



HAL
open science

Faisabilité de localisation d'utilisateurs de la route en détresse par la technique TDOA à l'aide d'un réseau de radiotéléphonie GSM. Rapport d'activités, décembre 2001 - décembre 2002

M. Laoufi

► **To cite this version:**

M. Laoufi. Faisabilité de localisation d'utilisateurs de la route en détresse par la technique TDOA à l'aide d'un réseau de radiotéléphonie GSM. Rapport d'activités, décembre 2001 - décembre 2002. 2002, 39p. hal-00546297

HAL Id: hal-00546297

<https://hal.science/hal-00546297>

Submitted on 14 Dec 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



*INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE
SUR LES TRANSPORTS ET LEUR SÉCURITÉ*

Mourad LAOUFI (INRETS/LEOST - UVHC)

Faisabilité de localisation d'usagers de la route en détresse par la technique TDOA à l'aide d'un réseau de radiotéléphonie GSM

Rapport d'activités

Décembre 2001 - Décembre 2002

*Cofinancement INRETS - Région Nord - Pas de Calais
Contrat n° 01-34-0092*

Décembre 2002

*Co-Directeur INRETS-LEOST : Dr. Marc Heddebaut
Directeur UVHC : Prof. Jean-Michel Rouvaen*

Mourad LAOUFI (INRETS/LEOST - UVHC)

Faisabilité de localisation d'usagers de la route en détresse par la technique TDOA à l'aide d'un réseau de radiotéléphonie GSM

Rapport d'activités

Décembre 2001 - Décembre 2002

*Cofinancement INRETS - Région Nord - Pas de Calais
Contrat n° 01-34-0092*

Décembre 2002

*Co-Directeur INRETS-LEOST : Dr. Marc Heddebaut
Directeur UVHC : Prof. Jean-Michel Rouvaen*

TABLE DES MATIERES

1.	<i>Introduction</i>	4
2.	<i>Le processus général de localisation de mobile</i>	5
3.	<i>La méthode TDOA de localisation du mobile</i>	7
3.1	<i>La méthode d'estimation de TDOA</i>	7
3.2	<i>Le modèle mathématique d'estimation de la position du mobile</i>	8
4.	<i>La mise en oeuvre du banc de mesure pour la localisation de mobile</i>	12
4.1	<i>La structure de l'émetteur</i>	13
4.2	<i>La structure du récepteur</i>	15
5.	<i>Les résultats généraux d'expérimentations obtenus au laboratoire</i>	18
5.1	<i>Effet du taux d'échantillonnage sur la précision de mesure de TDOA</i>	18
5.2	<i>Effet du rapport signal à bruit sur la précision de mesure de TDOA</i>	24
5.3	<i>Effet des trajets multiples sur la précision de mesure de TDOA</i>	26
5.4	<i>Conclusion</i>	28
6.	<i>Résultats d'expérimentations de la localisation du mobile en milieu rural</i>	29
6.1	<i>Effet du rapport signal à bruit et le taux d'échantillonnage sur la TDOA</i>	30
6.2	<i>Performances de mesure de la localisation du mobile en milieu rural</i>	32
6.3	<i>Conclusion</i>	37
7.	<i>Conclusion générale</i>	38
	<i>Références bibliographiques</i>	39

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 3.1 : Estimation de la TDOA par la technique d'intercorrélation générale	7
Figure 3.2 : La solution du système d'équation d'hyperboles	11
Figure 4.1: Illustration du schéma synoptique du banc de mesure d'émission/réception pour la localisation du mobile	12
Figure 4.2 : Illustration de l'implémentation de la structure de l'émetteur GSM dans le générateur de signaux SMIQ	13
Figure 4.3 : Le format du burst d'accès	14
Figure 4.4 : Autocorrélation de la séquence d'apprentissage de longueur 41 du burst d'accès	14
Figure 4.5 : Visualisation de l'émission pulsée du signal GSM générée par le générateur de signaux SMIQ et reçue sur les deux voies de l'oscilloscope à une fréquence FI = 21.4 MHz (un seul time slot de la trame GSM est actif contenant le burst d'accès)	16
Figure 4.6 : Illustration de l'implémentation sur MATLAB du récepteur GSM	16
Figure 4.7 : Profil de la réponse impulsionnelle du canal (le canal représente le filtre gaussien d'émission en cascade avec le canal de propagation) en présence du trajet direct uniquement. Ce profil correspond aux coefficients de filtre adapté à la réception	17
Figure 5.1 : Schéma synoptique du banc de mesure de TDOA entre deux lignes à retard de longueurs différentes	18
Figure 5.2 : La variation de la TDOA en fonction du taux d'échantillonnage (pas d'erreur de synchronisation, le rapport S/B est de 30, le signal FI est échantillonné à 100 MHz, les deux lignes de transmission à retard sont de longueurs 100 m et 72 m)	20
Figure 5.3 : Variation de la TDOA en fonction de différents valeurs du taux d'échantillonnage de l'oscilloscope (pas d'erreur de synchronisation, le rapport S/B est de 30 dB, les taux d'échantillonnages sont : 15, 37, 74, 148 et 369, pas de trajets multiples sur les lignes de transmission de longueurs 100 m et 62 m)	21
Figure 5.4 : Exemple de configuration des récepteurs pour le calcul de la position du mobile	21
Figure 5.5 : Variation de l'erreur de positionnement du mobile sur X et Y en fonction du taux d'échantillonnage (pas de trajets multiples, le rapport S/B est de 30 dB)	22
Figure 5.6 : Exemple de configuration des récepteurs pour le calcul de la position du mobile	22
Figure 5.7 : Variation de l'erreur de positionnement du mobile sur X et Y en fonction du taux d'échantillonnage (pas de trajets multiples, le rapport S/B est de 30 dB)	23
Figure 5.8 : La variation de la TDOA en fonction du rapport signal à bruit (les longueurs de lignes sont 150 m et 45 m, le taux d'échantillonnage est de 123, pas d'erreur de synchronisation, pas de trajet multiple)	25
Figure 5.9 : Schéma synoptique du banc de mesures TDOA entre deux signaux. L'un correspond uniquement à la composante du trajet direct, l'autre contient les trajets direct et indirect.	26
Figure 5.10 : Exemple de variation de la TDOA en fonction de la puissance relative présente dans le trajet multiple (Le retard relatif est de 0.19 μ s sur le signal de la voie 2, le signal de la voie 1 contient uniquement le trajet direct, le taux d'échantillonnage est de 123, S/B=25 dB, pas d'erreur de synchronisation)	27
Figure 6.1 : Schéma synoptique du banc de mesure TDOA entre deux signaux reçus au niveau des deux analyseur "FSIQ" synchronisés par deux récepteurs GPS de référence de temps.	30
Figure 6.2: Variation de la TDOA entre les deux signaux reçus au niveau des deux analyseurs "FSIQ" en fonction du taux d'échantillonnage pour un rapport signal à bruit de 15 dB, 25 dB et 30 dB (le taux d'échantillonnage est de 369 échantillons par bit)	31
Figure 6.3 : Configuration de la disposition des récepteurs PAU et la station mobile selon la précision du système DGPS sur le site d'un aéroport désaffecté	32

Figure 6.4 : Variation de la TDOA en fonction du taux d'échantillonnage entre le PAU 1 et 3 selon la configuration de la figure 20 (Le rapport S/B est de 30 dB, le taux d'échantillonnage initial du scope est de 369 échantillons par bit) _____ 34

Figure 6.5 : Variation de la TDOA en fonction du taux d'échantillonnage entre le PAU 2 et 3 selon la configuration de la figure 20 (Le rapport S/B est de 30 dB, le taux d'échantillonnage initial du scope est de 369 échantillons par bit) _____ 35

Figure 6.6 : Variation de l'erreur de positionnement du mobile sur X et Y en fonction du taux d'échantillonnage et selon la configuration de la figure 20 (Le rapport S/B est de 30 dB, le taux d'échantillonnage initial du scope est de 369 échantillons par bit) _____ 36

1. Introduction

La précision de localisation recherchée au sein du réseau cellulaire dédié de deuxième et troisième génération est de l'ordre de grandeur de quelques mètres afin de pouvoir lever l'ambiguïté quant au sens de circulation emprunté par l'utilisateur de la route. Ce paramètre est jugé majeur notamment sur autoroute.

Dans la première partie de ce rapport, nous présentons les différentes étapes du processus de localisation des usagers de la voie de transport par la technique de positionnement TDOA (Time Difference Of Arrival). Ainsi, nous décrivons la structure du banc de mesure mis en œuvre pour les mesures de la position du mobile sur la liaison montante du réseau GSM. La dernière partie de ce rapport est entièrement consacrée à l'analyse des principaux résultats expérimentaux obtenus au laboratoire afin d'évaluer l'effet des principaux facteurs qui affectent la précision de localisation du mobile dans le réseau GSM à savoir le taux d'échantillonnage, le rapport signal à bruit et les trajets multiples. Des résultats généraux sont présentés concernant un essai expérimental de mesure de la position de localisation du mobile réalisé sur le site d'un aérodrome désaffecté.

2. Le processus général de localisation de mobile

Dans cette partie, nous présentons les différentes étapes du processus de localisation afin d'estimer la position de la station mobile. La figure 2.1 montre le diagramme de ce processus d'estimation de position de mobile. L'utilisateur en détresse dans une nano-cellule sous la couverture radio du PAU 1 (Poste d'Appel d'Urgence), en possession d'un téléphone cellulaire GSM compose le numéro d'appel d'urgence attribué à ce réseau GSM dédié (exemple le 107 par analogie avec la fréquence 107.7 MHz de la chaîne radio d'autoroute) soit délibérément soit automatiquement depuis son véhicule. La BTS en charge d'un certain nombre de PAU reçoit tous les appels émanant des usagers de la route et déclenche dans un premier temps la procédure de détection du signal utile de l'utilisateur en détresse. Cette BTS reste à l'écoute permanente du même signal utile émanant de ce PAU 1 qui contrôle la communication et déclenche la détection du même signal utile au niveau de deux autres PAU au minimum [1]-[2]. On estime ensuite les deux différences de temps d'arrivée TDOA12 et TDOA13 respectivement par l'algorithme d'intercorrélation entre les signaux reçus au niveau du PAU 1 et 2, et ceux reçus au niveau du PAU 1 et 3. Les deux TDOA estimés sont convertis en différence de distance afin de résoudre le système d'équations d'hyperboles non-linéaires en utilisant la méthode de Chan.

