

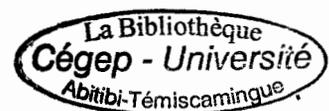
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAITRISE EN INGÉNIERIE

PAR ANTHONY TAOK

LOCALISATION DANS LES MILIEUX CONFINÉS :  
COMBINAISON DE L'UWB ET LES RESEAUX DE NEURONES  
DANS UN ALGORITHME DE LOCALISATION PAR SIGNATURE

MAI 2008





**Cégep** de l'Abitibi-Témiscamingue  
**Université** du Québec en Abitibi-Témiscamingue

### **Mise en garde**

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

## RÉSUMÉ

Le travail de ce rapport porte sur la localisation dans les milieux internes et plus précisément dans les milieux non conventionnels, les mines par exemple. L'UWB (Ultra Wide Band) présente un niveau physique idéal pour une telle application en raison de ses caractéristiques. Parmi les avantages de l'UWB citons : une résolution temporelle élevée qui fournit une meilleure précision temporelle dans un système de localisation; une grande largeur de bande qui permet de mieux contrôler les effets sélectifs d'un canal; une résolubilité des différentes parties d'une même transmission et provenant du phénomène multi-trajet. D'autre part, la localisation par signature se base généralement sur la formation d'une empreinte qui est directement liée à une position donnée et cela d'une manière unique et reproductible. En conséquence, le choix du signal UWB devient évident pour la prise des signatures et pour l'application dans le système de localisation sous étude.

Plusieurs analyses et campagnes de mesure concernant une transmission UWB ont été effectuées. Pour cela, un analyseur de réseau a été utilisé. Ce dernier réalise les mesures dans le domaine fréquentiel en effectuant un balayage de fréquences sur toute la largeur de bande choisie. Ces mesures sont ensuite transformées dans le domaine temporel utilisant les transformations de Fourier. Nous avons réussi à couvrir des distances allant de 36 à 40 mètres, alors que la plupart des travaux dans la littérature couvrent une distance maximale de 10 m. Ce qui a nécessité l'addition de matériel pour augmenter la portée du système. Jusqu'aux limites de nos connaissances, ce travail (au LRTCS) est l'un des rares se focalisant sur les mines et les environnements hostiles.

Enfin, trois scénarios différents ont été réalisés : i) le cas de visibilité directe sans aucune source d'interférence; ii) le cas de visibilité directe avec plusieurs sources de bruit (interférence); iii) le cas d'absence de ligne de vue. Après avoir construit les bases de données requises, des analyses ont été effectuées sur les réponses impulsionnelles collectées afin de trouver une empreinte qui représente au mieux le milieu choisi et qui offre donc la meilleure performance de l'algorithme de localisation. L'erreur étudiée représente la différence entre la position bidimensionnelle réelle et celle estimée par l'algorithme. Les résultats obtenus sont comparables à ceux trouvés dans la littérature.

## **REMERCIEMENTS**

J'aimerais au début remercier mon directeur Dr. Nahi Kandil et mon co-directeur Dr. Sofiene Affes, pour m'avoir guidé à travers ce travail.

Je tiens aussi à remercier le laboratoire du LRTCS et toute l'équipe pour leur accueil au sein de cette petite famille et pour avoir rendu ce travail possible.

Un autre grand remerciement pour l'UQAT, en particulier le département des sciences appliquées et la division de relations avec les étudiants étrangers. Ils ont rendu cette expérience agréable et facile.

Finalement je voudrais dédier ce travail à mes parents, ma sœur et mon frère.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES NOTATIONS .....</b>	<b>XII</b>
<b>CHAPITRE 1.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION À LA THÈSE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 2.....</b>	<b>3</b>
<b>LA LOCALISATION.....</b>	<b>3</b>
2.1 L'HISTORIQUE DE LA RADIOLOCALISATION .....	3
2.1.1 <i>Une vue dans l'histoire</i> .....	3
2.1.2 <i>La radiolocalisation au sens propre</i> .....	5
2.2 TECHNIQUES DE LOCALISATION PAR TRIANGULATION.....	6
2.2.1 <i>Latération</i> .....	6
2.2.1.1 Puissance du signal reçu.....	7
2.2.1.2 Délai du signal reçu TOA .....	12
2.2.1.3 Différence de délai du signal reçu TDOA.....	14
2.2.2 <i>Localisation basée sur le GPS</i> .....	16
2.2.3 <i>Angulation AOA</i> .....	19
2.3 TECHNIQUE BASÉE SUR LES EMPREINTES.....	22
2.4 UN DERNIER POINT .....	25
2.5 EXEMPLES PRATIQUES DES SYSTÈMES DE LOCALISATION .....	25
2.5.1 <i>Critères des systèmes</i> .....	25
2.5.2 <i>Quelques systèmes</i> .....	27
2.5.2.1 Active badge.....	28
2.5.2.2 Active bat .....	28
2.5.2.3 CRICKET .....	28
2.5.2.4 MOTIONSTAR TRACKER.....	29
2.5.2.5 RADAR.....	29
2.5.2.6 GPS .....	30
<b>CHAPITRE 3.....</b>	<b>31</b>
<b>TECHNOLOGIE UWB ET SA PRÉSENCE DANS LA LOCALISATION .....</b>	<b>31</b>
3.1 DÉFINITION ET IDENTIFICATION DE L'UWB .....	31
3.2 LES TECHNIQUES DE L'UWB.....	35

3.2.1	<i>IR UWB ()</i> .....	35
3.2.2	<i>UWB avec Multi-porteuse</i> .....	37
3.3	UWB DANS LA LOCALISATION.....	39
3.3.1	<i>Les raisons d'être</i> .....	39
3.3.2	<i>Les techniques de localisation supportées par UWB</i> .....	41
<b>CHAPITRE 4</b> .....		<b>47</b>
<b>SYSTÈME DE LOCALISATION</b> .....		<b>47</b>
4.1	JUSTIFICATION DU CHOIX DU SYSTÈME.....	47
4.1.1	<i>L'inefficacité des autres techniques</i> .....	47
4.1.2	<i>La localisation par signature</i> .....	49
4.2	LA SIGNATURE PROPOSÉE.....	50
4.2.1	<i>UWB comme medium physique</i> .....	50
4.2.2	<i>L'empreinte utilisée</i> .....	53
4.3	L'ALGORITHME DE JUMELAGE.....	60
4.3.1	<i>Pourquoi les réseaux de neurones</i> .....	60
4.3.2	<i>Le type de réseau de neurones</i> .....	63
4.4	PARTIE DE TRAVAIL PROPOSÉE MAIS NON EFFECTUÉE.....	67
4.4.1	<i>Localisation par secteur</i> .....	67
4.4.2	<i>Algorithme de correction d'erreur</i> .....	68
<b>CHAPITRE 5</b> .....		<b>71</b>
<b>MONTAGE DU SYSTÈME ET MESURE EFFECTUÉE</b> .....		<b>71</b>
5.1	SYSTÈME DE MESURE POUR UWB.....	71
5.1.1	<i>Domaine temporel</i> .....	72
5.1.2	<i>Domaine fréquentiel</i> .....	73
5.2	LE SYSTÈME DE MESURE PROPOSÉ.....	76
5.3	LES CAMPAGNES DE MESURES.....	81
5.3.1	<i>L'environnement de mesure</i> .....	81
5.3.2	<i>Les campagnes de mesure</i> .....	82
<b>CHAPITRE 6</b> .....		<b>88</b>
<b>ANALYSE DES RÉSULTATS</b> .....		<b>88</b>
6.1	APERÇU.....	88
6.2	LES COMPOSANTES DE L'EMPREINTE.....	88
6.3	RÉSULTATS DE LOCALISATION DE LA PREMIÈRE CAMPAGNE LOS_1.....	95
6.3.1	<i>Avec les réseaux MLP</i> .....	95
6.3.2	<i>Avec les réseaux GRNN</i> .....	101
6.4	RÉSULTATS DE LOCALISATION DE LA SECONDE CAMPAGNE LOS_2.....	106

6.4.1 Avec les réseaux MLP .....	106
6.4.2 Avec les réseaux GRNN .....	111
6.5 RÉSULTATS DE LOCALISATION DE LA TROISIÈME CAMPAGNE NLOS .....	115
6.5.1 Avec les réseaux MLP .....	115
6.5.2 Avec les réseaux GRNN .....	120
6.6 CONCLUSION .....	125
<b>CHAPITRE 7 .....</b>	<b>127</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>127</b>
<b>RÉFÉRENCES .....</b>	<b>130</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 3.1:</b> Comparaison entre I-UWB et MC-UWB.....	38
<b>Tableau 5.1:</b> Les paramètres du PA DBM0218N625.....	77
<b>Tableau 5.2:</b> Les paramètres du LNA RLNA01M10G.....	78
<b>Tableau 5.3:</b> Les paramètres des câbles.....	79
<b>Tableau 5.4:</b> Les spécifications d'une antenne EM-6116.....	80
<b>Tableau 6.1:</b> Corrélation entre la coordonnée en x et les composantes de l'empreinte pour LOS.....	91
<b>Tableau 6.2:</b> Corrélation entre la coordonnée en y et les composantes de l'empreinte pour LOS.....	91
<b>Tableau 6.3:</b> Corrélation entre la coordonnée en x et les composantes de l'empreinte pour NLOS.....	92
<b>Tableau 6.4:</b> Corrélation entre la coordonnée en y et les composantes de l'empreinte pour NLOS.....	92
<b>Tableau 6.5:</b> Les différentes valeurs statistiques pour LOS_1 et MLP.....	100
<b>Tableau 6.6:</b> Les différentes valeurs statistiques pour LOS_1 et GRNN.....	105
<b>Tableau 6.7:</b> Les différentes valeurs statistiques pour LOS_2 et MLP.....	111
<b>Tableau 6.8:</b> Les différentes valeurs statistiques pour LOS_2 et GRNN.....	115
<b>Tableau 6.9:</b> Les différentes valeurs statistiques pour NLOS et MLP.....	120
<b>Tableau 6.10:</b> Les différentes valeurs statistiques pour NLOS et GRNN.....	125

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 2.1:</b> L'intersection des régions de présence .....	10
<b>Figure 2.2:</b> Phénomène de multi-trajet .....	11
<b>Figure 2.3:</b> Région de présence en cas d'erreur.....	12
<b>Figure 2.4:</b> L'intersection des régions pour TDOA.....	16
<b>Figure 2.5:</b> Localisation par GPS .....	17
<b>Figure 2.6:</b> Localisation par angulation : cas idéal .....	20
<b>Figure 2.7:</b> Localisation par AOA : cas erroné .....	21
<b>Figure 3.1:</b> UWB Spectrum/Bande étroite .....	33
<b>Figure 3.2:</b> Les niveaux d'émissions permises pour UWB .....	34
<b>Figure 3.3:</b> Impulsion Gaussienne et ces dérivés.....	36
<b>Figure 3.4:</b> Comparaison du Spectrum a) I-UWB basé sur un monocycle gaussien... b) MC-UWB basé sur OFDM .....	38
<b>Figure 4.1:</b> Architecture d'un RN.....	66
<b>Figure 5.1:</b> Le système de mesure .....	76
<b>Figure 5.2:</b> Schématique de la galerie 40.....	81
<b>Figure 5.3:</b> Première campagne de mesure.....	84
<b>Figure 5.4:</b> Seconde campagne de mesure.....	85
<b>Figure 5.5:</b> Troisième campagne de mesure.....	86

<b>Figure 6.1-a:</b> Réponse impulsionnelle : cas LOS.....	89
<b>Figure 6.1-b:</b> Réponse impulsionnelle : cas NLOS.....	90
<b>Figure 6.2:</b> Les fluctuations dans la décroissance de la puissance cas NLOS.....	94
<b>Figure 6.3:</b> Distribution cumulative pour l'erreur en x pour LOS_1-MLP.....	96
<b>Figure 6.4:</b> Distribution cumulative pour l'erreur d'entraînement en y pour LOS_1-MLP .....	97
<b>Figure 6.5:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en x pour LOS_1-MLP.....	97
<b>Figure 6.6:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en y pour LOS_1-MLP.....	98
<b>Figure 6.7:</b> Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données d'entraînement pour LOS_1-MLP.....	99
<b>Figure 6.8:</b> Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données de test pour LOS_1-MLP.....	99
<b>Figure 6.9:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en d pour LOS_1-MLP.....	101
<b>Figure 6.10:</b> Distribution cumulative pour l'erreur d'entraînement en x pour LOS_1-GRNN.....	102
<b>Figure 6.11:</b> Distribution cumulative pour l'erreur d'entraînement en y pour LOS_1-GRNN.....	102
<b>Figure 6.12:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en x pour LOS_1-GRNN....	103
<b>Figure 6.13:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en y pour LOS_1-GRNN...	104
<b>Figure 6.14:</b> Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données d'entraînement pour LOS_1-GRNN.....	104
<b>Figure 6.15:</b> Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données de test pour LOS_1-GRNN.....	105
<b>Figure 6.16:</b> Distribution cumulative pour l'erreur d'entraînement en x pour LOS_2-MLP.....	106

<b>Figure 6.17:</b> Distribution cumulative pour l'erreur d'entraînement en y pour LOS_2-MLP.....	107
<b>Figure 6.18:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en x pour LOS_2-MLP.....	108
<b>Figure 6.19:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en y pour LOS_2-MLP.....	109
<b>Figure 6.20:</b> Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données d'entraînement pour LOS_2-MLP.....	110
<b>Figure 6.21:</b> Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données de test pour LOS_2-MLP.....	110
<b>Figure 6.22:</b> Distribution cumulative pour l'erreur d'entraînement en x pour LOS_2-GRNN.....	112
<b>Figure 6.23:</b> Distribution cumulative pour l'erreur d'entraînement en y pour LOS_2-GRNN.....	112
<b>Figure 6.24:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en x pour LOS_2-GRNN...	113
<b>Figure 6.25:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en y pour LOS_2-GRNN...	113
<b>Figure 6.26:</b> Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données d'entraînement pour LOS_2-GRNN.....	114
<b>Figure 6.27:</b> Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données de test pour LOS_2-GRNN.....	114
<b>Figure 6.28:</b> Distribution cumulative pour l'erreur d'entraînement en x pour NLOS_MLP.....	116
<b>Figure 6.29:</b> Distribution cumulative pour l'erreur d'entraînement en y pour NLOS_MLP.....	117
<b>Figure 6.30:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en x pour NLOS-MLP.....	117
<b>Figure 6.31:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en y pour NLOS-MLP.....	118
<b>Figure 6.32:</b> Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données d'entraînement pour NLOS-MLP.....	119

<b>Figure 6.33:</b> Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données de test pour NLOS-MLP.....	119
<b>Figure 6.34:</b> Distribution cumulative pour l'erreur d'entraînement en x pour NLOS-GRNN.....	121
<b>Figure 6.35:</b> Distribution cumulative pour l'erreur d'entraînement en y pour NLOS-GRNN.....	122
<b>Figure 6.36:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en x pour NLOS-GRNN....	122
<b>Figure 6.37:</b> Distribution cumulative pour l'erreur de test en y pour NLOS-GRNN....	123
<b>Figure 6.38:</b> Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données d'entraînement pour NLOS-GRNN.....	124
<b>Figure 6.39:</b> Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données de test pour NLOS-GRNN.....	124

## LISTE DES NOTATIONS

AOA	Angle Of Arrival
A-PAM-TH-IR	Antipodal-Pulse Amplitude Modulation-Tie Hoped Impulse Radio
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BS	Base Station
CIR	Channel Impulse Response
CME	Coronal Mass Ejections
DARPA	Defence Advanced Research Project Agency
D-GPS	Differential Global Positioning System
DoD	Department of Defence
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DS-UWB	Direct Sequence Ultra Wide Band
EM	Electro Magnetic
FCC	Federal Communications Commission
FSPL	Free Space Signal Strength
GPS	Global Positioning System
GRNN	General Regression Neural Network
ICI	Inter Channel Interference
IR	Impulse Radio
IRMA	Impulse Radio Multiple Access
IR-UWB	Impulse Radio Ultra Wide Band
ISI	Inter Symbol Interference
I-UWB	Impulse Ultra Wide Band
LNA	Low Noise Amplifier
LORAN	Long Range Navigation
LOS	Line Of Sight

MAI	Multiple Access Interference
MBOA	Multi Band OFDM Alliance
MC-UWB	Multi Carrier Ultra Wide Band
ML	Maximum Likelihood
MLP	Multi Layer Perceptron
NB	Narrow Band
NLOS	Non Line Of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PA	Power Amplifier
PDP	Power Delay Profile
PNA	Power Network Analyser
PPM-UWB	Pulse Position Modulation Ultra Wide Band
RBF	Radial Basis Function
RF	Radio Frequency
RN	Réseau de Neurone
RMSDS	Root Mean Squared Delay Spread
RSS	Received Signal Strength
RX	Receiver
SCG	Scaled Conjugate Gradient
SS	Signal Strength
TDOA	Time Delay Of Arrival
TOA	Time Of Arrival
TX	Transmitter
UWB-DS	Ultra Wide Band Directe Séquence
UWB	Ultra Wide Band
WB	Wide Band
WLAN	Wireless Local Area Network
VNA	Vector Network Analyser

# CHAPITRE 1

## Introduction à la thèse

Originellement conçus pour communiquer des informations, les systèmes de communication sans fil ont été utilisés avec succès pour différentes applications, dont la localisation qui est l'objet d'intérêt de ce travail. Cela a imposé différentes exigences sur les systèmes de communication parmi lesquelles on distingue deux critères essentiels : la largeur de bande (débit) et la sécurité du système. Dans ce cadre, la technologie Ultra Wide Band<sup>1</sup> (UWB) a été introduite dans le secteur civil après une utilisation première pour des applications militaires. L'UWB est une technologie prometteuse pour un grand nombre d'applications puisqu'elle permet d'atteindre un très haut débit associé à une sécurité élevée et à une architecture de système relativement simple.

La localisation dans les milieux confinés présente un grand défi pour les systèmes existants qui produisent de grandes erreurs liées aux caractéristiques de propagation d'un signal dans l'environnement. Dans ce travail, on cherche à étudier l'efficacité d'un système de localisation dans les milieux confinés et rugueux (une mine). L'UWB est choisie car elle profite de l'infrastructure de communication sans fil déjà déployée dans l'environnement permettant ainsi une meilleure exploitation de cette dernière à moindre coût. Dans ce contexte, l'infrastructure est considérée comme utilisant UWB pour la couche physique et cela pour plusieurs raisons. Premièrement, l'UWB est rapportée avoir le meilleur profil de propagation dans les milieux internes.

---

<sup>1</sup> Mieux connu sous son nom en anglais UWB : Ultra Wide Band.

Deuxièmement, l'UWB est considérée comme la nouvelle technologie universelle qui pourra offrir une couche physique commune à presque toutes les applications de communication sans fil. Finalement, l'UWB est sensée fournir des systèmes à batteries ayant une longue durée de vie et une grande autonomie, ce qui est avantageux dans un environnement minier hasardeux.

La revue de littérature qui suit présentera en première étape l'historique de la radiolocalisation, y compris les différentes techniques utilisées dans ce domaine ainsi que quelques exemples concrets. Ensuite, l'UWB sera introduite avec ses points forts, ses exigences, une discussion de son avenir vu par la communauté de communication, ainsi qu'une description de l'utilisation actuelle de l'UWB dans la radiolocalisation. Subséquemment, le système que nous proposons sera présenté avec une description de toutes ses composantes. Certains aspects qui permettent, à notre avis, d'améliorer la performance du système seront aussi discutés. Une présentation des travaux de mesure avec le système proposé suivra. Finalement, les résultats sont présentés accompagnés d'interprétations.

## **CHAPITRE 2**

### **La localisation**

Les différentes techniques de localisation ainsi que les divers concepts de ce domaine sont détaillés dans ce chapitre ou une explication des origines de la localisation, qui englobe aussi bien les principes généraux et les techniques communes pour ce domaine de localisation des exemples pratiques sur les différents systèmes appliqués, leurs points forts, leur précision et leur exactitude. Les problèmes et difficultés rencontrés en radiolocalisation seront exposés montrant ainsi les raisons derrière ce travail.

#### ***2.1 Historique de la radiolocalisation***

##### **2.1.1 Une vue dans l'histoire**

L'histoire de la radiolocalisation commence avec la navigation aérienne entre la première et la seconde guerre mondiale. Durant cette période, des tentatives ont été menées pour transformer le transport aérien en service civil. En parallèle, des essais militaires cherchaient à améliorer les méthodes classiques de navigation – ces dernières reposant essentiellement sur la reconnaissance par vue directe ou par des cartes de marquage.

De nouvelles technologies utilisant la transmission d'un signal de guide ont été développées. Ainsi le système allemand Lorenz apparut. Il permettait la transmission d'un code similaire au code morse dans un faisceau étroit couvrant le chemin direct d'un avion. La localisation de l'appareil se faisait par rapport à son

point de départ et à sa destination. Un autre système, le Gee, a été développé en Angleterre. Il était formé d'un ensemble de bases de transmission disposées à une centaine de kilomètres les unes des autres et qui émettaient une série d'impulsions synchronisées. L'un des signaux étant pilote, ce système calculait une zone de présence de l'avion à partir de la différence temporelle mesurée entre les signaux reçus. La transmission de Gee couvrait des distances allant jusqu'à 644 km avec une erreur aussi grande que quelques kilomètres. Un autre système a été aussi développé en Angleterre, mais cette fois-ci pour la navigation maritime. Le Decca se basait sur la transmission d'un signal continu par 4 stations séparées, dont l'une était principale (master) et les trois autres secondaires (slave). En calculant les différences de phase entre le signal de la station centrale et ceux de chacune des stations secondaires, Decca dessinait une intersection entre plusieurs régions de positions probables. La zone de couverture était trop influencée par les conditions ambiantes – jour ou nuit, été ou hiver – et pouvait aller de 370 km jusqu'à 780 km. L'erreur aussi subissait les effets des conditions ambiantes et variait entre une dizaine de mètres et plusieurs kilomètres dans les bonnes ou mauvaises conditions, respectivement. Ce système a été surtout déployé dans les zones d'influence de l'Angleterre (la mer du nord étant la région la plus couverte), et il a servi jusqu'à récemment. En suivant la chronologie, le système américain LORAN apparut pendant la seconde guerre mondiale. Il utilisait le même concept que Gee, mais couvrait une zone plus large et avait une meilleure exactitude et précision. Plusieurs versions de LORAN ont été introduites dans les années suivantes, ce qui permit une couverture d'une grande partie du globe. À la fin des années 70, les américains ont lancé le développement d'un nouveau système qui un jour va remplacer la plupart sinon tous les ancêtres de la localisation. Le GPS commença alors ses premiers pas vers la réalisation.

Après cette brève description chronologique de l'évolution des systèmes de localisation, les principales technologies de localisation externe et interne seront détaillées.

### **2.1.2 La radiolocalisation au sens propre**

La radiolocalisation au sens propre du terme a vu ses débuts pour des applications militaires dans les milieux externes non confinés. Mais depuis ce temps, le domaine a connu une grande expansion. De nos jours, on parle de radiolocalisation comme service offert à divers consommateurs et pour différentes raisons : une vieille personne se perd, il suffira d'appeler son fournisseur de téléphone mobile pour localiser son appareil et par la suite la personne; un touriste se ballade dans une ville et cherche à se connecter à un réseau sans fil le plus proche; des grandes compagnies cherchent à garder leurs matériels ou même leurs produits sous surveillance que ce soit dans leurs entrepôts (milieu interne) soit quelque part sur la route. Il existe aussi des applications plus avancées, comme dans le cas de routage ou des réseaux de capteurs. On parle alors d'algorithmes autodidactes qui utilisent leurs positions pour trouver la voie d'acheminement la moins coûteuse en énergie et temps (le temps étant relié au nombre de sauts); le service GPS qui se trouve dans le transport que ce soit maritime, aérien soit routier. Mais il y a aussi le côté sécuritaire dans la localisation comme dans les cas des appels d'urgence (911) en Amérique du Nord ou, comme dans notre cas, l'étude de la sécurité dans un milieu confiné sous terre. Ainsi plusieurs scénarios et différentes conditions s'appliquent dans ce domaine. Reposant sur tout cela, la dernière décennie a témoigné d'un grand progrès dans le domaine de la localisation et de la recherche à ce niveau.

Les différentes techniques de géolocalisation sont réparties en six grands groupes, soit: systèmes basés sur le temps d'arrivée du signal, systèmes basés sur le concept GPS, systèmes basés sur la puissance du signal reçu, systèmes hybrides serveur-GPS, et systèmes se basant sur le marquage de l'environnement. Ces groupes sont eux-

mêmes divisés en deux grandes catégories se basant sur le principe général de la méthode utilisée pour calculer la position; i.e., la triangulation et l'analyse des alentours. Toutes ces techniques ont été mises au point pour la localisation dans les milieux externes. Le développement de la radiolocalisation dans les milieux internes et confinés a nécessité des adaptations des concepts pour mieux couvrir les nouvelles contraintes. Il faut quand même noter que l'implantation et la performance de ces systèmes dans les milieux internes ne sont pas toujours possibles, et quand cela a lieu les résultats ne sont pas comparables à ceux des milieux ouverts.

## ***2.2 Techniques de localisation par triangulation***

La triangulation représente la majorité des algorithmes de localisation. Le concept de triangulation repose sur le fait de chercher une position qui soit une intersection entre trois zones. Ces dernières seront définies par l'un des aspects du comportement du signal dans son canal de propagation. Donc, à travers le comportement du signal au niveau du délai ou de la perte en énergie, on peut tirer des informations concernant la distance. C'est le cas de la latération. Par contre, à travers le chemin (plutôt direct) du signal et un système d'antenne complexe à la réception, on peut tirer des informations concernant l'angle d'arrivée du signal et c'est l'angulation. Dans un cas idéal, toute information sera exacte ainsi que la position estimée. Ceci n'étant pas le cas, plusieurs causes d'erreurs existent et la précision des estimations change accordement. Avec la présentation de chaque technique, une discussion des causes d'erreur est fournie.

### **2.2.1 Latération**

La latération positionne une cible en mesurant la distance qui la sépare de plusieurs points de référence. Pour trouver la position en 2-dimensions, il faut au moins trois références non linéaires. Alors que pour trouver une position en 3-dimensions, il faut au moins quatre références non coplanaires. Des techniques

utilisent différents aspects du signal afin de mesurer la distance entre la cible et les points de référence. Dans la partie suivante, un résumé de ces techniques est présenté.

### 2.2.1.1 Puissance du signal reçu

L'une des techniques les plus simples consiste à déterminer la distance entre le système de transmission et celui de réception en calculant la perte en énergie du signal reçu. En effet, dans le monde des ondes électromagnétiques et par suite dans celui de transmission sans fil, chaque milieu de propagation représente un indice de perte ou un phénomène de perte de puissance dans le signal transmis qui est spécifique. Dans le cas de la transmission sans fil, plusieurs formules mathématiques modélisent la perte de puissance et relient cette perte à la distance, la fréquence, ainsi que la largeur de bande du signal transmis. Le milieu de transmission par contre varie entre l'air et autres éléments qui couvrent le trajet d'un signal.

