles. Il est à noter que le nombre de TDOA est fonction du nombre de paires de récepteurs possibles. Ainsi pour n récepteurs C_2^n hyperboles sont obtenues.

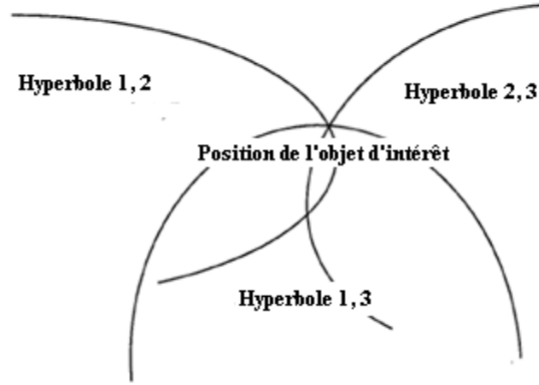


FIGURE 3 – localisation de l'émetteur en 2D par la méthode des hyperboles

Le nombre de TDOA nécessaires pour avoir une intersection unique dans un plan 2-D est de quatre. La figure 4 illustre bien le fait qu'avec trois TDOA les hyperboles s'intersectent en deux points distincts tandis qu'avec quatre TDOA un seul point subsiste.

Lorsque la notion de bruit est introduite, la méthode d'analyse graphique consiste à représenter les hyperboles avec une épaisseur de trait représentant ce bruit. Le point d'émission est dès lors situé au sein de l'aire commune aux quatre hyperboles.

La méthode proposée pour localiser l'émetteur consiste à trouver le minimum de la fonction représentant les écarts entre les TDOA théoriques et expérimentaux. Le point (x_e, y_e) ainsi estimé se rapproche au plus de la véritable position de l'émetteur au sens des moindres carrés. La fonction à minimiser est

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 \left(\sqrt{(x_i - x_e)^2 + (y_i - y_e)^2} - \sqrt{(x_j - x_e)^2 + (y_j - y_e)^2} - c \cdot TDOA_{ij} \right)^2 \quad (1)$$

où les couples (x_i, y_i) et (x_j, y_j) sont les positions des récepteurs i et j respectivement, où $TDOA_{ij}$ est le TDOA mesuré et c est la vitesse de la lumière

Pour résumer, il a donc été question au travers de cette étape d'établir les bases de la détection de position d'un émetteur. Ceci a été effectué par multilatération en identifiant l'intersection des hyperboles correspondantes aux TDOA des signaux. Ensuite, en présence de bruit, l'intersection des hyperboles n'étant plus localisée en un même point il a fallu trouver le point de position le plus probable par un critère de localisation au sens des moindres carrés.

3. Un TDOA n'est autre que la différence entre deux TOA

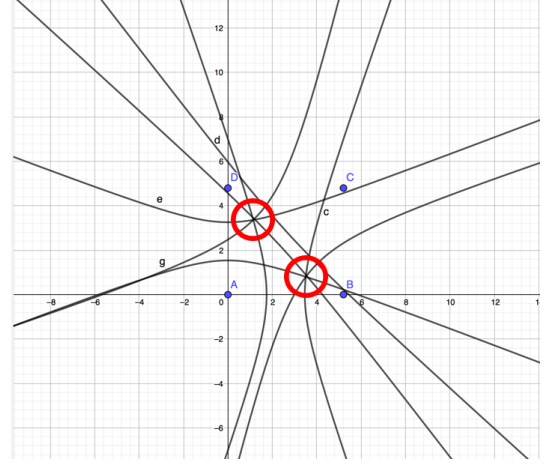
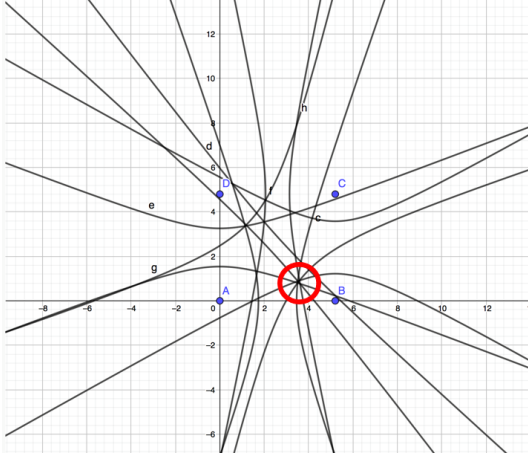


FIGURE 4 – Représentation de l'intersection des hyperboles sur base de trois et quatre TDOA à gauche et à droite respectivement

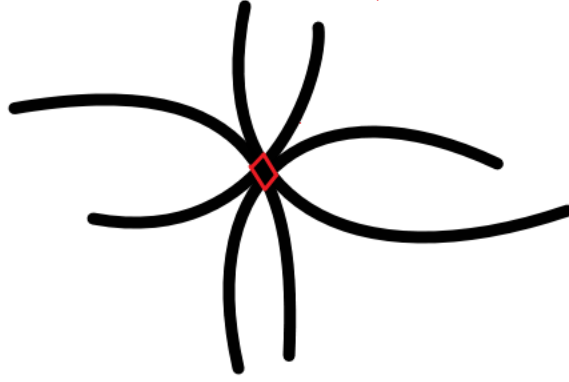


FIGURE 5 – Courbes hyperboliques du lieu de point de localisation de l'émetteur affectées d'un bruit

3.2 Estimation de TDOA avec la corrélation

Le signal reçu à l'un des récepteurs est de la forme $r_{rf}(t) = s_{rf}(t; \tau) + N_{rf}$ où $s_{rf}(t; \tau)$ est un signal dépendant du paramètre τ qu'on souhaite estimer aussi précisément que possible et où N_{rf} est une perturbation associée à un bruit blanc gaussien additif. Pour estimer τ il est nécessaire de trouver la fonction de vraisemblance.

La nature du signal est gaussienne⁴, sa densité spectrale est donc une constante de $-\infty$ à $+\infty$. Le signal est filtré par une fenêtre qui s'étend de $\frac{-0.5}{T_s}$ à $\frac{+0.5}{T_s}$ et ce filtrage a pour conséquence d'induire une densité spectrale qui est aussi une fenêtre sur la même plage de fréquence. En effectuant la transformée de Fourier inverse, on obtient la fonction de covariance du bruit blanc gaussien $C_{W(t)}(\tau)$ (où τ est ici la différence entre deux temps différents t et t') qui n'est autre qu'un sinus cardinal. La corrélation est donc nulle en les points de passage par zéro du *sinc* tous les nT_s comme montré sur la figure 6. Le signal étant échantillonné à la fréquence T_s , les variables aléatoires du signal sont décorréliées. Le signal est de nature gaussienne, la décorrélation entre ces variables aléatoires entraîne donc l'indépendance de celles-ci.

4. Toute transformation linéaire d'une fonction aléatoire normale produit une fonction aléatoire normale.

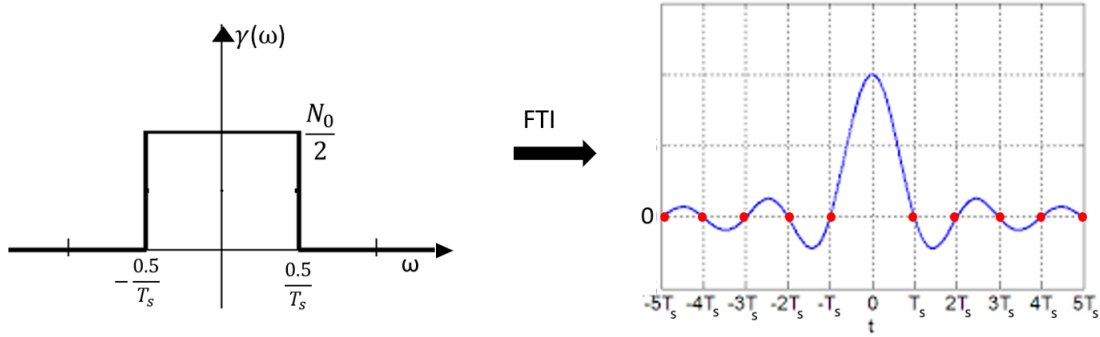


FIGURE 6 – Densité spectrale du bruit en fréquentiel et en temporel après avoir été passé dans un filtre rectangulaire

Cette propriété d'indépendance des variables permet d'exprimer la fonction de densité jointe caractérisant le signal $r_{rf}[n]$ comme un produit des fonctions de densité de chaque variable. Les moyennes des variables aléatoires, elles sont égales à la valeur du signal $s_{rf}[n]$ (car la moyenne du bruit est nulle et $s_{rf}[n]$ est déterministe) évalué en chaque n différents. Quant à la variance, elle vaut pour chacune des variables $\frac{N_0}{2T_s}$. Avec ces informations la fonction de vraisemblance peut s'écrire :

$$T_r(r|\hat{\theta}) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{N}{2}}} \exp\left(\frac{-1}{2\sigma^2} \sum_n (r_f[n] - s_{rf}[n; \hat{\tau}])^2\right) \quad (2)$$

Pouvant encore approximer comme :

$$T_r(r|\hat{\theta}) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{N}{2}}} \exp\left(\frac{-1}{N_0} \int_0^{NT_s} (r_f(n) - s_{rf}(n; \hat{\tau}))^2\right) \quad (3)$$

Par développements successifs et du fait que l'énergie ne dépend pas de l'estimateur $\hat{\tau}$, la fonction de vraisemblance au sens du log de Likelihood est de la forme :

$$f(t, \hat{\tau}_m) = \int_0^{NT_s} A_m r_{f,m}(t) s(t - \hat{\tau}_m) dt \quad (4)$$

Cette dernière permet l'obtention de TOA. Cette fonction effectue la projection du signal reçu sur le signal estimé. L'estimateur du maximum de vraisemblance $\hat{\tau}_{mv}$ maximise donc la corrélation entre les deux signaux.

Par analogie, une fonction de vraisemblance pour obtenir le TDOA peut être développée. En effet, les signaux reçus à deux ancrés différentes peuvent être corrélés et le paramètre de différence de temps entre ces deux derniers maximisant la corrélation trouvé.

$$\tau_{ij,mv} = \underset{\hat{\tau}_{ij}}{\operatorname{argmax}} = \int_0^{NT_s} r_{f,i}(t) r_{f,j}(t - \hat{\tau}_{ij}) dt \quad (5)$$

L'obtention des TDOA se fait donc sur base des signaux reçus aux récepteurs par la corrélation⁵ entre le signal $r_{f,i}$ reçu au récepteur i et le signal $r_{f,j}$ reçu au récepteur j . Un vecteur de décalages temporels pour lesquels la corrélation entre les deux signaux a été évaluée peut être obtenu. Le décalage temporel pour lequel la corrélation est maximale correspond au TDOA entre le récepteur i et le récepteur j .

5. La corrélation s'apparente fortement au produit de convolution. En effet, les étapes sont les mêmes sauf qu'il n'y a pas de retournement de signal. En effet, il est souhaité de comparer les deux signaux tels qu'ils sont et de trouver le temps t_i qui maximise la correspondance entre ces deux signaux. Le temps t_i pour lequel le produit de convolution est le plus élevé est le décalage pour lequel l'intégrale du produit des deux signaux est la plus grande et donc pour lequel les deux signaux sont les "plus semblables".