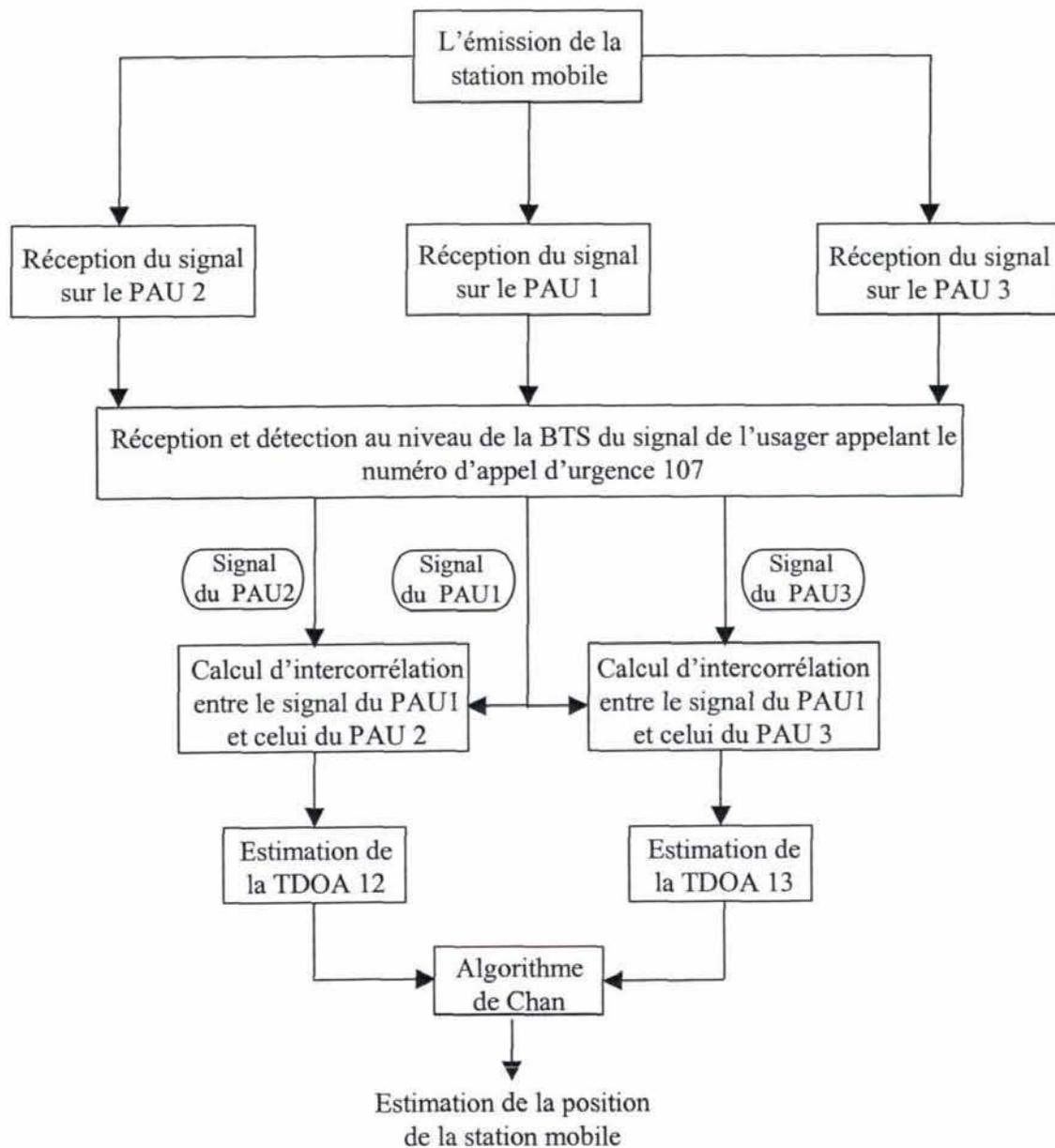


Figure 2. 1 : Le processus de calcul de la position de localisation du mobile

3. La méthode TDOA de localisation du mobile

Deux étapes distinctes sont nécessaires pour l'estimation de la localisation de la station mobile. La première étape consiste à estimer la différence de temps de propagation au niveau de la BTS entre la station mobile et chaque paire de PAU. Dans la deuxième étape, un algorithme de résolution des équations d'hyperboles non-linéaires est utilisé pour déterminer l'estimation de la position de la station mobile.

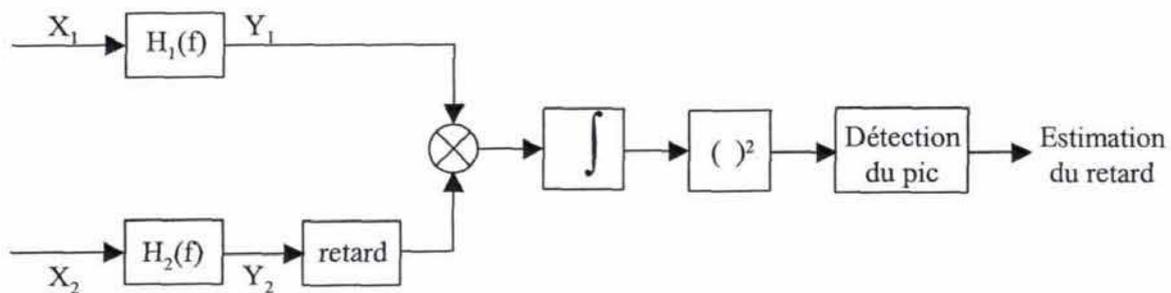


Figure 3. 1 : Estimation de la TDOA par la technique d'intercorrrelation générale

3.1 La méthode d'estimation de TDOA

La TDOA peut être estimée par deux méthodes[3]. La première méthode consiste à soustraire les mesures de TOA obtenues à partir de deux PAU afin de calculer la TDOA relative. La deuxième méthode est fondée sur l'utilisation des techniques générales d'intercorrrelation [4]-[5]-[6]. La figure 3.1 montre le bloc diagramme pour l'estimation de la TDOA par la méthode d'intercorrrelation générale. Elle calcule l'intercorrrelation entre les deux signaux préfiltrés reçus au niveau des deux récepteurs et estime la TDOA correspondant au pic de l'intercorrrelation estimé entre les deux récepteurs.

La première méthode est utilisable uniquement dans le cas de la mesure du temps de propagation absolu entre la station mobile et le PAU. Elle permet d'améliorer la précision de localisation de mobile notamment dans le cas où les erreurs de mesures sur les deux TOA dues aux trajets multiples sont corrélées (parce que les deux canaux de propagation entre la station mobile et les deux PAU possèdent les mêmes composantes de trajets multiples). Donc, plus les erreurs de

mesures de TOA sont similaires, plus il est avantageux de les convertir en mesure de TDOA relative. Cependant, cette méthode est praticable uniquement si nous connaissons le temps de référence au niveau de la station mobile. Pour cette raison, nous utilisons pour le réseau cellulaire dédié la technique d'intercorrélation pour l'estimation de la TDOA. Cette technique exige une synchronisation parfaite entre les différents PAU intervenant dans la mesure de TDOA.

3.2 Le modèle mathématique d'estimation de la position du mobile

Pour obtenir la position de la station mobile, il faut convertir la TDOA estimée en différence de distance afin de résoudre le système d'équations d'hyperboles non-linéaires (voir figure 3.2). Plusieurs algorithmes ont été proposés dans la littérature pour résoudre ce système d'équations non-linéaires. Un modèle mathématique général a été développé pour l'estimation de la position de la station mobile en 2-D utilisant N récepteurs.

Quelques définitions pour une estimation de la position en 2-D :

(x, y) représentent les coordonnées inconnues de la position de la station mobile. (X_j, Y_j) représentent les coordonnées connues fixes des récepteurs, avec $j = 2, 3, \dots, N$, N est le nombre total des récepteurs intervenant dans le calcul de la position du mobile. Nous supposons que le PAU 1 est le récepteur qui contrôle la communication. Par définition, c'est le récepteur qui reçoit en premier le signal en provenance de la station mobile. Donc, toutes les différentes TDOA sont calculées par rapport à ce PAU maître.

La différence de distance entre la MS et le $j^{\text{ème}}$ PAU est :

$$R_j = \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2} \quad (3.1)$$

$$= \sqrt{X_j^2 + Y_j^2 - 2X_jx - 2Y_jy + x^2 + y^2}$$

La différence de distance entre le PAU maître et les autres PAU intervenants dans le calcul de la localisation est donnée par :

$$R_{j,1} = cd_{j,1} = R_j - R_1 \quad (3.2)$$

$$= \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2}$$

Où

c est la vitesse de l'onde électromagnétique

$d_{j,1}$ est la TDOA estimée entre le PAU maître et le $j^{\text{ème}}$ PAU.

Ceci permet de définir un système d'équations d'hyperboles non-linéaires qui exprime la TDOA en fonction des coordonnées de la station mobile. Les algorithmes de résolution de système d'équations non-linéaires les plus couramment utilisés sont les méthodes de Taylor et Chan. La méthode de Taylor linéarise le système d'équations par un développement d'ordre 1 et utilise ensuite une méthode itérative pour résoudre le système d'équations linéaires [7]. Cette méthode est précise mais elle nécessite un vecteur de coordonnées d'initialisation proche de la position du mobile afin que la solution converge vers les coordonnées exactes de la position du mobile. Pour cette raison, nous utilisons pour notre système de localisation une méthode alternative de précision équivalente à celle de Taylor, et qui permet de transformer le système d'équations non-linéaires (3.2) en un système d'équations linéaires.

De l'équation (3.2) nous avons :

$$R_j = (R_{j,1} + R_1)^2 \quad (3.3)$$

L'équation (3.1) réécrite donne:

$$R_{j,1}^2 + 2R_{j,1}R_1 + R_1^2 = X_j^2 + Y_j^2 - 2X_jx - 2Y_jy + x^2 + y^2 \quad (3.4)$$

La soustraction de l'équation (2.1) à $j=1$ de l'équation (2.4) donne :

$$R_{j,1}^2 + 2R_{j,1}R_1 = X_j^2 + Y_j^2 - 2X_{j,1}x - 2Y_{j,1}y + x^2 + y^2 \quad (3.5)$$

Où

$$X_{j,1} = X_j - X_1 \quad \text{et} \quad Y_{j,1} = Y_j - Y_1$$

Le système d'équations (3.5) obtenu est linéaire en fonction des coordonnées (x, y) de la position du mobile et de la distance R_1 entre la station mobile et le PAU maître contrôlant la communication. En utilisant la méthode alternative de Chan pour un système de trois PAU ($N=3$), nous obtenons deux mesures de TDOA [8].

A partir de l'équation (3.5), nous déduisons les coordonnées x et y en fonction R_1

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} X_{2,1} & Y_{2,1} \\ X_{3,1} & Y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} R_{2,1} \\ R_{3,1} \end{bmatrix} R_1 + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ R_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (3.6)$$

Où

$$K_1 = X_1^2 + Y_1^2$$

$$K_2 = X_2^2 + Y_2^2$$

$$K_3 = X_3^2 + Y_3^2$$

Ensuite, nous substituons les valeurs de x et y de l'équation (3.6) dans l'équation (3.1) pour $j=1$. Ceci permet d'obtenir une équation du second degré en fonction de R_1 dont la connaissance des racines permet de déterminer les valeurs de x et y . Il est important de noter que seulement la racine carrée positive de R_1 est prise en considération pour le calcul des valeurs de x et y . La deuxième racine carrée de R_1 est soit négative ou supérieure au rayon de la cellule du PAU maître.

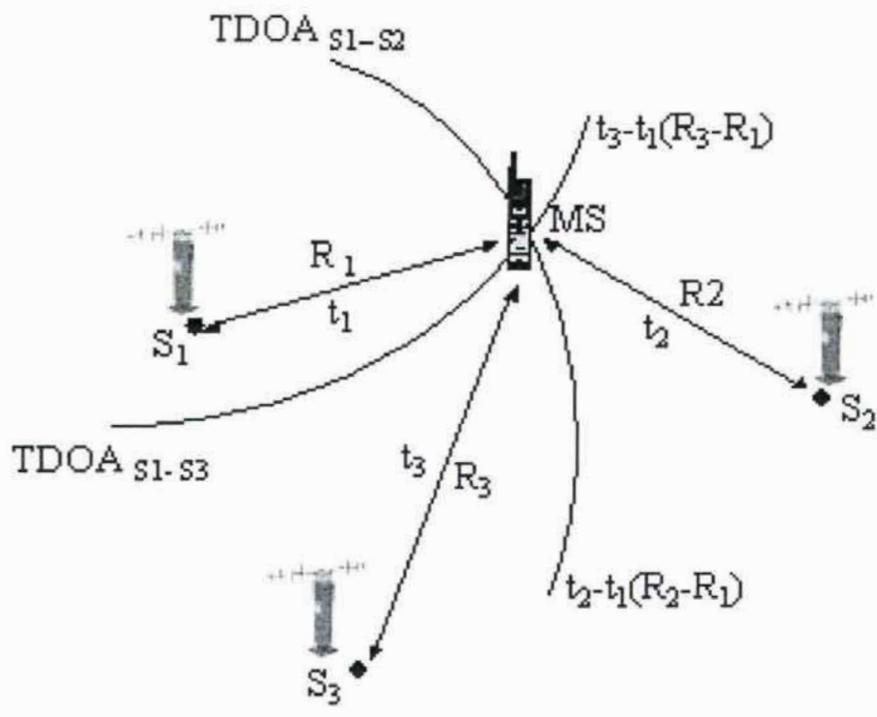


Figure 3.2 : La solution du système d'équation d'hyperboles

4. La mise en oeuvre du banc de mesure pour la localisation de mobile

Avant de présenter les principaux résultats de mesure de la localisation du mobile par la méthode de TDOA, nous allons détailler dans cette partie la mise en oeuvre du banc de mesure de la localisation du mobile. De façon générale, on peut décomposer le système de mesure de la localisation du mobile dans le réseau GSM en trois parties principales telle que le présente la figure 4.1. La partie d'émission, de réception et de traitement du signal GSM en bande de base sont simulées sur MATLAB.