L'une des formules les plus simples est celle de perte dans l'espace libre (l'air) FSPL (Free Space Path Loss) qui représente un cas général mais démonstratif du principe de fonctionnement de cette méthode de localisation. Dans la synthèse de cette formule et pour une puissance transmise  $P_T$ , la puissance au niveau du récepteur sera :

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} A = \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} G_T P_T G_R, \quad (2.1)$$

$A$  étant la surface effective de l'antenne de réception,  $G_T$  et  $G_R$  étant les gains relatifs à l'antenne de transmission et celle de réception.  $\lambda$  est la longueur d'onde relative à la fréquence centrale de transmission et  $d$  est la distance entre le transmetteur et le récepteur, le paramètre de localisation qui nous intéresse. Cette

distance suppose un espace vide. Mais elle suppose aussi une ligne de vue directe entre les deux antennes. On remarque alors que la puissance reçue est inversement proportionnelle au carré de la distance. Donc connaissant toutes les autres composantes de la formule, la distance peut être déterminée. Par la suite, la perte en espace libre sera :

$$FSPL = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2. \quad (2.2)$$

Et si on reprend la formule en dB la valeur devient :

$$FSPL(dB) = 10 \log_{10} \left( \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \right) \quad (2.3 a)$$

$$= 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi df}{c} \right) \quad (2.3 b)$$

$$= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi}{c} \right) \quad (2.3 c)$$

$$= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 147.55. \quad (2.3 d)$$

Dans ce cas, comme déjà noté précédemment, l'espace vide est considéré comme milieu de transmission. Donc l'indice de réflexion, de réfraction, ou tout autre indice propre au milieu de propagation ne joue pas un rôle dans la formule. Mais si on cherche le cas général adopté en communication, on aura la formule suivante :

$$P_{R-d}(dB) = P_T(dB) - P_{e-d}(dB) + G_T(dB) + G_R(dB), \quad (2.4)$$

$P_{R-d}, P_T, P_{e-d}, G_T, G_R$  étant, respectivement, la puissance reçue à une distance  $d$ , la puissance transmise, l'atténuation subie par le signal sur la distance  $d$  qui est fonction de plusieurs paramètres, et les gains des antennes de transmission et de réception. Dans cette formule  $G_T$  et  $G_R$  ainsi que  $P_T$  sont connus à l'avance. Par contre  $P_{R-d}$  est supposée être mesurable. Il reste donc  $P_{e-d}$  : la fonction de la distance est

d'habitude formulée suite à un cheminement empirique. Elle a le plus souvent la forme :

$$P_{e-d} (dB) = P_{e-(d_0)} + 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X. \quad (2.5)$$

Où  $P_{e-(d_0)}$  est la perte mesurée, pour une distance  $d_0$  spécifique qui est d'habitude de 1 mètre,  $n$  est le coefficient d'atténuation propre au milieu, et  $X$  est une variable aléatoire dépendant de l'environnement (le plus souvent Gaussienne) avec un écart type et une valeur moyenne calculés ou estimés à travers des méthodes empiriques. En remplaçant cela dans la formule précédente, on obtient :

$$P_{R-d} (dB) = P_T (dB) - P_{e-(d_0)} - 10n \log \left( \frac{d}{d_0} \right) - X + G_T (dB) + G_R (dB). \quad (2.6)$$

Dans cette formule, il y a donc des paramètres que l'utilisateur (transmetteur et récepteur) peut spécifier. D'autres qui sont calculables et ceux qui dépendent uniquement du signal et des différents milieux de propagation traversés. Une autre formule utilisée pour modéliser la perte [57] est :

$$P_{d_i} = P_t \left( \frac{c}{4\pi f_0 d_0} \right)^2 \left( \frac{f_0}{f} \right)^\beta \left( \frac{d_0}{d} \right)^\alpha + e_i, \quad (2.7)$$

Où  $\alpha$  et  $\beta$  ont une valeur entre 2 et 4, avec le cas spécial de l'espace libre où  $\alpha = \beta = 2$ .  $f_0$  et  $d_0$  représentent une fréquence et une distance prises comme références,  $e_i$  est une variable modélisant une erreur de la puissance de transmission.

En supposant que tous les paramètres sont connus, une distance  $d_1$  de la station de transmission sera calculée. Mais cette distance ne présente aucune information concernant la direction, et donc représente une couverture de 360 degrés. Ainsi on a un cercle centré à la station de base de rayon  $d_1$  ; en faisant le même calcul

pour deux autres stations, on aura trois cercles qui dans le cas de calcul exact ne présentent qu'un seul point d'intersection (figure 2.1).

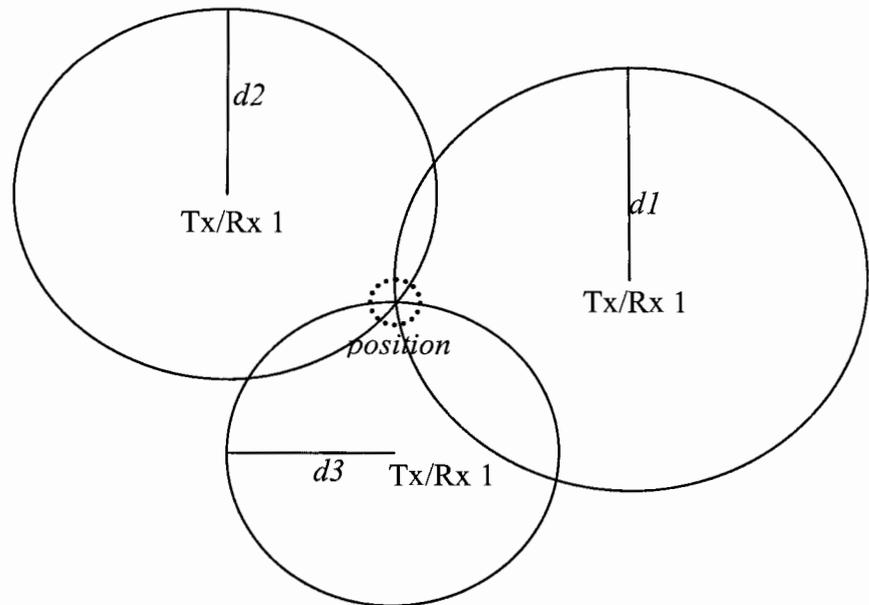


Fig. 2.1 L'intersection des régions de présence.

La formule d'un cercle étant :

$$r^2 = (x_c - x_p)^2 + (y_c - y_p)^2, \quad (2.8)$$

on aura avec les trois cercles un système de trois équations à trois inconnus et donc la possibilité de calculer les coordonnées exacts du point à localiser. À noter que pour une localisation tridimensionnelle, il suffira d'ajouter une quatrième station qui a une élévation différente des autres (coordonnées en  $z$ ) pour pouvoir localiser un point.

Donc la localisation basée sur la puissance du signal reçu est l'une des méthodes les plus simples; elle ne requiert l'ajout d'aucun matériel hardware au réseau et elle peut utiliser toute sorte de technologies et signaux sans fil pour localiser. Par contre dans le cas réel (non idéal), il y a plusieurs causes d'erreurs et

donc la localisation n'est pas précise. En effet, puisque le signal transmis ne suit pas un trajet direct, les formules décrites ci-dessus ne peuvent pas représenter correctement la relation perte/distance.

Il est évident que pour une zone à traverser, plusieurs trajets sont possibles et donc les pertes ne reflètent plus le cas de visibilité directe ou le cas de ligne de vue. Mais aussi les différentes surfaces heurtées par le signal absorbent une partie de l'énergie, ce qui augmente le taux d'erreur. Une autre source d'erreur provient du fait que le milieu traversé n'est pas isotrope et donc les formules de perte de puissance doivent pouvoir prendre les différents indices en considération. Mais dans un cas réel, il sera pratiquement impossible de prévoir les différents milieux et surfaces traversés par le signal, et donc il y aura toujours une erreur. Elle se manifeste à un niveau de puissance inférieur à celui du cas idéal. Des pertes dépassant les 30 dB ont été enregistrées et cela sur une distance ne dépassant pas une longueur d'onde. La triangulation n'est alors plus capable d'identifier un point unique, mais plutôt une région de présence de la cible (figure 2.3). Dans ces cas les cercles en pointillés de la figure 2.3 sont dus à l'erreur dans l'estimation de la distance traversée, le point d'intersection cherché originalement est remplacé par une zone d'intersection. Une méthode utilisée pour remédier à cet effet est 'la puissance relative'. Tout signal reçu est normalisé par rapport à une valeur de référence commune. Il est ensuite comparé à un autre signal. Le rapport peut être utilisé pour obtenir la puissance exploitée par l'algorithme de localisation.

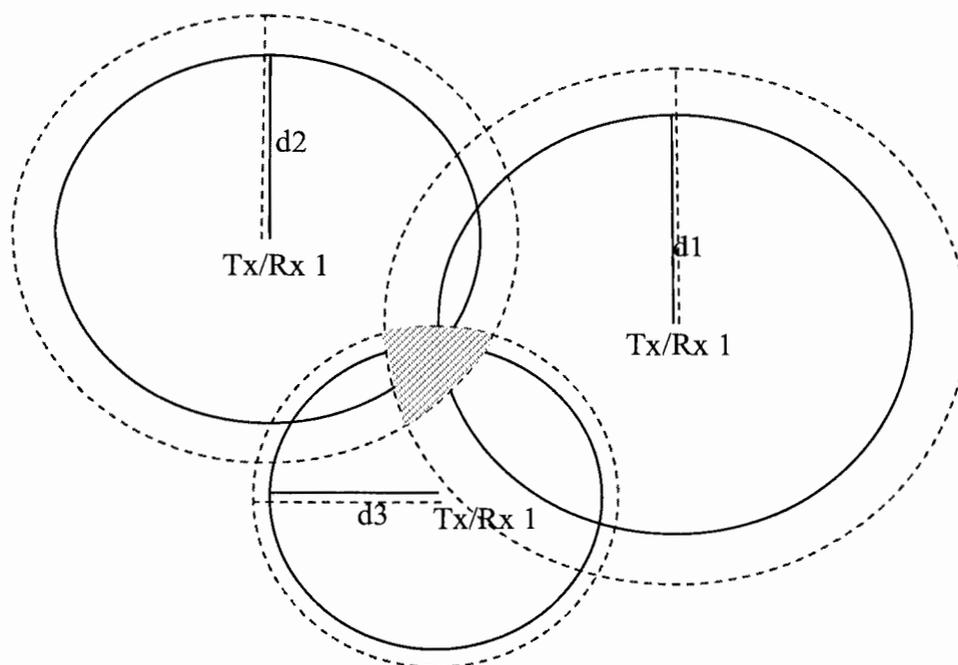


Fig. 2.3 Région de présence en cas d'erreur.

En dépit de l'erreur certaine, surtout dans les milieux internes, cette méthode est largement utilisée. Les changements minimes nécessaires dans un réseau existant, ainsi que l'algorithme simple qui ne demande aucune synchronisation ni toute autre fonction complexe ont fait que n'importe quelle technologie sans fil – à condition que sa puissance de transmission soit connue – peut être utilisée. Toutes ces raisons expliquent pourquoi cette technique est populaire [67].

### 2.2.1.2 Délai du signal reçu TOA

Une autre technique de localisation par latération et utilisant la triangulation permet d'estimer une position grâce à l'information temporelle tirée du signal. Cette technique est l'une des plus précises. Elle est sûrement plus efficace que la technique basée sur la puissance du signal reçu. Par contre, elle est plus compliquée sur tous les niveaux ; elle demande des additions aux infrastructures existantes et nécessite une

puissance calculatoire plus grande et des algorithmes de localisation plus compliqués. Basée sur le temps, elle exige une synchronisation complète entre les différents composants du réseau. Un signal reçu contient une information sur le moment de transmission. Cette information sera utilisée par le récepteur pour calculer la durée du trajet traversé par le signal. La synchronisation entre le transmetteur et le récepteur joue un rôle essentiel, parce que c'est en calculant la différence entre le temps de transmission (fourni par la station de transmission) et celui de la réception (le temps interne du récepteur) qu'on obtient la durée du trajet. Une fois la durée calculée en considérant que tous les signaux électromagnétiques se propagent à la vitesse absolue, une distance pourra être estimée :

$$d = c * t. \quad (2.9)$$

Cette distance représente le rayon d'un cercle centré sur la station de transmission. Comme précédemment, en combinant si possible les régions couvertes par trois stations différentes (la triangulation), un point d'intersection représentant la position sera calculable. Une fois les approximations des distances séparant l'utilisateur des trois stations de base sont faites, le calcul des coordonnées se fait exactement de la même manière que dans le cas de localisation par perte de puissance.

La performance de cette technique dans les milieux externes ouverts est excellente, l'erreur ne dépassant pas les 5 mètres pour un trajet allant jusqu'à quelques kilomètres. Cependant, en milieu urbain où les obstacles se trouvent le long du trajet, la performance diminue considérablement, de même que dans les milieux internes confinés où les obstacles et les trajets multiples, sont les premières sources d'erreur. Dans le cas des trajets multiples il se peut que le signal reçu – le plus fort – ne soit pas celui du trajet direct, comme il se peut que le signal soit une version retardée d'une transmission antérieure. Différentes mesures au niveau matériel (hardware) aussi bien que logiciel (software) sont utilisées pour surmonter de tels problèmes. Par exemple le récepteur est chargé d'un système pour minimiser les cas de réception du

faux signal et pour décider quel signal est bon. De plus, les informations contenues dans le signal peuvent comprendre un numéro identificateur de la transmission qui permet au récepteur de vérifier le signal utilisable pour la localisation. Toutefois, cela exige une grande puissance calculatoire et un niveau d'intelligence plus élevé que dans le cas de RSS. S'ajoute à cela le grand inconvénient de la synchronisation de tous les composants par ajout d'horloges dans le réseau et qui peuvent être coûteuses. Un moyen d'éliminer le besoin de synchronisation est l'utilisation d'une transmission duplex; le transmetteur (ou le récepteur) envoie un message et attend son retour en considérant que le signal a fait deux fois le trajet. Puisque c'est la même station qui envoie le signal et le localise, elle n'aura pas besoin de synchronisation. Mais il faut savoir le délai de traitement introduit par l'autre station (ce délai peut être retourné avec le signal). Il faut noter que dans ce cas toute erreur introduite par les phénomènes ayant lieu sur le trajet du signal sera double puisque le signal fait l'aller-retour du trajet (mais il faut tenir compte du fait ou le comportement du signal n'est pas forcément le même à l'allée et au retour).

En dépit de tous ses inconvénients, la localisation par « délai du signal reçu » trouve un grand nombre d'adeptes surtout pour des réseaux ayant l'infrastructure nécessaire pour un bon fonctionnement (synchronisation, puissance de processeur...), et dans les zones à faible densité.

### **2.2.1.3 Différence de délai du signal reçu TDOA**

Cette technique trouve son concept de base dans le système de navigation Gee décrit précédemment, mais elle est considérée comme une variante de la technique TOA. Basée sur la latération, elle utilise des données concernant le temps. Donc une fois de plus, elle précise une position utilisant la triangulation. Pour TDOA,

le réseau doit être synchronisé juste au niveau des stations de base alors que tout autre composant ou utilisateur du réseau ne le serait pas forcément. Toutefois le temps considéré n'est pas celui mis pour traverser le trajet, mais plutôt la différence de temps (de délai) entre les stations qui ont reçu le signal. Puisque les positions de toutes les stations sont connues à l'avance et que le signal voyage dans toutes les directions avec la même vitesse, et en comparant les différences d'arrivée du signal entre les stations de base, le transmetteur (la cible) sera localisable. Considérons le cas où on a trois stations de base désignées  $A, B$ , et  $C$ . Les différences du temps seront :

$$t_{A,B} = t_B - t_A, \quad (2.10 \text{ a})$$

$$t_{A,C} = t_C - t_B, \quad (2.10 \text{ b})$$

$$t_{B,C} = t_C - t_B. \quad (2.10 \text{ c})$$

Et considérons que les positions de ces trois stations sont connues, soit  $r_A, r_B$ , et  $r_C$  en prenant  $r_T$  comme la position de la cible et  $c$  la vitesse de la lumière, on obtient :

$$t_{A,B} = t_B - t_A = \frac{1}{c} (\|r_B - r_T\| - \|r_A - r_T\|), \quad (2.11 \text{ a})$$

$$t_{A,C} = t_C - t_B = \frac{1}{c} (\|r_A - r_T\| - \|r_C - r_T\|), \quad (2.11 \text{ b})$$

$$t_{B,C} = t_C - t_B = \frac{1}{c} (\|r_C - r_T\| - \|r_B - r_T\|). \quad (2.11 \text{ c})$$

La forme des trois formules ci-dessus est celle d'une équation d'une hyperbole. Donc dans le cas de TDOA, au lieu d'avoir la position comme une intersection de trois cercles, elle sera celle de l'intersection de trois hyperboles (figure 2.4). Dans le cas de Gee et Loran-C, il y avait des cartes dessinées avec toutes les hyperboles possibles là-dessus, surtout que les stations de bases étaient fixes et spécialement conçues (bâties) pour le fonctionnement du système.

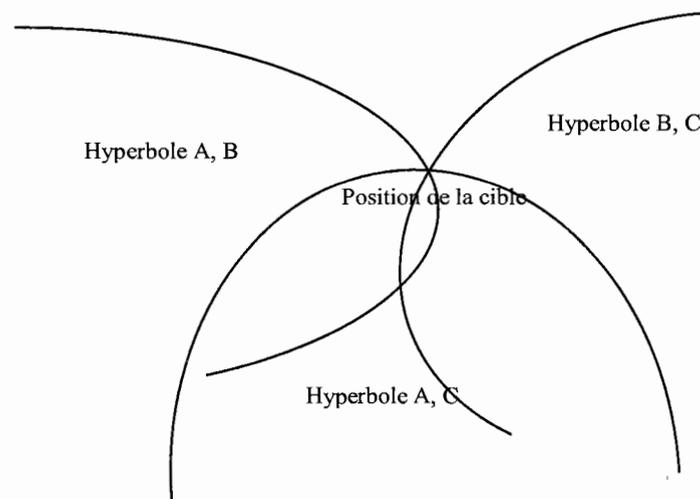


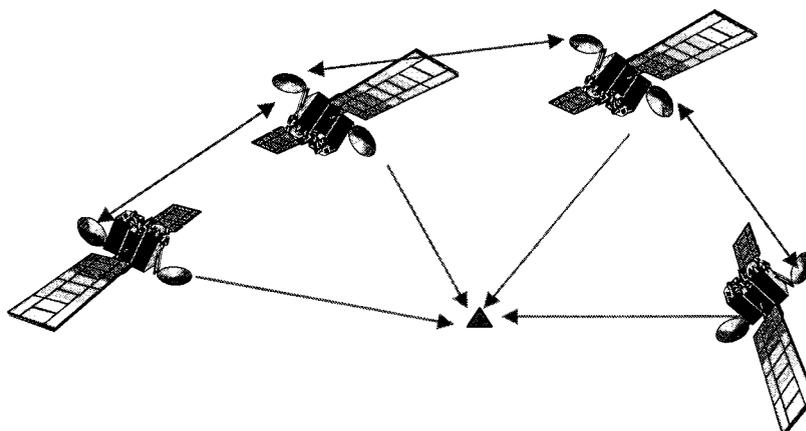
Fig. 2.4 l'intersection des régions pour TDOA

En cas d'erreur, l'intersection ne couvre pas un point mais une région comme dans le cas illustré pour le RSS. L'atout du TDOA par rapport au TOA est qu'il n'exige pas de synchronisation entre toutes les parties du réseau. Par contre, TDOA demande une très haute synchronisation entre les stations de bases et une puissance calculatoire plus élevée, puisqu'un plus grand nombre d'opérations est effectué. Alors qu'il existe différents moyens pour éviter le besoin de synchronisation dans les algorithmes TOA, et ce en dépit d'une erreur plus grande, pour TDOA la synchronisation est cruciale. Donc le réseau est généralement plus coûteux. Cette technique existe en navigation depuis les années quarante jusqu'à récemment (on a en effet arrêté les systèmes LORAN), ce qui explique son utilisation populaire en localisation externe et ensuite interne. Cette technique est sujette aux mêmes sources d'erreur que le TOA.

## 2.2.2 Localisation basée sur le GPS

Le système GPS est un système complet plutôt qu'un algorithme de localisation. Mais puisqu'il est le noyau de plusieurs autres systèmes reposant sur lui, il est considéré comme l'une des techniques les plus importantes de localisation.

Le GPS est un système qui utilise les informations temporelles pour localiser une cible. Sa différence majeure étant l'origine des signaux qui proviennent d'un groupe de satellites. L'estimation d'une position repose sur le système géodésique mondial (WGS84). Il faut au moins les signaux de quatre satellites pour avoir une localisation tridimensionnelle (figure 2.5) : longitude, latitude et altitude. D'autres signaux peuvent être utilisés pour la redondance qui assure une estimation plus robuste et précise. Par contre, il est possible d'utiliser juste trois satellites pour avoir une localisation bidimensionnelle qui n'inclut pas l'altitude comme pour la navigation aérienne ou même maritime qui a lieu sur une surface relativement plane.



*Fig. 2.5 Localisation par GPS.*

Les satellites dotés d'horloges atomiques ultra précises diffusent des informations sur leur temps interne dans leurs messages. L'utilisateur va recevoir cette information pour se localiser. Dans ce cas, il n'y a pas échange d'information entre les satellites et l'utilisateur et par la suite pas de synchronisation. Mais les satellites sont synchronisés entre eux. Avec une erreur de position dépassant les 300 mètres pour une imprécision d'un millionième de seconde dans le calcul du temps, la synchronisation est primordiale. C'est ce qui explique le besoin d'avoir un satellite supplémentaire comme dans le cas tridimensionnel. Quatre satellites donnent quatre équations à quatre inconnues dont la position et l'imprécision temporelle. C'est la

raison pour laquelle un récepteur cherche le plus grand nombre de satellites détectables rendant ainsi les estimations plus robustes. Il existe d'autres sources d'erreur à surmonter.

Comme indiqué auparavant, la vitesse de la lumière n'est pas identique dans tous les milieux. Les différentes couches de l'atmosphère ayant des indices différents ont des vitesses de traversée différentes. Il faut ajouter à cela les conditions météorologiques, comme l'humidité et la densité des nuages, qui introduisent d'autres erreurs dans le temps pris par le signal pour atteindre le récepteur. De plus, toutes ces sources d'erreur sont variables, ce qui rend les choses plus compliquées. Il faut noter aussi que les phénomènes de la relativité restreinte et absolue introduisent des erreurs dans le système. Pour surmonter ces difficultés, il y a deux groupes de mesures, le premier considérant des additions au niveau du matériel physique (hardware) et le deuxième des mesures au niveau des algorithmes ou logiciels qui estiment la position.

Si le récepteur choisit quatre signaux provenant de quatre satellites dispersés, l'erreur introduite par les mesures est multipliée par 1.5, alors que si les satellites sont proches, cette erreur sera multipliée par 5. Il est donc préférable de choisir les signaux de satellites dispersés. De plus, l'installation de stations terrestres fixes avec positions connues est proposée dans le GPS différentiel (DGPS). Ces stations sont très précisément localisées et elles peuvent donc détecter les erreurs dans le signal transmis par les satellites. Comme les phénomènes subis dans une région bien définie sont presque semblables, un récepteur à proximité d'une station terrestre utilise les signaux transmis par cette dernière comme référence pour connaître les erreurs à corriger en estimant une position.

Au niveau des algorithmes, toutes les sources d'erreurs sont modélisées avec des variables qui dessinent le plus parfaitement possible les variations de celles-ci. En tenant compte du fait qu'une grande partie des phénomènes naturels est imprédictible (leur modélisation n'est pas précise), des versions d'algorithmes introduisent des

variables obtenues par des mesures en temps réel pour améliorer les performances. Tout en prenant ceci en considération, il faut noter qu'il y a beaucoup de phénomènes totalement imprédictibles et donc incorrigibles. Des nuages électromagnétiques dus aux CME (Coronal Mass Ejections), une feuille d'arbre qui tombe, un avion qui passe par-dessus le récepteur et beaucoup d'autres « accidents » peuvent interférer dans le bon fonctionnement du système.

L'inconvénient du GPS dans les milieux confinés est l'absence totale du signal. En réalité, le signal transmis est assez faible et c'est rare qu'il puisse être capté dans les endroits fermés. On propose dans ce cas des systèmes hybrides, qui consistent à installer des stations fixes dans les milieux internes et l'utilisateur se localise par rapport à ces stations et par la suite par rapport au système GPS (puisque les stations ont des coordonnées caractéristiques). Ces stations internes utilisent l'une des autres techniques de localisation pour positionner une cible. Bien que ces systèmes hybrides soient considérés comme une technique distincte d'après notre classification initiale, ils ne seraient pas discutés plus profondément puisque chacun de leurs composants l'a déjà été.

Pour conclure cette section, on note que cette description simple mais approfondie du système GPS nous offre plusieurs aperçus sur des causes d'erreurs et des solutions pour surmonter ces dernières.

### **2.2.3 Angulation AOA**

L'Angulation est une autre technique de localisation qui utilise les angles pour déterminer la position d'une cible. Dans le cas d'une localisation bidimensionnelle, il faut au moins deux angles et une distance qui est d'habitude la distance entre les deux points de référence (figure 2.6). Dans le cas tridimensionnel, il

faut deux mesures d'angles, une mesure de distance et une mesure d'élévation (azimuth angle) pour pouvoir estimer une position.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour calculer les angles, la plus simple étant l'emploi d'une antenne directionnelle qui va détecter la direction du signal maximal [48]. Alternativement, on utilise la différence du délai de l'arrivée du signal sur plusieurs éléments d'un réseau d'antennes. Dans ce cas, il faut une antenne à six éléments pour couvrir 360 degrés.

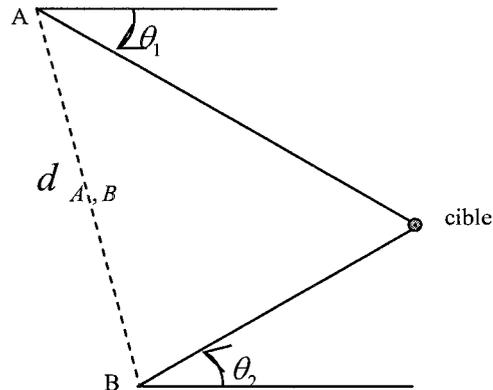


Fig. 2.6 Localisation par angulation : cas idéal.

Cette méthode a l'avantage de ne pas avoir besoin de synchronisation dans le réseau, tout comme le RSS. Par contre, elle a un prix assez élevé dû au coût des antennes directives (ou array).

L'AOA offre une bonne performance dans les milieux externes, mais elle présente plusieurs limitations. Premièrement, les antennes les plus précises présentent toujours une erreur en estimant la direction. Cette erreur, même minimale au niveau de l'angle, augmente une fois transformée en distance. Une approximation de base de ce changement sera  $e_d = e_\theta * d \sin(\phi)$ .

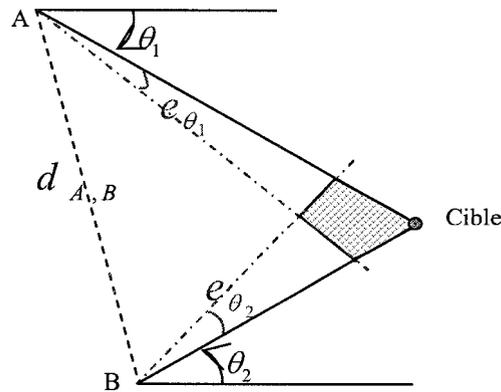


Fig. 2.7 Localisation par AOA : cas erroné.

Dans ce cas, la position estimée n'est plus un point indiquant la cible mais plutôt une région de présence de la cible. C'est la région colorée dans la fig. 2.7 qui représente la différence entre le cas idéal et le cas réel. Donc, l'erreur du système représente un minimum imposé par les antennes et cette erreur augmente avec la position de la cible. De plus, dans les milieux internes, il est pratiquement impossible de savoir si le signal reçu présente la direction du transmetteur ou si c'est une version déviée du signal. En effet, plus le milieu interne est dense, plus le signal tend à heurter des obstacles. L'angle d'arrivée provenant d'un trajet réfléchi ne présente pas le vol direct introduit alors des erreurs fatales qui passent inaperçues par l'algorithme qui calcule la position. Par contre, d'autres erreurs moins graves sont les versions des signaux précédents qui arrivent par un autre trajet et avec une puissance assez forte qu'ils sont considérés comme le signal original. L'erreur causée par ce signal peut être diminuée ou éliminée en utilisant des informations particulières dans le contenu du signal lui-même. Un autre inconvénient provient du fait que les antennes directives doivent tourner constamment pour s'aligner avec la cible. Pour toutes ces raisons, cette technique n'a pas connu une grande réussite dans les milieux confinés.

### **2.3 *Technique basée sur les empreintes***

Connue aussi comme « technique basée sur les signatures », cette méthode de localisation repose sur le concept le plus ancien de localisation. Dans le temps, les gens cherchaient des signatures (des irrégularités dans le paysage, des rochers, des maisons....) pour marquer leur chemin. Pour retrouver le bon chemin, il suffisait de trouver les signatures sur ce chemin. La même méthode a été initialement utilisée dans l'aviation. Dans un cas plus compliqué de localisation, le même concept est utilisé avec la différence que les empreintes recherchées sont plus compliquées. Elles se trouvent dans le comportement du signal et sont d'origine électromagnétique. Puisque le comportement du signal varie sous l'influence de la surface dans laquelle le signal voyage, alors réciproquement il sera possible d'identifier la surface à partir de l'analyse du signal reçu. Cette technique de localisation peut être statique ou différentielle. Dans le cas statique, une base de données est déjà complètement construite à l'avance et toute localisation se fait à partir de cette base. Alors que dans les cas différentiels, le système suit les changements dans les signatures et les interprète pour inférer une position.