Sur base de la corrélation en temporel :

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} r_{f,i}(t) r_{f,j}^*(t - \tau_{ij}) dt \quad (6)$$

La corrélation en fréquentiel s'exprime comme :

$$C(\omega) = R_i(\omega) R_j(\omega)^* \quad (7)$$

3.3 Effet des obstacles sur le champ émis

Le but de cette section est de calculer et représenter l'effet d'un obstacle sur le champ émis par une antenne. En effet, cet obstacle va engendrer une zone d'ombre dans laquelle les signaux vont se trouver fortement atténués. Pour quantifier cette atténuation, le champ \vec{E} est calculé sur l'ensemble de l'espace.

Une méthode pour calculer le champ au-delà de l'obstacle consiste à soustraire le champ émis au-delà d'une fente dans plan conducteur infini au champ émis dans l'espace en l'absence d'obstacle.

Champ émis au-delà d'une fente dans une plaque conductrice infinie

L'expression générale du champ émis par une antenne est donnée par :

$$d\vec{E} \simeq jk \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \hat{u} \wedge (\eta \hat{u} \wedge \vec{J} + \vec{J}_m) dV \quad (8)$$

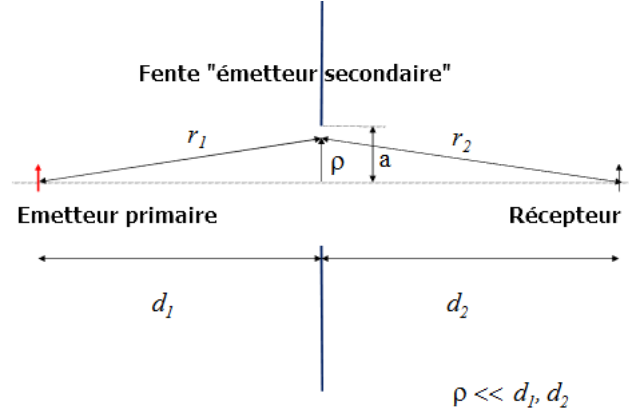


FIGURE 7 – Schéma de la situation "émetteur-obstacle"

Une simplification de l'expression du champ ci-dessous est possible. En effet, seul le champ électrique dans l'antenne dans une direction z est considéré. La direction de propagation est prise en y . De plus, JdV est également exprimé comme $I dl$.

Après intégration, le champ au niveau de la fente est :

$$\vec{E} \simeq -jk \frac{e^{-jkR_1}}{4\pi R_1} \eta I l u_z \quad (9)$$

Par une approximation de Taylor d'ordre deux sur R_1 et en considérant que la distance entre l'antenne et la fente est beaucoup plus grande que la largeur de la fente :

$$\vec{E} \simeq -jk \frac{e^{-jk(d_1 + \frac{\rho^2}{2d_1})}}{4\pi d_1} \eta I l u_z \quad (10)$$

Sur base du principe d'équivalence des surfaces⁶, le courant au niveau de l'ouverture vaut :

$$\vec{K}_m \simeq jk \frac{e^{-jk(d_1 + \frac{p^2}{2d_1})}}{4\pi d_1} \eta I l \hat{u}_x \quad (11)$$

A partir de l'équation

$$d\vec{E} \simeq jk \frac{e^{-jkR_2}}{4\pi R_2} \hat{u} \wedge (\eta \hat{u} \wedge \vec{K} + \vec{K}_m) dS \quad (12)$$

et en utilisant le principe d'équivalence sur une surface plane infinie, le courant total peut être considéré comme égal à $2K_m$. Ce courant magnétique est considéré comme une nouvelle source de champ. La valeur de ce champ au niveau du récepteur est donc calculée (à une distance R_2 de la nouvelle source, au récepteur) :

$$d\vec{E} = jk \frac{e^{-jkR_2}}{4\pi R_2} . 2K_m . dS(-\hat{u}_z) \quad (13)$$

En introduisant K_m dans l'équation 13 et en approximant R_1 et R_2 par d_1 et d_2 , une nouvelle équation en coordonnées polaires peut être obtenue par intégration, a est le rayon de l'ouverture :

$$\vec{E} = e^{-jk(d_1+d_2)} \int_0^a \int_0^{2\pi} \frac{2k^2 \eta I l}{(4\pi)^2 (d_1 d_2)} e^{-jk(\frac{\rho^2}{2}(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}))} \rho d\rho d\theta (\hat{u}_z) \quad (14)$$

Ce qui donne après développement donne :

$$\vec{E} = \frac{jk\eta Il e^{-jk(d_1+d_2)}}{4\pi(d_1+d_2)} [e^{(\frac{-jk(d_1+d_2)}{2d_1d_2}a^2)} - 1] \quad (15)$$

Effet d'un obstacle sur le champ

Il est maintenant souhaité de calculer le champ non plus avec une fente mais avec un obstacle. Cette intégrale est calculée sur base des résultats précédents :

$$\int_a^\infty d\vec{E} = \int_0^\infty d\vec{E}_{vide} - \int_0^a d\vec{E}_{fente} \quad (16)$$

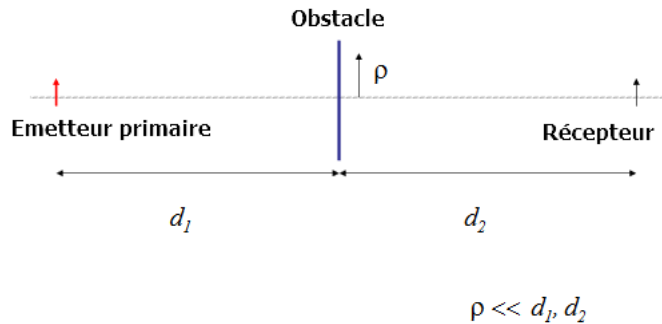


FIGURE 8 – Schéma de la situation "émetteur-obstacle"

Ou encore :

$$\vec{E} = E_{vide}^{\rightarrow} - \vec{E}_{fente} \quad (17)$$

Avec

$$E_{tot}^{\rightarrow} = j \frac{k\eta Il}{4\pi(d_1 + d_2)} e^{-jk(d_1 + d_2)} \quad (18)$$

6. Le principe d'équivalence des surfaces stipule que : $K_m = \vec{E} \wedge \vec{n}$, où dans ce cas-ci, \vec{n} est la normale au plan dans la direction \hat{u}_y .

$$\vec{E}_{vide} = \frac{jk\eta I l e^{-jk(d_1+d_2)}}{4\pi(d_1+d_2)} [e^{(\frac{-jk(d_1+d_2)}{2d_1d_2})a^2} - 1] \quad (19)$$

Il reste donc :

$$\vec{E} = -\frac{jk\eta I l e^{-jk(d_1+d_2)}}{4\pi(d_1+d_2)} e^{(\frac{-jk(d_1+d_2)}{2d_1d_2})a^2} \quad (20)$$

Pour obtenir un résultat quantitatif de l'atténuation derrière l'obstacle il suffit de comparer la valeur du champ avec obstacle à celle du champ sans obstacle. Cette mesure est donnée par le rapport de ces deux quantités. Comme le montrent les simulations des figures 9 et 10, le champ derrière l'obstacle subit une atténuation moins forte (environ 40% de la valeur sans obstacle) au bord de ce dernier. En se rapprochant du centre, l'atténuation est de plus en plus importante. Cependant, sur l'axe émetteur-obstacle-récepteur, le rapport est unitaire. Cette particularité est nommée "Arago spot".

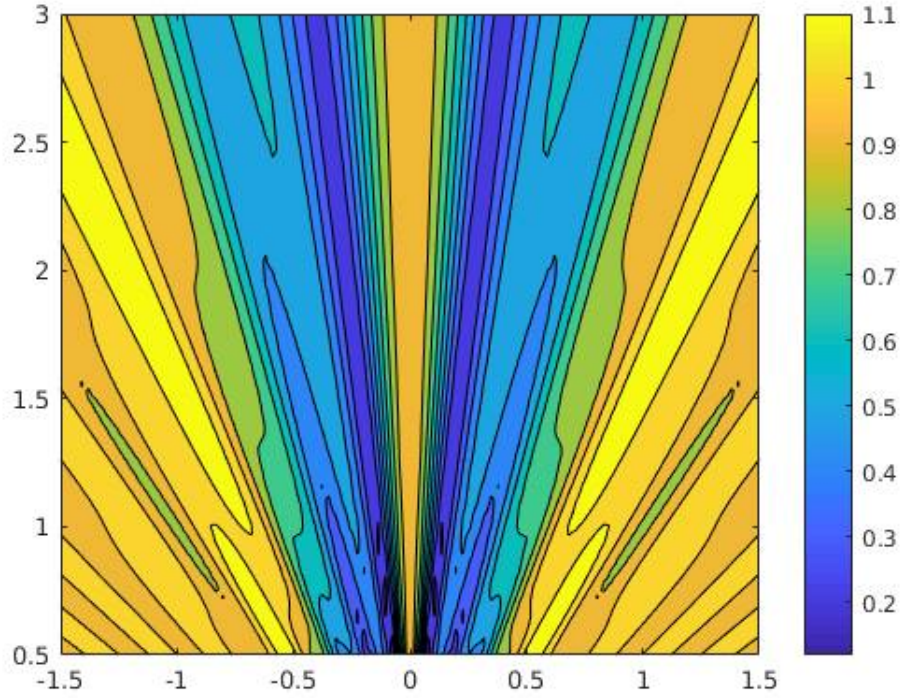


FIGURE 9 – Graphe en 2D des intensités du champ normalisé derrière l'obstacle

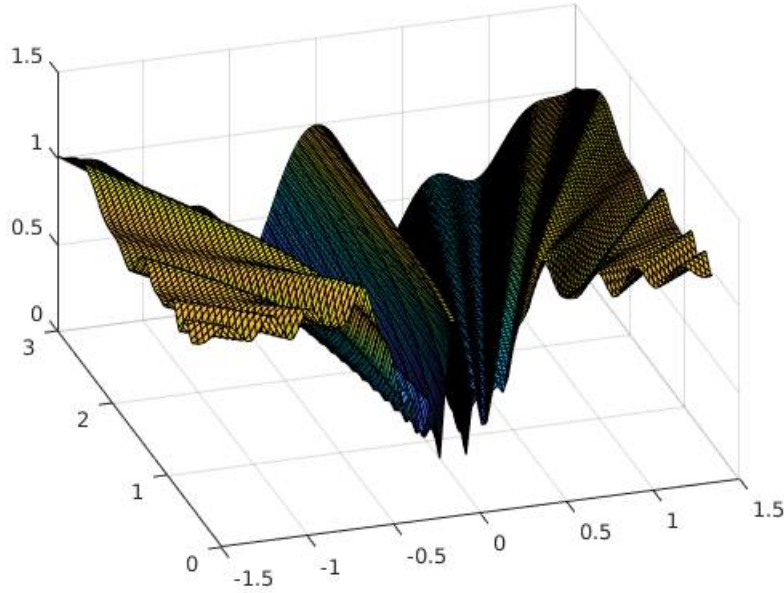


FIGURE 10 – Graphe en 3D des intensités du champ normalisé derrière l'obstacle

4 Implémentation

4.1 Vision globale du fonctionnement des méthodes implémentées

4.1.1 Extraction des TDOA

La première étape consiste en l'extraction des TDOA à partir des signaux récoltés. Cette opération demande d'abord d'effectuer un certain traitement des signaux obtenus avant d'extraire les données d'intérêt.