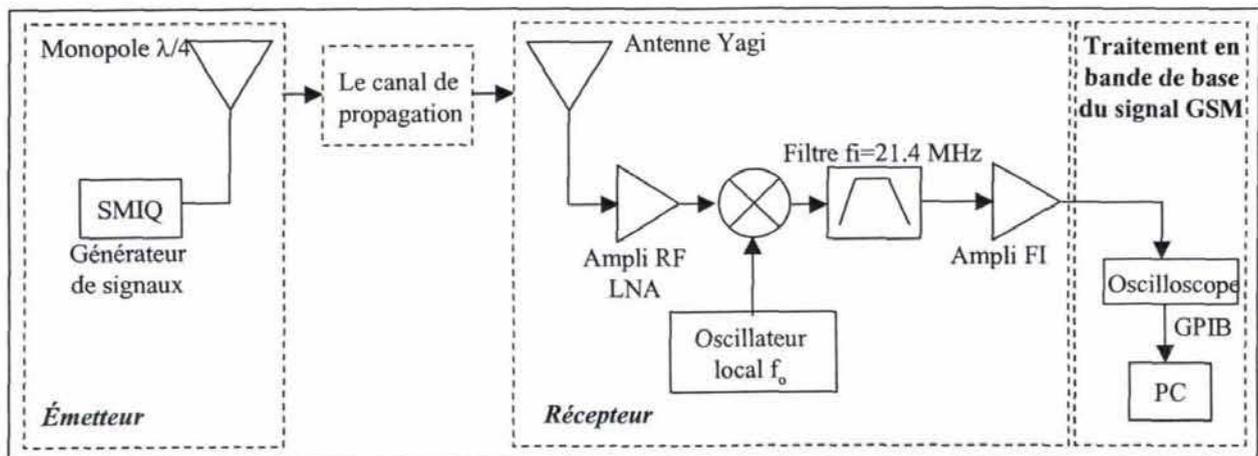


Figure 4. 1: Illustration du schéma synoptique du banc de mesure d'émission/réception pour la localisation du mobile

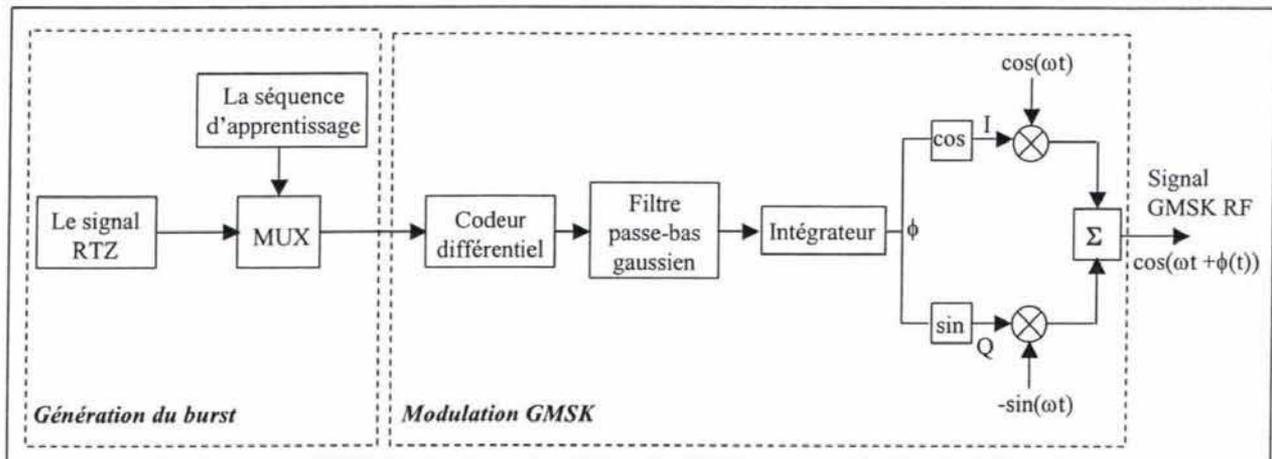


Figure 4.2 : Illustration de l'implémentation de la structure de l'émetteur GSM dans le générateur de signaux SMIQ

4.1 La structure de l'émetteur

A l'émission le signal hyperfréquence GSM est généré par le générateur de signaux vectoriel SMIQ et transmis dans une antenne omnidirectionnelle. Les opérations nécessaires en bande de base pour générer le signal GSM sont présentées figure 4.2. On distingue principalement l'opération de génération du burst GSM et celle de modulation GMSK [9]. L'estimation de la TDOA pour notre système de localisation exploite la séquence d'apprentissage du burst d'accès. Ce burst constitue le premier burst envoyé par le mobile vers la BTS avant l'établissement de la communication et ne fait pas l'objet du contrôle de puissance [10]. Il contient 87 bits dont 41 bits de séquence d'apprentissage tel que le présente la figure 4.3. La séquence d'apprentissage du burst d'accès présente l'avantage de posséder une séquence plus longue comparée à celle du burst normal et des propriétés particulières d'autocorrélation. La figure 4.4 montre la fonction d'autocorrélation, elle prend une forme de pic parfait autour de l'origine et atteint son maximum à $|R(0)| = 41$. Ce burst est édité à l'aide du générateur SMIQ et envoyé sur un seul time slot de la trame GSM. Le burst occupe 1 time slot (1 time slot = 156.25 bits et de durée de 577 μ s) parmi les 8 time slots de la trame TDMA de durée égale à 4.615 ms. Ce burst est ensuite passé à travers un codeur différentiel et préfiltré par un filtre gaussien passe-bas de produit $BT = 0.3$ (B: la bande à

3 dB de la réponse fréquentielle du filtre Gaussien, $T = 3.692\mu s$ est la durée de bit). Le signal à la sortie du filtre est appliqué à un intégrateur numérique pour générer la phase qui permet de calculer les signaux I et Q. Les signaux I et Q sont ensuite multipliés respectivement par la porteuse à ω et la même porteuse déphasée de $\pi/2$. Les signaux résultants sont additionnés et donnent le signal GSM RF modulé.

bits de garde 8 bits	séquence d'apprentissage 41 bits	bits codés 36 bits	bits de garde 3 bits
-------------------------	-------------------------------------	-----------------------	-------------------------

Figure 4.3 : Le format du burst d'accès

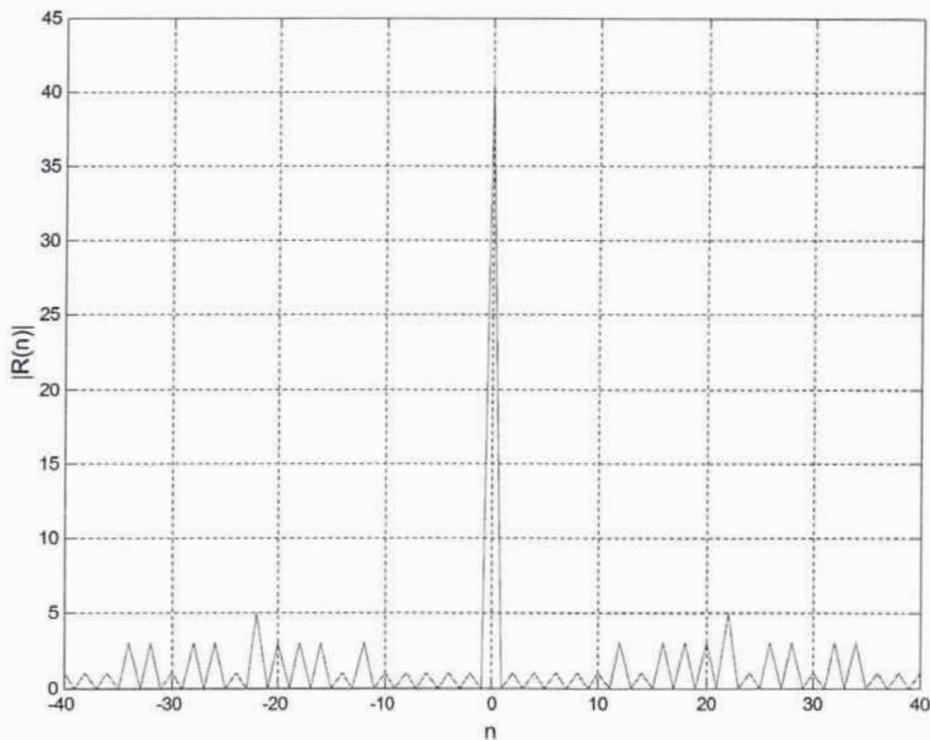


Figure 4.4 : Autocorrélation de la séquence d'apprentissage de longueur 41 du burst d'accès

4.2 La structure du récepteur

A la réception, le signal capté par l'antenne directive de type Yagi sur la bande de fréquences de GSM subit une transposition en fréquence par mélange avec l'oscillateur local pour sortir à une fréquence intermédiaire de 21.4 MHz tel que le montre la figure 4.1. Ensuite, le signal de fréquence intermédiaire est récupéré à partir de l'oscilloscope par le bus GPIB en vue d'un traitement ultérieur sur PC. La figure 4.5 montre l'acquisition à la fréquence intermédiaire de 21.4 MHz, sur les deux voies de l'oscilloscope, de l'émission pulsée du premier time slot de la trame GSM contenant le burst d'accès généré par le générateur de signaux SMIQ.

La dernière partie du banc de mesure est entièrement implémentée sur MATLAB. La figure 4.6 illustre les différents traitements appliqués au signal à la réception. Le signal numérique de fréquence intermédiaire 21.4 MHz est multiplié respectivement par la porteuse à 21.4 MHz et la même porteuse déphasée de $\pi/2$ pour transposer le signal en bande de base. Les signaux numériques I et Q sont ensuite récupérés par un simple filtrage passe-bas. Ces signaux I et Q sont dégradés du fait des aléas du canal de propagation, c'est pourquoi nous estimons la réponse impulsionnelle du canal de propagation en utilisant la séquence d'apprentissage du burst d'accès connue de l'émetteur et du récepteur [11]. Celle-ci en déduit les paramètres du filtre adaptatif égaliseur qui compense les déformations des signaux I et Q liées au canal de propagation. La figure 4.7 montre le profil de la réponse impulsionnelle du canal qui définit la réponse impulsionnelle du filtre gaussien à l'émission en cascade avec la réponse impulsionnelle du canal de propagation.

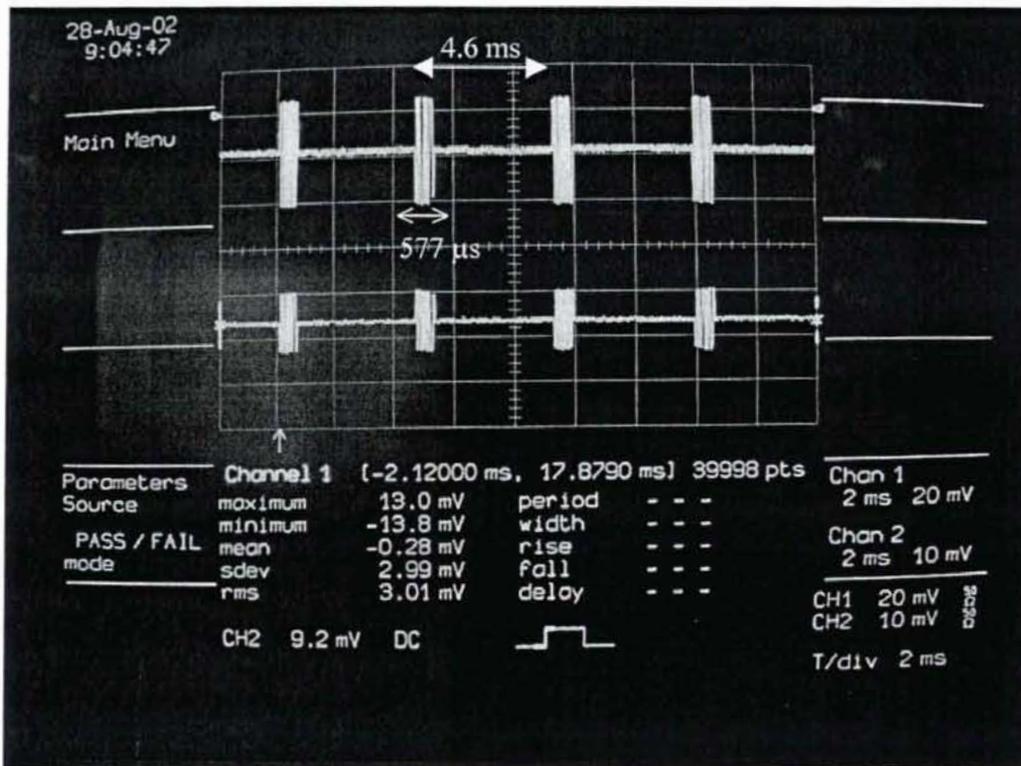


Figure 4.5 : Visualisation de l'émission pulsée du signal GSM générée par le générateur de signaux SMIQ et reçue sur les deux voies de l'oscilloscope à une fréquence $F_I = 21.4$ MHz (un seul time slot de la trame GSM est actif contenant le burst d'accès)