En se basant sur cette description simplifiée, on peut dire que la technique de localisation basée sur les empreintes se divise en deux étapes : la première étant celle de trouver les empreintes et la seconde celle d'évaluer la position (la localisation). Plus précisément, la première phase consiste à analyser le signal et son comportement dans la zone destinée. Une fois l'analyse effectuée, il sera possible d'identifier l'aspect du signal qui peut être utilisé pour former une empreinte. Une telle empreinte doit respecter plusieurs critères, les plus importants étant l'unicité et la reproductibilité. En fait, l'empreinte constituée à deux endroits différents ne peut être la même. Sinon, il serait impossible d'identifier un endroit précis et donc il est impératif que la signature (l'empreinte) soit unique à chaque endroit. De même, l'empreinte doit être reproductible, sinon elle n'aura aucun intérêt. La localisation ne

se produit pas simplement une seule fois ou à une étape donnée. Alors il faut à chaque fois que le système cherche à localiser une cible, que l’empreinte soit pareille aux empreintes vues par le système durant la phase de construction. En respectant ces deux critères, une signature est formée. Elle peut être de plusieurs types : la puissance du signal [55], le temps d’arrivée, l’angle d’arrivée, un ou plusieurs aspects (RMSDS, numéro total des Multipath reçu) de la réponse impulsionnelle du signal dans ce canal précis. Mais d’autres critères peuvent être également utilisés comme signature [42]. Il faut signaler qu’un ou plusieurs types peuvent être utilisés en parallèle dans la formation d’une signature. Une fois l’empreinte choisie, il faut construire une base de données reliant les différentes valeurs de cette empreinte aux différentes positions dans la région d’intérêt. Puisque l’empreinte est unique, c’est en cherchant sa valeur dans les diverses positions qui va permettre plus tard à identifier ces positions. La nature et la construction de cette base de données vont considérablement influencer la phase suivante de cette technique de localisation. Mais elles sont aussi influencées par la phase suivante. En fonction de l’algorithme utilisé dans la seconde phase, il faut identifier le nombre total d’empreintes nécessaires pour bien couvrir la surface en question. Mais cela influence aussi l’espace entre les empreintes consécutives ainsi que la topologie des empreintes pour couvrir la surface, etc. On reviendra à ce point plus loin en discutant plus profondément de la performance de cette technique.

Dans la seconde phase, le système acquiert une empreinte semblable à celle utilisée dans la phase précédente pour localiser une cible. La localisation se fait en comparant l’empreinte récupérée avec la base de données créée dans la première phase. S’il se trouve qu’une empreinte identique est dans la base, la position recherchée est alors celle associée à cette empreinte. Mais au cas où l’empreinte n’est pas retrouvée dans la base, l’algorithme doit estimer la position. Plusieurs algorithmes, avec des méthodes différentes pour estimer une position, sont disponibles. Le plus simple est la distance Euclidienne : l’algorithme cherche l’empreinte qui a une valeur la plus proche à la valeur présente. La position associée à

cette empreinte dans la base de données sera la position cherchée. A première vue, cet algorithme semble simple, mais il demande une recherche qui peut (s'avérer exhaustive) demander beaucoup de ressources alors que l'erreur dans les positions se limite à la position ou l'empreinte la plus proche. Donc s'il y a un moyen de constituer la base de données la plus complète et qui couvre pratiquement toutes les positions possibles – il faut considérer que dans ce cas des empreintes consécutives doivent être assez proches – ce sera un bon algorithme. Mais cela n'est pas pratique. Tout d'abord, à cause du travail qu'il demande au niveau du déploiement du système (spécialement la première phase) surtout que le travail doit être refait dans chaque nouvelle zone de déploiement. Ensuite, il faut considérer la taille de la base de données qui sera formée et les problèmes liés à la maintenance d'une telle base elle exige beaucoup de puissance calculatoire et rend la localisation lente surtout si une recherche complète est faite). D'autres algorithmes proposent l'interpolation comme moyen de diminuer la taille de la base de données et la complexité de sa construction. On cite les réseaux de neurones ou les systèmes basés sur les probabilités conditionnelles, « Bayesian modeling » basées sur les modèles Bayésiens étant le plus utilisé. Il faut noter que dans la littérature chacun des algorithmes a ses avantages et ses inconvénients, mais les résultats sont relativement proches et comparables (en considérant que la base de données dans le premier algorithme est assez large).

L'avantage premier de la localisation par signature c'est qu'elle se fait à partir d'observations passives qui ne présentent pas des paramètres strictement géométriques ou temporels. Les bases de données construites au début doivent contenir toutes les informations possibles sur le milieu et doivent relier celles-ci à la position désignée. Mais une fois la localisation est effectuée en temps réel, elle n'utilise que des informations déjà collectées. Les inconvénients sont la nécessité de former une base de données pour chaque nouveau milieu et le maintien et la gestion de cette dernière. Pour cela, il faut noter que les systèmes de localisation par

empreintes sont généralement déployés dans des zones assez limitées. Le cas des zones internes confinées offre alors un bon scénario pour ces systèmes.

## **2.4 *Un dernier point***

Il faut enfin noter qu'il existe 2 versions des algorithmes énumérés précédemment, la première étant simple à fonctionnement direct alors que la seconde emploie les algorithmes itératifs afin d'améliorer les premières estimations [43, 46].

## **2.5 *Exemples pratiques des systèmes de localisation***

Dans cette partie, quelques systèmes de localisation déjà commercialisés seront présentés. Pour mieux comprendre les avantages et les inconvénients de chacun des systèmes, un nombre de critères essentiels pour les systèmes de localisation sera établi auparavant.

### **2.5.1 Critères des systèmes**

#### **a. L'exactitude et la précision**

Un critère principal de tout système de localisation est de toute évidence la précision qui correspond à la valeur de l'erreur commise par le système lors d'une estimation d'une position. Mais il y a aussi l'exactitude qui est définie comme la capacité du système à garder un niveau de précision pour toutes ses estimations. En général, il existe un compromis entre les deux ou pour un système donné il est capable de fonctionner avec une exactitude plus élevée si la précision est moins contraignante – ce qui veut dire moins de précision –. Il

faut noter que plus le système a une meilleure performance, plus il pousse vers une amélioration de ces deux critères en parallèle.

**b. Localisation ascendante ou descendante**

Les systèmes utilisent une localisation descendante ou ascendante. Dans la première, le récepteur se localise en utilisant les signaux provenant des transmetteurs et puis il envoie cette information aux stations de base. Alors que dans la localisation ascendante, un serveur au niveau de la station de base estime une position de la cible – le récepteur – et puis transmet cette information à l'utilisateur, ces deux cas étant localisation à sens unique.

**c. Position physique ou symbolique**

Un système de localisation peut donner une information physique ou symbolique. Une position physique est un ensemble de coordonnées qui représente un système de cartographie utilisé pour identifier une zone. Par contre, une position symbolique est une abstraction de celle-ci, elle précise un endroit 'au laboratoire' plutôt qu'un ensemble de coordonnées '35 degré N, 45 degré S, élévation 200'. D'habitude, un système qui donne des informations physiques peut être mis à niveau pour lui permettre de fournir des positions symboliques; il suffit d'ajouter un algorithme et des codes, ce qui est plutôt un travail au niveau logiciel du système. Une différence essentielle entre les deux systèmes est bien la précision, un système à position symbolique se limite par une précision relative à la surface de l'endroit.

**d. Position absolue ou relative**

Un système à localisation absolue utilise une grille référentielle universelle pour tous les objets et les positions. Un système à localisation relative utilise un plan référentiel relatif à sa propre position qui peut changer

d'un endroit à l'autre. Un avantage commun des deux systèmes est la possibilité de translater les coordonnées d'un système à un autre, bien que le système absolu reste plus universel.

**e. L'échelle**

En fait un système comme le GPS peut couvrir la terre, d'autres peuvent couvrir une région métropolitaine ou un immeuble ou même une seule chambre. Mais en plus un système peut localiser jusqu'à 10 cibles à la fois alors que d'autres peuvent localiser un nombre illimité de cibles. L'échelle est un critère essentiel surtout pour étudier le rapport efficacité/prix. L'échelle d'un système peut souvent être élargie en développant l'infrastructure.

**f. Le prix**

Le prix reste l'un des critères les plus communs et généraux, il peut être affecté par un ou plusieurs des critères cités ci-dessus, et il joue un rôle principal dans le choix d'un consommateur et même d'un développeur de systèmes.

**g. Limitations**

A chaque système ses limitations qui définissent généralement les conditions sous lesquelles le système ne fonctionne pas ou a une faible performance. Ces conditions sont liées à la puissance, au niveau des bruits, à la topologie de l'endroit, à d'autres variables du système, le canal et le mode de fonctionnement.

## 2.5.2 Quelques systèmes

### **2.5.2.1 Active badge**

Le premier prototype de tous les systèmes de localisation interne à badge. C'est un système qui utilise les transmissions infrarouges pour localiser une cible qui porte une balise. La localisation se passe au niveau de la cellule. Chaque badge transmet un signal identificateur toutes les 10 secondes ou à la demande. Le système donne une position absolue et symbolique. Il utilise le scénario de localisation descendante. Les cellules du système se limitent à quelques mètres. Une autre limitation est sa sensibilité aux sources de lumière fluorescente.

### **2.5.2.2 Active bat**

Un système de localisation basé sur la transmission des ondes ultrasoniques. Il utilise le TOA avec la latération pour estimer une position physique. Chacune des cibles potentielles doit porter un badge qui transmet des signaux d'une manière périodique. Ces derniers sont saisis par des réseaux de capteurs accrochés au plafond. Chacun des capteurs estime la distance entre lui et les transmetteurs et communique cette information à un serveur central. Ce dernier utilise une combinaison des informations reçues afin de calculer une position de la cible. Le système est d'une précision de 9 cm avec une exactitude de 95 %. Active Bat est aussi capable de déterminer des informations sur l'orientation si les angles de la position initiale d'un badge sont connus. Le prix, l'échelle et la difficulté de déploiement sont les inconvénients de ce système.

### **2.5.2.3 CRIKET**

CRIKET est un autre système qui utilise les transmissions ultrasoniques pour des fins de localisation. Par contre, il adopte un scénario de localisation ascendante dans laquelle chacun des récepteurs cibles est muni de puissance

calculatoire afin de pouvoir estimer sa position. Cricket utilise les informations de durée de vol – TOA – pour trouver les distances et par la suite calculer une position. Le système offre deux modes de déploiement; l'une étant la latération où la position exacte est estimée; et l'autre est la proximité où le système situe le récepteur à proximité d'un nœud. Cricket est moins précis que les autres systèmes, mais des avancements à ce niveau sont attendus. L'échelle du système est illimitée, puisqu'il suffit à un récepteur de recevoir les transmissions des stations de base pour pouvoir se positionner (donc un nombre infini de récepteurs qui se positionnent).

#### **2.5.2.4 MOTIONSTAR TRACKER**

La localisation se fait par analyse de l'environnement. Le système calcule la réponse du canal au niveau de trois axes orthogonaux. Il ajoute à ces mesures l'effet du champ magnétique de la terre. Ce système est plutôt utilisé dans les technologies de réalité-virtuelle où la distance entre transmetteurs et capteurs ne doit pas dépasser les 3 mètres. Dans les cas de fonctionnement idéal, ces systèmes ont une précision de l'ordre de quelques millimètres, mais leur performance se dégrade rapidement avec la distance de séparation qui augmente.

#### **2.5.2.5 RADAR**

Étant l'un des systèmes de localisation interne les plus connus, il fut conçu par Microsoft. Les concepteurs du système cherchaient un moyen d'utiliser des systèmes et des infrastructures disponibles pour des fins de localisation, permettant ainsi le déploiement d'un système à coût minime. Radar utilise la technologie des empreintes. Le système utilise la RSS comme paramètre essentiel dans la construction de l'empreinte. En réalité, chaque empreinte est la combinaison des puissances mesurées pour trois stations de

base suite à une transmission. L'approche ascendante est donc adoptée par ce système pour une localisation absolue. RADAR bénéficie de la présence des infrastructures WLAN, mais il exige la présence d'au moins trois points d'accès qui transmettent à la fois, pour un fonctionnement naturel; moins que 3 stations ne permet pas une localisation bidimensionnelle précise alors que plus que 3 stations peut améliorer la performance. La précision est de 3-4 mètres dans une cellule couverte par 3 points d'accès.

#### **2.5.2.6 GPS**

Basés sur la technique de localisation qui porte le même nom, les systèmes GPS sont variés. La différence de précision entre divers systèmes dépend plutôt du récepteur. Généralement les récepteurs avec une meilleure précision coûtent plus chers. L'échelle de ces systèmes est infinie, puisque tous les récepteurs peuvent capter les signaux transmis par les satellites et donc se localiser. La localisation est absolue avec l'approche ascendante. Le principal inconvénient de ces systèmes est leur mauvaise performance dans les régions à haute densité et dans les milieux confinés. Le coût total de ces systèmes ne peut être estimé puisque la constellation des satellites est complètement prise en charge par l'armée des États-Unis.

## CHAPITRE 3

### **Technologie UWB et sa présence dans la localisation**

Divisé en quatre parties, ce chapitre explique la technologie UWB. La première partie présente une définition globale des systèmes qualifiés UWB ainsi que les deux grandes catégories de ces systèmes. La seconde partie montre les différentes techniques et recherches joignant UWB à la radiolocalisation. Un bouquet de résultats analytiques ainsi qu'expérimentaux sera présenté incluant les raisons pour lesquelles UWB est déployé dans les systèmes de localisation. La dernière partie porte sur notre cas spécial de localisation dans un milieu confiné. Les avantages et les inconvénients qu'UWB est supposé apporter y seront exposés. Une dernière partie conclut ce chapitre.

#### ***3.1 Définition et identification de l'UWB***

Le terme UWB a été introduit dans la littérature par le département de défense Américain – DoD – dans les années 1988-1989 et ce dans le cadre de recherches secrètes entreprises pour des fins militaires. Mais cette nomenclature a été contestée par plusieurs chercheurs qui l'ont trouvée inappropriée. Ils se sont basés sur le fait que la technologie consistait à générer des impulsions de très courte durée plutôt que des signaux UWB, c'est l'aspect temporel qui définissait le signal et non l'aspect fréquentiel. Le travail sur les IR (impulse radio) – mieux connu sous le nom «Time Domain Electromagnetics » – a débuté dans les années soixante, le premier brevet date des années soixante-dix. Mais des travaux sur IRMA (Impulse Radio Multiple Access) datant de 1952 ont été trouvés. De plus, ces travaux se basaient sur

des idées développées par Shannon (non publiées), ce qui les rend plus intéressants. Depuis, le concept des filtres corrélés (matched filtering) déjà vieux d'une cinquantaine d'années a été appliqué dans le domaine UWB pour construire des récepteurs. Une large partie des travaux se concentraient sur les radars [9], ce qui entraîna le développement au niveau de la conception des systèmes UWB ainsi que des antennes capables de supporter cette technique. D'autres avancées technologiques influencèrent le développement d'UWB. C'est le cas du développement des récepteurs avec échantillonnages qui, intégrés dans les oscilloscopes, ont immensément aidé au progrès des recherches dans le domaine IR. Durant cette période, les premiers produits UWB ont été commercialisés. Il s'agissait de radars pénétrant le sol ayant connu un succès commercial. Dans les années soixante-dix, les développements de technologies – surtout dans le domaine des oscilloscopes – ont participé encore une fois à l'amélioration dans le domaine IR. Le progrès fut tel qu'à partir de la fin de ces années, l'architecture de base des transmetteurs et récepteurs UWB devint complète. Toutes les recherches et les changements faits dès lors améliorent un ou plusieurs sous-modules, mais ne changent relativement rien au niveau de l'architecture [4, 71].

Différents concepts et technologies existaient donc depuis le milieu des années soixante-dix [70]. On pouvait même trouver des composants sur le marché. Mais une grande partie de l'UWB est restée inaccessible. Nombreuses recherches étaient financées par les États-Unis – mais aussi Russie ou Chine – sous une confidentialité totale. Au milieu des années quatre-vingt, des progrès considérables ont eu lieu dans les trois pays ainsi que dans d'autres institutions travaillant sur la communication en IR. C'est à partir de l'année 1994, avec l'ouverture du DARPA aux discussions sur l'UWB, que le monde industriel et la communauté scientifique (académique) ont commencé à s'intéresser fortement à ce domaine. C'est durant cette période là que le terme Impulse Radio (IR) a été utilisé. Avec le monde industriel entrant en jeu, le débat sur la définition des systèmes UWB s'intensifiât, surtout que

des grands manufacturiers cherchaient à classer leurs nouveaux systèmes sous la catégorie UWB.

Comme toute technologie, il fallait qu'elle soit réglementée. C'est en 2000 que la FCC (Federal Communication Commission) a proposé d'inclure les systèmes UWB dans la réglementation (part 15) [66]. En réalité on parle de ces règlements parce que les États-Unis sont les seuls à avoir publié des règlements officiels propres à eux. Ces réglementations ont changé les anciennes normes qui, jusqu'alors définissaient une transmission UWB.

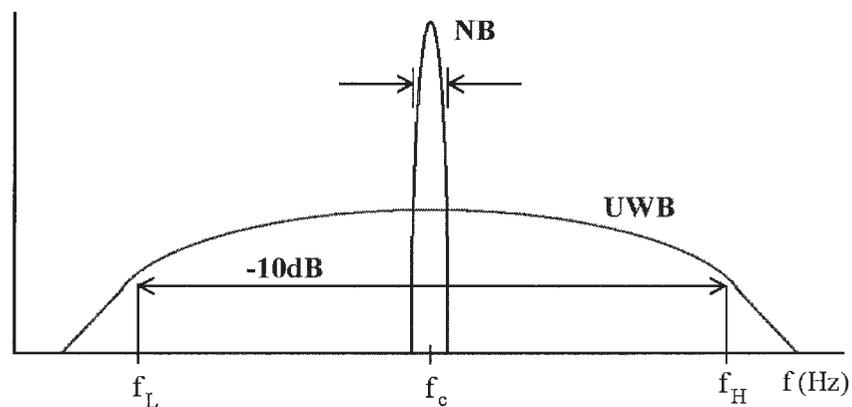


Fig.3.1 UWB spectrum/ bande étroite

UWB est toute transmission qui a une largeur de bande dépassant les 500 MHz (cette valeur était de 1500MHz avec les premiers règlements de DARPA) ou dont le signal a un rapport largeur de bande sur fréquence centrale d'au moins 0.2 (cette valeur était de 0.25). On considère que la largeur de bande est un terme qui définit la différence entre les fréquences maximale et minimale dans le système :

$$LB = BW = f_{\max} - f_{\min} \quad (3.1)$$

alors que le rapport décrit la formule suivante :

$$cfr = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\frac{(f_{\max} + f_{\min})}{2}} \quad (3.2)$$

Il faut préciser qu'un seuil de 10 dB doit être considéré pour répondre à la définition (figure 3.1). Il y a eu débat à ce niveau entre un seuil de 20 dB ou un de 10 dB, mais puisque les puissances de transmission UWB étaient précisées à -41.3dBm/MHz (voire figure 3.2), avec un seuil de 20 dB une partie du signal baigne dans le bruit et elle est non récupérable [66].

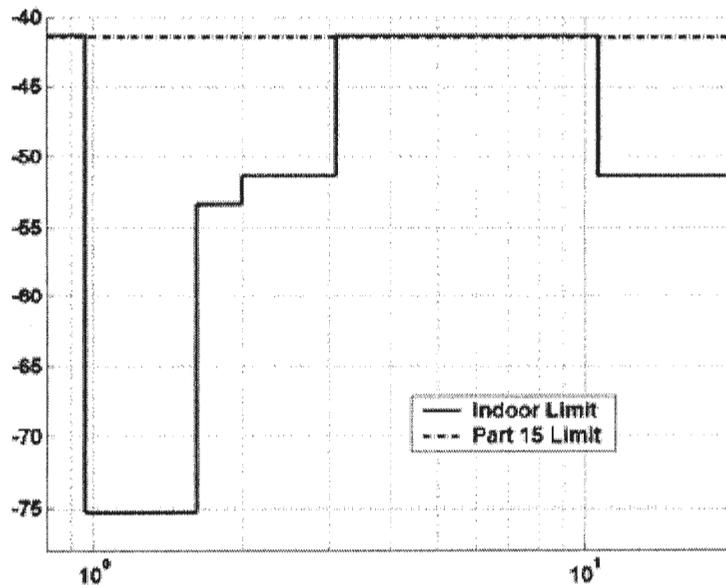


Fig. 3.2 les niveaux d'émission permises pour UWB

Il faut mentionner aussi que toute la bande entre 3.1GHz et 10.6GHz peut être librement utilisée par les systèmes UWB. Dans cette dernière définition, le FCC n'a pas réglé le débat concernant l'UWB, puisqu'elle émet un avis favorable à l'extension de l'UWB pour permettre l'utilisation de méthodes de transmission autres que par impulsion. Mais en même temps, elle exprime des doutes sur la capacité des systèmes à rampe et à saut de fréquence à se conformer à la définition, surtout que les mesures de bande doivent se faire au repos, donc sans variation de fréquence. Il faut signaler enfin que le débat sur une définition de l'UWB continue toujours.

### 3.2 Les techniques de l'UWB

Une description des deux modèles de l'UWB sera présentée dans ce paragraphe. Elle aidera à mieux expliquer notre choix de l'UWB-DS (I-UWB ou IR-UWB) comme base pour notre système de localisation.

#### 3.2.1 IR UWB

Dans cette approche, UWB consiste à transmettre des impulsions de très courte durée. Il n'y a pas alors de modulation d'une porteuse pour transmettre l'information. Par contre, le signal se présente comme une série d'impulsions qui contiennent l'information. Puisque les impulsions sont extrêmement courtes (en durée), la bande de fréquence du signal transmis est dans l'ordre des gigahertz. Le signal non modulé reçu par le transmetteur sera :

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i(t) p(t - iT_f), \quad (3.3)$$

$A_i(t)$  étant l'amplitude de l'impulsion et ayant une valeur  $\pm\sqrt{E_p}$  où  $E_p$  est l'énergie par impulsion,  $p(t)$  est l'impulsion reçue avec énergie normalisée, et  $T_f$  est le taux de répétition d'une fenêtre (frame repetition rate). Il faut noter que le rapport cyclique est toujours plus petit que 1.

Avec plusieurs propositions concernant les types de signaux à transmettre dans cette technique, les impulsions Gaussiennes – première forme avec plusieurs de ces dérivées – semblent être le meilleur choix adopté par un grand nombre de partisans de IR-UWB.



Fig.3.3 Impulsion Gaussienne et ces dérivées.

En fait les impulsions Gaussiennes offrent une facilité de description, d'utilisation et le plus important une facilité de génération. De plus, leurs dérivées sont bien connues (figure 3.3). L'importance de cette propriété vient du fait qu'en travaillant avec UWB dans le domaine temporel, les antennes ne transmettent pas le signal original mais plutôt une dérivée de ce signal. Il en est de même au niveau du récepteur. Alors l'emploi d'impulsions à dérivées connues devient avantageux. Il faut signaler que pour les systèmes commerciaux, il est souvent plus facile de travailler avec des impulsions Gaussiennes-sinusoïdales qui sont plus faciles à générer avec la technologie électronique présente.

La méthode de modulation dans IR-UWB est simple, on parle toujours de PAM (Pulse Amplitude Modulation) ou PPM (Pulse Position Modulation) et les deux techniques sont relativement anciennes et bien connues. Donc les transmetteurs seront simples, mais aussi leur coût sera minime et ils auront une très faible consommation d'énergie. Les récepteurs utiliseront les RAKE aussi bien connus. Par contre, cette technique demande une très forte synchronisation au niveau du récepteur et les signaux transmis ont un peak élevé, ce qui nécessite l'utilisation des circuits à base de SiGe plutôt que le CMOS [73]. Un autre inconvénient vient de l'utilisation du RAKE, parce que les corrélateurs sont analogiques. IR est donc plus difficile de les garder à jour avec la technologie. En plus, puisque IR-UWB propose l'utilisation de toute la bande de fréquence, elle devient susceptible à la non-linéarité des antennes sur toute la bande. Des études à un niveau plus élevé des systèmes de communication montrent

que IR-UWB est plus performante au niveau de NBI (Narrow Band Interference), sauf si on est proche de la fréquence centrale où la performance diminue alors légèrement. IR-UWB est également plus performante côté ICI (Inter-Carrier Interference). Finalement, IR-UWB offre une meilleure performance concernant MAI (Multiple Access Interference).

### 3.2.2 UWB avec multi-porteuse

Alors que le domaine temporel I-UWB était à la base de l'UWB, le domaine fréquentiel gagne du terrain depuis quelques années. En réalité un groupe (MultiBand OFDM Alliance MBOA) de 15 multinationales, y compris Microsoft et Intel, supporte largement cette technique et compte en faire un de-facto existant. Plusieurs techniques « multicarriers » existent, mais OFDM est la technique la plus supportée par MC-UWB. Cette méthode consiste à diviser la largeur de bande en 128 sous-bandes égales de 528 MHz chacune (respectant ainsi le minimum requis par la FCC) (voire le Spectrum dans figure 3.4). Le signal transmis à la forme :

$$s(t) = \sum_{i=1}^N d_i(t) e^{j2\pi t \left(\frac{t}{T_s}\right)}, \quad (3.4)$$

$N$  étant le nombre de porteuses,  $T_s = NT_b$  la durée du symbole et  $d_i$  étant le flot de symboles modulant la  $i^{\text{ème}}$  porteuse.

Cette technique est plus complexe que le cas DS-UWB, ce qui entraîne des circuits plus complexes et plus coûteux au niveau des transmetteurs et récepteurs. Un autre inconvénient est l'exigence d'une consommation d'énergie plus élevée. Vu la durée assez longue d'un symbole en OFDM, elle est moins sensible à la synchronisation que le cas précédent. Mais elle souffre par contre de l'effet des variations de fréquence et du bruit au niveau de la phase. Elle a une meilleure

collection de l'énergie provenant des trajets multiples, ce qui peut augmenter la portée du système, ou cela en présence d'un récepteur plus complexe et donc plus coûteux et qui demande plus d'énergie.

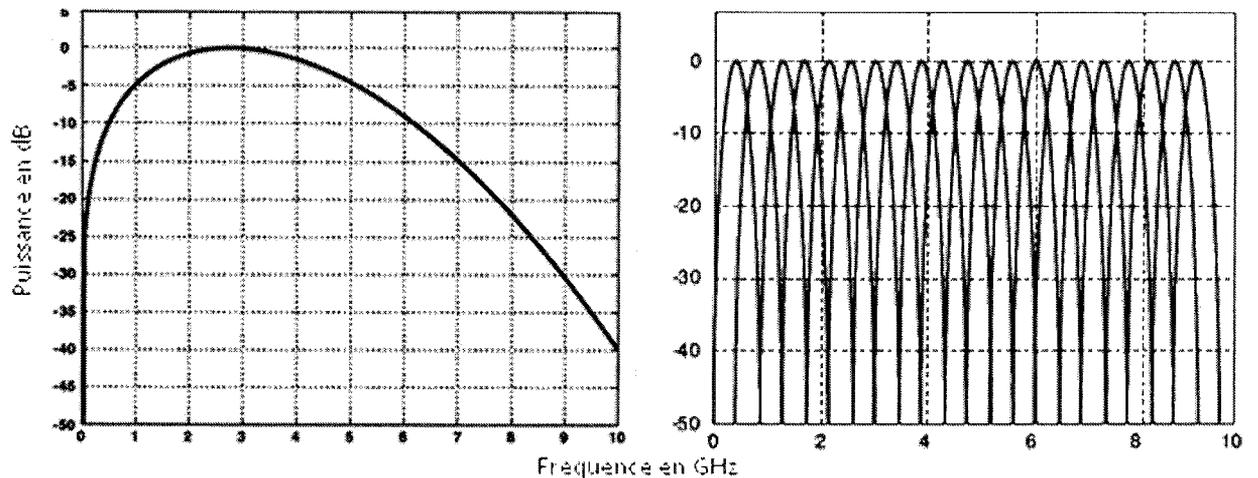


Fig.3.4 Comparaison des spectres a) un I-UWB basé sur un monocycle gaussien, b) MC-UWB basé sur OFDM.

Tableau 3.1 Comparaison entre I-UWB et MC-UWB.

	I-UWB (DS-CDMA)	MC-UWB (MB-OFDM)
Technique RF	Wavelet	Porteuse
Technique de collection d'énergie	RAKE	OFDM
Technique de diversité	Multipath	Fréquence
Nombre de sous-porteuses	-	128
Bande de fréquence	1.6 GHz-7.5GHz	528 MHz/porteuse
Gain d'étalonnage	<24/36	1, 2, 4
Technique de modulation	MBOK, BPSK/QPSK	OFDM, QPSK
Longueur de symbole	17.5 ns	312.5 ns
Technologie	SiGe	CMOS

Transmetteur	Générateur d'impulsion	DAC
Linéarité du LNA	moins	Plus
Irrégularité temporelle	Plus sensible	Moins sensible
Irrégularité fréquentielle	Moins sensible	Plus sensible
Fréquence de l'ADC	57 MSps	640 MSps

Au niveau MAC, MC-UWB requiert une coordination synchronisée pour éviter les collisions dues au saut de fréquence. Ceci augmente la complexité du système à ce niveau. MC-UWB a une meilleure performance au niveau de l'ISI, mais elle est plus sensible aux interférences ICI. Par contre, elle est moins performante au niveau de NBI. Finalement MC-UWB semble être plus conforme aux régulations globales déjà établies.