Il faut en premier lieu identifier les parties utiles du signal et ce à quoi elles correspondent. Les signaux reçus à chacune des ancrs réceptrices comprennent 819200 échantillons et sont de forme telle que montrée à la figure 12. Deux "segments" se détachent nettement. Le premier, situé entre la 50 000^{ième} et la 350 000^{ième} donnée, correspond au signal envoyé par la balise de calibration. Le second, entre la 500 000^{ième} et la 700 000^{ième} donnée, correspond à celui envoyé par l'émetteur.

Établissement de fenêtres et ajout de zéros entre les données L'utilisation de fenêtres temporelles permet d'isoler chacune des parties utiles du signal définies précédemment et de pouvoir agir sur chacune d'elles indépendamment de l'autre et du reste du signal. Chaque fenêtre doit représenter une même réalité temporelle afin de calculer les délais⁷ entre les signaux reçus au niveau de deux récepteurs. Pour ce faire, pour tous les signaux, les fenêtres doivent être de mêmes indices temporels fixés et arbitraires. Etant donné que les indices temporels de début et de fin du signal utile ne sont pas connus, la fenêtre est prise sur des indices dont il est certain qu'ils appartiennent au signal d'intérêt. Ici, une fenêtre de 5000 données a été choisie. La figure 13 illustre une fenêtre prise au milieu du signal de calibration. Il est constatable expérimentalement que prendre une fenêtre plus petite influe peu sur le résultat final. Cependant, un espace de temps trop petit (par exemple 1500 données) engendre une erreur trop importante à savoir de plusieurs mètres sur les TDOA.

7. Délais qui ne sont autre que les TDOA entre les signaux

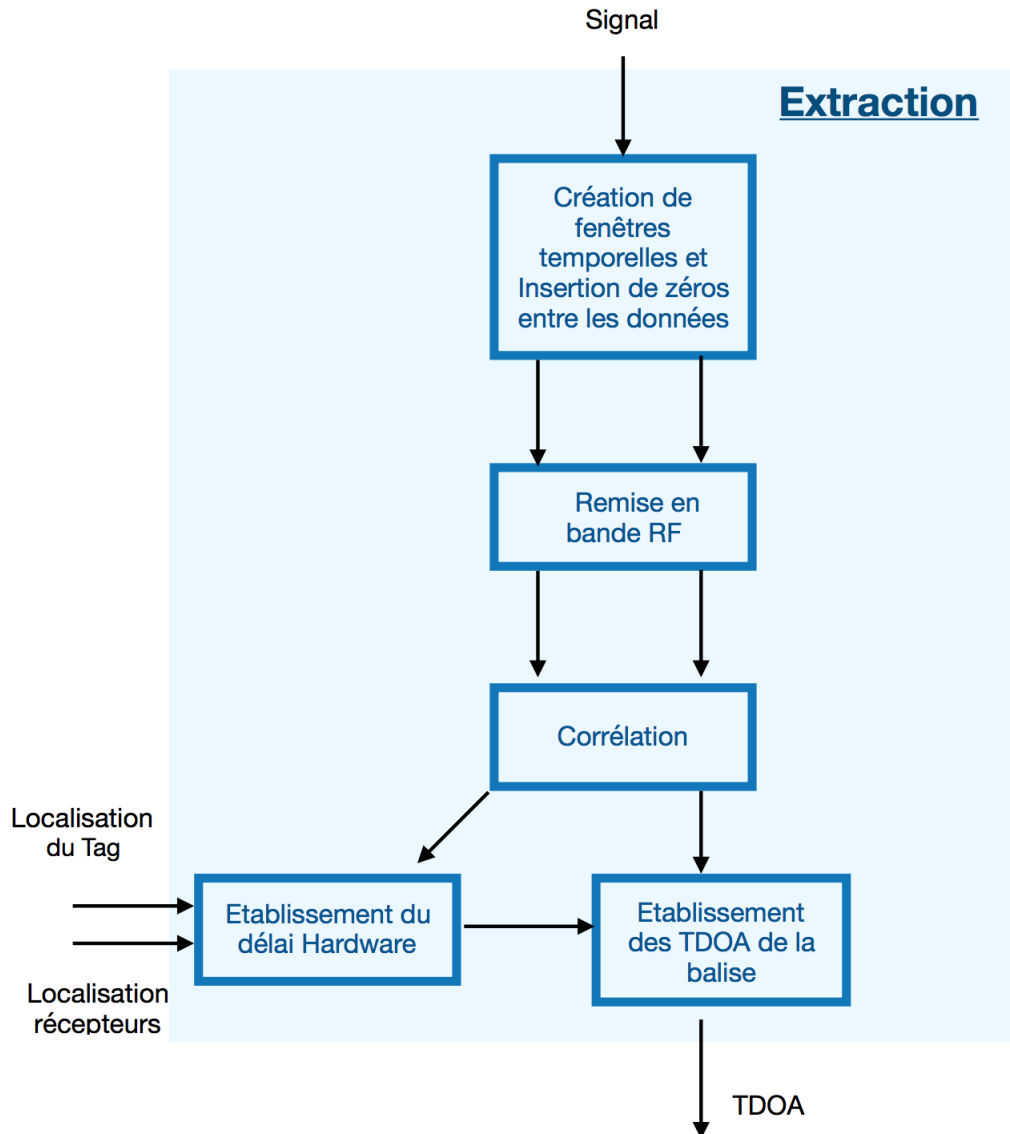


FIGURE 11 – Flow Chart d'extraction des TDOA

Une fois la fenêtre définie, il est judicieux de rajouter un certain nombre de zéros entre les données comme le montre la figure 14. Ceci a pour effet d'augmenter le nombre d'indices disponibles lors de la corrélation et donc sa précision. Cette augmentation vient de la façon de travailler des fonctions `fft()` et `ifft()` de MATLAB. En effet, la fonction `fft` prend un signal de longueur n en argument et retourne un vecteur de la même longueur comprenant n fréquences équidistantes allant de 0 à la fréquence d'échantillonnage. En augmentant le nombre de points examinés, le nombre de fréquences fournies augmente également. En effectuant la transformée inverse ce nombre de points est conservé.

L'écart entre les indices de la fonction de corrélation donne une mesure de la précision des TDOA. Plus l'écart est petit, plus le maximum de corrélation peut être approché de manière précise et la TDOA obtenue se rapproche au mieux de la valeur réelle. L'erreur sur la différence de distances⁸ se trouve donc diminuée. En outre, si la méthode numérique fournit un indice erroné pour le maximum de corrélation, la distance entre l'indice erroné fourni et l'indice réel est plus petite si l'écart est plus petit. Les erreurs potentielles sont donc minimisées.

8. Différence de distances $= cTDOA$ où c est la vitesse de la lumière

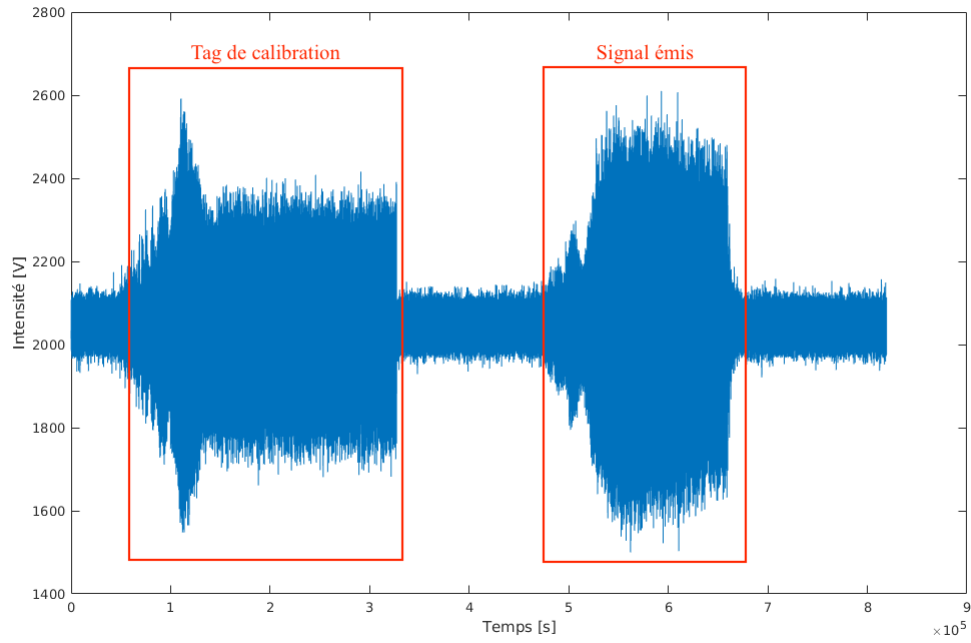


FIGURE 12 – Signal reçu par un des récepteurs

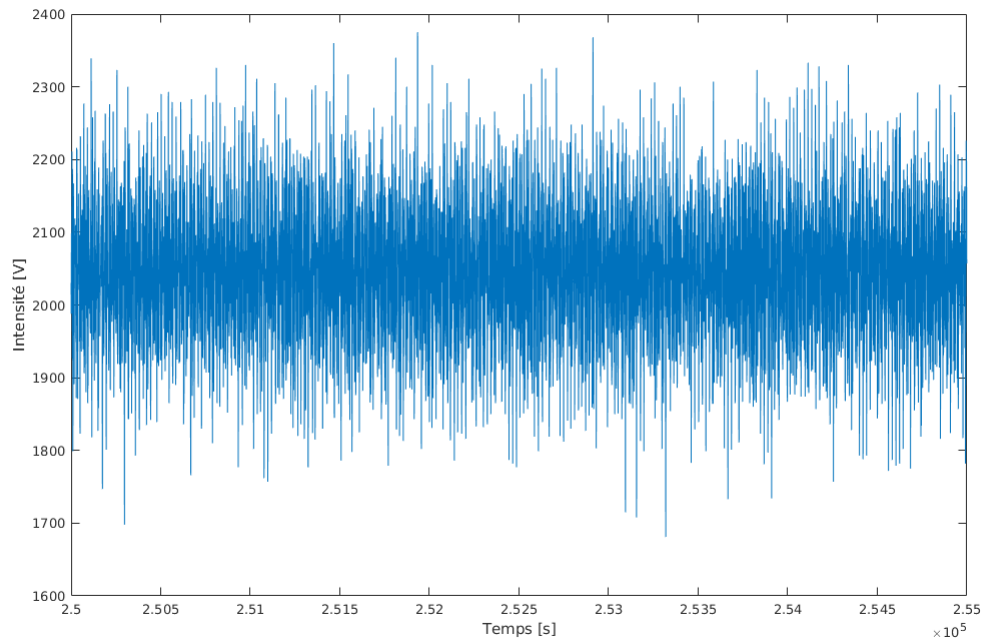


FIGURE 13 – Fenêtre de la partie de calibration du signal

Le tableau 1 quantifie l'erreur par indice qui diffère de l'indice réel.