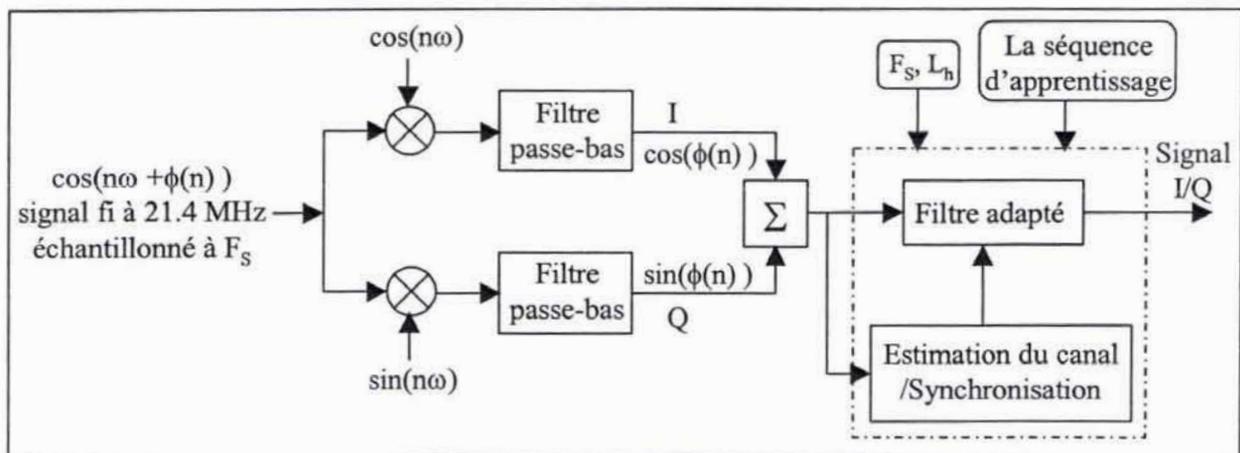


Figure 4.6 : Illustration de l'implémentation sur MATLAB du récepteur GSM

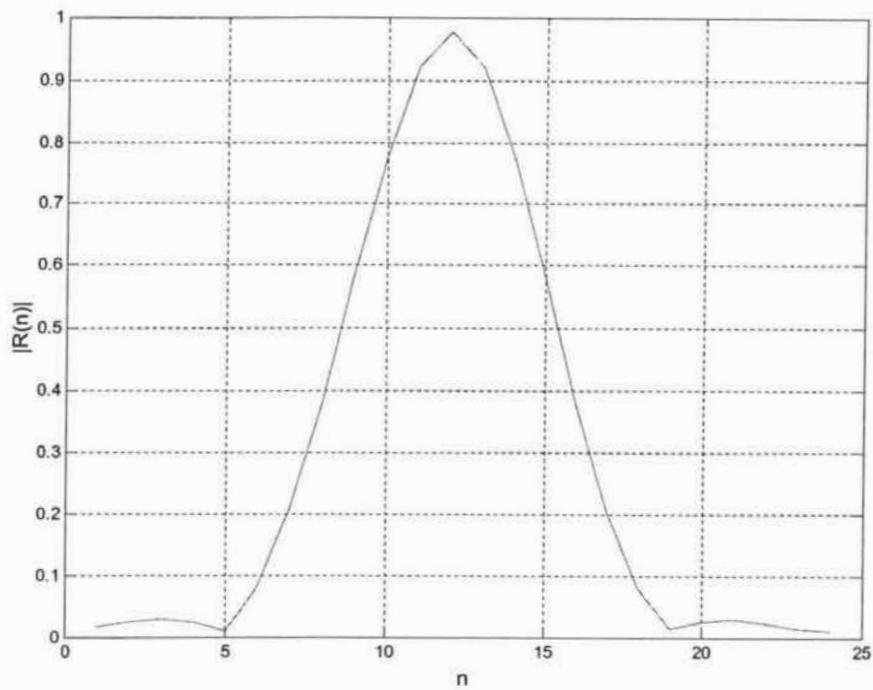


Figure 4.7 : Profil de la réponse impulsionnelle du canal (le canal représente le filtre gaussien d'émission en cascade avec le canal de propagation) en présence du trajet direct uniquement. Ce profil correspond aux coefficients de filtre adapté à la réception

5. Les résultats généraux d'expérimentations obtenus au laboratoire

Dans cette partie, nous présentons les résultats d'expérimentations réalisées au laboratoire pour évaluer l'effet des principaux facteurs importants qui affectent la précision de localisation du mobile dans le réseau GSM. Dans un premier temps nous nous intéressons à l'analyse de l'effet du taux d'échantillonnage sur la précision de mesure de TDOA. Nous présentons ensuite les performances de la localisation du mobile en fonction du rapport signal à bruit et suivant le milieu de propagation en trajets multiples.

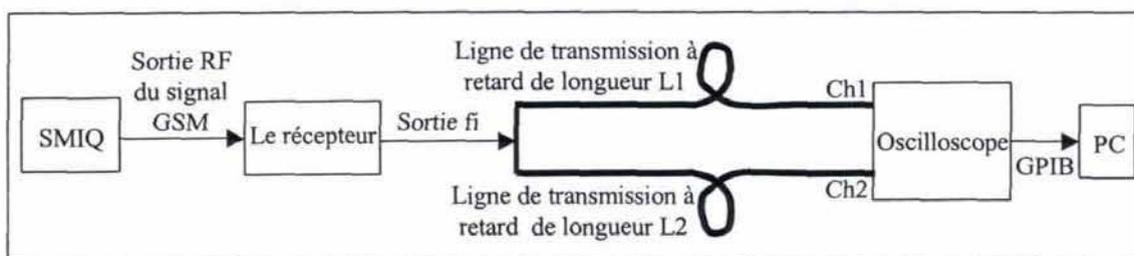


Figure 5.1 : Schéma synoptique du banc de mesure de TDOA entre deux lignes à retard de longueurs différentes

5.1 Effet du taux d'échantillonnage sur la précision de mesure de TDOA

Pour analyser l'effet du taux d'échantillonnage du récepteur GSM sur la mesure de TDOA en utilisant la technique d'intercorrélation, nous avons procédé à des mesures de différence de temps de propagation entre deux lignes de transmission à retard de longueur différentes tel que le présente le schéma synoptique de la figure 5.1. Le signal GSM de fréquence intermédiaire à 21.4 MHz et de puissance de -80 dBm à la sortie du récepteur est injecté à travers deux lignes de transmission à retard de longueurs équivalentes dans l'air respectivement égales à 100 m et 72 m. Les deux signaux sont ensuite récupérés à partir de l'oscilloscope par le bus GPIB en vue de calculer la TDOA. L'acquisition des deux signaux FI est parfaitement synchrone à une fréquence

d'échantillonnage de 100 MHz . Cette fréquence d'échantillonnage permet d'échantillonner le signal GSM de débit de 270.833 kbits/s à un taux d'échantillonnage de 369 échantillons par bit. Différents taux d'échantillonnage ont été envisagés sur MATLAB afin d'analyser la variation de l'erreur de mesure de la TDOA en fonction de ce taux d'échantillonnage. La figure 5.2 montre que l'erreur sur la TDOA diminue progressivement avec l'augmentation du taux d'échantillonnage. Elle varie entre une trentaine et une centaine de mètres pour un taux d'échantillonnage inférieur à 20 échantillons par bit. Elle diminue ensuite progressivement jusqu'à la limite de la résolution de 3 m correspondante au pas de quantification de $\Delta t = 3.69.2\mu\text{s}/369$. Pour tous ces essais, un rapport signal à bruit important a été considéré.

Le même type d'expérimentation que la précédente a été entrepris en faisant varier progressivement la fréquence d'échantillonnage du signal de fréquence intermédiaire sur l'oscilloscope. Différentes mesures ont été faites à des taux d'échantillonnage de 15, 37, 74, 148 et 369 échantillons par bit. La figure 5.3 montre effectivement que l'erreur sur la mesure de TDOA diminue avec l'augmentation du taux d'échantillonnage. Ceci s'explique du fait que l'augmentation du taux d'échantillonnage entraîne la diminution de l'erreur de quantification sur l'estimation de la TDOA. Le rapport signal sur bruit dû à la quantification est proportionnel au carré du nombre de points utilisés pour échantillonner le signal. Donc, plus le nombre de points est important moins le bruit lié à la quantification est significatif et meilleure est la précision de mesure de TDOA.

Les figures 5.5 et 5.7 montrent la variation de l'erreur de positionnement sur les coordonnées x et y du mobile en fonction du taux d'échantillonnage. Elles correspondent respectivement aux configurations des figures 5.4 et 5.6. La fréquence d'échantillonnage du signal utilisée est de 100 MHz . Les deux figures montrent que l'erreur de positionnement sur les coordonnées x et y du mobile varie d'une centaine à une dizaine de mètres pour des taux d'échantillonnage inférieurs à 40 échantillons par bit. L'erreur ensuite diminue considérablement et avoisine le zéro pour des taux d'échantillonnages élevés de 123, 184 et 369 échantillons par bit. Il est donc indispensable d'appliquer au signal GSM de débit 270.833 kbits/s à la réception des fréquences d'échantillonnage élevées afin de diminuer l'erreur dû au bruit de quantification et d'améliorer la précision de localisation du mobile.

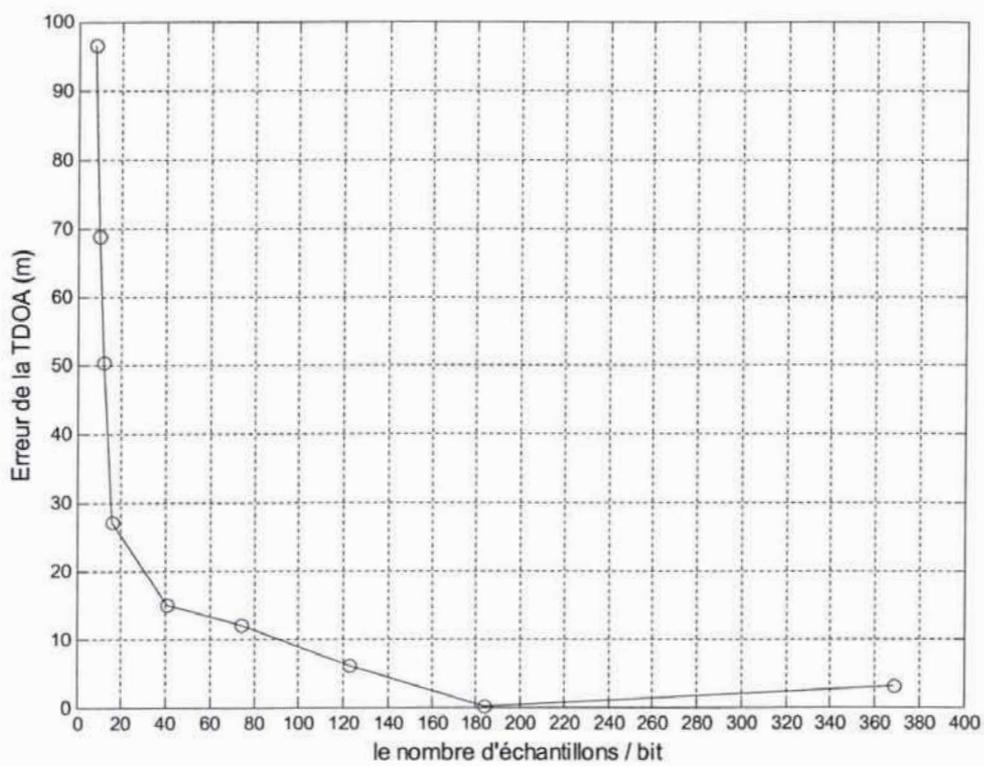


Figure 5.2 : La variation de la TDOA en fonction du taux d'échantillonnage (pas d'erreur de synchronisation, le rapport S/B est de 30, le signal FI est échantillonné à 100 MHz, les deux lignes de transmission à retard sont de longueurs 100 m et 72 m)