### 3.3 *UWB en localisation*

#### 3.3.1 Les raisons d'être

L'intérêt direct de la technologie UWB est sa promesse d'offrir une interface radio réellement universelle à circuits de faible coût et de petite taille [22, 72]. En étudiant la formule de capacité de Shannon :

$$C = B * \log_2 \left( 1 + \frac{E_s}{N_0} \right). \quad (3.5)$$

$B$  étant la largeur de bande, et  $E_s / N_0$  le ratio signal/bruit, on remarque que la capacité augmente d'une manière linéaire avec la largeur de bande alors qu'elle augmente d'une manière logarithmique avec la puissance. De ce fait, un système avec une grande largeur de bande mais avec une puissance plus faible que les systèmes NB (Narrow Band) classiques offre des capacités plus grandes [73]. Les avantages d'une

transmission à grande largeur de bande et faible puissance dépassent ce critère essentiel de l'UWB. Le grand éventail de fréquence couvert par un système augmente la probabilité d'un signal – ou une partie de ce signal – de traverser les canaux à comportement sélectif [25]. Le bas niveau d'énergie transmis rend les signaux UWB indétectables par les systèmes NB, et donc non-interférents. En comparant UWB avec les techniques classiques d'étalement (spreading), UWB a un meilleur comportement au niveau du rendement de l'énergie. En fait, en UWB toute l'énergie dans une impulsion constitue le signal. Donc en diminuant la durée de l'impulsion (ou en augmentant la largeur de bande), il faut augmenter la valeur maximale (de crête) de puissance pour préserver l'énergie par symbole déjà spécifié. Cependant, dans le cas SS, l'énergie présente dans le signal avant étalement et transmission constitue le signal alors que le reste sera considéré comme bruit, et dans ce cas le rapport énergie par symbole est donc indépendant de l'étalement (la longueur temporelle du signal ou impulsion), mais dépend plutôt d'une manière directe du taux d'informations comprises dans la transmission.

Un autre avantage promis par les systèmes UWB est une précision temporelle très élevée, ce qui entraîne la possibilité d'intégrer plusieurs fonctions dans un système UWB comme la localisation (à très haute précision) qui est le sujet d'intérêt de cette maîtrise. Mais aussi la très courte durée d'une impulsion UWB rend cette technologie plus immune aux problèmes des trajets multiples. En réalité, les divers trajets sont détectables et identifiables grâce à la durée assez courte de chaque transmission et donc la séparation temporelle entre différentes transmissions consécutives et entre les copies provenant d'un même signal [40].

Il faut noter aussi que la faible puissance de transmission, et donc la faible consommation d'un système UWB, le rend un bon candidat pour un fonctionnement sur pile et donc pour tout système où l'alimentation est un problème.

### 3.3.2 Les techniques de localisation supportées par UWB

La localisation dans les milieux internes est objet de deux sources d'erreurs importantes, le premier étant l'absence de ligne de vue assez fréquemment et le second étant la présence excessive des multi-trajets. Avec l'introduction de l'UWB dans le monde des communications sans fil, il semblait que cette technologie offre des solutions ou tout au moins des améliorations.

En fait, UWB a une résolution temporelle très élevée qui le rend idéal pour les systèmes de localisation. UWB s'étale aussi sur une grande bande de fréquence, ce qui offre aux basses fréquences une meilleure possibilité de surmonter les obstacles. Un autre atout d'UWB est la résolubilité des trajets multiples dans cette technologie surtout en considérant la dépendance fréquentielle des différents signaux dispersés [18]. Dans ce cas l'inconvénient des multi-trajets va devenir un avantage au niveau du recueil de l'énergie. S'ajoute à cela le fait que la puissance d'émission et la grande bande d'UWB le rend pratiquement indétectable et donc non interférent avec les systèmes déjà existants. UWB est devenu ainsi un sujet d'études extensives pour les systèmes de localisation [63].

En considérant les différentes techniques de localisation discutées dans le chapitre précédent, UWB peut servir comme medium physique de transmission pour cinq des six techniques. Le GPS est exclu du fait des grandes distances qu'UWB ne peut pas supporter. Cependant, dans la technique GPS-hybride, UWB peut exister au niveau du serveur mais en pratique une des quatre autres techniques y sera implantée [35]. Donc UWB peut exister pour l'une des techniques de localisation suivante : puissance du signal reçu, angle d'arrivée, empreinte et temps d'arrivée.

Comme mentionné précédemment, l'une des raisons pour lesquelles on propose UWB est sa capacité de résoudre les différents multi-trajets dans les régions denses. Le signal avec un trajet direct reçu (pas de déviation au niveau des angles)

peut ne pas être le signal ayant la puissance la plus élevée. Donc pour une technique de localisation basée sur l'angle d'arrivée, alors qu'on n'est pas capable d'identifier le bon angle, il sera pratiquement obsolète d'essayer une telle technique. Pour cela, UWB n'a jamais été considéré dans la littérature pour un système basé sur l'angle d'arrivée. Une autre raison de l'absence d'une telle recherche peut être dû au fait qu'UWB est supposé supporter un système à coût bas, alors que pour un système basé sur l'angle d'arrivée, il faut investir de larges sommes pour développer des réseaux d'antennes convenables.

Par contre, due à la résolution temporelle très élevée de l'UWB, les systèmes de localisation basés sur les techniques temporelles sont les plus attirants pour les chercheurs et les industriels. Lee et Scholtz [27] ont proposé un système de télémétrie pour milieu interne. Le système est basé sur le délai du signal reçu TOA. Les auteurs proposent l'utilisation de l'estimateur ML (maximum likelihood) pour minimiser l'erreur d'identification du signal venant du trajet direct. Une fois ce signal choisi, son temps d'arrivée est calculé et un algorithme de triangulation est utilisé pour estimer la position bidimensionnelle du transmetteur. Le système propose une localisation à double-sens qui s'oppose à la méthode classique où l'on utilise la localisation à sens-unique. En testant ce système et sur des distances allant jusqu'à 90 pieds, l'erreur se limitait à des valeurs inférieures à 4 pieds. D'autres investigations sur les paramètres de l'UWB dans les milieux internes pour des fins de localisation sont faites [51, 52, 54, 80]. Le système proposé se base sur la différence de temps d'arrivée TDOA. Ils utilisent IR-UWB et le signal transmis est un A-PAM-TH-IR (Antipodal PAM Tie Hoped IR). La région de test est un carré de 10x10 mètres carrés dans lequel les deux scénarios de présence et d'absence de ligne de vue ont été étudiés. L'erreur d'estimation de position variait entre 8 et 35 cm en fonction de la distance et le scénario sous investigation, avec les pires valeurs représentant le cas d'absence de ligne de vue dans des régions à haute densité (par haute densité on veut indiquer la présence de bruit assez élevé). Les auteurs de ce travail envisagent l'étude

d'un autre système basé sur DS-UWB avec un algorithme de minimisation de l'erreur.

Opshaug et Enge [35] étudient la faisabilité d'un système intégrant UWB et GPS, qui tombe dans la catégorie de systèmes hybrides. Une étude des caractéristiques du canal interne est effectuée afin de pouvoir construire un bon estimateur de la précision du système. Les résultats montrent que les obstacles ont un grand effet sur toute estimation de position, surtout dans le cas des grandes distances, mais aussi que l'arrivée du signal avec la puissance la plus élevée ne coïncide pas avec l'arrivée du premier signal, ce qui conduit à des erreurs dans l'estimation de position. Par contre, UWB offre une meilleure exactitude (accuracy) que d'autres techniques de transmission RF. Dans un autre travail basé sur TDOA, des mesures UWB ont été effectuées dans le domaine temporel permettant ainsi la suppression des trajets multiples dans le signal [52]. L'exactitude attendue du système est de l'ordre des millimètres. Toutes les mesures faites considèrent les LOS et l'étude se concentre sur l'effet des trajets multiples. Il faut noter que le système se limitait à des distances de 3 mètres.

Le travail de Zetik et al. [63] dépasse l'étude théorique et utilise des équipements de test UWB pour implémenter un système de localisation. Le système proposé est basé sur TDOA et adopte une technique d'estimation ML pour approximer la position de l'impulsion (PPM-UWB étant le RF de choix) et par suite acquérir l'information sur le délai qui va permettre la localisation. Le système utilise une fréquence maximale de 5GHz. Les tests couvrent les cas actifs et passifs pour une localisation bidimensionnelle et tridimensionnelle. L'erreur étudiée est la différence entre le délai estimé et le délai réel d'une impulsion. Une translation de cette erreur dans le domaine métrique projette des distances entre 1.5 cm dans le cas LOS jusqu'à 2.5 m dans des cas plus compliqués. Ces valeurs sont considérées comme un niveau d'erreur acceptable. Un autre prototype qui utilise TDOA propose une fois de plus

l'utilisation d'IR-UWB avec un système de multi-lecteurs et une unité centrale qui va recevoir les différentes lectures et les utiliser pour des raisons de positionnement et de contrôle [40]. Un filtre ML est utilisé pour minimiser l'erreur dans l'estimation d'une position. Dans une région de 5x6 mètres carrés, la majorité des erreurs dans les régions bien couvertes par les lecteurs ne dépassent pas les 30cm. Mais la performance du système s'empire gravement dans les régions de moindre couverture par les lecteurs. Il faut noter qu'une fois de plus la majorité des mesures sont faites dans des cas LOS.

Jourdan et al. [76] n'adoptent pas une technique spécifique pour la localisation mais étudient la précision estimée d'un système de localisation UWB qui utilise les paramètres temporels. L'étude inclut l'effet du nombre des stations centrales – transmetteurs – visibles ou non pour le récepteur, ainsi que leurs emplacements mais aussi la densité dans la région de localisation. Ils proposent le PED (Position Error Bound) comme paramètre représentant la précision possible d'un système. Un important aspect de ce travail est l'étude de l'influence de la proportion de signaux arrivant d'une BS à travers NLOS (face au nombre total de signaux reçus) sur la borne supérieure de l'erreur. Pour une distance de 20 m, le système estime que l'erreur peut varier entre 0.1 et 0.2 m dans le cas où 7/10 des balises reçues parviennent de NLOS. Une autre étude [79] analyse la relation entre l'exactitude de localisation par rapport à la largeur de bande du système, la fréquence centrale utilisée et l'écart type des erreurs d'estimation de la durée du trajet. Les auteurs concluent que la variation dans la mesure de temps d'arrivée est indépendante de la largeur de bande dans un intervalle donné. Cet intervalle de mesure est égal à la moitié de l'inverse de la fréquence centrale de l'impulsion :

$$T_{\text{intervalle}} = \frac{1}{2} \frac{1}{f_{\text{centrale}}}. \quad (3.6)$$

Cette exactitude de calcul du temps d'arrivée décline vite en dehors de l'intervalle précisé. Mais aussi en dehors de cet intervalle, l'exactitude dépend considérablement de la largeur de bande adoptée. Par la suite, l'exactitude spatiale a été reliée à l'exactitude temporelle suivant la formule simplifiée :

$$\sigma_R \geq 2.5 * c * \sigma_T, \quad (3.7)$$

$\sigma_R, \sigma_T$  étant les écart-types spatial et temporel, respectivement, et  $c$  la vitesse de la lumière. Les résultats reflètent des erreurs de quelques centimètres<sup>2</sup> pour une localisation unidimensionnelle allant jusqu'à 20 mètres. Mais aussi le résultat indique une meilleure précision pour une plus grande largeur de bande surtout si le calcul se fait en dehors de l'intervalle défini avant.

D'après cette brève discussion des systèmes de localisation basés sur UWB, il est clair qu'il n'y a pas eu un travail sérieux concernant la technologie RSS et la technologie d'empreinte dans la littérature. La technique RSS est l'une des plus simples, mais aussi celle qui demande les moindres investissements et changements dans les infrastructures. Elle ne demande pas de synchronisation ou d'ajout ou de traitement de codes ou de tags supplémentaires. Par contre, dans les travaux effectués sur les systèmes à bande étroite ou large, la technique RSS avait une moindre performance que celle des techniques basées sur l'information temporelle. Également RSS ne semble pas exploiter les avantages de la technologie UWB. Par contre dans une analyse du canal UWB pour des raisons de localisation [75], les auteurs étudient l'erreur probable dans un système de localisation basé sur la puissance du signal.

Finalement, à notre connaissance, la localisation par étude d'empreinte n'a pas été étudiée dans la littérature. Mais, il y a eu un travail ou deux qui ont cherché à étudier le comportement du canal UWB et utiliser ce comportement dans

---

<sup>2</sup> Les résultats sont des mesures temporelles qui sont projetées dans le domaine spatial pour une estimation de l'erreur.

l'amélioration d'algorithme de localisation par zone (le système définit une zone de présence et non pas une position). L'objectif de notre travail est l'étude de la faisabilité et la performance d'un système de localisation par empreinte et utilisant UWB comme RF. Le scénario de localisation par empreintes digitales semble être un bon candidat dans le cas des mines. La technique de localisation par empreinte est supposée surmonter les sources d'erreurs dans TDOA et RSS qui sont dues en premier lieu à l'absence de lignes de vue. Le chapitre suivant discute de tout cela.

## **CHAPITRE 4**

### **Système de localisation**

Suite aux études faites au niveau des différentes techniques de localisation surtout dans les milieux internes et confinés, et en relation avec des travaux effectués préalablement au LRCS, notre choix de méthode de localisation est la localisation par empreintes. Ce chapitre discute les différentes parties du système proposé, incluant aussi quelques propositions non accomplies.

#### ***4.1 Justification du choix du système***

##### **4.1.1 L'inefficacité des autres techniques**

Le milieu minier sous terrain est un milieu non-conventionnel. Il se distingue beaucoup des milieux externes, mais aussi de la plupart des milieux internes. Une mine est une série de galeries de dimensions différentes. Les parois sont rugueuses avec des ondulations de surface dépassant les quelques centimètres. La visibilité directe entre un transmetteur et un récepteur est rarement possible. C'est un environnement de travail difficile et la difficulté majeure vient du fait que c'est un endroit défavorisant la plupart des systèmes de localisation, d'où l'importance de l'étude.

En fait dans les milieux miniers, les 2 causes d'erreurs les plus graves pour un système de localisation sont les trajets multiples et l'absence de lignes de vue. Ces deux phénomènes combinés entraînent des erreurs dans l'estimation de tous les

paramètres utilisés par les systèmes de localisation : les angles d'arrivée, le temps de propagation, et la puissance reçue. À cause du phénomène de trajets multiples, l'angle d'arrivée ne présente plus l'angle de transmission, surtout que le plus souvent il y a manque d'une ligne de vue et par conséquent de trajet direct. Cela rend les estimations basées sur l'angle d'arrivée erronées. Pour les algorithmes basés sur la puissance du signal reçu, il est sous-entendu dans ces systèmes que la valeur de la puissance utilisée représente celle du signal provenant du chemin direct le plus court. Là encore, cette supposition est fautive puisqu'une ligne de vue manque souvent. Mais aussi les interférences constructives et destructives des différentes copies du même signal rendent la valeur de la puissance non représentative des pertes dues à la propagation dans l'espace. De plus les pertes en puissance diminuent à cause de l'absorption d'énergie qui a lieu chaque fois que le signal heurte une surface. Comme effet direct de tout cela, d'habitude les distances (positions) estimées sont plus grandes que les distances (positions) réelles et donc la précision du système diminue. Les systèmes fondés sur les informations temporelles font face aux mêmes problèmes : ils calculent les délais à partir du premier signal reçu et ils considèrent le signal avec la plus grande puissance comme étant le premier signal reçu. Mais comme déjà discuté auparavant, la puissance du signal est sujette à plusieurs effets qui rendent sa valeur non fiable, et dans ce cas les erreurs sont grandes. D'autres systèmes voient le premier signal reçu avec une puissance qui dépasse un seuil donné comme référence pour estimer les délais. Ils considèrent que le signal avec le chemin le plus court est celui qui indique la ligne de vue, même avec une puissance inférieure à d'autres signaux reçus. Une fois de plus les trajets multiples ainsi que l'absence de ligne de vue rendent ces systèmes sujets à de larges erreurs surtout dans le cas de transmission NB.

D'après ce qui précède, ainsi que les informations incluses dans le premier chapitre, il devient clair que dans un environnement aussi hostile que la mine, la radiolocalisation basée sur la modélisation mathématique de la transmission et du

canal est inefficace. Dans tous ces cas, les variations dans les valeurs des paramètres ne reflètent plus de manière exacte le changement en distance de séparation. Il faut dès lors combiner les effets des différents phénomènes afin d'ajuster les modèles. Par suite tout système de localisation doit considérer les moyens pour surmonter ou contourner ces problèmes.

#### **4.1.2 La localisation par signature**

Un système de localisation basé sur les signatures semble être le bon candidat pour notre scénario. Cette technique de localisation est orientée côté environnement. Plus clairement, tous les paramètres de cette technique sont réglables de manière à mieux représenter un environnement ou une surface donnée. Le choix des composants de l'empreinte, ainsi que le choix de l'algorithme d'association de jumelage influencent énormément le comportement final du système. En tenant compte des 2 phénomènes que le système doit surmonter, le choix de la réponse impulsionnelle comme base génératrice de notre empreinte devient évident. En fait si on considère une empreinte basée seulement sur les puissances des signaux – l'empreinte la plus utilisée traditionnellement – elle ne peut donner la précision demandée. D'autre part, avec une empreinte basée sur des informations temporelles le système sera sujet aux mêmes inconvénients que les systèmes de latération classiques. Par contre, la réponse impulsionnelle d'un canal lui est propre surtout que les galeries d'une mine présentent des architectures différentes (puisque les surfaces ne sont pas contrôlables).

Puisque l'analyse de la réponse impulsionnelle d'un canal se caractérise par l'étude de plusieurs paramètres qui définissent les variations dans l'énergie ainsi que les délais qui y sont associés, une empreinte pourra être formée à partir d'une ou plusieurs de ces paramètres. Mais une bonne empreinte doit avoir deux propriétés

essentielles : elle doit être reproductible et unique. Reproductible pour permettre au système de ré-identifier la même empreinte qui normalement se reproduit dans la même position mais à un autre moment. Unique pour que chaque empreinte puisse identifier un endroit et un seul. En réalité, si le canal est considéré comme stationnaire, la réponse impulsionnelle est une fonction fixe, donc une empreinte basée sur cette réponse impulsionnelle est supposée avoir la même valeur. Elle est donc reproductible à tout moment. Puisque dans les signaux UWB la durée d'un signal est de l'ordre de nanosecondes, le canal peut être considéré comme stationnaire. Comme le profil du canal varie avec la distance, des mesures prises dans différentes positions sur un même canal sont rarement identiques, et en conséquence on pourra synthétiser une empreinte qui aura une valeur unique à chaque position. Donc on a partiellement introduit un autre composant de notre système.

## ***4.2 La signature proposée***

### **4.2.1 UWB comme medium physique**

D'après la description du premier chapitre, la radiolocalisation par empreinte se divise en deux étapes, la première étant la construction de la base de données et la seconde étant la localisation par corrélation avec cette base déjà construite. Afin de finaliser la première étape il faut choisir une signature, et tel que déjà mentionné cette signature sera synthétisée à partir du profil du canal. Mais différentes méthodes de transmission sans fil présentent différents profils et différents comportements sur le même canal. Donc il faut introduire la technologie sans fil de choix pour le système : l'UWB (Ultra Wide Band) mieux connu sous son acronyme anglais UWB (Ultra Wide Band). Ce choix est justifié par plusieurs critères qui sont nécessaires pour une meilleure performance ainsi que pour d'autres considérations pratiques pour le système.

UWB offre une très grande largeur de bande. Donc elle est capable de supporter différents systèmes et différentes techniques quel que soit leur exigence au niveau du débit. Cela fait de UWB le candidat idéal pour tous les nouveaux systèmes, de radiolocalisation entre autres. Et par conséquent il sera concevable d'avoir des systèmes à tâches multiples dont la radiolocalisation. D'autre part, UWB est caractérisé par une faible consommation d'énergie et donc les systèmes peuvent être à batterie et avoir une longue durée de vie. Dans un environnement dangereux comme les mines où un incendie se révèle beaucoup plus dangereux qu'à la surface, minimiser les causes de risques est un bon exercice. De ce fait réduire le besoin d'installer des câbles électriques et des transformateurs partout dans les galeries s'affirme avantageux. Un autre point fort de la technologie UWB est l'utilisation de DS-UWB déjà discutée dans le chapitre 2. Cette technique permet d'avoir des transmetteurs/récepteurs plus simples à un prix moins élevé; cela étant une considération pratique très importante pour le déploiement d'un système [29]. Les standards d'émission et de largeur de bande établis par la FCC rendent un signal UWB similaire au bruit pour la plupart des récepteurs classiques, permettant ainsi la coexistence de l'UWB avec d'autres systèmes dans un même milieu sans interférence [33]. Mais aussi cette ressemblance au bruit rend les communications UWB plus robustes et plus sécuritaires vis-à-vis des tentatives de piratage. Toutes ces raisons et beaucoup d'autres justifient l'implantation de nouveaux systèmes avec la transmission radiofréquence UWB. Ces caractères entrent alors dans nos considérations pour un système fondé sur UWB, mais notre choix repose primordialement sur les caractéristiques de propagation d'une transmission UWB [10].

En utilisant la transmission DS-UWB, les impulsions sont d'une durée de 1ns ou moins. Cela donne à l'UWB une résolution temporelle élevée et permet au récepteur de différencier deux transmissions consécutives alors que cela n'est pas le cas dans des transmissions NB. Cette courte durée de transmission mais aussi le

cycle<sup>3</sup> court de transmission donnent au récepteur une meilleure résolution pour capter les trajets multiples. Contrairement au cas d'une transmission CW ou sinusoïdale, dans IR-UWB les trajets réfléchissants d'une surface proche du chemin TX/RX ne dépassent pas un délai équivalent à la durée minimale du signal. Avec des périodes de transmission de très courte durée, le transmetteur aurait un temps suffisant pour pouvoir identifier les copies multiples d'un même signal, surtout que la courte durée de ce signal permet d'éviter la fusion d'un trajet avec un autre. Dans un canal, il y a généralement jusqu'à  $N_r = WT_d$  trajets identifiables pour un délai maximal de  $T_d$  et une largeur de bande  $W$ , mais il suffit de choisir un nombre  $L$  pour reconstituer approximativement un signal avec une énergie maximale (permettant une performance comparable dans le cas où tous les trajets sont reçus) [78].

Les transmissions à très grande largeur de bande ont l'avantage de réduire les évanouissements à petite échelle (small scale fading) du canal [14, 29]. En outre une transmission UWB améliore la fiabilité du système; puisque différentes composantes fréquentielles réagissent différemment en se propageant dans un milieu à comportement sélectif vis à vis de la fréquence [77] en présence d'obstacles. Plus la largeur de bande est grande, plus il y a de probabilité qu'une partie du signal (une composante fréquentielle) provienne jusqu'à la destination. De plus, généralement une grande largeur de bande offre en absolu une meilleure exactitude dans les systèmes d'estimation de portée (ranging) [38].

Un avantage additionnel de l'UWB, que nous avons pris en compte dans notre choix, est son efficacité énergétique : grâce à sa capacité de résoudre les trajets multiples d'un signal, UWB multiplie l'énergie des différentes composantes détectées, améliorant ainsi l'efficacité énergétique du signal. Des travaux effectués

---

<sup>3</sup> Par cycle on veut dire le rapport temporel entre le temps réservé pour une transmission et la vraie portion de ce temps utilisée pour transmettre une impulsion.

dans ce sens par Miller [78] rapportent une moyenne de perte de propagation proportionnelle à  $1/d^{1.7}$  en comparaison au cas classique de  $1/d^2$  à  $1/d^4$ .

#### 4.2.2 L'empreinte utilisée

Après le choix du système de localisation et du meilleur medium RF à utiliser, l'étape suivante est l'identification de l'empreinte qui donnera la meilleure représentation de l'environnement de telle sorte à permettre une précision élevée. En réalité, le bon fonctionnement du système de localisation choisi dépend fondamentalement de l'empreinte ainsi que de l'algorithme de jumelage, et la performance de ce dernier ne peut améliorer le système que dans la condition où la signature est identificatoire de l'endroit.

Alors que la puissance du signal reçu est l'empreinte la plus adoptée normalement dans les systèmes de localisation basés sur la signature [36, 37, 39, 41, 42, 45, 47], dans nos discussions précédentes concernant le comportement du signal dans le milieu souterrain, il est clair que RSS ne présente pas la meilleure solution dans notre cas. De plus une signature RSS demande au moins la réception de signaux provenant de trois transmetteurs différents, alors qu'une telle couverture excessive ne présente pas un scénario économiquement viable pour les mines. De même, les signatures basées sur les informations temporelles font face à plusieurs causes de mauvaise précision, des erreurs dues à l'absence de point de vue, à la détection erronée du premier chemin. L'empreinte basée sur l'angle d'arrivée offre le pire fonctionnement dans un environnement multi-trajets. Reste à considérer les signatures basées sur les fonctions de transfert du canal.

La fonction de transfert d'un canal est une fonction identificatrice de celui-ci. Dans les milieux internes ou externes, il est impossible que plusieurs endroits aient exactement le même effet sur un signal se propageant sauf si ces endroits sont

complètement identiques [6, 13, 17]. A partir de là, les différentes techniques de caractérisation de canal utilisent des représentations paramétriques d'un canal de telle sorte qu'une variation de la valeur d'un paramètre ou d'un autre permet d'avoir un modèle complet du comportement du signal dans ce canal [10]. Cela est d'autant plus vrai dans l'environnement minier confiné et rugueux, puisque la forme d'une galerie est le résultat d'un processus aléatoire<sup>4</sup>, et donc la réponse impulsionnelle d'un canal est unique et représentative de ce canal. Plusieurs travaux comme dans [6, 7, 13, 17, 23, 24, 26, 30] étudient des canaux dans des environnements diverses et rapportent les fonctions de transfert des canaux qui témoignent de la différence entre un canal et un autre surtout dans les milieux confinés et à haute densité. Basé sur tout ce qui précède, la réponse impulsionnelle du canal a été choisie comme génératrice (source) de l'empreinte de localisation. Cette fonction, en plus de sa relation identificatrice avec le milieu de propagation, lui donne la propriété de reproductibilité. Il suffit de prendre une valeur moyenne sur plusieurs mesures dans un même endroit (canal considéré stationnaire) pour que la même procédure aboutisse au même résultat même un autre moment. Cela est aussi essentiel pour permettre le bon fonctionnement du système de jumelage.

Puisqu'une réponse impulsionnelle se caractérise par plusieurs paramètres représentants des mesures et des statistiques au niveau des délais aussi bien qu'au niveau des puissances; plusieurs de ces paramètres sont choisis comme constituants de la signature. Pour ces fins, considérons un signal UWB arrivant au récepteur :

$$r(t) = \sum_{n=1}^{N(t)} a_n(t) p(t - \tau_n(t)) + n(t). \quad (4.1)$$

---

<sup>4</sup> Bien que les mineurs puissent décider de la direction, la profondeur et la largeur d'une galerie, tous ces trois critères dépendent de la présence des minerais. Mais même si les critères cités auparavant sont contrôlés, il n'y a aucun contrôle sur la rugosité des surfaces et sur leurs irrégularités, ce qui rend chaque galerie unique.

C'est la sommation<sup>5</sup> des composants parvenant de trajets différents (trajets multiples), où  $a_n(t)$  désigne le gain par trajet,  $\tau_n(t)$  le délai introduit par le canal pour chaque trajet,  $N(t)$  le nombre total de trajets considérés par le récepteur pour une mesure donnée, et finalement  $n(t)$  le bruit AWGN. Ces trois paramètres sont généralement des fonctions du temps à cause du changement temporel du canal et alors elles varient d'une manière qui rend l'analyse plus compliquée. Mais en supposant que ce changement temporel du canal est très lent par rapport à la fréquence de répétition des transmissions UWB, le canal sera considéré comme stationnaire et ces mêmes paramètres seront indépendants du temps [2]. Alors le signal sera :

$$r(t) = \sum_{n=1}^N a_n p_n(t - \tau_n) + n(t). \quad (4.2)$$

La sommation considère alors un nombre fixe de trajets. L'indice  $n$  fait référence aux différents trajets provenant d'un signal transmis unique, et cela pour le gain aussi bien que pour le délai. Puisque la fonction recherchée est la réponse impulsionnelle du canal, utilisons la convolution pour avoir le signal de la forme :

$$r(t) = s(t) * h(t) + n(t). \quad (4.3)$$

Dans cette représentation,  $s(t)$  est le signal originalement transmis alors que  $h(t)$  est la réponse impulsionnelle recherchée. Elle peut être définie comme suit :

$$h(t) = \sum_{n=1}^N a_n \delta_n(t - \tau_n), \quad (4.4)$$

où  $n$  représente toujours les différents trajets observés par le récepteur et  $\delta(t)$  la fonction de Dirac. En partant de cette forme, l'étude du profil de puissance et de

---

<sup>5</sup> Cette sommation se passe au niveau d'un seul signal et non pas sur plusieurs signaux consécutifs.

délais PDP (Power Delay Profile) donne les paramètres-empreintes recherchés. Des travaux comme dans [21] notent clairement l'influence de l'architecture de l'environnement sur le profil PDP, et cela est bien la base de ce travail. Comme déjà précisé, plusieurs paramètres sont utilisés pour construire le profil de comportement du signal comme le délai moyen (excess delay), l'étalement du délai (RMSDS), l'étalement maximal du délai, le gain total des trajets multiples et plusieurs autres. Dans une première étape, l'empreinte construite consistait en un groupe de trois paramètres par signature par position (de mesure).