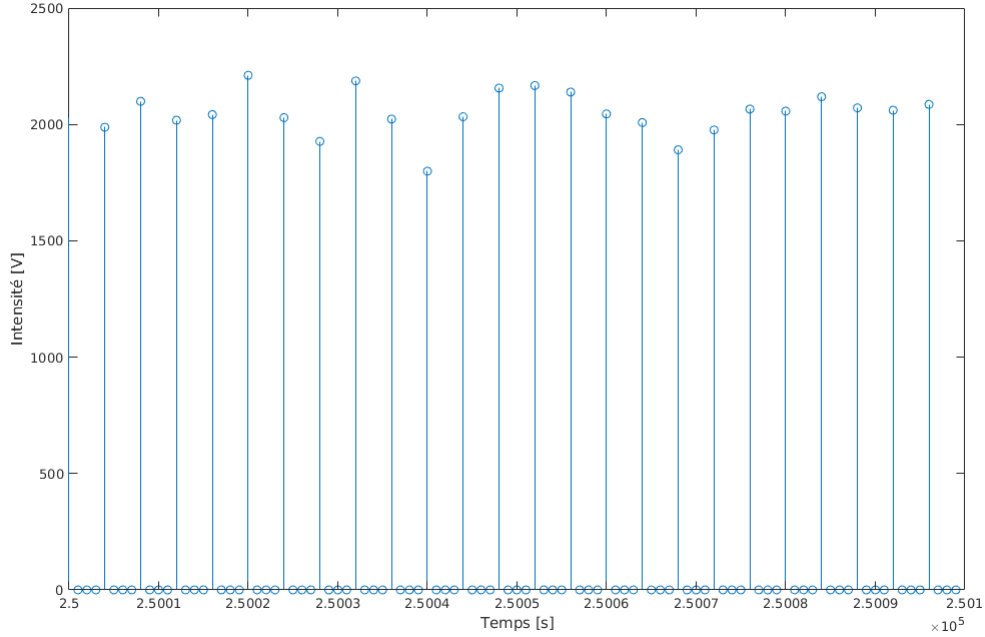


FIGURE 14 – Agrandissement de la fenêtre montrant les zéros insérés

Nombre de 0 ajoutés	f_e (GHz)	Erreur sur la TDOA remise en mètre par indice qui diffère de l'indice réel
0	3.2	0.09375
2	9.6	0.03125
3	12.8	0.02344

TABLE 1 – Tableau illustrant l'erreur sur la différence de distances (c TDOA) selon le nombre de zéros ajoutés entre les échantillons du signal de base

Remise en bande RF (3.2 à 4.8GHz) Le signal doit ensuite être repositionné dans la bande de fréquence correcte. Celui-ci est échantillonné à 3.2 GHz et la `fft` ne fournit le spectre de ce dernier qu'entre 0 et 3.2 GHz ce qui ne permet pas d'extraire directement le signal RF. L'ajout des zéros entre chaque donnée, comme discuté au point précédent, par la `fft`, a l'avantage de répéter le spectre autant de fois qu'il y a de zéros ajoutés. Cela correspond à observer le spectre sur une bande plus large (entre 0 et 12.8 GHz). Il y a sur cette largeur de bande 4 répétitions qui s'étendent sur 3.2 GHz chacune comme le montre la figure 15

Un filtrage du spectre est ensuite effectué dans le but d'éliminer les fréquences situées hors de la plage de fréquences du signal utile c'est-à-dire de 3.2 GHz à 4.8 GHz. Les signaux RF sont ainsi obtenus, leur spectre est visible sur la figure 16

Ceci fait, la transformée inverse est effectuée pour récupérer un signal temporel nécessaire pour la corrélation.

Établissement des délais Le délai entre les deux signaux s'obtient par corrélation temporelle des signaux issus de l'étape précédente. Cette opération est réalisée numériquement via la fonction `xcorr` de MATLAB qui renvoie un vecteur des valeurs de corrélation ainsi que les indices de décalages temporels correspondants. En identifiant l'indice pour lequel la corrélation est maximale et en le multipliant par la période d'échantillonnage le délai est obtenu.

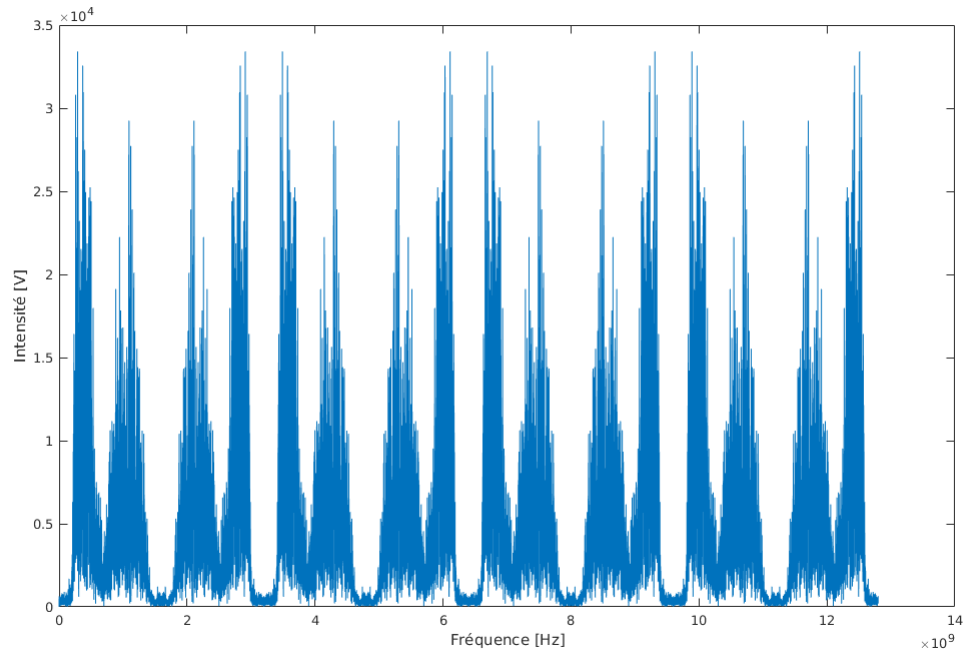


FIGURE 15 – Transformée de Fourier du signal obtenue par fft avec trois zéros ajoutés

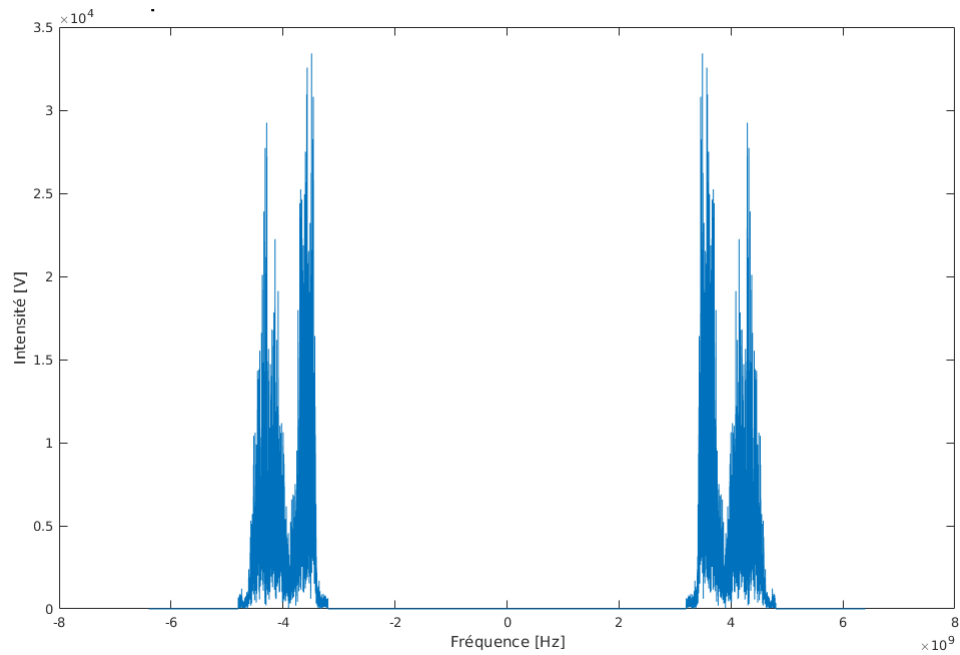


FIGURE 16 – Transformée avec fréquences inutiles annulées

Erreur du harware À ce stade, si la TDOA était extraite directement du second segment du signal, une erreur importante serait observée. En effet, un délai est causé par le hardware : le signal passe par les câbles reliant chaque

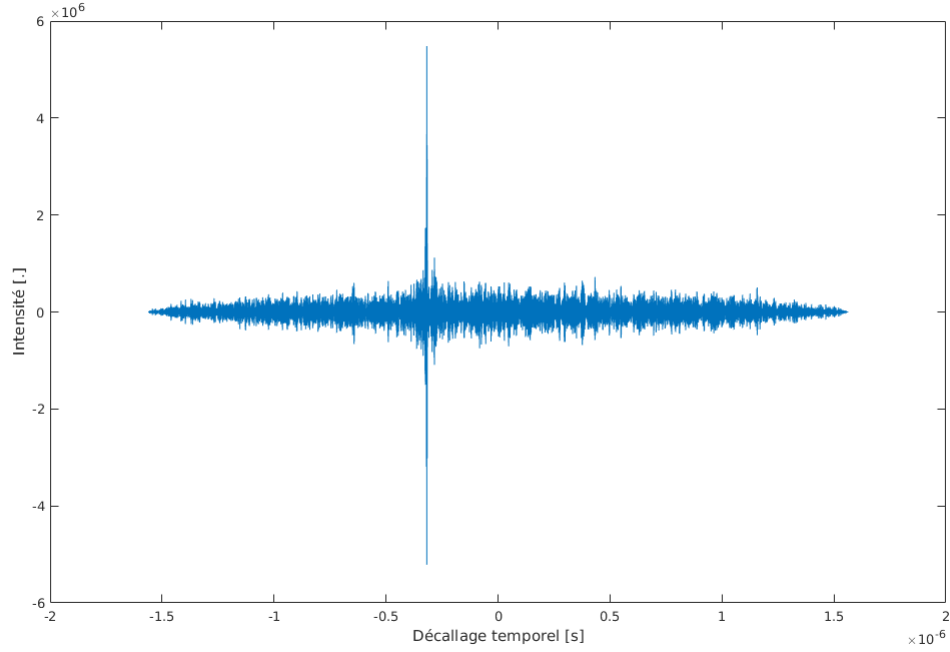


FIGURE 17 – Fonction de corrélation en fonction des indices des décalages

récepteur à l'ordinateur contrôlant le système ainsi que divers composants matériels. Connaissant les positions des récepteurs et du tag de calibration fixe, les TDOA théoriques peuvent être calculées. L'erreur induite par le hardware peut donc être déterminée en soustrayant la TDOA théorique à la TDOA expérimentale qui n'est autre que le délai entre deux signaux de calibration.