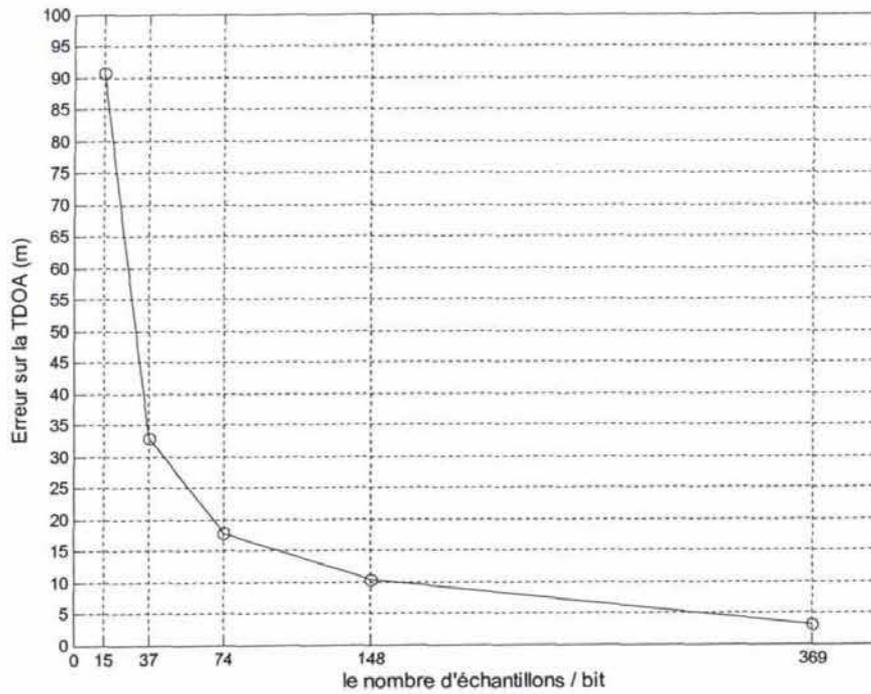


Figure 5.3 : Variation de la TDOA en fonction de différents valeurs du taux d'échantillonnage de l'oscilloscope (pas d'erreur de synchronisation, le rapport S/B est de 30 dB, les taux d'échantillonnages sont : 15, 37, 74, 148 et 369, pas de trajets multiples sur les lignes de transmission de longueurs 100 m et 62 m)

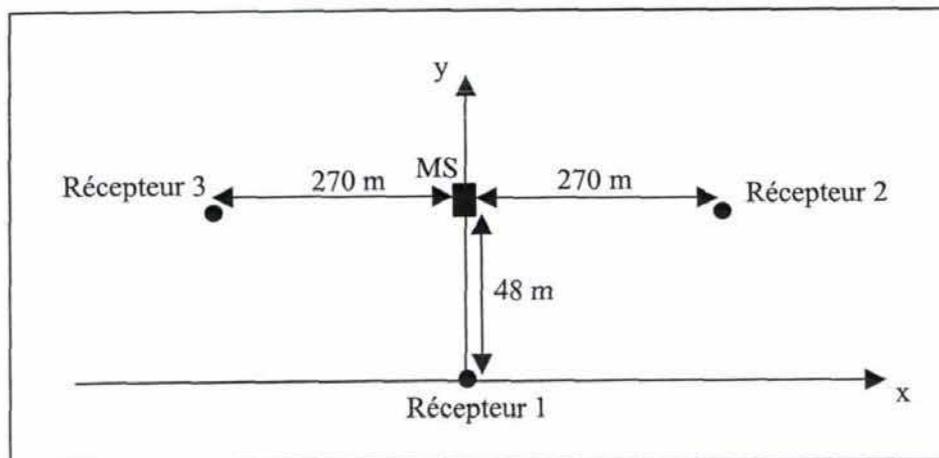


Figure 5.4 : Exemple de configuration des récepteurs pour le calcul de la position du mobile

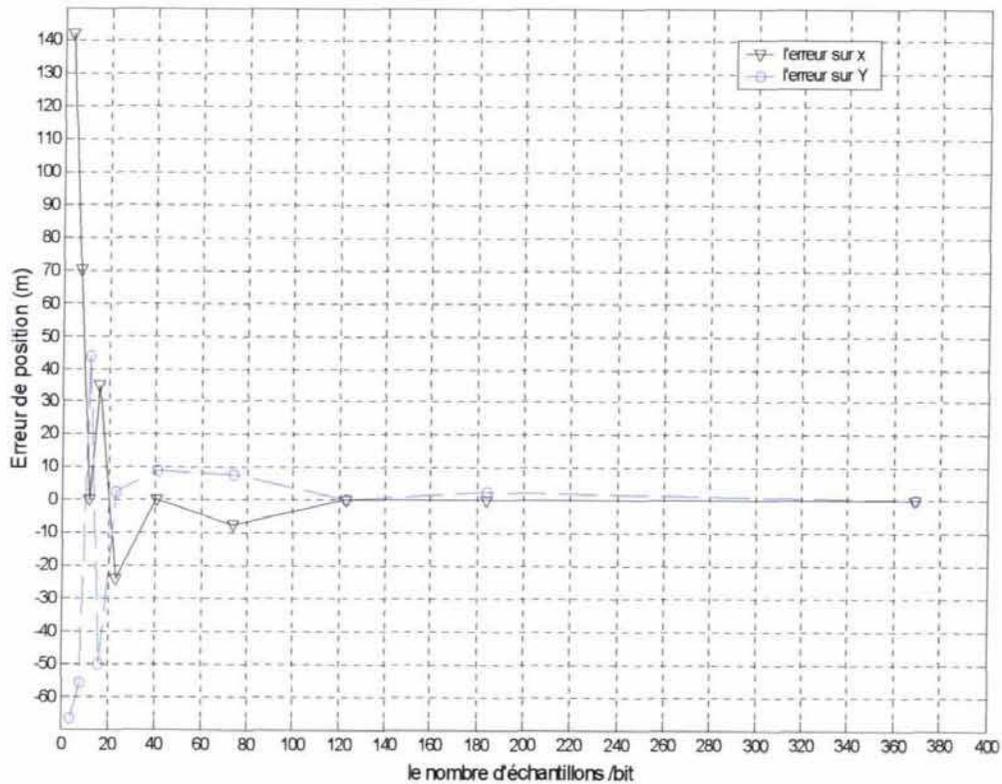


Figure 5.5 : Variation de l'erreur de positionnement du mobile sur X et Y en fonction du taux d'échantillonnage (pas de trajets multiples, le rapport S/B est de 30 dB)

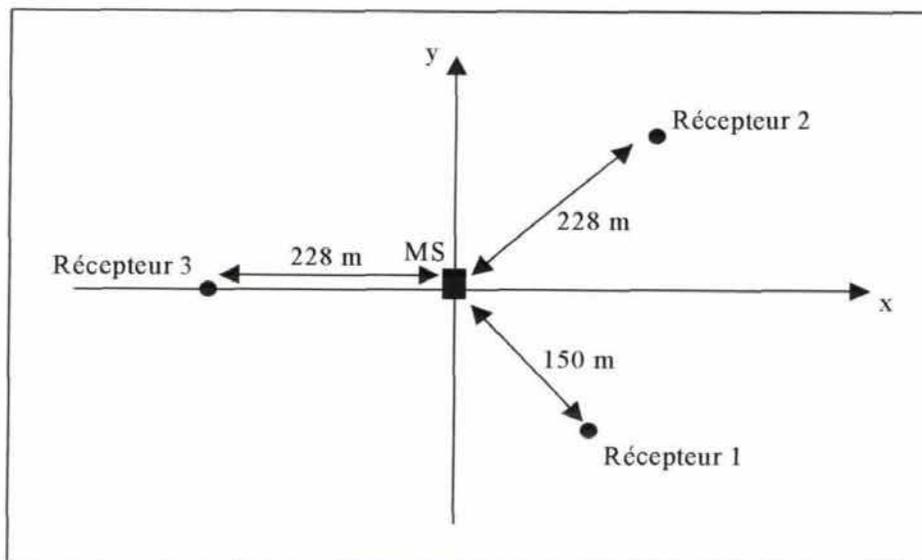


Figure 5.6 : Exemple de configuration des récepteurs pour le calcul de la position du mobile

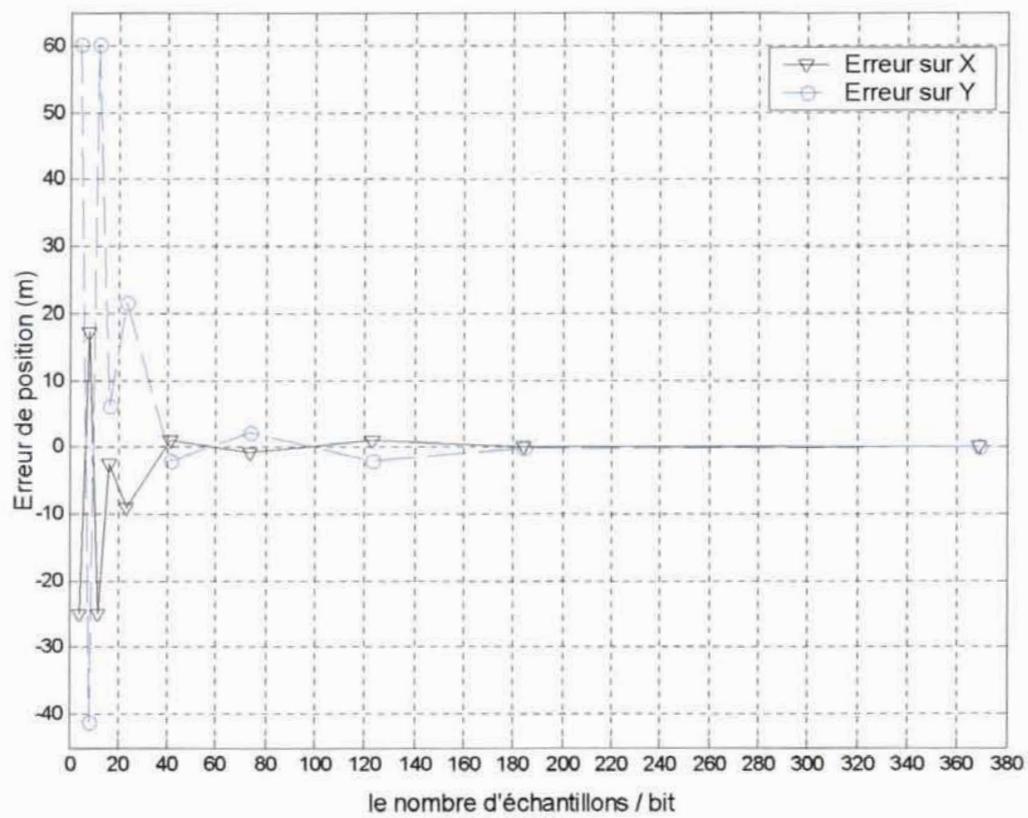


Figure 5.7 : Variation de l'erreur de positionnement du mobile sur X et Y en fonction du taux d'échantillonnage (pas de trajets multiples, le rapport S/B est de 30 dB)

5.2 Effet du rapport signal à bruit sur la précision de mesure de TDOA

Dans ce paragraphe, nous allons examiner l'effet du rapport signal à bruit du signal reçu sur la précision de mesure de la TDOA. Ce rapport est défini par :

$$\frac{S}{B} = \frac{P_s}{P_n}$$

où

P_s est la puissance du signal reçu, et P_n est la puissance du bruit.

La puissance du bruit à la réception est donnée par :

$$P_n = kTB$$

où

k : La constante de Boltzman ($2.38 \times 10^{-23} \text{ J}/^\circ\text{K} / \text{Hz}$),

T : La température en Kelvin,

B : La largeur de bande équivalente du bruit du signal transmis,

Plusieurs expérimentations ont été faites selon la configuration de la figure 5.1 et suivant plusieurs niveaux de puissance du signal reçu. Les deux signaux reçus à l'aide de l'oscilloscope sur les deux lignes de transmission à retard de longueur de 45 m et 150 m sont parfaitement synchronisés. Un taux d'échantillonnage de 123 échantillons par bit a été pris en considération. La figure 5.8 montre la variation de l'erreur de mesure de TDOA en fonction du rapport signal à bruit. La courbe montre effectivement que la précision de mesure de la TDOA s'améliore avec l'augmentation du rapport signal à bruit. Nous constatons aussi que, dans un premier temps, l'amélioration de la précision de la TDOA évolue rapidement lorsque le rapport signal à bruit augmente de 0 à 10 dB puis, dans un deuxième temps, devient lente pour des rapports signal à bruit élevés et supérieurs à 20 dB jusqu'à atteindre la résolution de 9 m correspondant au pas de quantification limite de $\Delta t = 3.69.2 \mu\text{s}/123$. Ceci est justifié par le fait que le niveau du bruit devient très bas et négligeable devant le niveau du signal utile. La précision de mesure de TDOA

reste essentiellement dépendante alors du bruit de quantification. Nous concluons qu'il faut maintenir le rapport signal à bruit au minimum à 25 dB pour que les performances du système de localisation demeurent satisfaisantes.