Le gain total des trajets multiples est défini comme étant la puissance reçue au niveau du récepteur provenant de différents trajets ayant une puissance au dessus d'un seuil spécifié. Dans le domaine temporel, le gain est :

$$G = \sum_{n=1}^N |a_n|^2, \quad (4.5)$$

où  $n$  désigne toujours le nombre total des trajets considérés et  $a_n$  le gain par trajet. Le gain total est l'un des composants principaux du profil de la réponse impulsionnelle du canal. La valeur du gain est directement liée à la distance traversée par le signal. Bien que dans les mines cette relation n'est pas aussi stable que dans les milieux moins rugueux, elle reste considérablement présente. La formule ci-dessus indique explicitement l'association entre le gain et le phénomène de multi-trajets et par la suite la dépendance de ce paramètre sur l'architecture de l'environnement en considération. En théorie, le gain total diminue avec la distance à cause de 2 phénomènes reliés : la puissance provenant d'un trajet donné diminue avec la longueur du trajet. C'est le phénomène classique de perte en électromagnétique. Mais aussi avec la distance qui augmente et les niveaux de puissance qui faiblissent pour chaque trajet, le nombre total de trajets avec une puissance dépassant le seuil de bruit est réduit. Il y a donc moins de trajets et par la suite moins de composantes de puissance à ajouter. Il faut ajouter aussi le fait que le seuil du bruit influence cette

valeur, surtout que le système de mesure utilisé n'offre aucun moyen de récupération du signal noyé dans le bruit comme discuté dans [28].

Le gain total représente l'un des avantages de la technologie UWB puisqu'il bénéficie des composants provenant des trajets multiples pour augmenter la puissance du signal reçu. Et en même temps, c'est un paramètre influencé par l'architecture du milieu. De plus, avec l'adoption de la localisation par signature, les inconvénients liés à la mauvaise détection de la composante avec la puissance la plus élevée ou à la première composante (direct first path) du signal reçu sont éliminés. Ni l'une ni l'autre ne jouent un rôle dans la localisation et n'offrent aucune information qui sera utilisée par le système. De même, des problèmes de synchronisation qui affectent spécialement la localisation sont écartés puisque les indications temporelles normalement utilisées pour estimer la partie analysable du signal ne sont plus observées afin de pouvoir estimer nos paramètres.

Un autre paramètre important du PDP est le retard moyen. Défini comme le premier moment du PDP, il estime le délai entre la première et la dernière composante atteignant le récepteur avec une puissance plus grande que le seuil adopté. Le retard moyen (excess delay) est extensivement étudié dans la littérature de UWB ainsi que sa dépendance sur la fréquence, la puissance, la distance, l'environnement etc. :

$$\tau = \frac{\sum_{n=1}^N |a_n|^2 \tau_n}{\sum_{n=1}^N |a_n|^2}. \quad (4.6)$$

Le comportement de ce paramètre est également étroitement lié au phénomène des trajets multiples, ainsi qu'à la perte d'énergie due en premier à la

distance<sup>6</sup> [31, 50, 59]. Le délai moyen<sup>7</sup> est fortement influencé par le type d'antennes utilisées à la transmission/réception, avec des valeurs plus petites pour les antennes directives. Ordinairement plus les antennes sont directives, moins il y a de trajets qui arrivent en retard par rapport au premier reçu et il est donc normal d'avoir des délais relatifs plus petits. Les valeurs de ces paramètres sont fortement influencées par l'architecture du lieu de propagation ainsi que par la présence et l'absence de ligne de vue entre le transmetteur et le récepteur, avec le cas NLOS ayant des valeurs plus grandes.

Bien que le délai moyen soit un paramètre temporel, les problèmes rencontrés par les TAO ou TDOA n'influencent pas le délai moyen comme partie de la signature. Les valeurs de ce paramètre sont indépendantes des problèmes tels que l'identification du composant (du signal reçu) avec le plus d'énergie comme le premier trajet, ou les problèmes liés à la bonne synchronisation de ce premier trajet, et d'autres.

Donc basée sur les deux paramètres qui sont le gain total et le retard moyen, la signature est formée. Cette empreinte est théoriquement étroitement liée à l'architecture du milieu puisque les deux composantes y sont déjà liées. Mais aussi cette empreinte est liée à la puissance du signal reçu d'une manière à bénéficier des avantages que l'UWB offre au niveau des trajets multiples sans avoir les inconvénients introduits par les relations étroites liant cette puissance à la distance avec toutes leurs irrégularités. De plus l'empreinte contient une information temporelle reliée à l'architecture et à la forme du signal reçu permettant donc un fonctionnement sans exiger une synchronisation compliquée.

---

<sup>6</sup> La distance étant toujours notre premier intérêt dans la localisation.

<sup>7</sup> Les deux termes, retard moyen et délai moyen, sont utilisés d'une manière interchangeable.

Une troisième et dernière composante de l’empreinte qui a été étudiée dans ce travail est l’étalement efficace du délai RMSDS (Root Mean Square Delay Spread), un autre paramètre du PDP qui indique la dispersion temporelle du signal reçu. En effet RMSDS indique la durée effective de la réponse impulsionnelle du canal [2].

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N |a_n|^2 \tau_n^2}{\sum_{n=1}^N |a_n|^2} - \left( \frac{\sum_{n=1}^N |a_n|^2 \tau_n}{\sum_{n=1}^N |a_n|^2} \right)^2} \quad (4.7)$$

Statistiquement parlant, RMSDS est la racine carré du second moment du profile PDP d’un signal. Ce paramètre est extensivement étudié surtout qu’il est utilisé pour évaluer la présence d’ISI (Inter-Symbol Interference). D’après la littérature, RMSDS dépend fortement des caractéristiques de l’environnement de mesure. En effet, le nombre de différents trajets ainsi que le niveau de puissance de ces trajets influencent largement la valeur de ce paramètre. Normalement les valeurs RMSDS dans des cas NLOS sont plus grandes que celles de LOS [3, 11, 12, 19], mais cela n’est pas toujours le cas. Dans [14], ce n’en est pas le cas puisque les résultats reflètent des valeurs plus petites dans le scénario NLOS. Les auteurs attribuent cela aux effets de l’environnement et les caractéristiques de propagation dans ce dernier.

RMSDS fut choisi comme partie de l’empreinte parce qu’il est un composant important du profil PDP. Ses valeurs sont liées à l’environnement et il représente un comportement différent des deux autres de sorte qu’en incluant les trois, une signature augmente sa probabilité d’être unique. Après les études réalisées dans la partie pratique, ce composant fut éliminé de la forme finale de l’empreinte. Une discussion plus détaillée sera présentée avec des résultats plus loin dans ce document.

Finalement, il faut préciser que le seuil<sup>8</sup> choisit est de 10dB par rapport à la valeur maximal. Ce choix respecte les dernières modifications de la FCC, mais il est aussi influencé par la puissance du signal reçu surtout pour les longues distances<sup>9</sup>.

### ***4.3 L'algorithme de jumelage***

#### **4.3.1 Pourquoi les réseaux de neurones**

Le jumelage représente la partie la plus importante du système puisque c'est à ce niveau que la localisation prend place. C'est cet algorithme qui va permettre de bien interpréter les signatures de sorte à minimiser ou maximiser les erreurs dans les coordonnées estimées.

Il y a plusieurs algorithmes de jumelage ayant chacun ses points forts et faibles. L'algorithme le plus simple étant celui de la position la plus proche. Il calcule la distance euclidienne entre l'empreinte à localiser et les valeurs sauvegardées dans la base de données, afin de trouver une ou plusieurs signatures avec les distances les plus proches. Dans le cas où l'algorithme retourne une seule valeur, la position estimée sera celle correspondante à cette signature. Dans une autre méthode, l'algorithme retourne les signatures les plus proches et la position estimée sera une fonction pondérée des positions correspondantes à ces empreintes. Dans le premier cas, l'erreur maximale doit théoriquement se limiter à la moitié de la distance séparant deux signatures sauvegardées. Mais pratiquement et dû aux erreurs dans l'évaluation de l'empreinte elle-même, l'erreur dépasse cette valeur. La fonction pondérée a une meilleure performance, mais elle présente un autre inconvénient

---

<sup>8</sup> Comme déjà indiqué ce paramètre influence directement les trois composantes IR de la signature.

<sup>9</sup> Voir la partie concernant l'analyse des campagnes de mesures.

(commun avec le premier cas), puisque les bases de données doivent être suffisamment grandes surtout qu'une recherche complète de cette base doit être performante afin de localiser un objet. Un inconvénient additionnel sera la mise à jour de cette base et sa maintenance. Donc cela demande une grande capacité énergétique (consommation d'énergie) ainsi que calculatoire (le processeur), ce qui représente un grand inconvénient surtout que la précision du système n'est pas tellement améliorée par cet effort.

Par contre les algorithmes basés sur l'interpolation des informations nécessitent une base de données plus petite, ce qui se reflète sur plusieurs aspects du système, comme par exemple une campagne de mesures moins compliquée, moins d'efforts pour la maintenance des bases de données, un déploiement plus facile du système et autres. Dans cette catégorie d'algorithme, il y a plusieurs sous-catégories, comme l'utilisation des méthodes de la probabilité conditionnelle ou l'utilisation des réseaux de neurones. Bien qu'il soit rapporté que les performances de ces différents algorithmes soient assez semblables [49], les réseaux de neurones ont été choisis dans ce travail la discussion suivante explique ce choix.

Un réseau de neurones peut être présenté de deux manières différentes. Par définition un réseau de neurones est une structure mathématique capable d'approximer une fonction. Afin de réaliser cette tâche, le réseau doit être entraîné dans une première étape utilisant deux ensembles d'éléments : le premier consiste en des éléments entrées possibles avec des valeurs couvrant toute l'espace des entrées, le second comprenant les sorties correspondantes. Une fois l'entraînement accompli, le système est théoriquement capable dans une seconde étape d'interpoler sur toute entrée<sup>10</sup> provenant de l'espace d'entrée. En comparaison avec la localisation par signature, la première étape consistera en la construction de la base des empreintes ce qui se rend à l'entraînement du réseau avec les mesures collectées. Ensuite la seconde

---

<sup>10</sup> Que cette entrée soit vue auparavant par le système ou non

phase comprendra la localisation par simple mise du réseau en fonctionnement. Par la suite, il est possible de supposer que le réseau joue le rôle d'un corrélateur entre les vecteurs entrées et les vecteurs sorties ou comme faisant l'approximation des fonctions reliant les entrées et les sorties. En réalité les différents composants de la signature présentent un comportement lié à la distance. Cette relation a été mentionnée dans la discussion théorique de l'empreinte ci-dessus et elle sera démontrée plus tard dans la discussion des résultats. Il faut noter dans ce cas que le comportement n'est peut être pas bien reproduit par les différents modèles du canal et c'est la première cause d'erreur dans la localisation (TOA, TDOA) [34, 38]. Par contre, dans le cas des empreintes, l'intérêt se concentre sur le comportement du canal mesuré d'une manière directe et qui sera alors propre à ce canal et représentant une fonction reliant directement les paramètres à la distance. En conséquence, le système exploite le bon comportement de l'UWB dans les milieux internes et profite des réseaux de neurones pour dessiner ce comportement d'une manière unique à chaque endroit.

L'utilisation des réseaux de neurones avec les empreintes déjà spécifiées entraîne l'allègement de l'infrastructure requise pour le fonctionnement du système, puisqu'il n'y a pas besoin de latération. Mais aussi l'empreinte se forme du comportement d'un seul signal, et les réseaux de neurones ne demandent pas d'autres composantes. De plus, puisque les réseaux de neurones sont capables d'interpoler les données exploitées durant l'entraînement, cela fait que la campagne de mesures nécessaire pour calibrer le système est moins exigeante que dans le cas d'autres algorithmes de jumelage. Mais aussi cette interpolation offre un grand avantage, puisque dans le cas de localisation par empreinte la localisation se fait au point le plus proche déjà existant dans les bases de données, alors que pour les RN l'interpolation offre une estimation de position plus précise : les RN ne cherchent pas le point le plus proche mais cherchent plutôt la valeur qui respecte le « pattern » appris. Additionnellement les RN sont robustes une fois correctement entraînés et déployés

[62]. Un autre point intéressant concerne la synchronisation dans le système, puisque la construction de l’empreinte en elle-même ne place pas des contraintes à ce niveau et les réseaux de neurones travaillent en ayant recours aux empreintes uniquement (ne demandent pas d’autres contraintes). L’utilisation d’un système transmetteur sans synchronisation ou à synchronisation minimale est acceptable.

Avec plusieurs entrées en parallèle, le réseau de neurones peut être vu comme un algorithme combinant plusieurs méthodes de localisation. En fait la signature comprend une composante liée au temps, ainsi qu’une autre liée à la puissance et toute variation dans l’une ou l’autre de ces composantes entraîne une variation dans la sortie des réseaux. Donc le réseau ne se contente pas de représenter les relations entrées/sorties chacune à part, il combine plutôt ces relations de manière à les rendre mutuellement influencées. Par la suite un algorithme de jumelage utilisant les réseaux de neurones peut être considéré comme un système de localisation hybride combinant des informations temporelles et énergétiques (puissance).

Un dernier avantage des RN est leur réponse en temps réel qui dépasse de loin les meilleurs systèmes de recherche. L’entraînement d’un réseau est la tâche qui consomme le plus de temps, mais une fois le réseau entraîné, sa performance est quasi-instantanée. Puisque l’entraînement se fait dans la phase passive avant le déploiement du système, cela ne présente aucun inconvénient. Par contre une fois le système déployé, les autres algorithmes demandent du temps pour traiter les données et en sortir avec un résultat, et là les RN sont avantagées.

### **4.3.2 Le type de réseau de neurones**

Bien que dans le paragraphe précédent on a introduit les réseaux de neurones comme une structure mathématique capable d’approximer une fonction, en réalité

cette définition est applicable à deux sous-catégories de réseaux de neurones seulement, nominalement RBF (Radial Basis Function) et MLP (Multi Layer Perceptron). Les autres catégories ne sont pas capables d'approximer une fonction, mais elles ont d'autres fonctions. Pour l'une ou l'autre de ces catégories, il est impératif d'avoir une bonne architecture pour le réseau choisi ainsi qu'un bon algorithme d'apprentissage [58, 64].

Les réseaux MLP sont les plus adoptés des différentes catégories, ils constituent environ 80% des réseaux utilisés dans tous les domaines. C'est un réseau sans rétro-propagation dans lequel la circulation de l'information se fait dans un seul sens de l'entrée vers la sortie. Avec un apprentissage supervisé, un réseau MLP est capable de faire une régression non linéaire à travers laquelle il performe les fonctions d'approximation et de prédiction avec la contrainte que toute entrée doit appartenir à l'espace vectoriel identifié durant la phase de l'apprentissage. Le nom même du MLP vient du fait que ce réseau peut avoir plusieurs couches cachées. Plus il y a de couches, plus l'architecture du réseau devient complexe, ce qui promet une meilleure capacité d'approximation ou de prédiction de la fonction d'intérêt. Les études effectuées à ce niveau [14] indiquent qu'il suffit normalement d'avoir un réseau avec deux couches cachées pour pouvoir pratiquement approximer la fonction la plus complexe. Alors un réseau avec deux couches cachées a été utilisé dans ce travail. Mais un autre aspect de l'architecture à régler est le nombre d'éléments (neurones) par couche. Ce nombre est prédéterminé de la couche d'entrée et celle de la sortie. Par contre, une méthode directe consiste à mettre sur la première couche cachée un nombre  $2q + 1$  neurones,  $q$  étant le nombre de neurones en entrées. Dans le cas où  $q$  est trop petit, on essaie d'augmenter un peu le nombre de neurones. Enfin la performance finale du réseau peut dépendre de plusieurs facteurs et le meilleur moyen de calibrer un réseau est de l'entraîner et de le tester. Surtout comme dans notre cas où la phase finale du système consiste en un déploiement d'un RN déjà entraîné et ne touche pas alors à l'étude de la théorie d'optimisation utilisée pour

analyser l'algorithme d'apprentissage en lui-même. Dans le chapitre de l'analyse des résultats il y aura une petite description des architectures finales correspondantes aux résultats dans chaque cas.

La seconde sous-catégorie utilisée est la RBF. Elle a une architecture semblable au MLP, sauf que le nombre de couches cachées est toujours limité à une seule. Une autre différence avec MLP est que les fonctions d'activation des éléments sont prédéfinies contrairement au cas MLP où on a le choix de changer ces fonctions. Donc l'architecture des RBF est plutôt complètement identifiée par l'entrée et la sortie et notre seule manipulation sur ces réseaux est leur apprentissage. Ils sont alors plus faciles à entraîner et demandent moins de temps pour finir l'apprentissage, mais aussi leurs algorithmes d'apprentissage sont plus simples. D'autre part, les réseaux RBF sont connus pour leur bonne capacité de se rappeler des valeurs apprises. Par contre ils sont moins performants dans la généralisation sur des données non-apprises. Un paramètre 'd'influence' concernant la zone d'influence de chaque élément du réseau doit être réglé de sorte à trouver le meilleur compromis entre apprentissage et généralisation. Le seul moyen de trouver une bonne valeur de ce paramètre est empirique (essais et erreurs), donc il faut faire plusieurs apprentissages avec différentes valeurs et ainsi calibrer le paramètre d'influence représentant la meilleure performance.

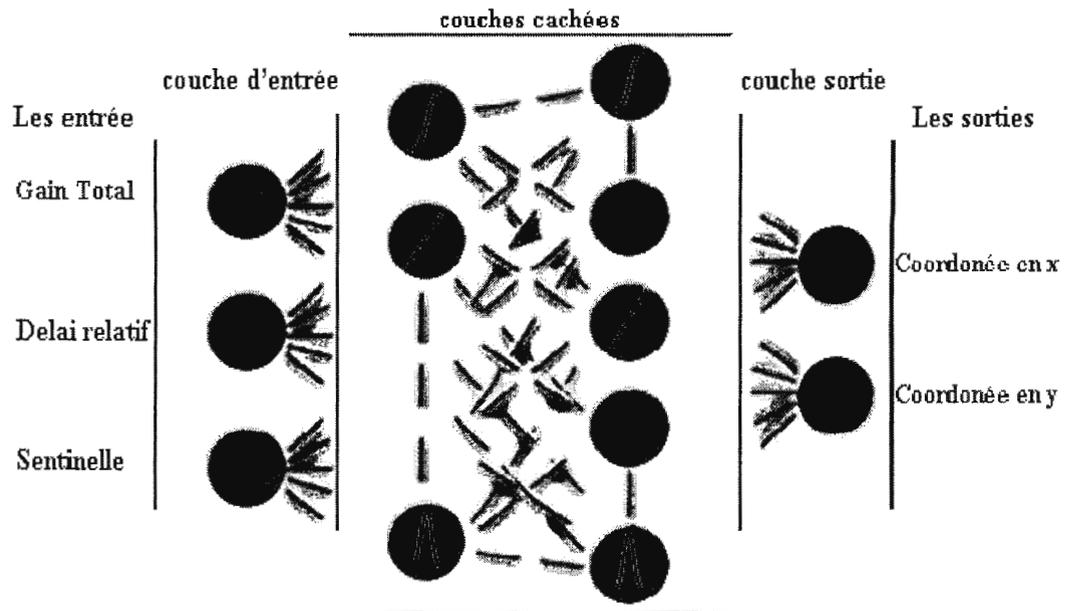


Fig.4.1 architecture d'un RN.

La figure 4.1 ci-dessus représente une architecture approximative des différents réseaux de neurones possibles. La couche d'entrée ainsi que celle de sortie sont fixes pour n'importe quel réseau utilisé. Par contre les couches cachées font toute la différence. Le nombre de ces couches peut varier, mais aussi les fonctions d'activation dans ces couches. Contrairement à ce qui est illustré dans la figure, normalement les éléments de la même couche ont tous la même fonction d'activation, alors qu'ici pour l'illustration on a inclus sur une même couche différentes formes de fonctions. Dans cette figure il faut remarquer qu'on indique aussi notre architecture finale incluant les données d'entrée et de sortie. Celles-ci seront discutées et expliquées plus tard dans la partie d'analyse des mesures.

#### ***4.4 Partie du travail proposée mais non effectuée***

Dans cette partie, on va expliquer quelques extensions qui, à notre avis, doivent être ajoutées au système. Elles n'ont pas été testées pour différentes raisons incluant la disponibilité du matériel et le manque de temps.

##### **4.4.1 Localisation par secteur**

Plusieurs études ont suggéré d'améliorer la performance d'un système en faisant la localisation en deux étapes. La première étape consiste à constituer la cible dans une zone précise (area localisation); la seconde étape étant de trouver les coordonnées exactes de la cible dans cette région précise. Les travaux dans [68] et [69], bien que différents du notre, peuvent donner quelques informations à ce sujet. En fait dans la première phase, il y a une grande probabilité que le système situe la cible dans la zone de présence. Cette partie permet une erreur aussi grande que la moitié de la surface d'une zone, ce qui se reflète par une plus grande robustesse puisque même avec des grandes erreurs le système est capable de trouver la bonne région de présence [44]. Donc cette méthode est caractérisée par une exactitude très élevée (dépassant les 95 %), mais une précision assez dégradée. Une telle localisation est relativement simple puisque la précision est le paramètre qui force la complication des algorithmes. Un autre intérêt est la capacité d'effectuer une telle localisation en utilisant un réseau de neurones.

En considérant une autre aptitude des réseaux, celle de la classification, une empreinte pourra être classifiée sous l'une ou l'autre des zones (catégories). Le réseau ne sera pas MLP ou RBF, mais plutôt appartenant à un autre type : les réseaux cartes auto-adaptatives. Dans une telle proposition, une fois que les réseaux adaptatifs ont classifié une empreinte, ils mettent en marche un réseau MLP ou RBF qui représente le mieux cette zone et par la suite ce dernier va localiser la cible avec une précision plus élevée. D'après l'étude effectuée dans [42], une connaissance spécifique du

domaine contribue à réduire le taux d'information requis pour avoir une précision donnée. L'avantage d'un tel système est une performance finale plus élevée, en comptant sur l'utilisation de multiples réseaux, chacun ayant une meilleure représentation d'une zone spécifique. Un autre avantage est le fait que le système peut être complètement monté avec des réseaux de neurones, donc une solution économique et une réponse en temps réel. Comme déjà indiqué par le titre de cette section, cette éventualité a été sérieusement considérée sans être testée.

#### **4.4.2 Algorithme de correction d'erreur**

Le travail dans un environnement comme la mine est difficile, et la performance des systèmes en est systématiquement affectée. Les galeries étroites, le plafond ainsi que les murs ne sont pas suffisamment stables. Des risques d'effondrement et de blocage partiel du signal ainsi que d'autres incidents imprévisibles viennent s'ajouter aux causes habituelles d'erreurs. Alors en cherchant un algorithme pour la correction des erreurs<sup>11</sup>, il faut prendre en considération tous ces aspects. Le système proposé consiste à placer des points de référence fixes à différents emplacements dans le milieu observé. Ces transmetteurs joueront un rôle de repérage, avec leurs coordonnées déjà déterminées au moment de l'installation, il est facile de trouver les erreurs commises par le système. Ces points transmettront périodiquement un signal avec un code (numéro ou autre) permettant la corrélation de chaque signal avec sa source. En recevant ces signaux, la station de base estimera la position de chacun des ces transmetteurs, et par la suite en utilisant les coordonnées déjà connues, elle sera capable de calculer les erreurs.

---

<sup>11</sup> Et même pour un bon calibrage du système

À cause de la répartition des points références partout dans le milieu, le système sera capable d'identifier les différentes erreurs commises dans les différentes zones du système. Cela offre plusieurs dispositions pour améliorer la précision globale du système [53]. L'une d'elles est le calcul d'une fonction pondérée des erreurs de manière à ce que la zone de présence de la cible ait une meilleure pondération et par la suite une plus grande influence sur la valeur de la fonction calculée. La valeur de cette fonction sera par la suite retranchée de toute estimation sur la position de la cible. Cette méthode permettra ainsi un contrôle direct sur les erreurs dans les différentes parties de la région couverte par la station de base. Une autre manière sera de calculer l'erreur moyenne pour les références sur les deux bornes de la zone de présence de l'utilisateur, et puis de retrancher cette erreur de l'estimation de position. Le pire cas sera de considérer l'erreur associée avec une seule référence, celle qui est la plus proche de la cible.

Un autre aspect intéressant est de permettre à l'utilisateur de recevoir les signaux transmis par les points de références. Cela est profitable dans les cas où il y a une coupure complète du signal entre la station de base et les récepteurs. Ces derniers pourront dans ce cas se repérer par rapport à ces points fixes de manière à garder un minimum de connaissance sur leurs positions. Dans le cas le plus optimal – et qui demande aussi le plus de ressources – la station de base pourra, à l'introduction d'un utilisateur dans son secteur, lui fournir une sorte de carte incluant tous les points de référence avec leurs numéros d'identifications et leurs coordonnées relatives à cette station. Cela permettra à l'utilisateur un repérage assez précis dans le noir (perte de tout signal de la station de base).

Étant donné que ce travail n'a pas été réalisé, on ne va plus élaborer sur ces idées en les remettant peut être pour un travail futur. Il faut quand même indiquer que l'utilisation des points de référence avec la technologie UWB est l'une des solutions les moins chères puisque justement UWB promet des transmetteurs simples avec un

coût minime et une autonomie très élevée permettant ainsi une durée de vie prolongée. De plus, avec un tel système les références ne font aucune tâche qui nécessite une puissance computationnelle ou d'autres capacités que celles de transmettre périodiquement un signal. Tout le calcul et l'analyse de données se font au niveau de la station de base qui normalement possède suffisamment de puissance de calcul et de mémoire. La station de base fournira ensuite au récepteur (utilisateur) les informations nécessaires pour effectuer ses propres ajustements.

## CHAPITRE 5

### Montage du système et mesure effectuée

#### 5.1 *Système de mesure pour UWB*

Les mesures d'un canal UWB sont plus compliquées que les cas classiques des canaux NB. Plusieurs difficultés existent : des obstacles relatifs au matériel avec les exigences concernant la largeur de bande, mais aussi des complications à bases théoriques. Diverses méthodes peuvent être considérées pour étudier la réponse impulsionnelle d'un canal surtout que dans le cas de l'UWB et avec la très courte durée d'un signal les méthodes temporelles deviennent applicables. Il existe alors 2 domaines pour effectuer le sondage d'un canal UWB : le domaine fréquentiel et le domaine temporel. Il faut différencier la discussion des domaines temporel et fréquentiel de celle considérant les différentes techniques de transmission, ici la discussion considère uniquement l'étude du canal et de la réponse impulsionnelle [32].

Dans le cas fréquentiel, le canal est mesuré en utilisant une technique de balayage. La large bande de fréquence est divisée en plusieurs sous-bandes NB et il y a un balayage du canal avec ces différentes NB et la réponse impulsionnelle fréquentielle est enregistrée en utilisant un VNA (Vector Network Analyzer) [16] ou un PNA [23, 61]. Cela correspond à une mesure du paramètre  $S_{21}$ , l'appareil sous mesure étant le canal de transmission [12,56]. La deuxième méthode de mesure dans

le domaine temporel utilise des techniques de sondage du canal basé sur la transmission des impulsions ou des signaux utilisant l'étalonnage du spectre. Dans les techniques de sondage, une impulsion de très courte durée est envoyée dans le canal et la réponse impulsionnelle est mesurée à l'aide d'un oscilloscope numérique (Digital Sampling Oscilloscope). La série d'impulsions transmises peut être générée en utilisant la manière classique de transmission DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) avec un récepteur par corrélation. La performance d'un tel système est liée aux propriétés de la fonction d'auto-corrélation du code d'étalonnage adopté. L'inconvénient de cette technique est son besoin d'un CR (Chip Rate) très élevé pour respecter les exigences de largeur de bande UWB [4, 5, 15, 60].

Une brève discussion des deux techniques de sondage du canal sera étendue, suivie par le système utilisé pour ce travail.

### **5.1.1 Domaine temporel**

L'un des avantages de l'étude du canal dans le domaine temporel est que ce dernier supporte jusqu'à sur certain niveau la non-stationnarité dans le canal. Deux méthodes sont considérées dans ce domaine.

#### **a. Par impulsion**

Le concept consiste à transmettre des impulsions de très courte durée. Le récepteur dans ce cas est un oscilloscope digital. La bande de fréquence dépend uniquement de la forme de l'impulsion et sa durée. Par contre plus le signal transmis est simple, plus l'étude de la réponse impulsionnelle obtenue par déconvolution entre le signal reçu et celui transmis sera simple. Donc il est mieux de transmettre des signaux de forme simple (Gaussienne généralement). D'autre part, les meilleurs résultats de cette technique surviennent quand la forme des

impulsions utilisées dans le sondage correspond à la forme des transmissions adoptée par l'application plus tard. Cette technique demande l'utilisation d'une troisième antenne pour des raisons de déclenchement (triggering) et de synchronisation.