Extraction des TDOA La TDOA entre deux émetteurs est finalement obtenue en soustrayant l'erreur hardware au délai entre les signaux utiles reçus à ces récepteurs.

$$TDOA_{ij} = \tau_{mesuré,ij} - \tau_{hardware,ij} \quad (21)$$

4.1.2 Localisation

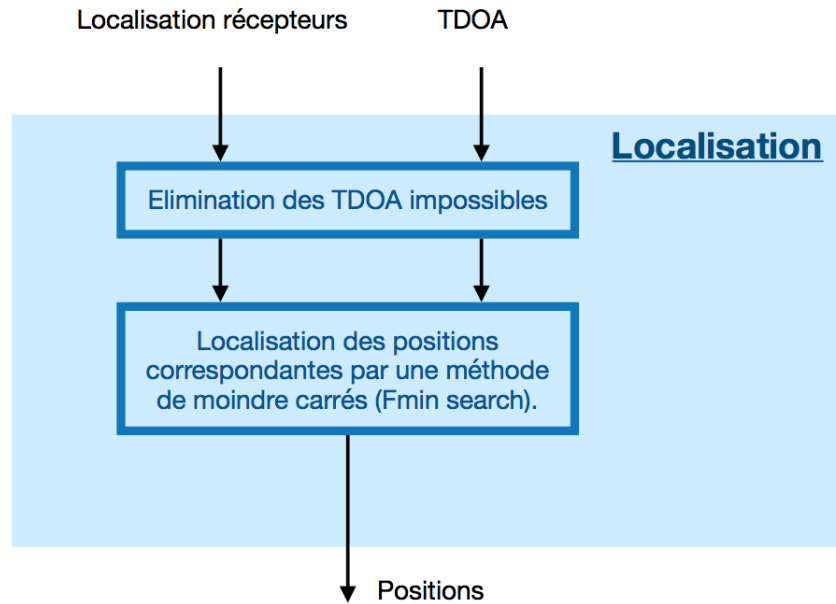


FIGURE 18 – Flow Chart Localisation

Un premier épuration des données consiste à enlever les valeurs physiquement impossibles. Une fonction MATLAB adaptable prenant comme entrées les dimensions des distances entre les antennes a été implementée. La distance correspondante aux TDOA est forcément plus petite que l ou L (la largeur et la longueur de la pièce respectivement) pour des antennes voisines. Tandis que la distance maximale est de $\sqrt{L^2 + l^2}$ pour des antennes non-adjacentes. Si une tentative de localisation contient une valeur de TDOA aberrante, elle est systématiquement abandonnée.

L'équation 1 minimisée permet de déterminer la position de l'émetteur à l'aide des TDOA et de la position des récepteurs. Cette minimisation est obtenue grâce à la fonction `fminsearch` basée sur la méthode de Nelder-Mead pour établir le minimum d'une fonction non-linéaire dans un espace multi-dimensionnel.

4.1.3 Trajectoire

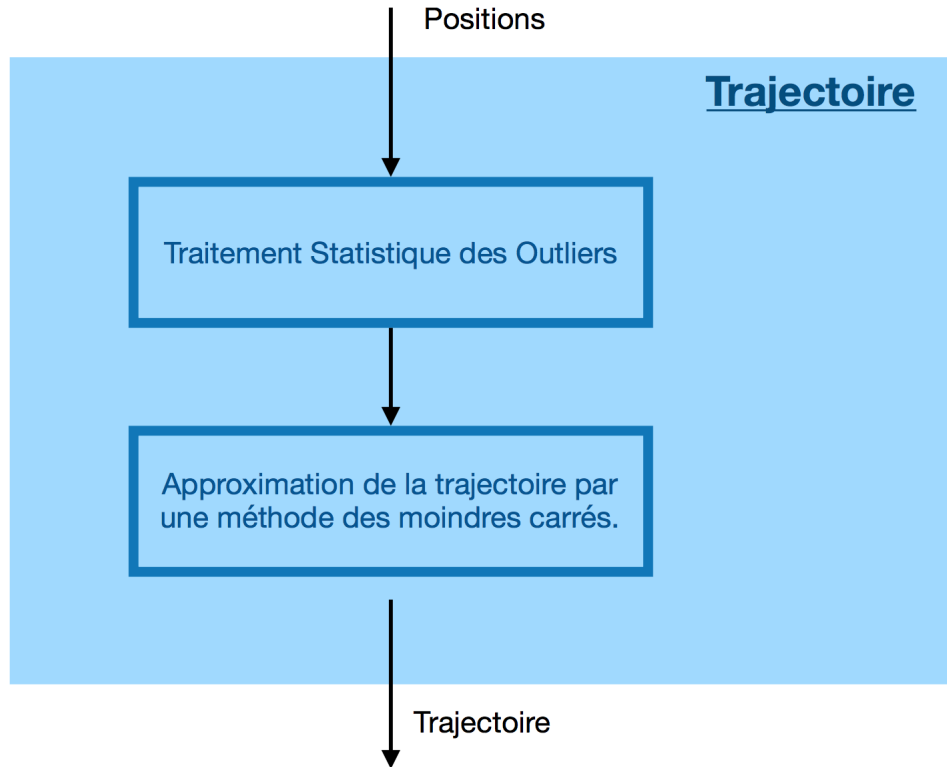


FIGURE 19 – Flow Chart Localisation

Traitement statistique des outliers De manière générale, l'analyse de données se base sur les positions obtenues grâce aux TDOA et non sur les TDOA mêmes.

La méthode de traitement des outliers consiste à utiliser une approche statistique afin d'éliminer les données improbables. En effet, en calculant les distances entre les points voisins et en présence de nombreuses données (plus de 30), le théorème central limite qui stipule que ces distances doivent être distribuées de manière normale peut être utilisé. Il est ainsi possible de repérer, en choisissant judicieusement un taux de tolérance, les distances statistiquement extrêmes (outliers) par rapport au seuil fixé et à la moyenne des distances entre les données. En faisant l'hypothèse que les données sont distribuées de manière normale, la figure 20 donne la répartition statistique des écarts de distance (entre les points) sur base de leur moyenne et de leur variance. Tandis que la figure 21 délimite la zone de tolérance lorsque le seuil limite est fixé à un écart-type.

Afin d'éliminer une position ou un ensemble de données de positions, il faut vérifier qu'elles soient "encadrées" par deux distances jugées statistiquement extrêmes. Lorsque la méthode parcourant les différentes distances rencontre un outlier tel que défini par le critère statistique fixé, elle va continuer à parcourir jusqu'à trois distances suivantes à la recherche d'un autre outlier. Ce nombre de trois a lui aussi été choisi arbitrairement mais de manière judicieuse. Plus ce nombre est élevé plus il y a de risque d'éliminer par erreur des pans de données importantes ainsi qu'augmenter considérablement le temps de calcul de la méthode numérique. Par ailleurs, si la méthode ne parvient pas à trouver un autre outlier pour boucler la boucle, les données ne sont pas éliminées. Le fonctionnement de l'algorithme est mis en évidence sur les figures 22 et 23 qui représentent le traitements de cas simples et plus complexes respectivement.

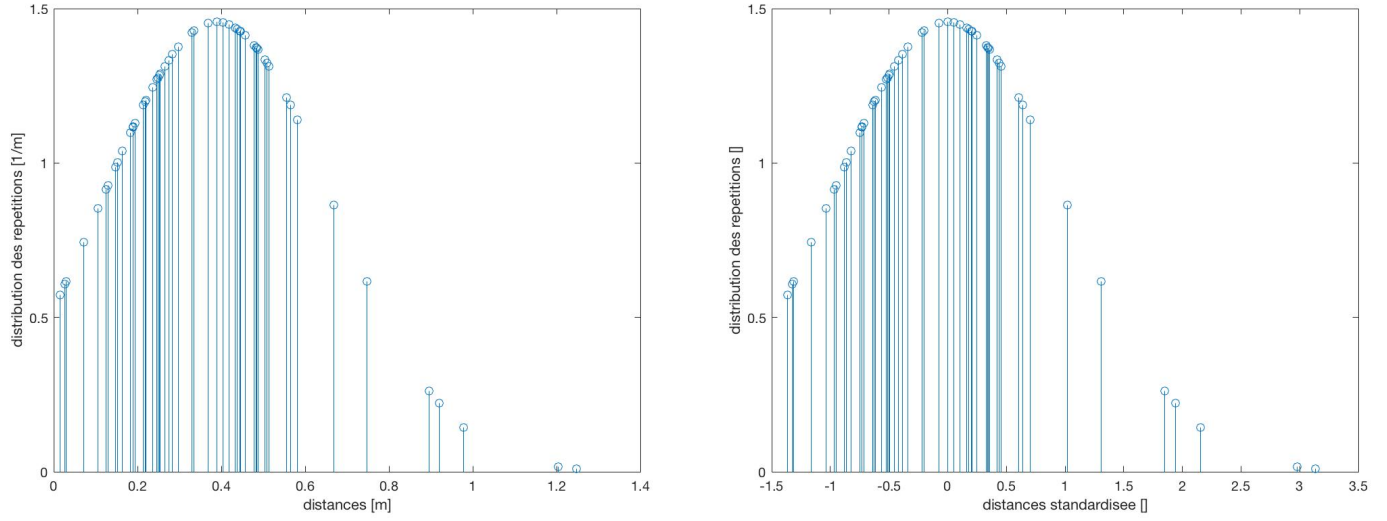


FIGURE 20 – Distribution des distances entre points et distribution standardisée des distances entre les points

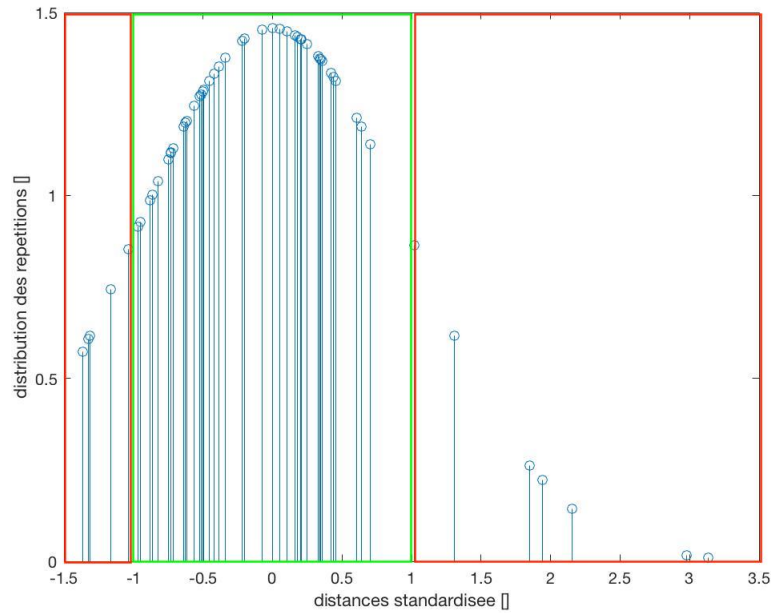


FIGURE 21 – Distribution standardisée des distances entre points , avec choix d'éliminer les données éloignées de plus d'un écart type par rapport à la moyenne.