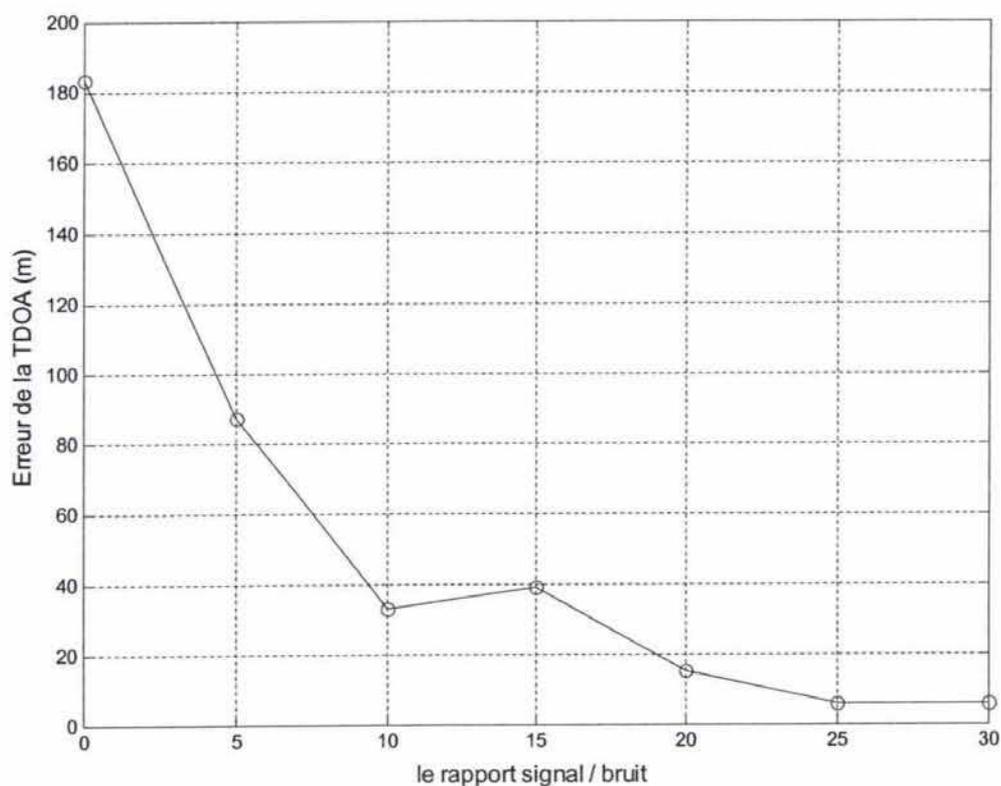


Figure 5.8 : La variation de la TDOA en fonction du rapport signal à bruit (les longueurs de lignes sont 150 m et 45 m, le taux d'échantillonnage est de 123, pas d'erreur de synchronisation, pas de trajet multiple)

5.3 Effet des trajets multiples sur la précision de mesure de TDOA

Dans ce paragraphe, nous analysons la dépendance de la précision de mesure de TDOA aux trajets multiples. Dans l'expérience présentée figure 5.9, nous additionnons, en utilisant un coupleur, le signal de la ligne 2 de longueur de 93 m qui représente le trajet direct avec celui de la ligne 1 de longueur de 150 m à la sortie de l'atténuateur qui représente le trajet indirect (les deux signaux à la sortie du coupleur sont décalés de $0.19 \mu\text{s}$). Les deux signaux reçus sur les deux voies de l'oscilloscope à un taux d'échantillonnage de 123 échantillons et un rapport S/B de 25 dB sont parfaitement synchronisés. La figure 5.10 montre la variation de l'erreur de mesure de TDOA en fonction de la puissance relative correspondant à un milieu rural de propagation. Nous constatons que l'erreur de la TDOA augmente avec la diminution de la puissance entre le trajet direct et indirect. Nous vérifions ainsi que la précision de la localisation du mobile est subordonnée à l'environnement de propagation. Les performances sont nettement inférieures dans un milieu de propagation urbain comparées à celles dans un milieu de propagation rural.

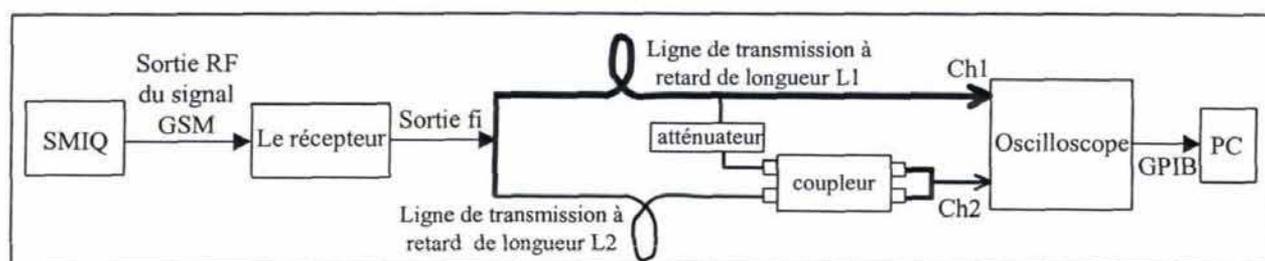


Figure 5.9 : Schéma synoptique du banc de mesures TDOA entre deux signaux. L'un correspond uniquement à la composante du trajet direct, l'autre contient les trajets direct et indirect.

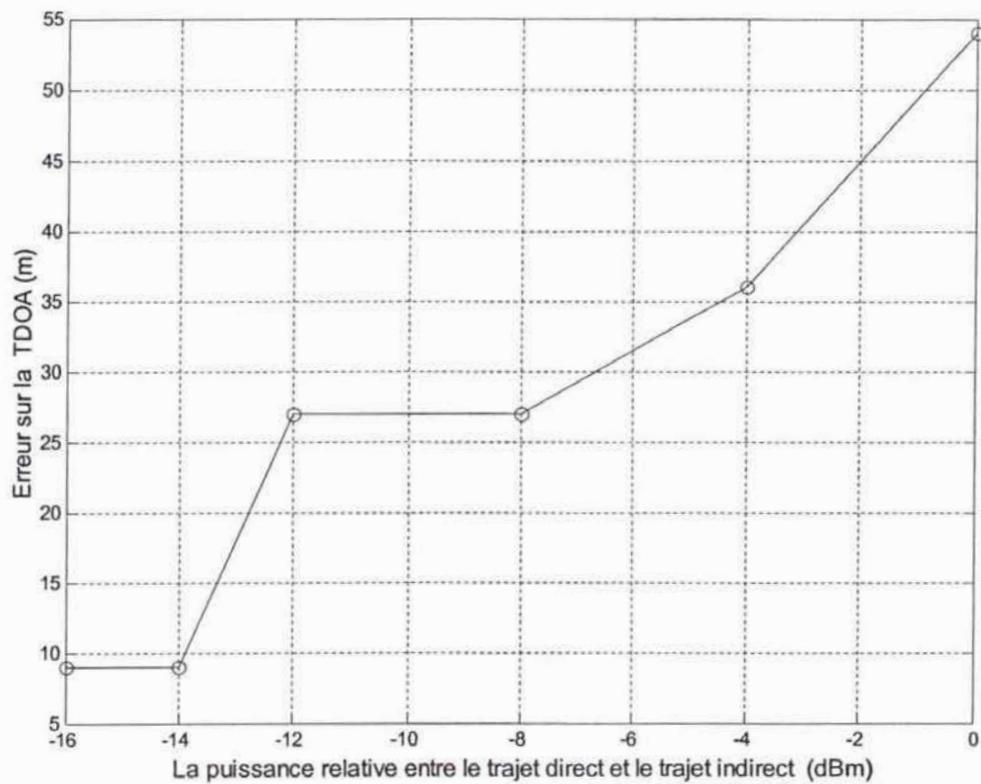


Figure 5.10 : Exemple de variation de la TDOA en fonction de la puissance relative présente dans le trajet multiple (Le retard relatif est de $0.19 \mu\text{s}$ sur le signal de la voie 2, le signal de la voie 1 contient uniquement le trajet direct, le taux d'échantillonnage est de 123, S/B=25 dB, pas d'erreur de synchronisation)

5.4 Conclusion

Cette partie a été consacrée à l'évaluation et à l'analyse des principaux facteurs qui altèrent la précision de localisation du mobile dans le réseau GSM. Nous avons conclu qu'il est donc indispensable d'appliquer au signal GSM de débit 270.833 kbits/s à la réception des taux d'échantillonnage élevés afin de diminuer l'erreur dû au bruit de quantification et d'améliorer la précision de localisation de mobile. Un taux d'échantillonnage de 100 échantillons par bit est suffisant pour que la précision de localisation du mobile soit de l'ordre d'une dizaine de mètres. L'effet du rapport signal à bruit a été évalué et nous avons conclu qu'il faut un rapport de 25 dB afin que les performances du système de localisation soient satisfaisantes. Nous avons ensuite étudié les performances du système dans un environnement de trajets multiples. Elles sont nettement dégradées dans un milieu de propagation urbain comparées à celles dans un milieu de propagation rural.

6. Résultats d'expérimentations de la localisation du mobile en milieu rural

Nous avons jusqu'à présent analysé en laboratoire l'effet des principaux facteurs importants sur la précision de localisation du mobile sans l'introduction de l'erreur de synchronisation et en se limitant à l'utilisation d'un seul récepteur GSM. L'étape suivante consiste maintenant à analyser la précision de localisation du mobile en utilisant deux récepteurs GSM synchronisés par deux récepteurs GPS tel que le montre le schéma de la figure 6.11 qui présente le banc de mesure mis en œuvre pour la réalisation de mesures de la localisation de mobile. Dans le cas réel, la localisation du mobile se fait en mesurant simultanément les deux TDOA entre trois récepteurs. Dans notre cas, nous allons effectuer une seule mesure à la fois étant donnée que nous disposons uniquement de deux récepteurs GSM.

Dans cette partie, nous allons présenter dans un premier temps le banc de test et de mesure utilisé pour la localisation de mobile sur le site d'un aéroport désaffecté. Dans un deuxième temps, nous présentons des résultats expérimentaux de l'effet du taux d'échantillonnage et le rapport signal à bruit afin de valider l'étude réalisée auparavant dans la partie précédente. Nous terminerons par un cas de figure de mesure de localisation de mobile sur le site d'un aérodrome désaffecté situé dans un environnement radioélectrique de type rural.