#### **b. Par DSSS**

Basée sur la transmission d'un signal DSSS et sur un récepteur par corrélation, cette technique est la plus utilisée pour les systèmes WB (Wide Band). Théoriquement, elle peut être adoptée pour UWB puisque la largeur de bande est bien définie par le CR (Chip Rate) du code transmis. Par exemple, pour une bande de 500 MHz un CR de 250 MHz est nécessaire, mais pour une très grande largeur de bande cette exigence en CR limite l'utilisation de cette technique avec UWB.

### **5.1.2 Domaine fréquentiel**

Dans le domaine fréquentiel le signal RF est transmis et reçu par le même appareil, le VNA, ce qui rend la mise en place du système de mesure plus simple. Le sondage se fait à travers un ensemble de signaux sinusoïdaux en NB qui vont balayer toute la bande à étudier [1]. Cette technique permet aussi l'utilisation des antennes Ultra Wide Band simples au lieu des antennes spécialement conçues pour les impulsions comme dans le cas précédent. Une fois tout le balayage fait, l'analyseur reconstitue un modèle final du canal en UWB. Un inconvénient par rapport au domaine temporel est l'obligation que le canal soit stationnaire durant les mesures dans le cas fréquentiel [8]. Le temps d'un sondage (balayage complet) est limité par la période de cohérence du canal, sinon ce dernier risque de changer. Une autre

limitation de cette méthode est le délai maximal du canal. La limite du délai du canal détectable est une fonction du nombre total des points de fréquences par balayage ainsi que la largeur de bande :

$$\tau_{\max} = \frac{(N_{\text{smf}} - 1)}{B}. \quad (5.1)$$

Où  $N_{\text{smf}}$  étant le nombre de points choisis et  $B$  la largeur de bande.

Une autre source d'erreur est le déplacement de fréquence dû au délai de propagation induit par de longs câbles entre les antennes et le VNA ou à un long temps de vol du signal de sondage. Quand le système est configuré en mode verrouillage-par-étape, les longs délais de propagation peuvent résulter en un échantillonnage – au niveau du récepteur – à des fréquences plus élevées que la fréquence reçue. Ce décalage en fréquence est une fonction du temps de propagation  $t_{pr}$ , ainsi que la largeur de bande  $B$ , et dépend aussi du temps d'un balayage complet du canal  $t_{bl}$  :

$$\Delta f = t_{pr} \left( \frac{B}{t_{bl}} \right). \quad (5.2)$$

En général la valeur de  $\Delta f$  doit être plus petite que la fréquence intermédiaire de l'analyseur pour que les résultats soient corrects. Une fois la réponse du canal obtenue dans le domaine fréquentiel, elle pourra être transformée jusqu'au domaine temporel en utilisant la transformation inverse de Fourier. Habituellement, il y a deux techniques pour effectuer cette transformation du domaine temporel et qui donnent des résultats similaires, nominalement : la méthode hermitienne et la méthode du conjugué [18].

Un grand inconvénient de l'utilisation d'un VNA est le besoin de calibrage, c'est simple mais aussi critique. Ce calibrage doit inclure toute la configuration qui va

être utilisée dans les mesures : les câbles, les antennes, les connecteurs, les adaptateurs, etc. Elle est essentielle pour le bon calcul de la phase, de l'amplitude et des délais dans le signal reçu. En réalité, les câbles ainsi que les adaptateurs entraînent des variations des fréquences et ajoutent des pertes qui seront éliminées (corrigées) par calibrage. Cette option est incluse dans les nouveaux analyseurs, ce qui évite à l'utilisateur de faire cela manuellement en post-traitement. Durant le calibrage tous les paramètres doivent être configurés correctement, y compris la puissance à transmettre, la largeur de bande à étudier ainsi que le nombre de points de fréquences. Le calibrage déplace (translate) les points de références temporelles depuis les bornes de l'analyseur jusqu'aux extrémités des câbles. De cette manière, les délais dans le signal à traiter représentent uniquement les délais dûs au canal.

Il faut noter que les délais causés par les antennes, ainsi que tous les effets des antennes sont considérés comme faisant partie de la fonction de transfert du canal [26, 30]. Le temps de balayage d'un canal, qui est un paramètre assez critique pour un bon sondage de ce dernier, est le plus souvent ajusté automatiquement durant cette phase par l'analyseur lui-même.

Dans cette méthode d'étude du canal, la séparation entre le transmetteur et le récepteur se limite à des petites ou moyennes distances. Pour une portée plus élevée, il faut apporter des changements à la configuration principale du système. Il faut alors ajouter un générateur de signal externe et synchroniser celui-là avec le récepteur. Le système modifié consistera alors en un générateur de signal synchronisé avec le VNA à l'aide d'un générateur de signal de synchronisation (horloge). Cette synchronisation doit préférablement réalisée être par la transmission d'une impulsion déclencheuse commandée à distance par un moniteur sans fil. Tous les autres aspects de fonctionnement du système restent les mêmes qu'auparavant.

## 5.2 Le système de mesure proposé

Pour le travail de cette maîtrise, le système de sondage dans le domaine fréquentiel a été utilisé pour effectuer les campagnes de mesures. La figure 5.1 ci-dessous montre une représentation du montage.

L'analyseur de spectre PNA (Power Network Analyzer) Agilent E8363 forme la composante principale de ce système. Il joue le rôle de transmetteur et de récepteur comme l'indique la méthode de mesure fréquentielle.

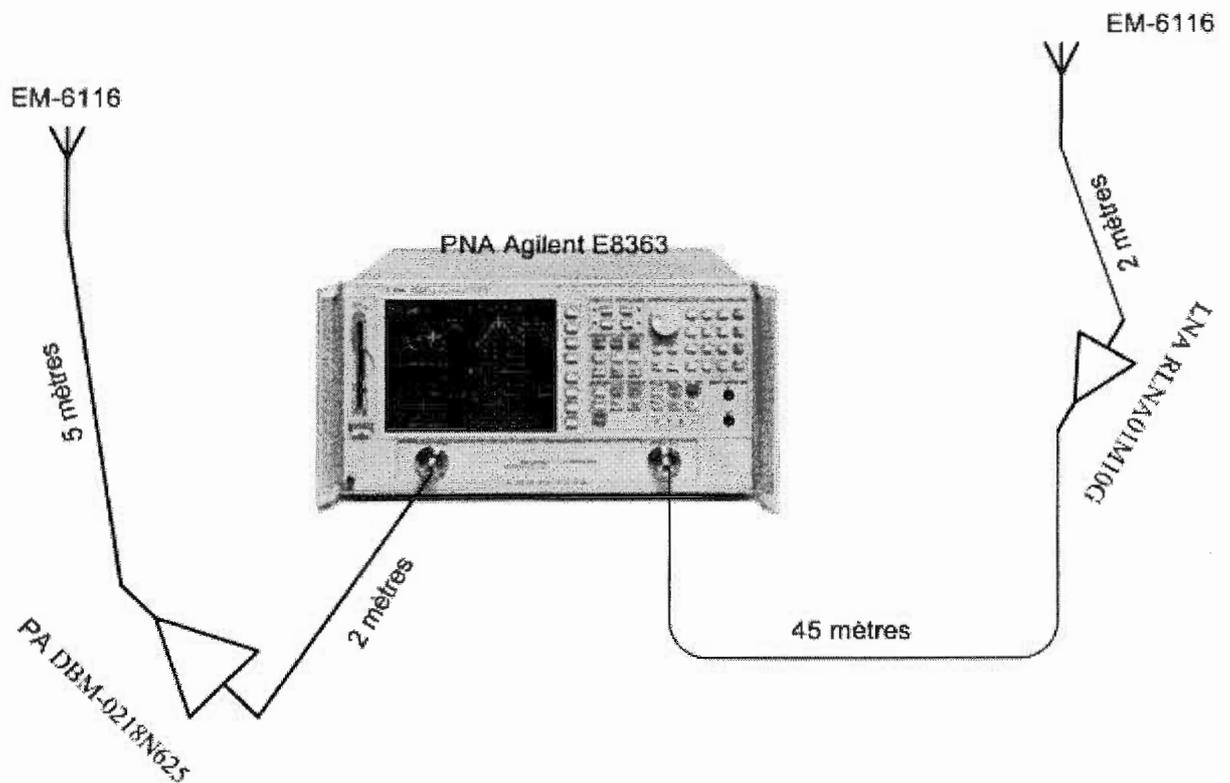


Fig. 5.1 le système de mesure

Ce PNA peut couvrir des fréquences allant jusqu'à 40 GHz. Dans ce travail, il a été décidé de faire l'étude du canal sur presque toute la largeur de bande permise par les régulations de la FCC. Alors la plage entre 3 GHz et 10 GHz a été inspectée.

Le niveau de puissance transmis par l'analyseur a été fixé à -15dBm et cela pour respecter la puissance maximale d'entrée du LNA, surtout pour les petites distances de séparation TX/RX. Le nombre de points d'inspection de fréquence a été réglé à 6401 points par balayage. Le temps de balayage a été fixé automatiquement par l'analyseur une fois la largeur de bande et le nombre de points choisis. Durant le calibrage, toutes ces valeurs avaient été administrées au PNA, et toutes les mesures ont été faites avec ce montage. Une façon connue pour minimiser l'effet du bruit dans le canal étant le calcul de la moyenne de plusieurs mesures. Le PNA a été configuré pour effectuer une moyenne sur 10 mesures consécutives à chaque position. Cette moyenne aide aussi à mieux accentuer les signaux ayant les meilleures puissances et le comportement le plus stable [20].

Les éléments de second ordre d'importance dans le système sont les amplis, car ils peuvent introduire une large erreur au niveau fréquentiel ainsi que des retards et des irrégularités dans les amplitudes à cause de la non-linéarité de leur amplification. Donc le choix des amplis était critique.

L'amplificateur de puissance DBM0218N625 est un produit de Narda West, connu sous le titre d'amplificateur UWB. Il supporte une certaine linéarité pour des fréquences allant jusqu'à 18 GHz. Le tableau 5.1 montre les gains, ainsi que les autres paramètres d'influence aux fréquences d'intérêt pour ce travail.

Tableau 5.1: Les paramètres du PA DBM0218N625.

Fréquence (GHz)	Gain (dB)	Figure du Bruit (dB)	P-1dB (dBm)
2.0	43.0	4.3	25.5
6.0	42.4	3.7	26.8
10.0	42.2	3.4	26.4

Avec les paramètres ci-dessus, l'amplificateur PA assure un minimum d'interférence au niveau des paramètres du canal à étudier.

Le second amplificateur étant le LNA RLNA01M10G. C'est un produit de la compagnie RF-Lambda qui couvre presque la même largeur de bande que le PA, allant de 0.1GHz jusqu'à 18 GHz avec une figure de bruit stable le long de la bande.

Tableau 5.2 : Les paramètres LNA RLNA01M10G.

Fréquence (GHz)	Gain (dB)	Max In-puissance (dBm)	P-1dB (dBm)
0.1-18	30	-16	23

Pour cet amplificateur aussi, les paramètres influencent au minimum les valeurs du canal à étudier. Les pertes et les gains des amplis sont calculables, mais les délais introduits par ces deux derniers ne peuvent être calculés ou éliminés par calibrage. Dans toutes les études effectuées dans ce domaine, il est proposé d'éliminer les effets des amplificateurs dans la phase de post-traitement. Avec une variation de gain relativement stable, les seuls effets à éliminer sont les délais, et ceux-là peuvent être mesurés par référence à une mesure prise à une distance  $d_0$  (de 1 m d'habitude) avant l'intégration des amplis dans le système calibré. Cette tâche a été réalisée permettant ainsi l'élimination des délais dans la seconde phase de notre travail.

Les câbles de choix sont un produit de StormProduct, les true-blue série 205, avec une perte acceptable, un poids moyen (par rapport à d'autre produit), et une malléabilité permettant la manipulation dans l'environnement agressif de la mine.

Tableau 5.3: Les paramètres des câbles.

Câble	Perte à 5GHz	Perte à 10 GHz	Poids/mètre	Délais de propagation	impédance
True-blue	0.59 dB/m	0.85 dB/m	65.6 g/m	4.56 ns/m	50±2Ω

Tous les effets des câbles sont normalement éliminés à travers le calibrage, de sorte que les délais à travers les câbles sont annulés, alors que les pertes ne le sont pas. En réalité l'analyseur, en calculant un rapport, élimine les effets des pertes une fois le signal est reçu au niveau du récepteur lui-même, mais avec les grandes distances, les signaux reçus aux antennes ne sont pas assez puissants pour traverser toute la longueur des câbles (45 m) et c'est la raison principale de l'installation d'un LNA (c.à.d. pour permettre un bon niveau de signal d'arriver jusqu'au récepteur).

Un autre côté décisif dans le système est le choix des antennes, surtout que les caractéristiques de radiation de ces dernières affectent d'une manière directe les paramètres d'importance dans cette étude<sup>12</sup>. Le fonctionnement et le déploiement des antennes soit bien connus dans le cas des signaux sinusoïdaux à bande étroite. Dans le cas UWB, la connaissance des effets des antennes n'est pas assez développée. En effet et dans le cas classique, la dérivation<sup>13</sup> effectuée par l'antenne sur le signal sinusoïdal revient à un changement dans la phase du signal, ce qui est loin d'être le cas dans la technologie UWB surtout dans les transmissions DS-UWB. La plupart des antennes existantes peuvent transmettre un signal UWB mais la distorsion dans le signal ainsi que le modèle de propagation de l'antenne seront affectés par la largeur de bande utilisée [5]. Dans ce travail la largeur de bande est de 7GHz (entre 3GHz et 10GHz), mais pour faire un sondage complet du canal, le PNA divise cette largeur de bande en plusieurs sous-bandes et ensuite effectue un balayage sur ces fréquences.

<sup>12</sup> On parle des trajets multiples et de la puissance et de la directivité du signal.

<sup>13</sup> Chaque antenne effectue une ou plusieurs dérivations sur le signal à transmettre (la théorie des antennes).

Dans ce balayage, des signaux sinusoïdaux sont utilisés et par la suite il est possible de considérer que les effets des antennes (dérivation et autre) sur chaque sous-bande est semblable aux cas d'une transmission classique.

Puisque le gain et la directivité des antennes influencent à leur tour les résultats, la décision a été d'utiliser des antennes avec une directivité omni<sup>14</sup> – ce type d'antenne est le plus souvent utilisé dans l'étude d'un canal – et un gain minimal de 1dB. Les antennes EM-6116 d'electro-metrics ont été choisies puisqu'elles respectent les différentes contraintes. Le tableau 5.4 résume les spécifications des antennes.

Tableau 5.4 : Les spécifications d'une antenne EM-6116.

Fréquence	Gain	Radiation	Déviaton de l'Omni	Impédance $\Omega$	Puissance max.
2 GHz -10 GHz	1 dB	Omni	$\pm 1$ dB	50	25 W

Bien que dans ce choix d'antenne leur impact sur le système et sur l'étude du canal soit minimisé, il reste plusieurs effets que les antennes imposent sur le résultat final du système sans que ces derniers puissent être déterminés. Dans la littérature ainsi que dans plusieurs systèmes expérimentaux étudiés, ces effets sont ignorés en les considérant comme faisant partie de la fonction de transfert (la réponse impulsionnelle) du canal; cela a été aussi appliqué dans cette étude. Il faut quand même noter qu'une autre possibilité existe [19], soit l'utilisation d'une chambre anéchoïque pour une étude complète des effets des antennes sans aucune influence du milieu.

---

<sup>14</sup> L'impact sur le délai moyen est bien mentionné dans la description des composantes de l'empreinte.

### 5.3 Les campagnes de mesures

#### 5.3.1 L'environnement de mesure

Trois campagnes de mesures ont été menées dans la mine CANMET à une profondeur de quarante mètres sous-sol. Le niveau quarante (fig. 5.2) représente un milieu idéal pour les tests et les mesures, il s'y trouve des endroits pour le scénario LOS ainsi que pour le scénario NLOS. La galerie s'étend sur une longueur dépassant les 70 mètres, ce qui théoriquement permet des mesures UWB allant jusqu'à 70 mètres. En réalité, le montage expérimental permettait des mesures jusqu'à 40 à 45 mètres; i.e. les longueurs couvertes par les câbles.

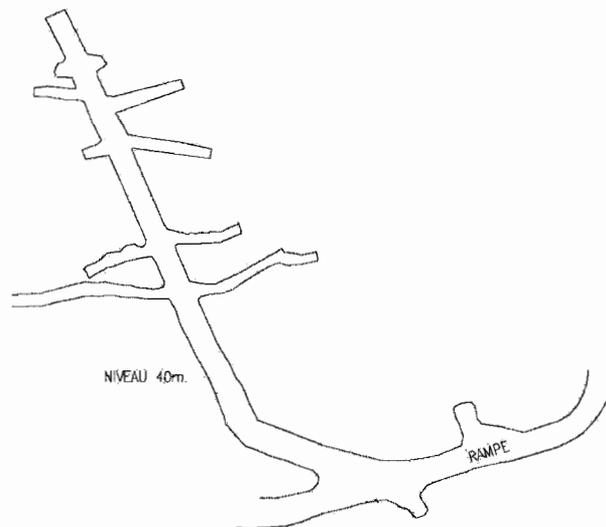


Fig. 5.2 schématisation de la galerie 40

Dans la galerie il existe des systèmes de ventilation, ainsi que des tuyautages pour des usages miniers et un grillage couvrant tout le plafond qui constituent autant de sources de réflexion du signal et de multi-trajet que la rugosité excessive des parois. Le sol n'est pas plat avec des bosses et plusieurs fossés. De plus, les murs (parois) ne sont pas alignés, les dimensions varient quasi-aléatoirement tout le long

de la galerie bien que cette dernière est supposée avoir une largeur d'environ 4 à 5 mètres. La galerie présente aussi plusieurs ramifications de dimensions variantes dans différents emplacements comme indiqué dans la figure 5.2. L'humidité est toujours trop élevée, des gouttes d'eau tombent de partout et de grandes flaques d'eau couvrent le sol. La température est stable autour de 6-7 °C tout le long de l'année.

Donc d'après cette description, il est clair que l'environnement est dur, mais ce qui nous intéresse c'est l'effet sur le montage et les équipements. Il fallait toujours attendre une durée minimale de 30 minutes avant que l'analyseur ne soit dans un état stable permettant le calibrage et le début de mesure. Il fallait aussi protéger tous les équipements contre l'humidité et surtout contre l'eau (les amplis étant posés sur le sol) puisqu'on travaille avec des équipements à courants forts. À part ces effets de l'environnement sur le matériel, on considère que les campagnes de mesures se sont faites avec un montage robuste et performant.

### 5.3.2 Les campagnes de mesure

Comme les campagnes de mesures sont directement liées à la formation de la base de signature, qui est primordiale pour le fonctionnement de ce système, il fallait respecter les exigences de la technique d'empreinte durant ces campagnes. Dans la seule étude analytique<sup>15</sup> sur cette technique [49], les auteurs identifient ces exigences. La première étant le nombre de stations de base utiles pour former une empreinte, dans notre cas une station sera suffisante pour générer une empreinte et les résultats y témoignent. L'espacement entre les mesures consécutives constitue la seconde exigence, un espacement trop petit réduit l'exactitude du système alors qu'un espacement trop grand réduit la précision. Par la suite, une distance de séparation de

---

<sup>15</sup> Les autres études trouvées sont plus des travaux expérimentaux sans formulations ni bases mathématiques.

un mètre a été choisie pour la grille, de telle sorte que les mesures prises permettent à la base de données d'être représentative du milieu et par la suite permettent aux réseaux de neurones d'avoir assez d'information pour un bon apprentissage. Donc des mesures sont prises à chaque mètre dans les deux cas NLOS et LOS.

Les antennes ont été placées sur des supports de 1.5 mètres de hauteur, mais vu la nature du sol, elles n'étaient pas toujours au même niveau. Dans toutes les campagnes de mesures, l'antenne de transmission a été fixée à un point donné dans la galerie, et toutes les mesures ont été faites par référence à ce point. Par contre, puisque la galerie est courbée, on ne pouvait considérer un système référentiel fixe. C'est pour cela que le système choisi est en mouvement avec l'antenne de réception. Par la suite l'ordonnée 'composante-horizontale' dans le système de coordonnées représente la distance de séparation en mètre entre le transmetteur et le récepteur. Alors que l'abscisse 'composante-verticale' représente la séparation verticale prenant en compte la courbe dans la galerie.

Les figures ci-dessous montrent l'emplacement de l'antenne de transmission ainsi que les différents points de mesures pour les trois campagnes de mesures.

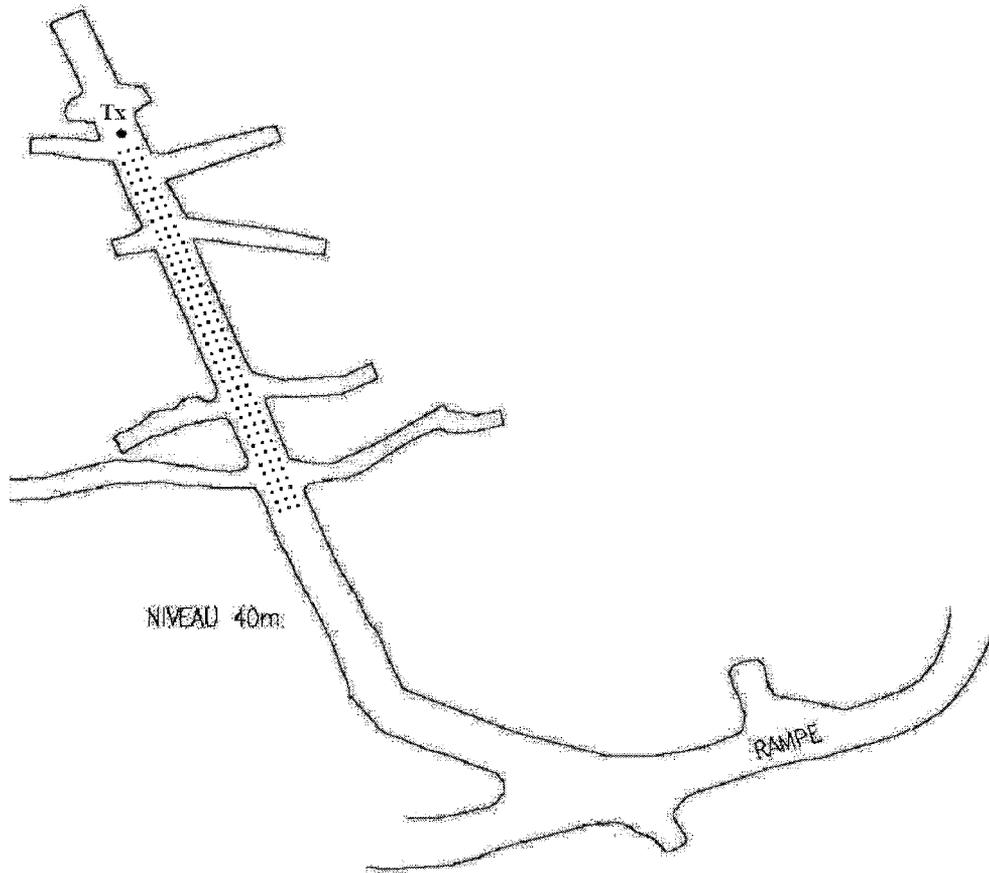


Fig. 5.3 première campagne de mesure

Dans cette première campagne (figure 5.3), l'antenne de transmission a été placée au fond de la galerie<sup>16</sup> à équidistance entre les deux parois de gauche et de droite. De son côté, le récepteur a été déplacé sur une distance de 40 mètres commençant par une première position en face du transmetteur et à 1 m de ce dernier. Les différentes stations de bases présentes dans la galerie ont été éteintes au début de la campagne afin d'éviter toutes sources d'interférence surtout que plusieurs d'entre elles transmettaient sur des fréquences à l'intérieur de la bande 3GHz-10GHz.

<sup>16</sup> La partie derrière l'antenne est isolée avec un rideau plastique.

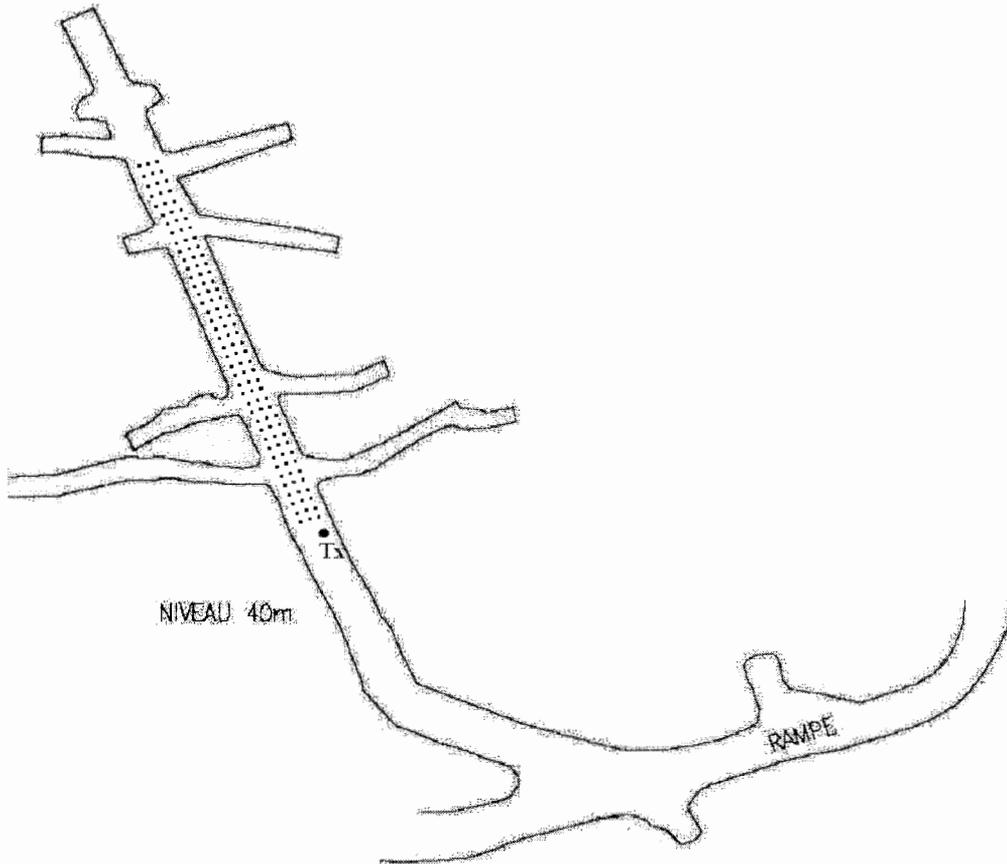


Fig. 5.4 seconde campagne de mesure

La seconde campagne (figure 5.4) est aussi pour le cas LOS. Elle ressemble beaucoup à la première. Le transmetteur a été placé quelque part au milieu de la galerie mais plus proche de la paroi à droite qu'à gauche. Là aussi le récepteur a été déplacé sur une distance de 40 mètres, sauf que la première position<sup>17</sup> n'était pas face au transmetteur, bien qu'elle était à 1 m de ce dernier. Une autre différence est que les sources d'interférence n'ont pas été éteintes durant la campagne. Cette campagne cherche à établir une comparaison avec la première campagne concernant surtout l'effet des interférences sur la précision mais aussi l'effet de l'emplacement de la station de base (ici l'antenne de transmission).

<sup>17</sup> On parle toujours de la première position parce que toutes les mesures et les distances consécutives l'utilisent comme référence.