Approximation de la trajectoire par une méthode des moindres carrés Dans le cas de la génération de trajectoires, il est nécessaire d'estimer la position de la balise émettrice entre les positions calculées grâce aux signaux reçus de manière à ce que le déplacement soit représenté continûment. De plus, les positions de l'émetteur qui ont été éliminées par les méthodes de traitement des outliers se doivent d'être remplacées.

Pour ce faire deux possibilités se présentent : la première par une interpolation et la seconde une approximation. Le but de l'interpolation est de fournir une courbe passant exactement par toutes les positions calculées. Cependant, ces positions comprennent elles-même des erreurs plus ou moins significatives qui risquent d'être amplifiées par la



FIGURE 22 – Illustration de l'algorithme de traitement des outliers , cas d'une donnée isolée

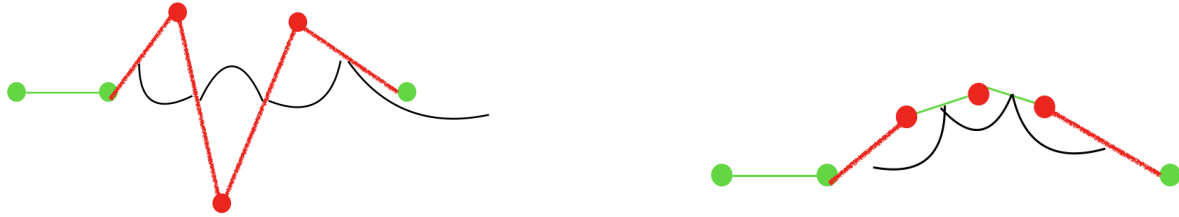


FIGURE 23 – Illustration de l'algorithme de traitement des outliers, cas de données groupées

méthode d'interpolation. Pour cette raison, une méthode d'approximation, le couple `polyfit()`-`polyval()`, a été préférée. Celle-ci, appliquée sur la liste de données permet d'établir un polynôme d'un degré choisi. Ce polynôme approxime au mieux le trajet. Bien que cette méthode soit moins précise, cette dernière ne passant pas exactement par les points, elle est moins affectée par les erreurs de mesure et permet d'obtenir une courbe plus lisse.

4.2 Validation des résultats intermédiaires

Les résultats intermédiaires mettent en évidence les données et simulations obtenues aux différentes étapes de la méthode numérique. Il est judicieux de les comparer avec les vraies données de localisation de l'émetteur fournies au laboratoire, notamment pour observer la précision dont la méthode fait preuve.

4.2.1 Données extraites de l'étape d'extraction

L'étape d'extraction fournit les TDOA. En les remettant en distances, il est alors possible de comparer les résultats obtenus par la méthode aux résultats théoriques de différences de distances calculées sur base des positions données au laboratoire. Le tableau 2 fournit ces valeurs théoriques pour différents points de la trajectoire. Les valeurs correspondantes obtenues via le traitement de signal sont représentées sur la tableau 3. Sur base de ces données, les erreurs entre les deux sont alors calculées et reprises dans le tableau 4. Les erreurs obtenues étant faibles (de l'ordre du centimètre) le système est considéré comme valide.

$[m]$	d_{12}	d_{13}	d_{14}	d_{23}	d_{24}	d_{34}
Point 1	0.8023	0.6752	0.0127	-0.1271	-0.7896	-0.6625
Point 2	0.2244	3.0497	2.7963	2.8252	2.5719	-0.2534
Point 3	-2.5125	-1.3877	2.9474	1.1248	5.4599	4.3351
Point 4	0.8603	-0.3178	-0.8609	-1.1781	-1.7212	-0.5342
Point 5	-2.3184	-3.5026	-1.850	-1.1843	0.4604	1.6446

TABLE 2 – Différences de distances théoriques des données récoltées en laboratoire (prise de mesures sans obstacle)

$[m]$	d_{12}	d_{13}	d_{14}	d_{23}	d_{24}	d_{34}
Point 1	0.8655	0.7487	0.0934	-0.1637	0.7721	-0.6085
Point 2	-0.4929	3.0674	-3.4432	2.7406	2.6005	-0.1869
Point 3	-2.4369	-1.3592	3.0210	1.0074	5.3408	4.3803
Point 4	0.8889	-0.3287	-0.8200	-1.2176	-1.7090	-0.4913
Point 5	-2.1792	-3.5608	-1.8272	-1.2645	0.4223	1.6868

TABLE 3 – Différences de distances obtenues par la méthode (prise de mesures sans obstacle)

$[m]$	ϵ_{12}	ϵ_{13}	ϵ_{14}	ϵ_{23}	ϵ_{24}	ϵ_{34}
Point 1	0.0633	0.0735	0.0807	0.0366	0.0174	0.0540
Point 2	0.7173	0.0177	6.2395	0.0847	0.0286	0.0665
Point 3	0.0756	0.0284	0.0736	0.1174	0.1191	0.0452
Point 4	0.0286	0.0109	0.0409	0.0396	0.0122	0.0518
Point 5	0.1391	0.0582	0.0309	0.0802	0.0380	0.0422

TABLE 4 – Erreur absolue des différences de distances des données récoltées en laboratoire (prise de mesures sans obstacle)

4.2.2 Données de localisation

Par l'étape de localisation les points sont extraits des TDOA. Les résultats numériques obtenus sont une nouvelle fois comparés avec les positions réelles. Ceci est représenté dans la tableau 5. Les erreurs de localisation sont de l'ordre du millièmme ou du centièmme ce qui indique que le système effectue correctement la localisation des points. Une mesure donne une erreur importante du au fait qu'elle ai été prise lorsque l'émetteur était collé au mur.

$[m]$	Coordonnées réelles		Coordonnées calculées		e_x	e_y
	x	y	x	y		
Point 1	4.3280	3.5160	4.3464	3.5019	0.0184	0.0141
Point 2	4.9510	1.2030	4.4947	2.4661	0.4563	1.231
Point 3	2.1100	0.9440	2.1405	0.9589	0.0305	0.0149
Point 4	4.0240	4.1600	4.0193	4.1604	0.0047	0.0004
Point 5	2.1890	3.7470	2.2060	3.7708	0.017	0.0238

TABLE 5 – Résultat de la multilatération et comparaison avec les coordonnées réelles des données récoltées (prise lors de mesures sans obstacle)

4.2.3 Trajectoire

La méthode d'élimination des outliers montre bien son efficacité en éliminant les points qui déforment trop la trajectoire comme observé sur la figure 24.

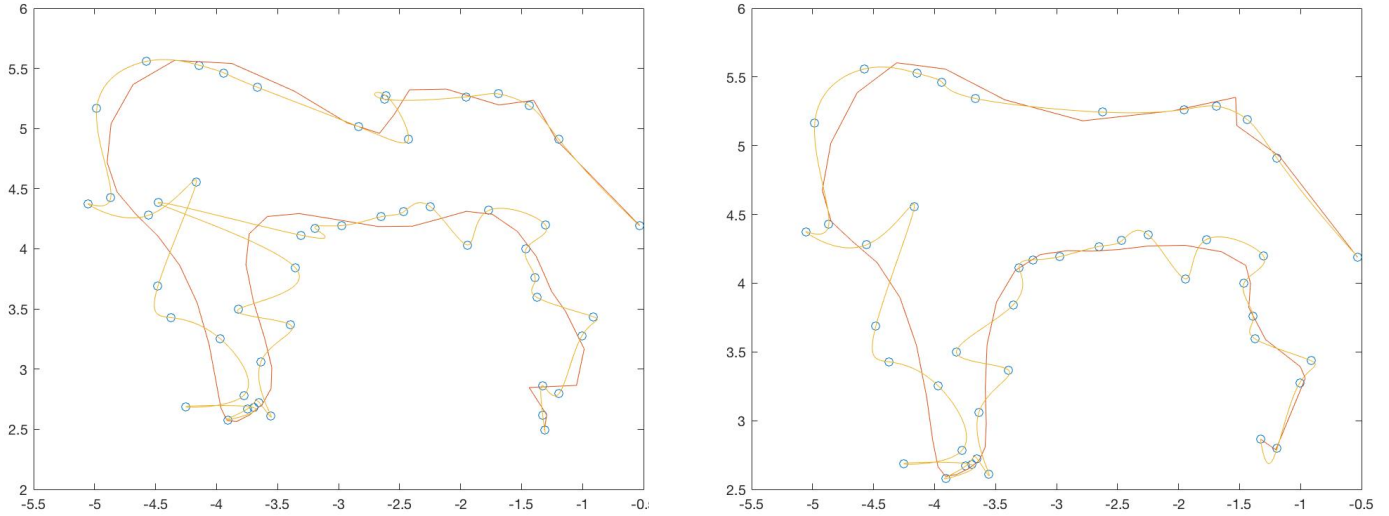


FIGURE 24 – Trajectoire non traitée à gauche et trajectoire avec traitement des outliers à droite

Il faut finalement s'assurer que les résultats finaux sont bien validés. Sur la figure 25, il est possible de visualiser les différences entre la courbe approximée et la courbe réelle dessinées par rapport au repère fourni par le laser de position dans le cas sans obstacle. Dans ce cas, la trajectoire estimée représente fidèlement la trajectoire réelle de l'objet. Le cas avec un et deux obstacles sont similairement représentés sur la figure 26 et 27 respectivement, la trajectoire calculée est sensiblement moins fidèle mais approxime encore correctement la trajectoire réelle

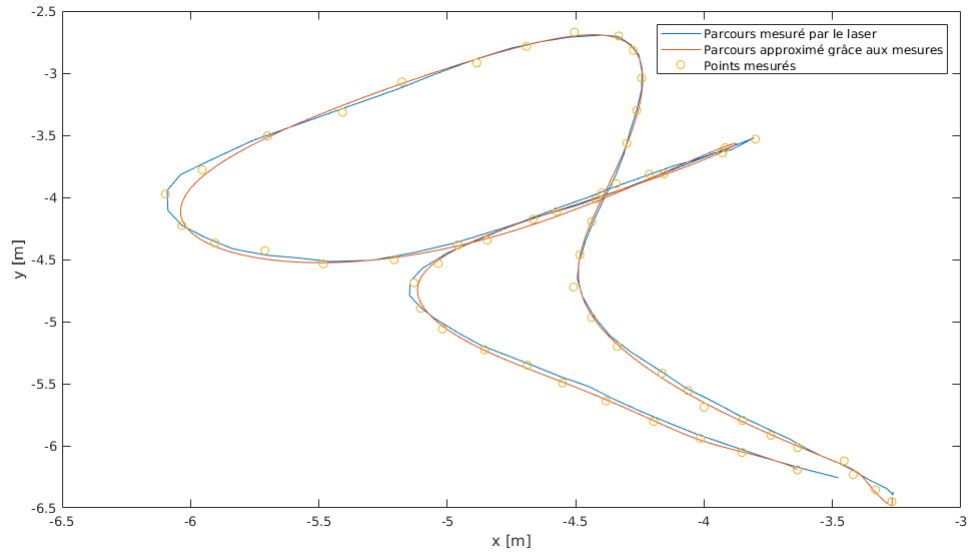


FIGURE 25 – Comparaison de la trajectoire réelle et approximée, cas sans obstacle