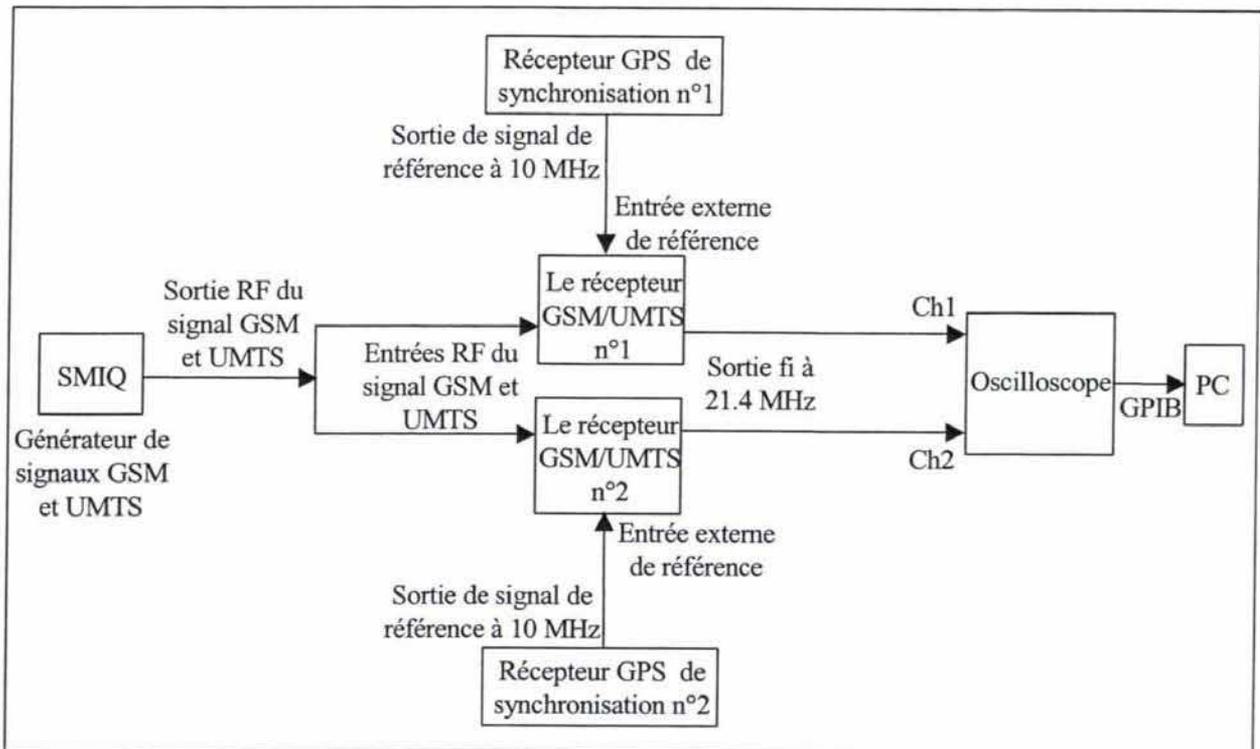


Figure 6.1 : Schéma synoptique du banc de mesure TDOA entre deux signaux reçus au niveau des deux analyseur "FSIQ" synchronisés par deux récepteurs GPS de référence de temps.

6.1 Effet du rapport signal à bruit et le taux d'échantillonnage sur la TDOA

Plusieurs mesures de TDOA ont été effectuées au laboratoire afin de valider l'étude réalisée précédemment. Tel que le montre la figure 6.1, les deux récepteurs "FSIQ" remplissant le rôle du récepteur GSM sont synchronisés à l'aide de deux horloges références à 10 MHz fournis par deux récepteurs GPS. La précision de l'horloge GPS est de l'ordre de 40 ns équivalente à une erreur de localisation de 12 m. Les courbes de la figure 6.2 montrent la variation de l'erreur de mesure de TDOA en fonction du taux d'échantillonnage pour un rapport signal à bruit de 15 dB, 25 dB et 30 dB. Elles montrent effectivement que l'erreur sur la mesure de TDOA diminue progressivement avec l'augmentation du taux d'échantillonnage. Nous constatons aussi que la précision de mesure de TDOA pour un rapport signal à bruit de 25 dB et 30 dB est nettement meilleure à celle correspondant à 15 dB. L'erreur sur la TDOA pour les deux courbes correspondant à un rapport de 25 dB et 30 dB atteint une dizaine de mètres pour un taux

d'échantillonnage de 123 échantillons par bit. Elle reste ensuite de même grandeur en passant à un taux d'échantillonnage de 369 échantillons par bit. Ceci est justifié par la présence de l'erreur de synchronisation entre les deux récepteurs qui est de l'ordre d'une dizaine de mètres.

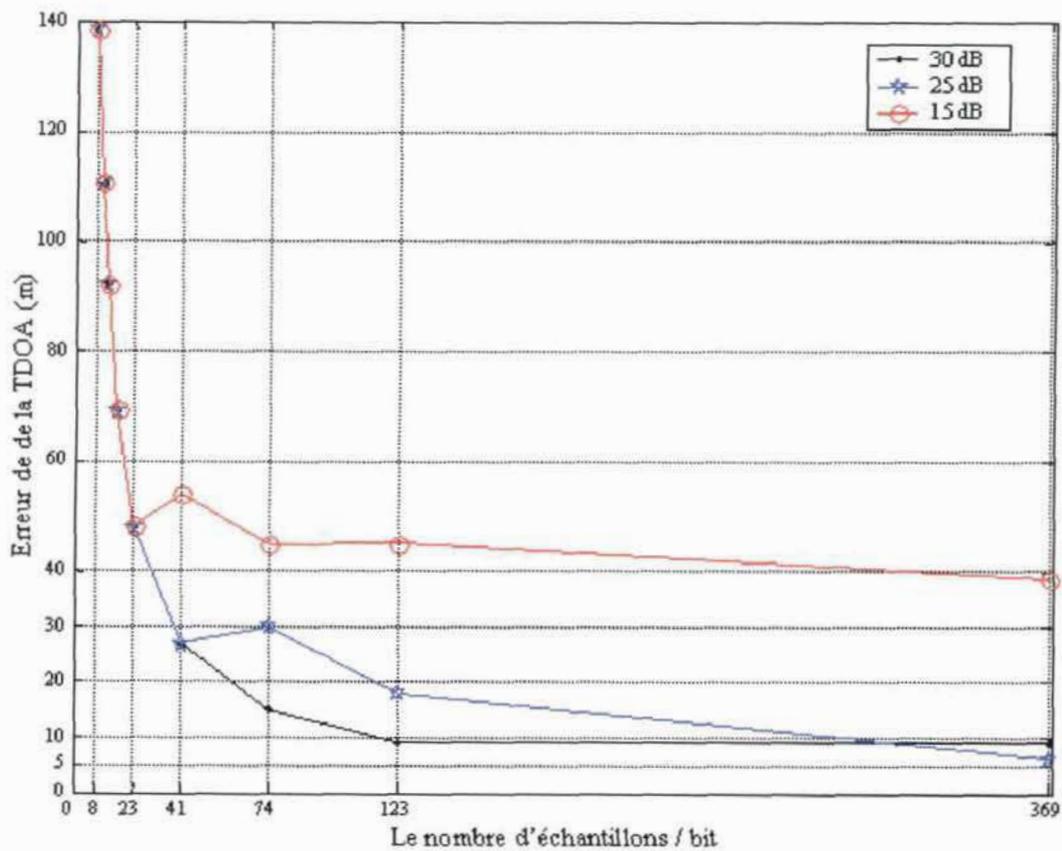


Figure 6.2: Variation de la TDOA entre les deux signaux reçus au niveau des deux analyseurs "FSIQ" en fonction du taux d'échantillonnage pour un rapport signal à bruit de 15 dB, 25 dB et 30 dB (le taux d'échantillonnage est de 369 échantillons par bit)

6.2 Performances de mesure de la localisation du mobile en milieu rural

Des expérimentations de mesure de la localisation du mobile ont été réalisées sur le site d'un aéroport désaffecté en milieu rural. Nous avons procédé dans un premier temps à la réalisation d'une campagne de prélèvement des coordonnées de la position des récepteurs et de la station mobile sur le site en utilisant un récepteur DGPS (voir figure 6.3) travaillant sur la phase et de précision centimétrique. Ce travail a été confié à un géomètre. La position théorique du mobile obtenue par le réseau GSM dédié sera comparée à celle géoréférencée par le géomètre.

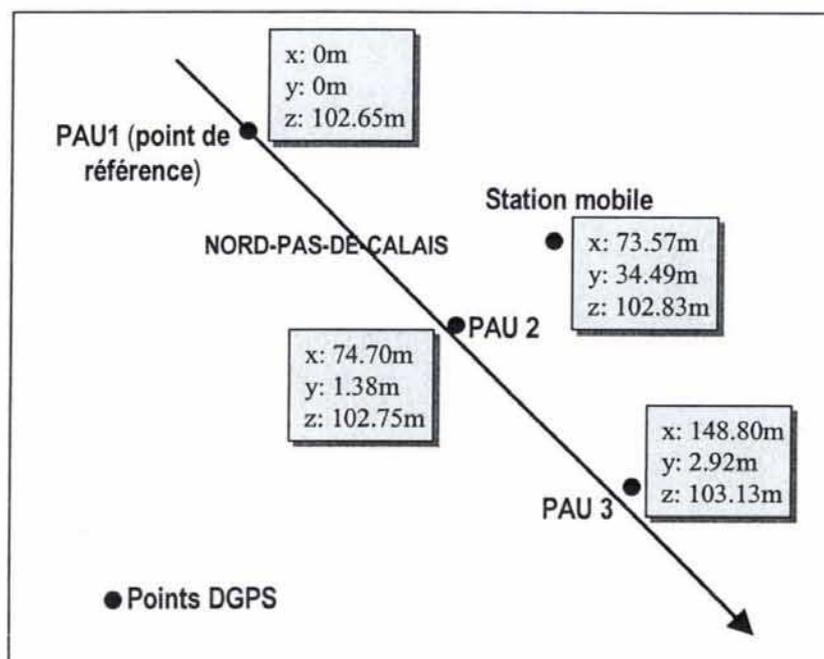


Figure 6.3 : Configuration de la disposition des récepteurs PAU et la station mobile selon la précision du système DGPS sur le site d'un aéroport désaffecté

Les courbes des figures 6.4 et 6.5 montrent la variation de l'erreur de mesure de TDOA en fonction du taux d'échantillonnage selon la configuration de la figure 6.3. La fréquence d'échantillonnage du signal utilisée est de 100 MHz. Nous vérifions comme précédemment que l'erreur de mesure de TDOA diminue progressivement avec l'augmentation du taux d'échantillonnage. Elle atteint la limite de la résolution de 3 m correspondant au pas de quantification de $\Delta t = 3.69.2\mu s/369$.

La figure 6.6 montre la variation de l'erreur de positionnement sur les coordonnées x et y du mobile en fonction du taux d'échantillonnage correspondant aux mesures, des deux TDOA précédentes. La courbe montre que l'erreur de positionnement sur les coordonnées x et y du mobile varient d'une centaine à une vingtaine de mètres pour des taux d'échantillonnages inférieurs à 40 échantillons par bit. L'erreur ensuite diminue considérablement et avoisine le zéro pour des taux d'échantillonnages élevés de 74, 123 et 369 échantillons par bit. Il est donc indispensable d'appliquer au signal GSM de débit 270.833 kbits/s à la réception des fréquences d'échantillonnage élevées au minimum de 100 échantillons par bit afin que la précision de localisation du mobile atteigne quelques mètres.

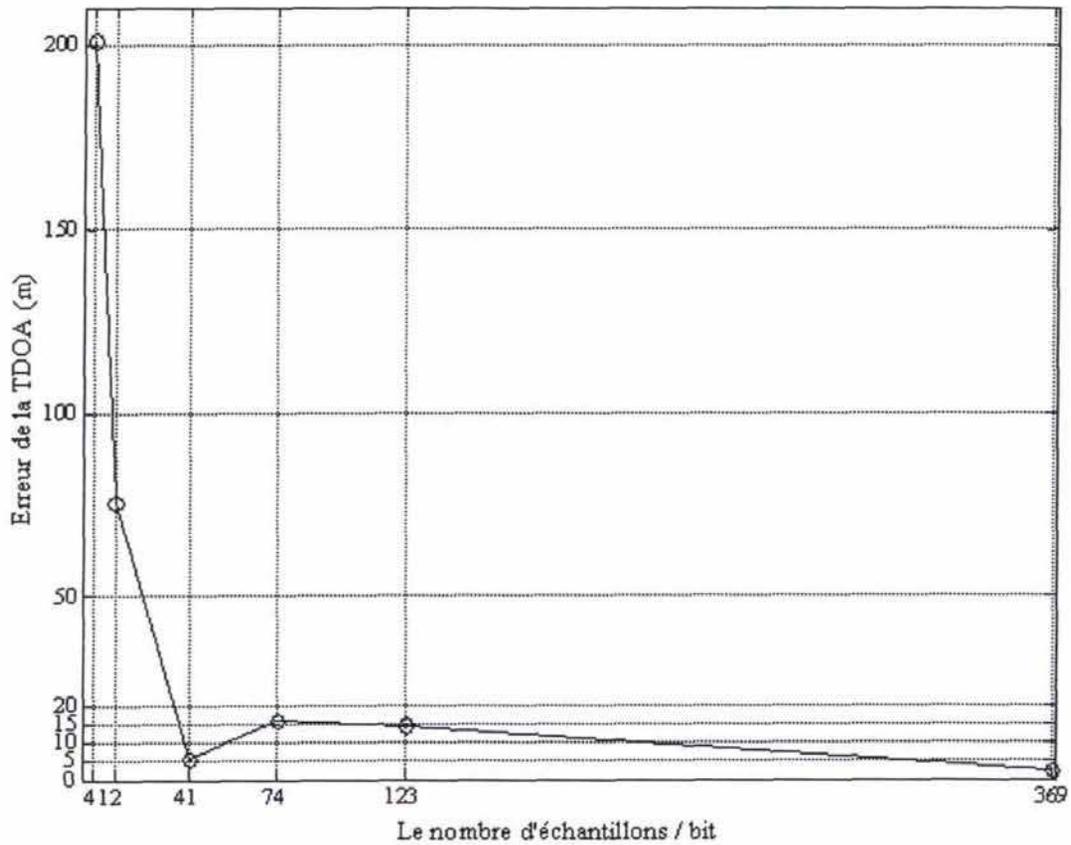


Figure 6.4 : Variation de la TDOA en fonction du taux d'échantillonnage entre le PAU 1 et 3 selon la configuration de la figure 20 (Le rapport S/B est de 30 dB, le taux d'échantillonnage initial du scope est de 369 échantillons par bit)