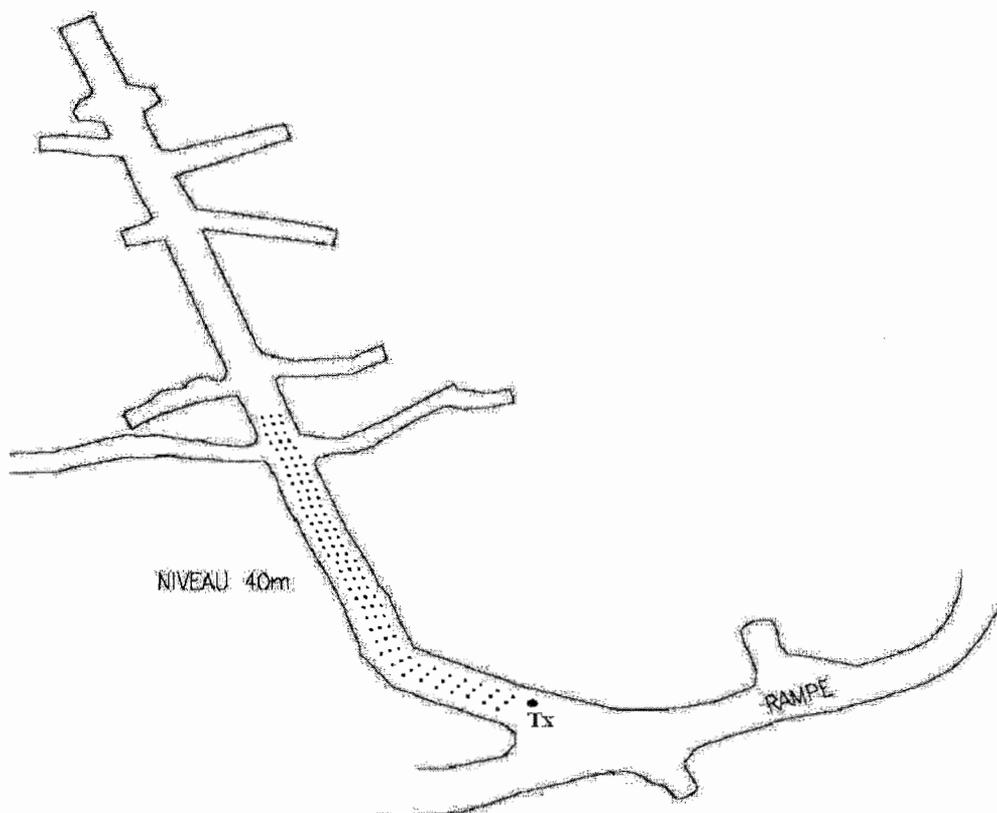


Fig. 5.5 troisième campagne de mesure

La troisième campagne concernait le cas d'absence de visibilité NLOS (Fig. 5.5). Il y a une visibilité pour les 9 premiers mètres, mais au-delà ce n'est plus le cas. La distance maximale atteinte était de 36 mètres après laquelle le signal fut noyé dans le bruit d'une manière irrécupérable. Non observable dans la figure 5.5 est le fait que l'antenne de transmission est placée à la base d'une pente qui couvre 12 mètres avec une inclinaison d'environ 7 degrés et donc les antennes ne sont pas au même niveau. Dans ce cas, la surface derrière l'antenne de transmission est assez libre par comparaison aux cas précédents. Alors les réflexions provenant de l'arrière et dues à l'omni-«directionnalité» de l'antenne sont moins présentes. Dans cette campagne, toute source d'interférence a été désactivée. Par contre, cette partie de la galerie contenait le plus de matériel nuisible à la propagation du signal tel les installations en fer et autres métaux.

Enfin, il faut noter que dans toutes les campagnes de mesures, vu la difficulté du milieu ainsi que l'absence d'un repérage assez précis, il y a une erreur d'à peu près  $\pm 10$  centimètres par unité de distance.

## CHAPITRE 6

### Analyse des résultats

#### 6.1 *Aperçu*

Ce chapitre présente les résultats obtenus pour les différents scénarios nominalement en cas de visibilité directe (LOS) ou d'absence de visibilité directe (NLOS). Les résultats sont exposés de manière à clarifier le plus possible les divers paramètres et phénomènes influençant la performance du système proposé. À cette fin, le chapitre commence avec une discussion réaliste des différentes composantes choisies pour l'empreinte ainsi que leurs relations avec la distance et leurs interactions avec les réseaux de neurones. Ensuite, les valeurs réelles ainsi qu'estimées pour les emplacements étudiés seront analysées pour les deux types de réseaux choisis. Finalement, une petite conclusion complétera le chapitre.

#### 6.2 *Les composantes de l'empreinte*

Comme déjà indiqué, il est important que l'empreinte soit représentative du milieu et assez unique afin de permettre une bonne localisation. Pour ces raisons, les composantes choisies dans l'étude théorique ont été : 1) la puissance totale qui est liée à la distance et à la propagation dans le milieu; 2) le retard moyen aussi lié à la distance et à la propagation dans le canal; et 3) l'étalement efficace qui est surtout

choisi pour améliorer l'unicité de l'empreinte. Par contre, une fois les mesures prises dans le milieu et après leurs analyses, le troisième paramètre a été éliminé pour des raisons directement liées au signal et au canal. Les figures 6.1.a et 6.1.b représentent des mesures de chaque scénario : la première dans le cas LOS où le premier signal étant la réponse impulsionnelle pour une distance d'un mètre et le second pour une distance de quarante mètres. La seconde figure est dans le cas NLOS et les distances sont de 1 et 36 mètres.

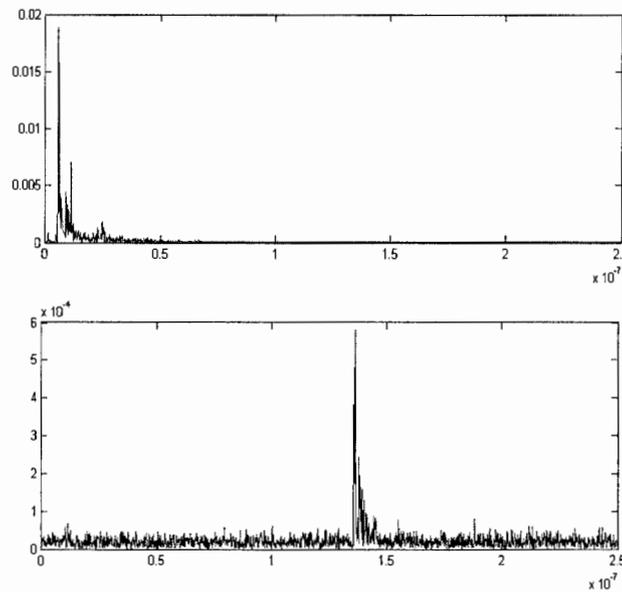


Fig. 6.1-a) réponse impulsionnelle : cas LOS.

Il faut noter que le signal à 40 mètres subit une très grande dégradation au niveau de la valeur maximale<sup>18</sup> (peak value) par rapport au signal à 1 mètre. De tel sorte qu'un seuil de 10dB n'est plus disponible pour les dernières mesures, et cette partie du signal est complètement submergée par le bruit.

<sup>18</sup> Noter que les axes de 'y' n'ont pas les même échelles sinon le second signal ne sera pas observable et cela pour les deux figures.

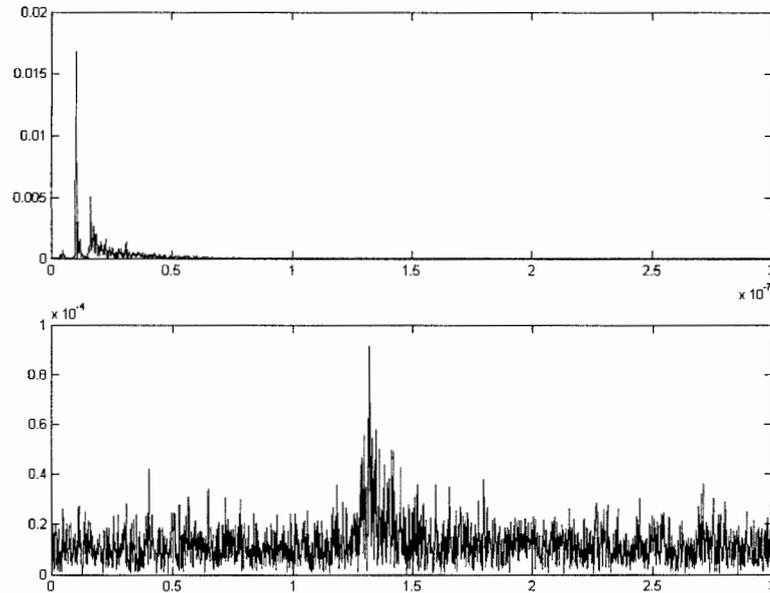


Fig. 6.1-b) réponse impulsionnelle : cas NLOS.

Dans le cas NLOS la dégradation est d'autant plus grande, de sorte que le signal reçu à 36 mètres est plus proche d'un bruit que d'une CIR identifiable. Cette grande perte est la raison principale pour laquelle l'étude de localisation n'inclura pas toutes les distances couvertes par la campagne de mesure. Un facteur plus important est l'influence du seuil disponible sur les paramètres composants de l'empreinte. En fait toutes les trois composantes sont influencées par le seuil choisi pour l'étude du canal. Mais le RMSDS est le paramètre le plus sensible d'autant plus que sa valeur est la plus petite [19], mais aussi son rôle est plus lié à l'unicité de l'empreinte qu'à la relation distance/paramètres. Tout cela a entraîné l'élimination de ce paramètre. Il faut indiquer que des essais ont été faits pour des petites distances<sup>19</sup> permettant ainsi l'étude de l'impact de l'élimination de cette composante, et dans notre cas la dégénérescence dans la précision du système était acceptable. Finalement, il faut mentionner que d'habitude les systèmes effectuant un codage du signal transmis

<sup>19</sup> Des petites distances pour s'assurer que les niveaux de puissance sont proches et ainsi avoir le comportement le plus stable.

peuvent permettre la récupération d'une partie du signal noyé dans le bruit, mais cela n'est pas le cas ici<sup>20</sup>.

Pour les deux composantes restantes, la performance du système repose sur leur capacité de fournir assez d'information aux réseaux de neurones. Une étude dans ce sens est celle de la corrélation entre les composantes de l'entrée du réseau et celles de la sortie, donc entre les 2 paramètres UWB de choix et les coordonnées en x et y qui se trouvent à la sortie du réseau. Cette étude a été réalisée dans les deux cas LOS et NLOS. Puisque les résultats obtenus dans les deux scénarios LOS étaient similaires, un seul des 2 cas sera présenté. Les tableaux 6.1-6.2 ci-dessous résument les résultats de l'analyse.

Tableau 6.1 : Corrélation entre la coordonnée en x et les composantes de l'empreinte pour LOS.

<b>Corrélation</b>	Puissance total	Délai moyen	Distance en x
Puissance total	1.0000	-0.7132	-0.7016
Délai moyen	-0.7132	1.0000	0.9985
Distance en x	-0.7016	0.9985	1.0000

Tableau 6.2 : Corrélation entre la coordonnée en y et les composantes de l'empreinte pour LOS.

<b>Corrélation</b>	Puissance total	Délai moyen	Distance en y
Puissance total	1.0000	-0.7132	-0.6928
Délai moyen	-0.7132	1.0000	0.9926
Distance en y	-0.6928	0.9926	1.0000

Avec une corrélation de la valeur de '-0.7016' entre la coordonnée en 'x' (la distance en x) et la puissance totale, cette dernière présente un comportement lié à la distance. Le signe négatif indique un sens inverse dans la relation, ce qui est conforme aux suppositions théoriques puisque en fait plus on s'éloigne de la station de transmission, plus la puissance diminue. La valeur de '0.7016' indique une bonne

<sup>20</sup> Le système de mesure disponible est un système de sondage simple

corrélation et donc une forte relation entre les deux variables pour que les réseaux de neurones puissent l'identifier et l'approximer. La corrélation entre le délai et la composante en 'x' est d'autant plus imposante et plus forte avec une valeur de '0.99', et une fois de plus cette valeur est conforme à l'étude théorique. Il est donc raisonnable de supposer que les réseaux de neurones seront capables d'estimer une valeur pour la coordonnée en 'x' à partir de l'empreinte.

D'autre part pour la composante en 'y' dans les cas LOS, elle présente une corrélation de valeur '-0.6928' avec la puissance totale. Donc ici aussi la puissance diminue avec la distance en 'y' qui augmente. Cette valeur est légèrement plus petite que pour la composante en 'x', néanmoins elle est assez grande pour offrir aux réseaux une base d'estimation (d'approximation) de la relation entre puissance et déplacement en 'y'. D'autre part le Délai moyen garde une corrélation très élevée et proche par rapport à la composante en 'x'. Par la suite, il est sûr que les données d'entrées offrent au réseau de neurones assez d'information pour que ce dernier puisse tracer une bonne approximation de la coordonnée en 'y'.

Tableau 6.3 : Corrélation entre la coordonnée en x et les composantes de l'empreinte pour NLOS.

<b>Corrélation</b>	Puissance total	Délai moyen	Distance en x
Puissance total	1.0000	-0.5590	-0.6204
Délai moyen	-0.5590	1.0000	0.9870
Distance en x	-0.6204	0.9870	1.0000

Tableau 6.4 : Corrélation entre la coordonnée en y et les composantes de l'empreinte pour NLOS.

<b>Corrélation</b>	Puissance total	Délai moyen	Distance en y
Puissance total	1.0000	-0.5590	-0.6121
Délai moyen	-0.5590	1.0000	0.9865
Distance en y	-0.6121	0.9865	1.0000

Comme première constatation, les corrélations dans le cas NLOS (Tableaux 6.3-6.4) sont un peu plus faibles que dans le cas LOS. Pour la coordonnée en 'x', la

puissance a une corrélation de '-0.6204' avec une valeur négative indiquant toujours l'inverse, alors que le délai a une corrélation de '0.9870'. Donc ces deux valeurs sont plus petites que celles des cas LOS, mais elles sont toujours significatives pour supporter un bon fonctionnement<sup>21</sup> du réseau de neurones. La seconde composante 'y' présente des valeurs plus petites que celles de la composante en 'x', mais ces valeurs reflètent toujours une relation inverse avec le paramètre de puissance et une relation directe avec celui du délai.

Les valeurs des corrélations plus petites dans le cas NLOS reflètent le comportement du canal. En fait dans les cas NLOS, les variations au niveau de la réponse impulsionnelle sont plus accentuées, ce qui tend à diminuer les valeurs des corrélations. La figure 6.2 dessine les valeurs relatives de la puissance totale dans le cas NLOS et sur toutes les positions couvertes par les mesures. Le comportement décroissant de ce paramètre est bien clair dans cette illustration, mais cela est perturbé par les fluctuations qui rendent cette décroissance un peu moins corrélée avec les distances (les coordonnées 'x-y') associées à ces valeurs. Toutefois, ces valeurs sont représentatives des variations et comme nous allons le voir ultérieurement, elles offrent une bonne performance.

---

<sup>21</sup> Au moins du côté théorique le réseau est supposé être capable d'identifier et d'approximer les relations.

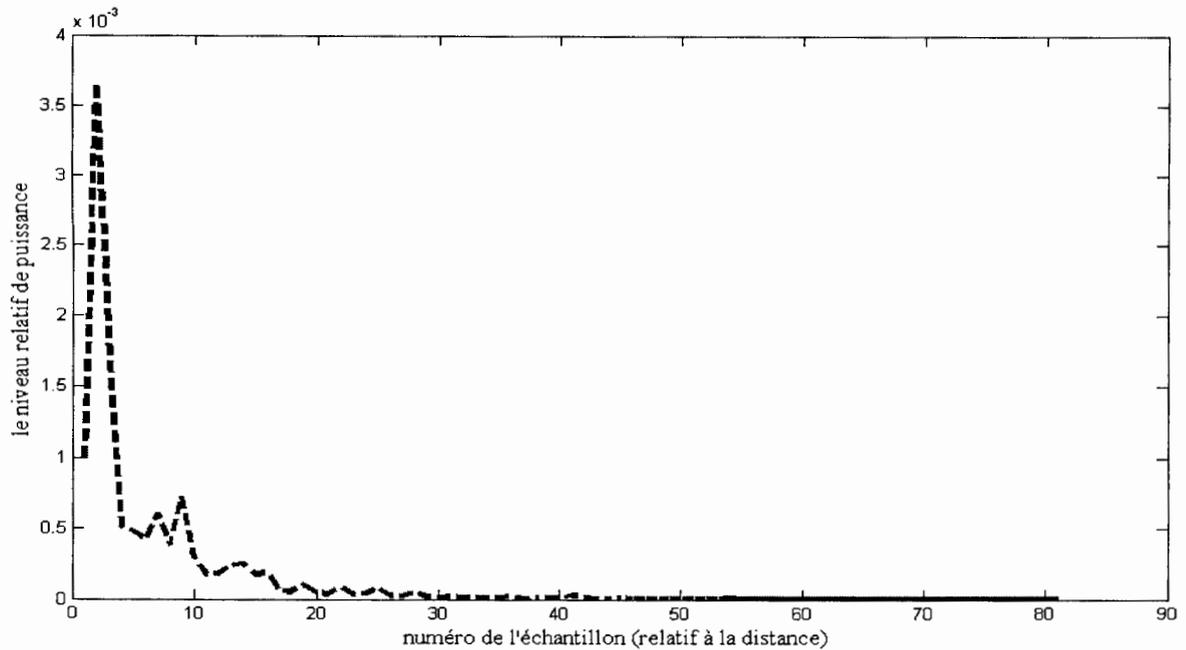


Fig. 6.2 Les fluctuations dans la décroissance de la puissance cas NLOS.

Suite à cette discussion, on peut s'attendre à une bonne performance du système puisque les entrées offrent assez d'informations aux réseaux pour bien approximer les fonctions. Par contre, on peut s'attendre à ce que la performance du scénario NLOS diminue par rapport aux cas LOS tout en gardant une bonne précision.

Une autre analyse sur l'espace des entrées et l'espace des sorties des réseaux a été effectuée. L'étude de l'unicité de l'empreinte était l'objectif de cette analyse. En examinant les données des entrées, on a pu confirmer que plus de 95% des empreintes sont uniques. Par contre, on a pu identifier un problème qui peut être à l'origine des valeurs de corrélations vues auparavant. En fait, on a trouvé qu'avec le système de coordonnées choisi et pour l'emplacement des mesures prises, il y avait la coordonnée en 'y' qui revenait avec une même valeur pour plusieurs distance 'x' et par la suite pour plusieurs empreintes. Donc, alors que les empreintes étaient uniques, il y avait des coordonnées en 'y' qui se répétaient. Cela peut partiellement expliquer pourquoi les valeurs dans les corrélations sont plus petites pour 'y' que pour 'x'. Mais

le plus important est que cela risque de dégrader la performance des réseaux de neurones. Pour contrarier cet effet, un drapeau (flag) a été ajouté aux entrées, permettant ainsi au réseau de mieux distinguer les valeurs en 'y' semblables. Le drapeau est identifié à l'un des trois codes : 1, 2 ou 3; et cela pour les valeurs de 'y' à droite, au centre et à gauche, respectivement. Avec ce drapeau ajouté aux entrées du réseau, le nombre total des entrées devient 3, dont 2 viennent du IR et la troisième est le drapeau.

### ***6.3 Résultats de localisation de la première campagne LOS\_1***

#### **6.3.1 Avec les réseaux MLP**

Il existe plusieurs algorithmes pour l'entraînement d'un réseau MLP, dont les critères peuvent être la vitesse de cet entraînement, ou sa performance sur les données d'entraînement (sa capacité d'apprendre), mais aussi la capacité du réseau final à généraliser sur les informations apprises. Dans notre cas, la vitesse de l'entraînement ne constitue pas un problème. Par contre, le réseau final doit représenter le mieux possible les données d'apprentissage ainsi que toute nouvelle donnée non vue déjà par le réseau (les données de test dans notre cas). À cette fin, plusieurs algorithmes d'apprentissage ont été testés, et dans ce scénario, l'apprentissage basé sur la régularisation Bayésienne a fourni la meilleure performance finale. Cet algorithme est connu pour ses bonnes capacités d'apprentissage ainsi que pour une très forte capacité de généralisation. En fait, le sur-apprentissage est contrôlé permettant une meilleure performance totale. Un taux d'apprentissage de '80' cycles a été adopté pour un réseau avec 2 couches cachées ayant '8' et '12' éléments, respectivement. Le résultat final est bien illustré par la multitude de figures ci-dessous.

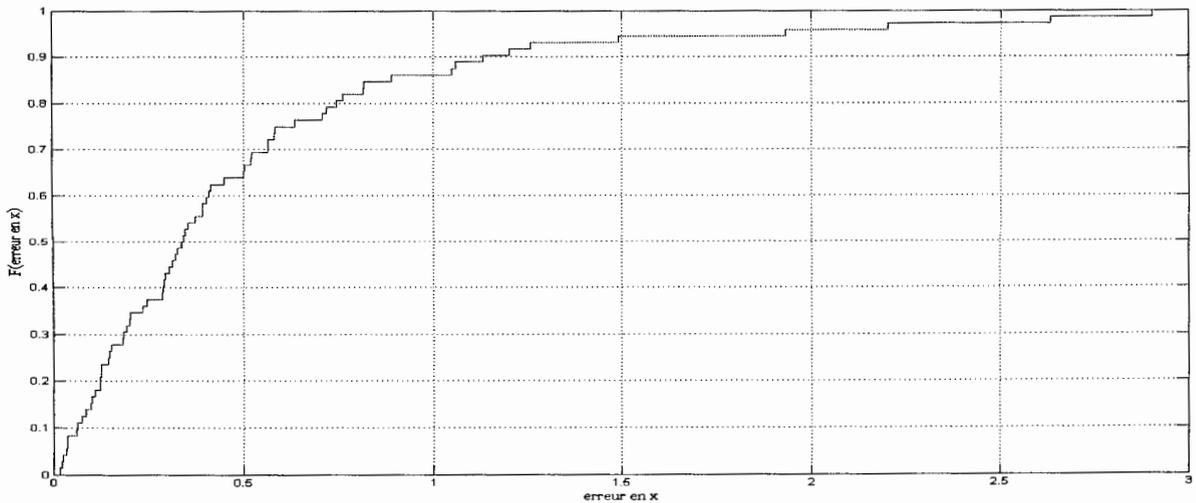


Fig. 6.3 : Distribution cumulative de l'erreur d'entraînement en x pour LOS\_1 – MLP.

Dans ce graphe (Figure 6.3), il est clair que 70 % des erreurs dans 'x' sont inférieures à 0.5 mètres et cela pour des distances allant jusqu'à 36 mètres<sup>22</sup>. Par contre, l'erreur maximale atteint les 2.7 mètres, mais cela ne présente pas plus que 2% des cas. Donc on peut parler d'une précision de '0.5' mètres pour une exactitude de 70%. La moyenne totale de l'erreur dans ce cas est de '0.5' mètres, ce qui représente un bon niveau d'erreur si on prend en considération que le système couvre jusqu'à 36 mètres.

<sup>22</sup> Bien que des mesures allant jusqu'à 40 mètres ont été faites, on n'a pu analyser celles dépassant les 36 mètres.

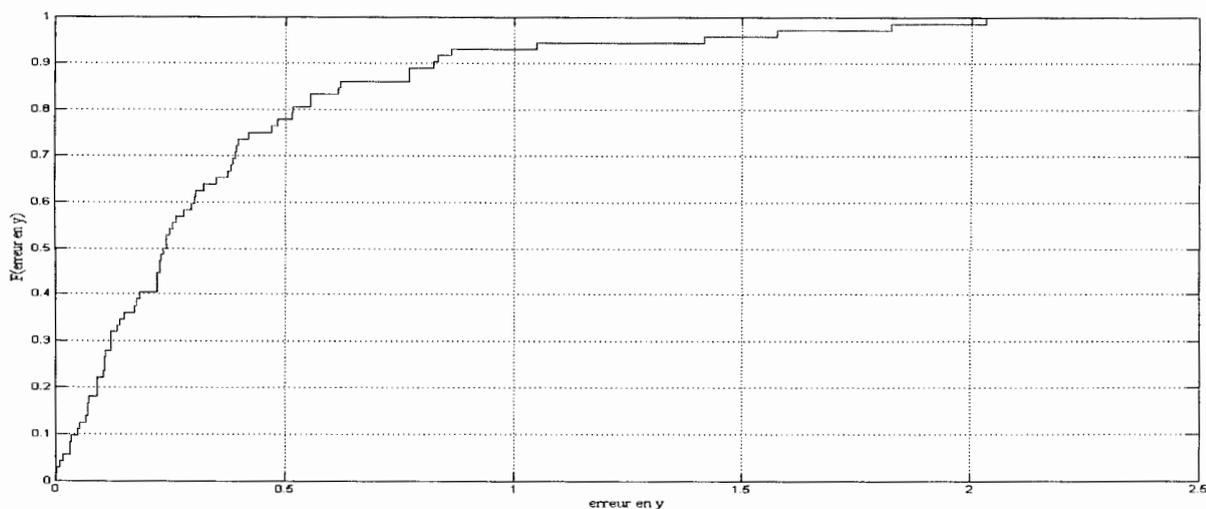


Fig. 6.4 : Distribution cumulative de l'erreur d'entraînement en y pour LOS\_1 – MLP.

Le taux d'erreur sur la composante 'y' (Figure 6.4) est assez proche de celui en 'x' bien qu'ici le système présente une précision de '0.5' mètres avec une exactitude de 80% environ. Il faut tenir compte du fait que 'y' ne dépasse pas les 26 mètres<sup>23</sup> et donc le rapport d'erreur est bien proche de celui en 'x'.

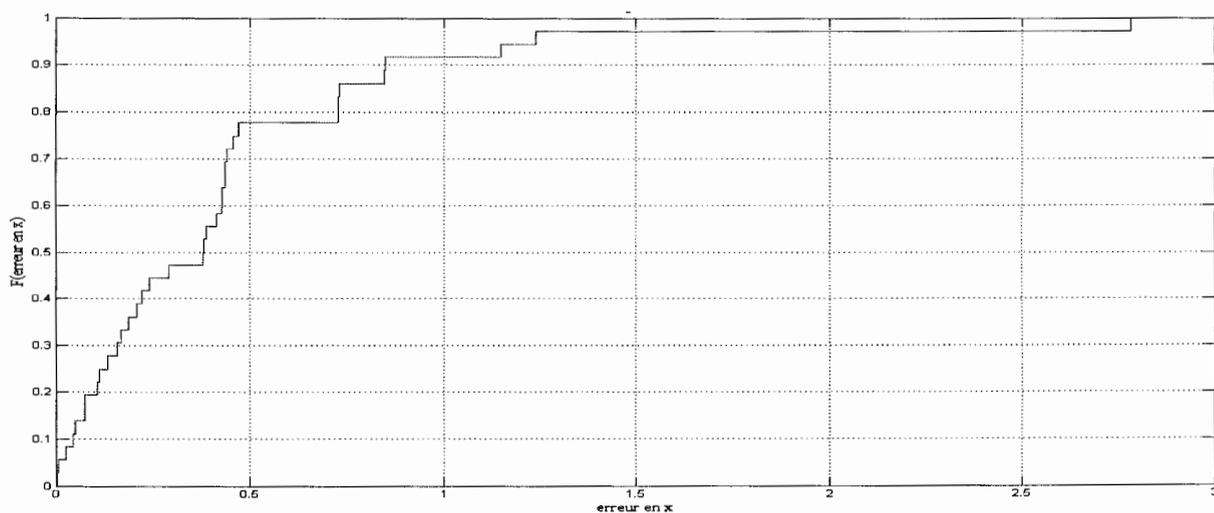


Fig. 6.5 : Distribution cumulative de l'erreur de test en x pour LOS\_1 – MLP.

<sup>23</sup> En réalité dans le système de coordonnées choisit 'y' varie entre 0 mètre et 26 mètres

L'erreur sur le test est plus importante que l'erreur en 'x' pour les données d'entraînement. Dans ce cas (Figure 6.5), l'erreur est de moins de '0.5' mètres pour 78% des cas, et donc il est évident que le réseau de neurones est capable de généraliser sur les données apprises, surtout que le total de données de test utilisées ici représente la moitié du nombre des données utilisées pour l'apprentissage; avec ces données couvrant pratiquement toutes les longueurs possibles (cf. figures 6.7 et 6.8). Il faut même remarquer que l'erreur maximale ne dépasse pas la valeur vue dans la figure 6.3.

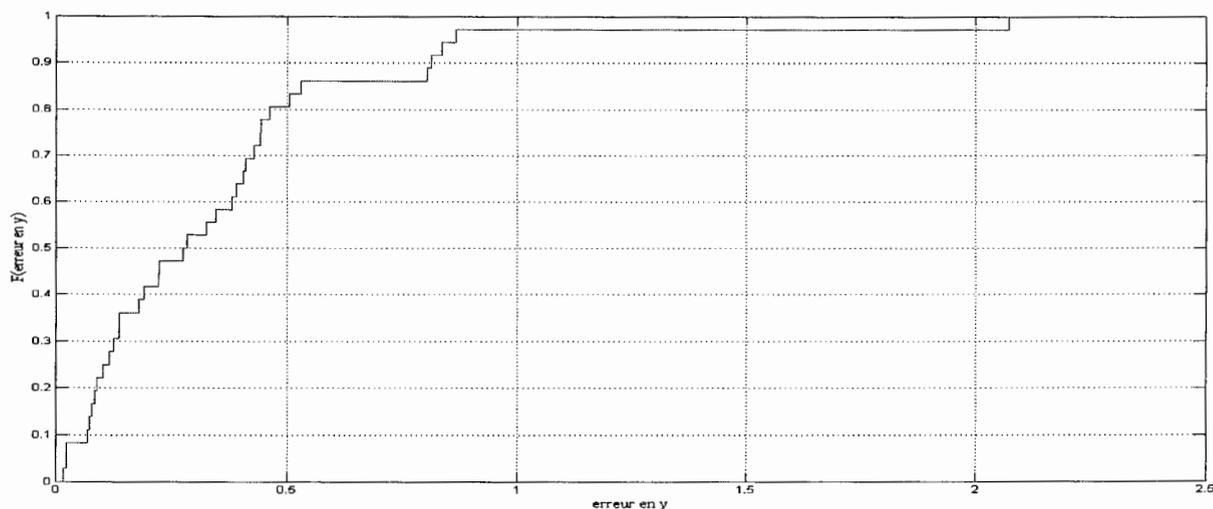


Fig. 6.6 : Distribution cumulative de l'erreur de test en 'y' pour LOS\_1 - MLP.