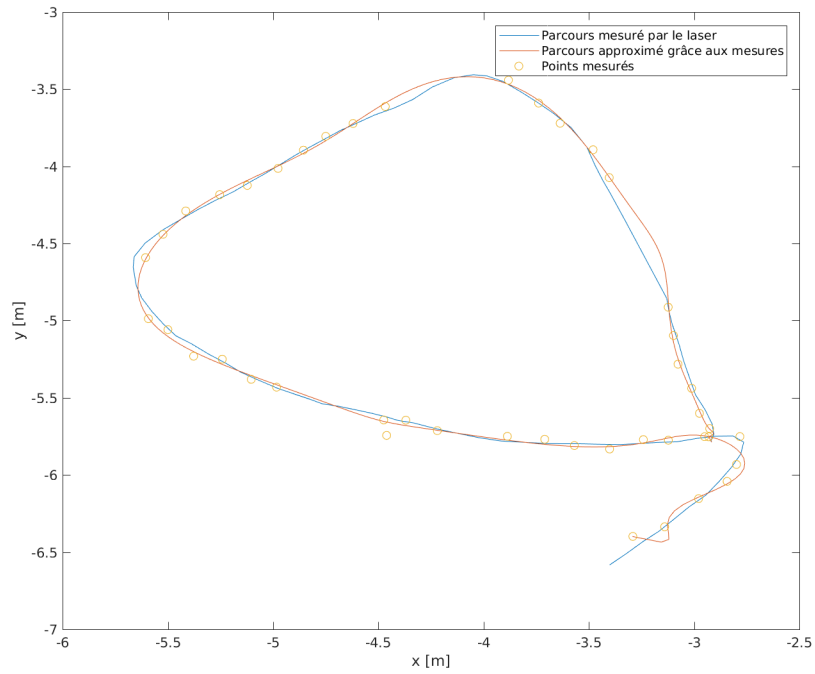


FIGURE 26 – Comparaison de la trajectoire réelle et approximée, cas avec 1 obstacle

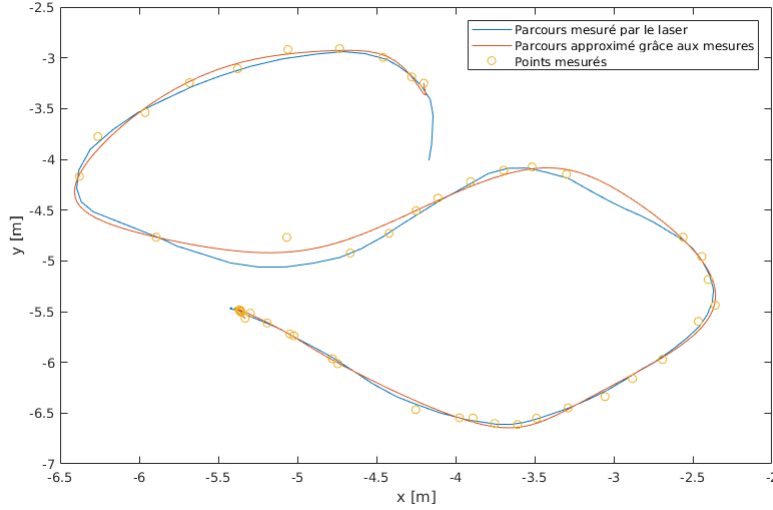


FIGURE 27 – Comparaison de la trajectoire réelle et approximée, cas avec 2 obstacles

5 Réalisation et caractérisation du système

Tests en aveugle D'après le système d'évaluation fourni par l'EPL, la plateforme "Inginious", les trajectoires obtenues seraient correctes à 91.63% dans le cas sans obstacle et 73% dans le cas avec obstacle. Cependant, ces 73% sont encore insuffisants pour permettre d'espérer de bons résultats sur le troisième.

Tests Complémentaires Des tests complémentaires ont été exécutés en laboratoire. Au cours de ceux-ci, l'émetteur a décrit plusieurs parcours au sein d'une pièce parsemée d'obstacles émettant des signaux toutes les secondes. Parallèlement, la position de la balise est mesurée grâce à un télémètre laser permettant de retracer la trajectoire exacte de la balise. Le même programme que celui utilisé sur les tests en aveugle est ensuite exécuté pour tenter de recréer une approximation de la trajectoire parcourue par la balise. Au cours des expériences, des obstacles ont été progressivement ajoutés pour consciemment perturber les signaux reçus et évaluer leur impact sur l'approximation finale du trajet. Le laboratoire était cependant contraignant sur un aspect. Le laser prenant des mesures constamment, il imposait une vitesse de déplacement de la balise plutôt lente et des trajectoires spécifiques lors du passage de la balise derrière des obstacles.

Éléments originaux Le système a comme particularité de prendre en ligne de compte les dimensions physiques de l'espace de travail en plus de se baser sur l'aspect physique des événements. Le programme étant conçu pour de la localisation indoor, il élimine de lui-même les données qui impliqueraient que l'objet se déplacerait plus vite qu'au pas ou en marche rapide en comparant les distances entre les points. L'approche statistique développée possède une tolérance adaptable dans le cas où les positions expérimentales se dégraderaient. En outre, malgré le fait que le système ait été développé pour un signal situé entre 3.2 GHz et 4.8GHz, il reste néanmoins adaptable et fonctionnel pour n'importe quelle bande passante.

6 Conclusion

Les résultats obtenus au cours de ce projet se révèlent satisfaisants en regard des spécifications imposées. L'erreur se trouve bien en dessous de 10% par rapport à la position réelle. L'étape d'extraction, par le choix d'une fenêtre, la remise des spectres des signaux en bande RF et par corrélation des signaux correspondants a permis, en soustrayant l'erreur due au Hardware, d'obtenir des TDOA. Ensuite, la localisation des points sur base de ces TDOA s'est avérée fructueuse à l'aune de l'erreur commise par rapport au placement réel de l'émetteur. Enfin, les méthodes statistiques d'élimination des outliers ont permis de traiter de nombreux cas extrêmes et d'éliminer les points selon des critères physiques arbitraires.

Les résultats finaux ainsi que les différentes étapes intermédiaires sous-jacentes à ceux-ci ont été validés en comparant les données obtenues numériquement à celles des vraies positions et ceci dans le cas de nombreux essais expérimentaux. La robustesse et la rapidité d'exécution de l'implémentation a également été confirmée lors de tests supplémentaires en présence de plusieurs obstacles masquant les récepteurs de manière importante.

L'objectif final d'obtention d'une trajectoire relativement précise par multilatération à l'aide de signaux UWB a bien été accompli cependant une implémentation plus poussée permettrait d'obtenir une meilleure approximation du trajet. Pour cela, il serait intéressant de voir si le calcul de la corrélation en fréquentiel permettrait d'améliorer la précision ou si l'utilisation de NURBS, plus complexe que le couple `polyfit()`-`polyval()`, pourrait donner une meilleure approximation de la trajectoire. Il serait également intéressant d'essayer d'appliquer une méthode d'élimination des outliers sur les TDOA récoltés et de tenter d'établir une position avec moins de TDOA disponibles.

Malgré toutes ces possibilités d'amélioration, l'implémentation actuelle, offrant la plupart du temps une marge d'erreur inférieure à la dizaine de centimètres, est largement satisfaisante pour déterminer la position d'un objet se déplaçant au pas dans un environnement simple qu'il comprenne des obstacles ou non. L'"indoor tracking" est donc une solution relativement facile à implémenter qui permet d'avoir des résultats fiables. Une utilisation de celle-ci est donc envisageable dans de nombreux secteurs et dans un futur proche.

7 Bibliographie

Références

- [1] Cramer-Rao Bound and Optimum Sensor Array for Source Localisation from Time Differences of Arrival, B. Yang and J. Scheuing
- [2] The generalized correlation method for estimation of time delay, C. Knapp and G. Carter, 1976
- [3] Laboratoire d'ElectroMagnétisme et d'Acoustique(LEMA).(2011).Localisation de sources, extraction et caractérisation de signaux acoustiques : application aux cris de chouettes effraies en milieu confiné. Adresse url : https://infoscience.epfl.ch/record/169594/files/MARMAROLI_Journ%C3%A9BioAcoustique_13102011.pdf
- [4] K Regina K., Accuracy Studies for TDOA and TOA Localization. Adresse url : http://fusion.isif.org/proceedings/fusion12CD/html/pdf/056_271.pdf
- [5] Le Mans Université, Convolution et Corrélation. Adresse url : http://perso.univ-lemans.fr/~nerrien/Phy308aA_5_C1.pdf
- [6] Isaacs J., Klein D., Hespanha J.,Optimal Sensor Placement For Time Difference of Arrival Localization. Adresse url : <https://pdfs.semanticscholar.org/66bb/fd42ade4176c7c5c5c5143a397ba02cd7e34.pdf>
- [7] HEURGUIER D. (2014). La localisation d'émetteurs de radiocommunication en zone urbaine .Adresse url : http://ursi-france.telecom-paristech.fr/fileadmin/journees_scient/docs_journees_2014/data/articles/000045.pdf
- [8] Kouali M., (2015). Diffusion d'une onde électromagnétique par un objet au-dessus d'une surface rugueuse - Problème vectoriel 3D Adresse url : <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01104970/document>
- [9] <http://www.beep.es/blog/2015/07/20-anos-de-gps/> Consulté le 4 mai 2018
- [10] Nogueira E. (2013).Conception d'un système d'antennes pour la localisation en temps réel avec réseau de capteurs sans fils. Adresse url : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00981583/document>
- [11] Wikipédia, Multilateration Adresse url : <https://en.wikipedia.org/wiki/Multilateration> consulté le 4 mai 2018

8 Annexe

8.1 Code MATLAB

8.1.1 Script d'exécution

```
1 % Apres avoir charge un fichier .mat contenant les donnees
2 sig = ones(4, size(Matrix_1_Array, 1), size(Matrix_1_Array, 2));
3 sig(1, :, :) = Matrix_1_Array;
4 sig(2, :, :) = Matrix_2_Array;
5 sig(3, :, :) = Matrix_3_Array;
6 sig(4, :, :) = Matrix_4_Array;
7
8 xR = [xR1, xR2, xR3, xR4];
9
10 [locations index tau] = multilateration(xCal, xR, sig);
11 approx = elimOutl(locations, index, 60);
```