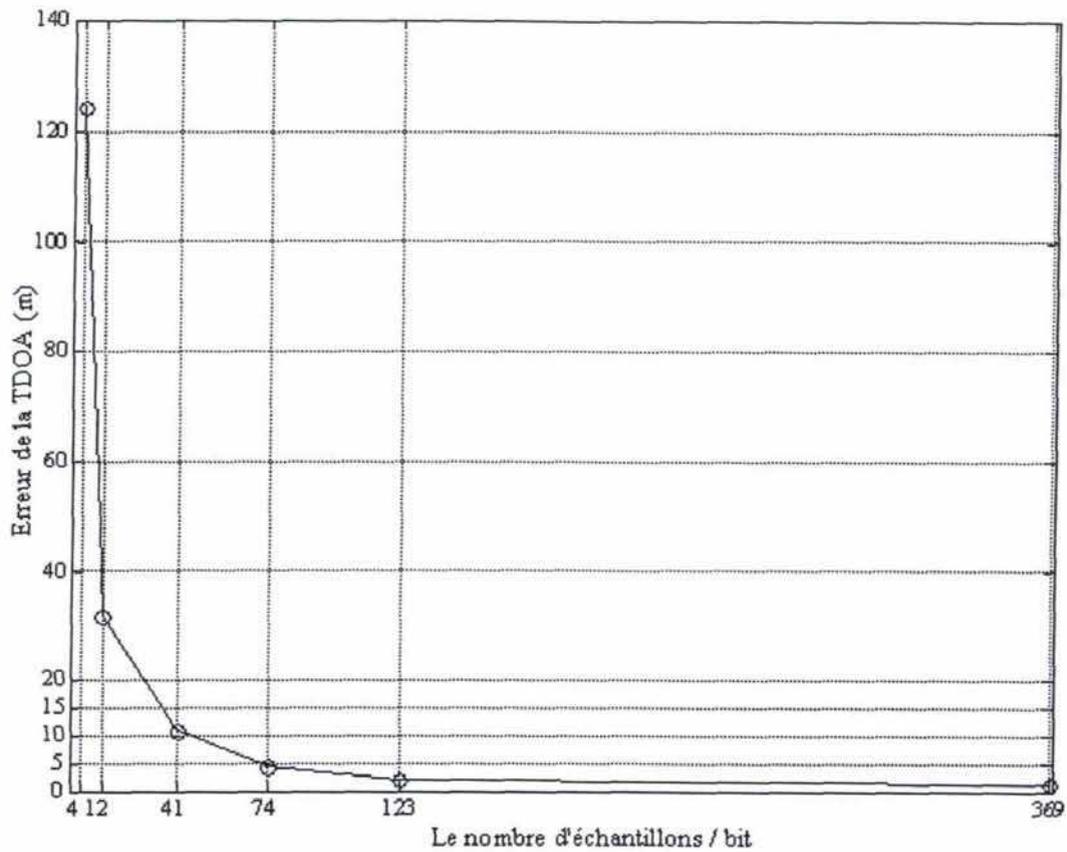


Figure 6.5 : Variation de la TDOA en fonction du taux d'échantillonnage entre le PAU 2 et 3 selon la configuration de la figure 20 (Le rapport S/B est de 30 dB, le taux d'échantillonnage initial du scope est de 369 échantillons par bit)

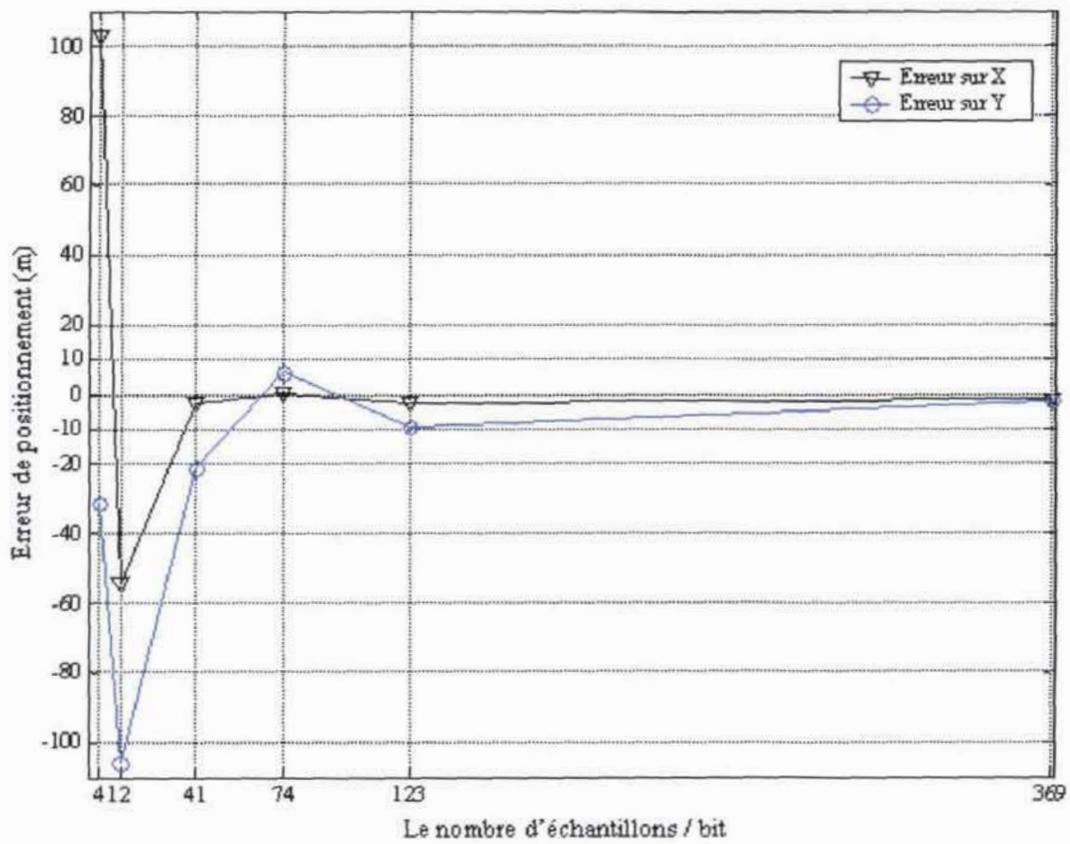


Figure 6.6 : Variation de l'erreur de positionnement du mobile sur X et Y en fonction du taux d'échantillonnage et selon la configuration de la figure 20 (Le rapport S/B est de 30 dB, le taux d'échantillonnage initial du scope est de 369 échantillons par bit)

6.3 Conclusion

Dans cette partie du rapport, nous avons étudié la précision de mesure de TDOA correspondant au cas réel du réseau cellulaire GSM. Pour cela, nous avons utilisé deux récepteurs GSM synchronisés à l'aide de deux horloges précises et stables fournies par deux récepteurs GPS. Nous avons présenté dans un premier temps les résultats de mesure de TDOA au laboratoire et dans un deuxième temps les mesures de la localisation de mobile sur le site de l'aérodrome désaffecté en milieu rural. Nous avons démontré à maintes reprises le rôle capital de l'effet de l'augmentation du taux d'échantillonnage sur la précision de mesure de TDOA. Une précision de localisation de mobile de l'ordre de quelques mètres a été obtenue sur le site en utilisant des références de temps GPS précises de l'ordre de 40 ns.

7. Conclusion générale

Dans la première partie de ce rapport nous avons décrit le processus de localisation de mobile par le nouveau concept du réseau d'appel d'urgence. Nous avons présenté ensuite les différents aspects de la technique TDOA de localisation de mobile à savoir la méthode d'intercorrélation d'estimation de TDOA et l'algorithme de Chan de résolution de système d'équations non-linéaires.

Dans la deuxième partie, des expérimentations ont été effectuées au laboratoire afin d'évaluer l'effet des principaux facteurs qui altèrent la précision de mesure de la localisation de mobile dans le réseau GSM. Nous avons analysé l'effet du taux d'échantillonnage sur la précision de mesure de TDOA, nous avons conclu que l'erreur de mesure de TDOA diminue progressivement avec l'augmentation du taux d'échantillonnage. Elle est de l'ordre du pas de quantification appliqué au signal à la réception en absence d'erreur de synchronisation entre les deux récepteurs GSM. Nous avons ensuite analysé l'effet du rapport signal à bruit et les trajets multiples sur la précision de mesure de TDOA. Nous avons constaté qu'un rapport signal à bruit d'au moins 25 dB est nécessaire pour que les performances du système de localisation dans le réseau GSM soient satisfaisantes. Ainsi, nous avons mis en évidence la sensibilité de mesure de TDOA aux erreurs de temps résultantes dans un environnement de trajets multiples. Les performances du système de localisation se dégradent sensiblement en présence de trajets multiples.

Enfin, une expérimentation terrain, sur un site d'aérodrome désaffecté, a permis de vérifier la faisabilité de la localisation de mobile avec une précision de l'ordre de quelques mètres. A titre d'exemple, la précision de la localisation obtenue par le réseau GSM à des taux d'échantillonnage très élevés apparaît ainsi nettement meilleure que celle fournie par un récepteur de navigation GPS standard.

Il est donc nécessaire de synchroniser parfaitement les récepteurs GSM et d'appliquer au signal GSM des taux d'échantillonnages au minimum de 100 échantillons par bit, afin que le réseau d'appel d'urgence soit apte à fournir une précision de localisation de mobile de l'ordre de grandeur de quelques mètres et de pouvoir lever l'ambiguïté quant au sens de circulation emprunté par le véhicule.

Références bibliographiques :

- [1] A. Schatz, M. Heddebaut, *Réseau d'appel d'urgence pour voie de transport, Brevet français et européens SAGEM & INRETS INPI numéro 99 07 530 – 15 juin 1999.*
- [2] M. Laoufi, M. Heddebaut, M. Cuvelier, J. Rioult, J.M. Rouvaen, *Positioning Emergency Calls along Roads and Motorways using a GSM Dedicated Cellular Radio Network. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-2000/Fall) ISBN n°0-7803-6507-0 @ 2000 IEEE paper 4.2.2.2 Boston Sep. 24, 2000, Sep. 28, 2000.*
- [3] M. Aatique, *Position Location for CDMA Using TDOA Techniques*, M.S. Thesis, MPRG, Virginia Tech, Aug.1997
- [4] M. Laoufi, *La technique TDOA de localisation d'utilisateurs de la route en détresse par réseau cellulaire GSM dédié. Acte des rencontres doctorants INRETS-LEOST du 17 janvier 2001.*
- [5] M. Laoufi, M. Heddebaut, J.M. Rouvaen *Emergency Calls Location Using TDOA Technique Along a Motorway Dedicated Cellular Radio Network. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC-2001/Fall) Oakland, California, Aug. 25-29, 2001.*
- [6] C. Knapp and G. Carter, *The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay. IEEE Trans. Acoustics Speech and Signal Processing*, vol. ASSP-24, pp.320-27, Aug. 1976.
- [7] W. H. Foy, "Position-location solution by Taylor-series estimation", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-12, pp. 187-194, Mar.1976.
- [8] Chan, Y. T., and Ho, K. C. *A simple and efficient estimator for hyperbolic location, IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 42, no. 8, Aug. 1994.
- [9] European Telecommunications Standard Institute. *GSM 05.04: Modulation. Version 6.1.1*, 1997
- [10] European Telecommunications Standard Institute. *GSM 05.05: Radio transmission and reception. Tenth Edition, August 1997*
- [11] J. Brondum. *GSM data receiver structures. Technical report, Institute for Electronic Systems Department of Communication Technology, Aalborg university, 1993.*