8.1.2 Exécution de la multilatération

```
1 function [location indexes tau] = multilateration(xCal, xR, sig)
2 % Etabli les positions associees au signal
3 % xCal: position de la balise de calibration
4 % xR : position des recepteurs (3x4)
5 % sig : signaux pour chaque balise, pour chaque position (4xnx819400 ou n est le nombre de positions
6 % recherches)
7
8 nbMeasures = size(sig, 2);
9 tau = zeros(nbMeasures, 6);
10 R1 = [1 1 1 2 2 3]; % Etablissement des indices des balises a comparer
11 R2 = [2 3 4 3 4 4]; % A lire verticalement
12
13 maxTdoa = sqrt(sum((xR(1:2, R1) - xR(1:2, R2)).^2, 1)); % Recherche du TDOA maximum possible pour
14 % chaque coupe d'emetteur
15
16 for i = 1:nbMeasures
17     tau(i, :) = ms2(xCal, xR, squeeze(sig(:, i, :))); % Calcul des TDOA correspondant a chaque signal
18 end
19
20 indexes = find(all(maxTdoa > abs(tau), 2)); % Recherche des indices des TDOA inferieurs a maxTdoa
21 tau = tau(indexes, :); % Elimination des TDOA impossibles (superieurs a maxTdoa)
22
23 location = ones(size(tau, 1), 2);
24
25 for i = 1:size(tau, 1)
26     location(i, :) = locate(xCal, xR, tau(i, :)); % Calcule des positions associees aux TDOA
27 end
28 end
29
30
31 function tau = ms2(xCal, xR, sig)
32 % Fournis les 6 TDOA pour le signal
33 % xCal : la position de la balise de Calibration
34 % xR : matrice 3x4 comprenant les positions des bornes
35 % sig : matrice 4x819200 comprenant les 4 signaux
36
37
38 sigCal = zeros(4, 5000*4);
39 sigCal(:, ((1:5000)*4)-3) = sig(:, 2.5e5:(2.55e5-1)); % Cretion de la fenetre et insertion des 0;
40
41 sigSig = zeros(4, 5000*4);
42 sigSig(:, ((1:5000)*4)-3) = sig(:, 5.95e5:(6e5-1)); % Creation de la fenetre et insertion des 0;
```

```

43
44 ftCal = fft(sigCal, [], 2); % Transformation de Fourier et elimination des frequences hors bande
45 ftCal(:, 1:5001) = ftCal(:, 1:5001)*0;
46 ftCal(:, ((5000*3/2)+1):((5000*5/2)+1)) = 0;
47 ftCal(:, (15001:end)) = ftCal(:, (15001:end))*0;
48 ftCal = fftshift(ftCal, 2);
49
50
51 ftSig = fft(sigSig, [], 2); % Transformation de Fourier et elimination des frequences hors bande
52 ftSig(:, 1:5001) = ftSig(:, 1:5001)*0;
53 ftSig(:, ((5000*3/2)+1):((5000*5/2)+1)) = 0;
54 ftSig(:, (15001:end)) = ftSig(:, (15001:end))*0;
55 ftSig = fftshift(ftSig, 2);
56
57 sigCal = ifft(ftCal, [], 2); % Transformation inverse
58 sigSig = ifft(ftSig, [], 2);
59
60 tauRCal = tdoaCal(xCal, xR); % Calcul des differences de distance Calibration-emetteurs
61 dtCal = delay(tauRCal, sigCal, fs); % Calcul du delai cause par le materiel
62 tau = tdoa(sigSig, dtCal, fs); % Calcul des TDOA
63
64 end
65
66 function tauRCal = tdoaCal(xCal, xR);
67 % Calcule les TDOA reels pour la calibration
68 % xCal: position de la balise de calibration
69 % xR : position des recepteurs (3x4)
70
71 R1 = [1 1 1 2 2 3]; % Etablissement des indices des balises a comparer
72 R2 = [2 3 4 3 4 4]; % A lire verticalement
73
74 toa = sqrt(sum((xCal(1:2) - xR(1:2, :)).^2)); % Etablissement des TOA balise-recepteurs
75 tauRCal = toa(R1) - toa(R2); % Etablissement des TDOA par soustraction des TOA associes au TDOA
76
77 end
78
79 function dt = delay(tau, sig, fs)
80 % Calcule l'erreur causee par le materiel
81 % tau : vecteur comprenant les TDOA reels entre la balise et les recepteurs
82 % sig : fenetres de calibration des signaux correspondant a chacun des recepteurs (4x20000)
83 % fs : frequence d'echantillonnage
84
85 R1 = [1 1 1 2 2 3]; % Etablissement des indices des balises a comparer
86 R2 = [2 3 4 3 4 4]; % A lire verticalement
87 dt = zeros(1,6); % Creation du vecteur de reponse
88
89 for i = 1:6
90 [correlated lag] = xcorr(sig(R1(i,:),:), sig(R2(i,:),:)); % Correlation des signaux R1(i) et R2(i)
91 index = find(abs(correlated) == max(abs(correlated))); % Recherche de l'indice du maximum de la
correlation
92 dt(i) = lag(index)/fs - tau(i)/physconst('LightSpeed'); % Etablissement du delai en soustrayant les
TDOA reels du decalage obtenu
93 end
94
95 end
96
97 function tau = tdoa(sig, dt, fs)
98 % Calcule les TDOA
99 % sig : fenetres de la balise des signaux correspondant a chacun des recepteurs (4x20000)
100 % dt : delai du materiel
101 % fs : frequence d'echantillonnage
102
103 R1 = [1 1 1 2 2 3]; % Etablissement des indices des balises a comparer
104 R2 = [2 3 4 3 4 4]; % A lire verticalement
105 dt = zeros(1,6); % Creation du vecteur de reponse
106
107 for i = 1:6

```

```

108     [correlated lag] = xcorr(sig(R1(i,:),:), sig(R2(i,:),:)); % Correlation des signaux R1(i) et R2(i)
109     index = find(abs(correlated) == max(abs(correlated))); % Recherche de l'indice du maximum de la
        correlation
110     tau(i) = (lag(index)/fs - dt(i))*physconst('LightSpeed'); % Etablissement du delai en soustrayant
        les delais du decalage obtenu
111 end
112
113 end

```

8.1.3 Élimination des outliers, approximation de la trajectoire et affichage des résultats

```

1 function coord = elimOutl(location, index, nbMeasures)
2     % Elimine les positions aberrantes, etabli une appoximation du trajet et l'affiche
3     % location : position selon x et y de la balise (nbMeasuresx2)
4     % index : indices correspondant aux positions transmises
5     % nbMeasures : nombre de mesures originellement effectuees
6
7     firstMeasure = min([find(abs(location(2:end, 1) - location(1:end-1, 1)) > 0.05, 1)
8         find(abs(location(2:end, 2) - location(1:end-1, 2)) > 0.05, 1)]); % Prise de la
        premiere mesure marquant une difference de position de 0.05 m par rapport a la
        precedente (debut du mouvement)
9     coord = zeros(nbMeasures*3.75, 2);
10    coord(1:firstMeasure-1, :) = location(1:firstMeasure-1, :); % Stockage des mesures immobiles
11    index = index(find(firstMeasure <= index)); % Elimination des indices correspondant aux mesures
        immobiles
12
13    figure;
14    plot(location(:, 1), location(:, 2), 'o')
15
16
17    loc = location(firstMeasure:end, :); % Elimination des mesures immobiles
18
19    % Recherche des outliers (a mettre en commentaire pour ne pas chercher les outliers (cas sans obstacle
        par exemple))
20    notOutliers = findOutlier(loc);
21    index = index(notOutliers);
22    loc = loc(notOutliers, :);
23
24    [x y] = fitpath(loc(:, :), 20, index, firstMeasure, nbMeasures);
25
26    coord(firstMeasure:end, :) = [x' y'];
27
28    hold on; plot(coord(:, 1), coord(:, 2))
29    plot(loc(:, 1), loc(:, 2), 'o')
30
31 end
32
33 function ind = findOutlier(A)
34     % Recherche les indices correspondant aux outliers dans une matrice de positions
35     % A : Matrice des positions (coordonnees en x, y)
36
37     A = outlier3(A, 0.7); % Recherche des outliers
38     ind = find(A ~= 0); % Etablissement des indices correspondant
39     ind = ind(1:length(ind)/2);
40
41 end
42
43 function [x y] = fitpath(A, n, index, tmin, nbMeasures)
44     % Fait l'approximation du parcours a l'aide des donnees restantes
45     % A : Matrice des positions (coordonnees en x, y)
46     % n : degre a attribuer a polyfit
47     % index : indice de chaque donnee restante
48     % tmin : temps de depart
49     % nbMeasures : nombre de mesures
50
51     x = A(:, 1);

```

```

52 y = A(:, 2);
53
54 tmax = index(end) % Temps maximum
55
56 [coef1, ~, mu1] = polyfit(index, x, n);
57 [coef2, ~, mu2] = polyfit(index, y, n);
58
59 t = linspace(tmin,tmax, (nbMeasures*3.75)-tmin+1); % Vecteur de temps a utiliser
60
61 x = polyval(coef1, t, [], mu1);
62 y = polyval(coef2, t, [], mu2);
63
64 end
65
66
67 function [NewA] =outlier3(A,tolerance)
68 % Identifie les outliers dans la matrice des positions (x, y) A et les remplace par des zeros
69 % A : Matrice des position (x, y)
70 % tolerance : Tolerance (entre 0.5 et 1)
71
72 sizemat=size(A);
73 dist= zeros(sizemat(1)-1,1);
74 NewA=A;% cree nouvelle matrice sans outliers
75 for (i=1:sizemat(1)-1)
76     dist(i,1)=sqrt((A(i,1)-A(i+1,1))^2+(A(i,2)-A(i+1,2))^2); %
77     %aura une colonne de moins que A puisque distance entre 2 points
78 end
79
80 mean1=mean(dist);
81 var1=var(dist);
82
83 x=dist;
84 % norm = fitdist(x,'normal');
85 % fit x a une distribution normale , renvoie la variance et moyenne
86 % et son intervalle de confiance 95%
87 pd = makedist('Normal',mean1,sqrt(var1)); % cree la normale ;
88 y = cdf(pd,x); % calcule la cumulative ;
89 for (i=1:sizemat(1)-1-3)
90     if y(i)< ((1-tolerance)/2) || y(i)>(tolerance+(1-tolerance)/2) || x(i)>3
91         for (K=0:2) %on elvalue les 3 suivants si distances anormales
92             % deuxieme distance (i+1)
93             if y(i+K+1)< ((1-tolerance)/2) || y(i+K+1)>(tolerance+(1-tolerance)/2) || x(i+K+1)>3
94                 it=K;
95                 for (v=i+1:i+1+it)
96                     NewA(v,1)=0 ;
97                     NewA(v,2)=0 ; % le point suivant de l'indice est un outlier, puisque
98                     % l'indice i calcule la distance entre le point i et i+1
99                     % tout outlier est remplace par 0
100                 end
101                 break
102             end
103         end
104     end
105 end
106
107 WTFIndex = find(abs(A(:, 1)) > 10 | abs(A(:, 2)) > 10);
108 NewA(WTFIndex, :) = 0;
109
110 % NewA( ~any(NewA,2), : ) = [];
111 % ceci permet de virer tous les parties de la matrices qui valent 0 , on
112 % obtient une nouvelle matrice sans outliers ( sans 0 )
113 end

```