Ici (Figure 6.6) aussi l'erreur en 'y' présente un rapport proche de celui en 'x'. De plus, le comportement avec les données de test est semblable à celui de l'apprentissage et même mieux. Il faut mentionner ici qu'on a pu avoir une meilleure précision pour les données de test, cette dernière ne dépassant pas les 0.2 mètres. Mais dans ces cas, la généralisation du réseau était minime avec des erreurs de test allant jusqu'à 1.2 mètres. Alors il a fallu faire un compromis pour avoir une meilleure performance totale.

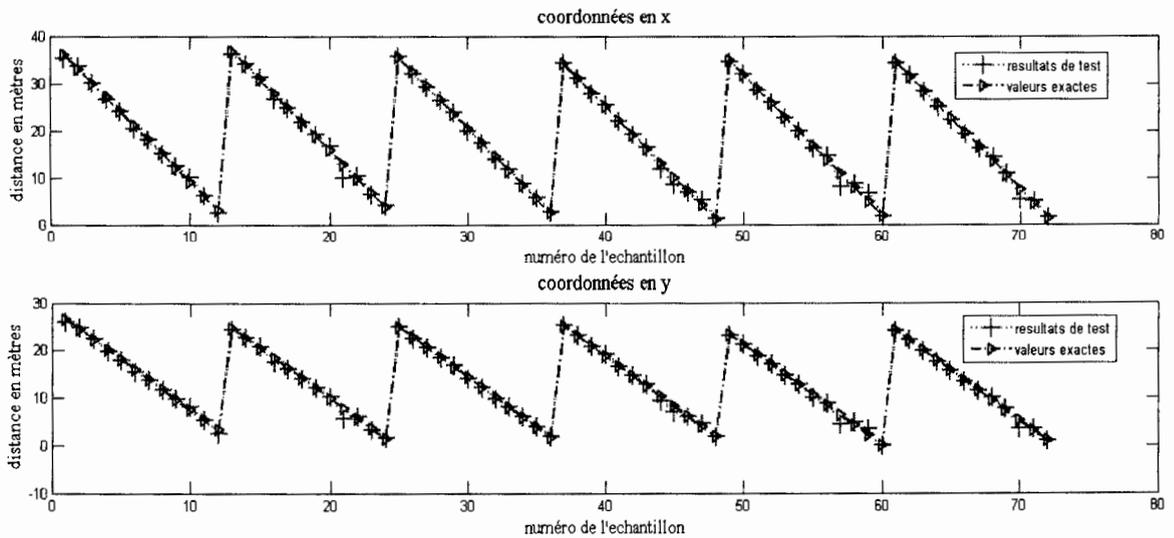


Fig. 6.7 : Comparaison entre estimation et valeur réelle pour les données d'entraînement pour LOS\_1 – MLP.

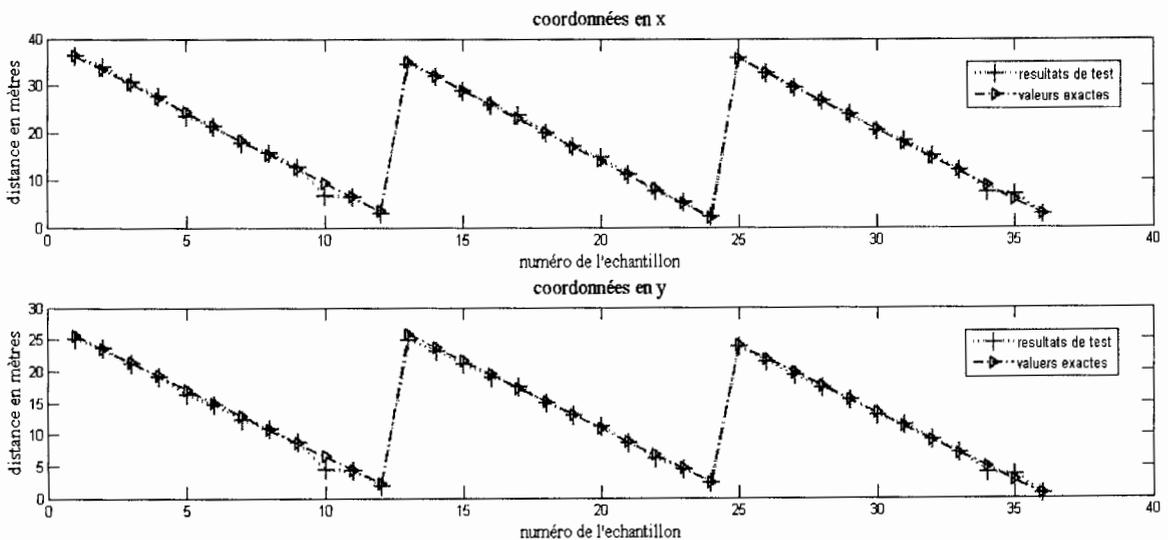


Fig. 6.8 : Comparaison entre estimation et valeur réelle pour les données de test pour LOS\_1 – MLP.

Les figures 6.7 et 6.8 ci-dessus représentent les sorties de la localisation du système par comparaison aux valeurs réelles des coordonnées. Elles donnent une preuve visuelle des CDF des erreurs discutées avant. Il est clair que le rapport de l'erreur est petit puisque les courbes se superposent sur une grande partie. Une autre conclusion qu'on peut tirer de ces graphes est que les réseaux de neurones sont

capables de représenter un algorithme de jumelage puisqu'on remarque que les estimations avec grande erreur se trouvent dans les mêmes zones pour les données antérieurement vues par le réseau et les nouvelles.

Finalement le tableau 6.5 résume les valeurs les plus importantes dans ce scénario.

Tableau 6.5 : Les différentes valeurs statistiques pour LOS\_1 et MLP.

	Données d'apprentissage		Données de test	
	Composante-x	Composante-y	Composante-x	Composante-y
Moyenne statistique	0.5156	0.3642	0.4391	0.3587
25% percentile	0.1462	0.1053	0.1209	0.1095
50% percentile	0.3397	0.2366	0.3805	0.2777
75% percentile	0.6133	0.4445	0.4663	0.4418

Dans l'analyse des résultats, une étude de la distance totale  $d = \sqrt{x^2 + y^2}$  peut être incluse. Bien que nous n'ayons pas inclus cette étude pour tous les scénarios, on la présente pour les données de tests de ce cas. En fait, cette erreur présente une région qui est un cercle centré à la position réelle et de rayon égal à 'd'. Suite aux résultats de test sur (x, y) on peut s'attendre que l'erreur en 'd' présente de bonnes valeurs. Le 50% percentile de cette erreur est de 0.363 mètres, et d'après la figure ... on voit qu'elle atteint une précision de '0.5' mètres avec une exactitude de '67%'. L'erreur maximale est de '3.5' mètres pour '2%' des cas.

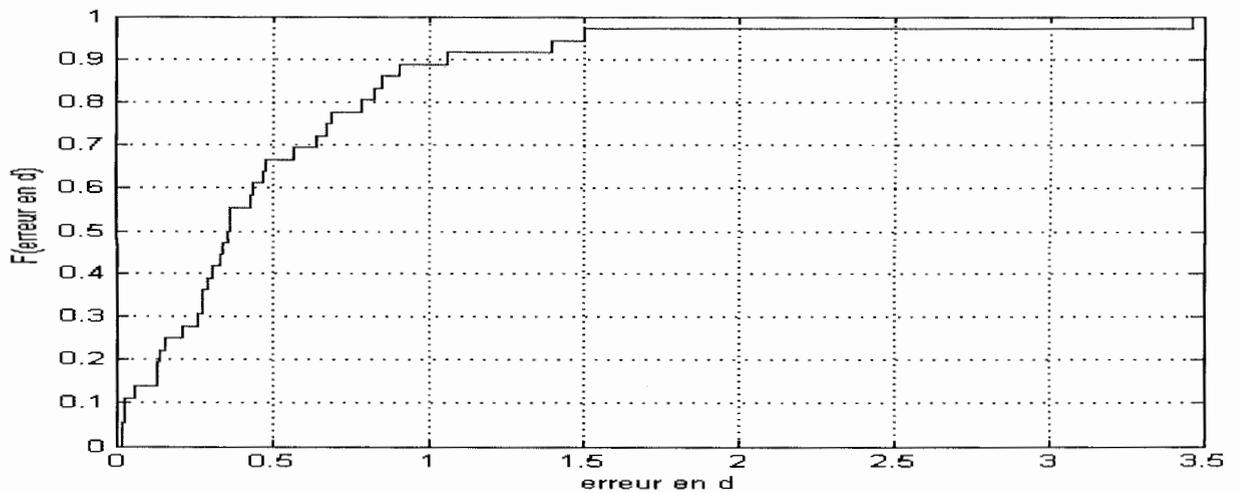


Fig. 6.9 : Distribution cumulative de l'erreur de test en 'd' pour LOS\_1 - MLP.

### 6.3.2 Avec les réseaux GRNN

Dans cette section, on analyse les résultats dans le cas GRNN. Une comparaison a naturellement été faite entre deux architectures de réseaux parmi les plus utilisées et la discussion permet de voir le rôle et l'importance du choix de l'architecture du réseau de neurones. On verra que la performance du système avec les réseaux GRNN est pire que le cas MLP. Vu que les réseaux GRNN sont puissants dans l'apprentissage, les chiffres liés aux données d'entraînement sont meilleurs que ceux des données de test. Vu la faiblesse des GRNN dans la généralisation au niveau du test, une grande différence apparaît dans la performance du système par rapport au MLP. Il faut spécifier que le paramètre d'étalonnage (the spread) avec la meilleure performance était de 0.1524.

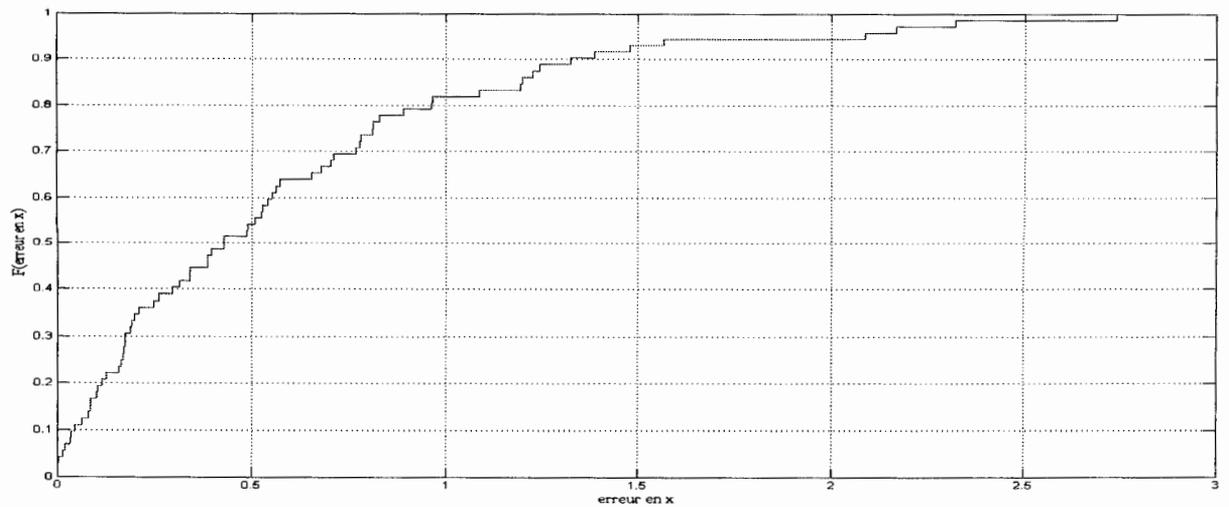


Fig. 6.10 : Distribution cumulative de l'erreur d'entraînement en x pour LOS\_1 – GRNN.

Donc pour l'entraînement en 'x' (Figure 6.10), l'erreur est plus petite que '0.5' mètre pour 51% des cas, et donc le système à ce niveau est moins performant que les cas MLP. D'autre part, l'erreur maximale est de '2.7' mètres environ et ce pour 1% des cas, ce qui est similaire à la performance MLP. Mais il reste qu'une grande partie des erreurs dépasse en valeur celles du cas MLP de sorte que la moyenne de l'erreur ici est de '0.5927' mètres. C'est une dégradation d'approximativement '0.1' mètre par rapport au meilleur cas.

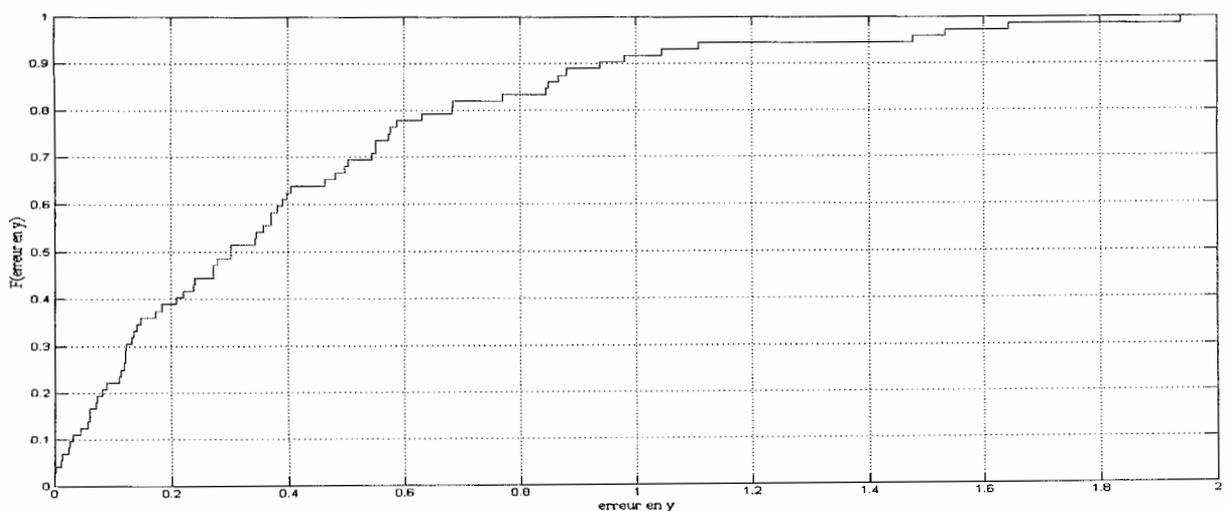


Fig. 6.11 : Distribution cumulative de l'erreur d'entraînement en y pour LOS\_1 – GRNN.

L'erreur d'entraînement en 'y' subit les mêmes effets que celle en 'x', avec une précision de '0.4' mètre pour 80%, il y a une augmentation d'environ '0.15' mètre par rapport au cas MLP. La moyenne statistique de l'erreur ici est de '0.4191' mètres (Figure 6.11).

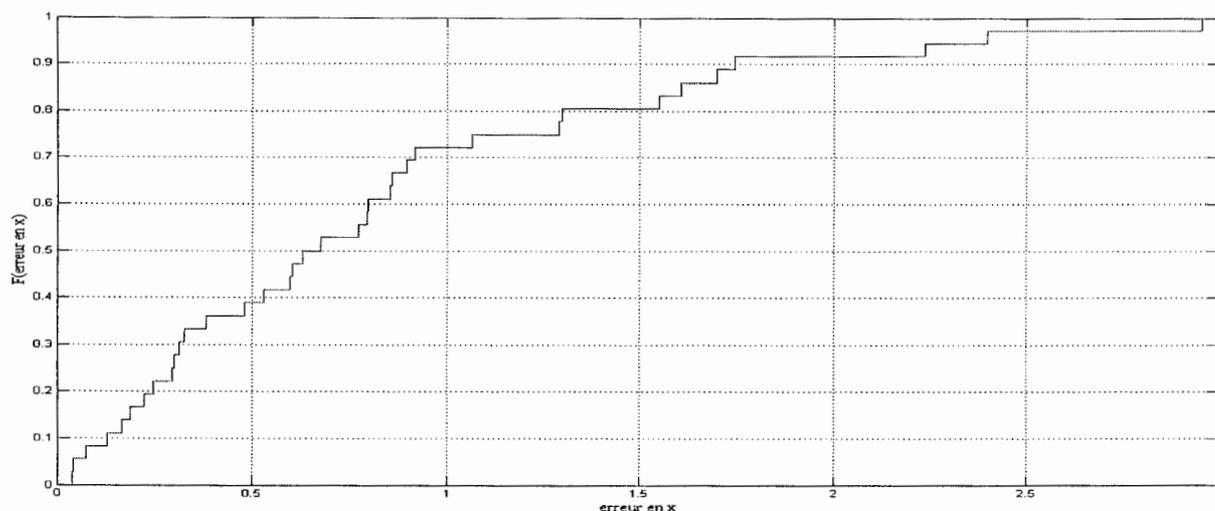


Fig. 6.12 : Distribution cumulative de l'erreur de test en x pour LOS\_1 - GRNN.

La dégradation au niveau des données de test (Figure 6.12) est pire que celle vue à l'entraînement. Ici la précision est de '1.35' mètres dans 78% des cas, ce qui représente une augmentation de plus de 0.8. La moyenne de l'erreur est de '0.8328' mètres. Donc la différence est de presque '0.4'. Cette erreur représente une dégradation de '0.4' sur la performance totale du système.

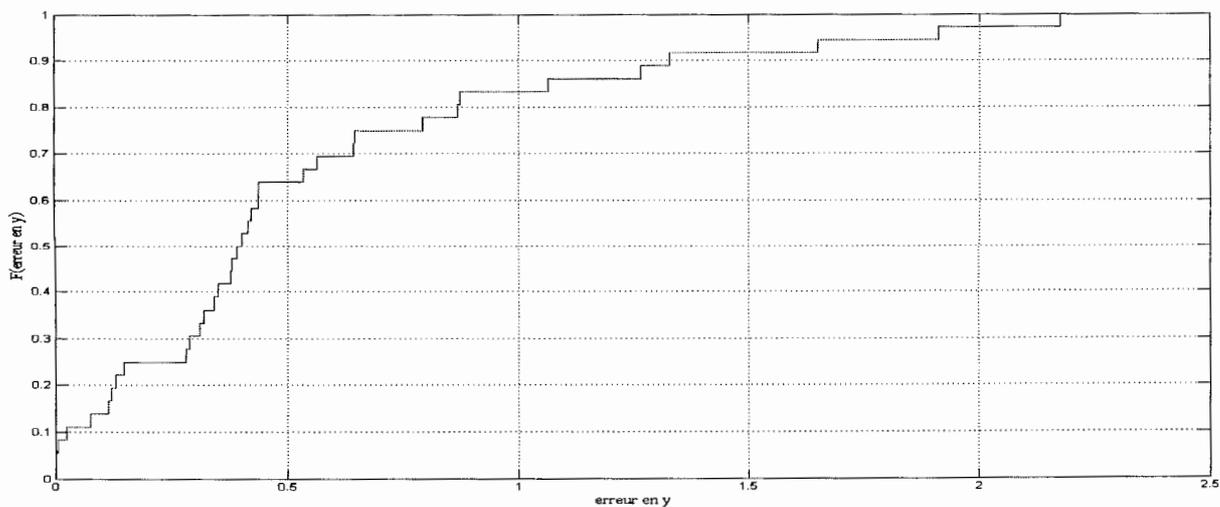


Fig. 6.13 : Distribution cumulative de l'erreur de test en y pour LOS\_1 - GRNN.

Pour la coordonnée en 'y' (Figure 6.13), on a une précision de '0.82' mètre dans 80% des cas, ce qui représente une fois de plus un résultat moins bon que le cas MLP. La moyenne statistique est de '0.5578' mètre avec une différence de '0.22' mètre dans la performance totale. Mais aussi, l'erreur maximale dépasse celle vue à l'entraînement par '0.7' mètre environ.

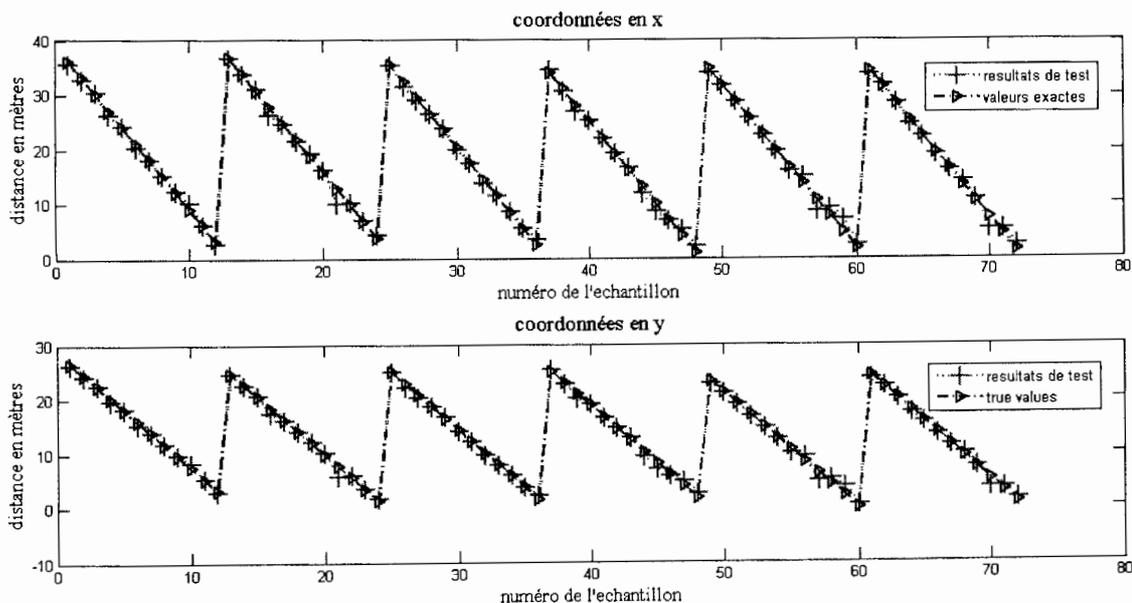


Fig. 6.14 : Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données d'entraînement pour LOS\_1 - GRNN.

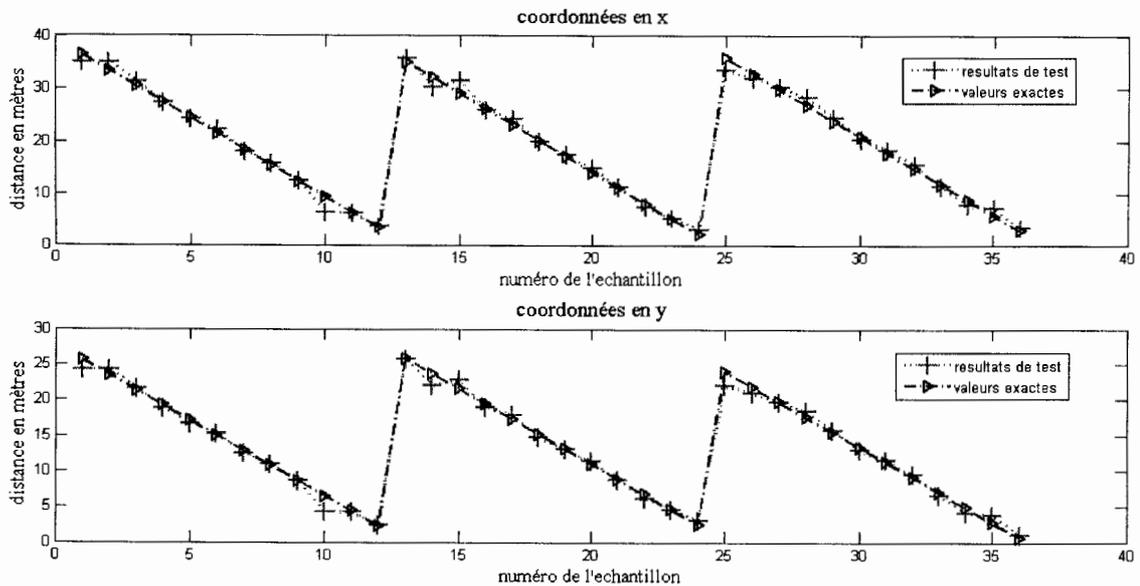


Fig. 6.15 : Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données de test pour LOS\_1 – GRNN.

Finalement les figures 6.14 et 6.15 illustrent les valeurs estimées par le système en comparaison avec les valeurs réelles dans les deux cas d'apprentissage et de test. Il est clair que les fluctuations et les erreurs visibles dans ces figures sont plus grandes que dans le cas précédent. Le tableau 6.6 ci-dessous résume les valeurs de la localisation LOS avec GRNN.

Tableau 6.6 : Les différentes valeurs statistiques pour LOS\_1 et GRNN.

	Données d'apprentissage		Données de test	
	Composante-x	Composante-y	Composante-x	Composante-y
Moyenne statistique	0.5927	0.4191	0.8328	0.5578
25% percentile	0.1654	0.1169	0.2970	0.2147
50% percentile	0.4278	0.3031	0.6529	0.3961
75% percentile	0.8126	0.5746	1.1783	0.7178

## 6.4 Résultats de localisation de la seconde campagne LOS\_2

### 6.4.1 Avec les réseaux MLP

Comme déjà indiqué pour cette campagne, il y avait plusieurs sources de transmission opérant sur des fréquences dans la bande UWB. Une autre différence est l'emplacement des antennes et la manière avec laquelle ces dernières se voient. Au début de ce travail, on s'attendait à avoir des résultats proches du cas LOS\_1 en supposant que l'effet des interférences serait minime sur le système. Puisque le système de mesure (l'analyseur) utilise un balayage spectral, il fallait s'attendre à ce que les puissances reçues sur certaines sous-bandes soient influencées, ce qui dit agir sur la totalité de la mesure, bien que ces sous-bandes ne constituent pas une grande partie du nombre total de sous-bandes. Par contre, puisque le système sous investigation est basé sur la technique par empreinte, on peut s'attendre à ce que ces variations deviennent une partie de l'empreinte et donc le système ne doit pas être affecté.

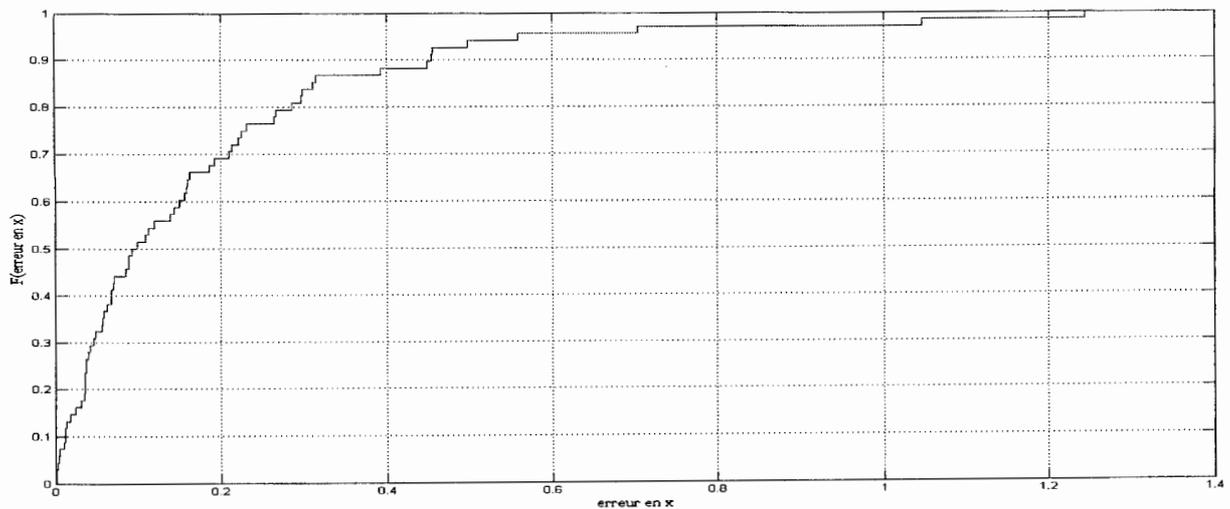


Fig. 6.16 : Distribution cumulative de l'erreur d'entraînement en x pour LOS\_2 - MLP.

Pour les réseaux MLP de ce scénario, l'entraînement se fait suivant l'algorithme d'entraînement par la méthode de « pondération du conjugué du gradient » (Scaled Conjugate Gradient - SCG). Cette méthode de rétropropagation est basée sur la direction du gradient mais elle fait une recherche non linéaire à chaque itération, ce qui rend l'entraînement plus rapide mais moins stable. Quand il est bien effectué, l'entraînement est très efficace. Mais la généralisation n'est pas aussi performante que dans le cas Bayésien. Cet algorithme a été choisi parce qu'il a donné la meilleure performance totale, en considérant qu'un compromis entre l'erreur en 'x' et l'erreur en 'y' a été fait. La figure 6.16 montre l'erreur sur la coordonnée en 'x' dans le cas d'entraînement. Une précision de '0.2'm pour une exactitude de 69% a été atteinte. La moyenne de l'erreur est de '0.1796'm, et l'erreur maximale est de '1.27'm dans 1% des cas. Ces valeurs sont impressionnantes, mais elles restent pour des données déjà vues par le réseau.

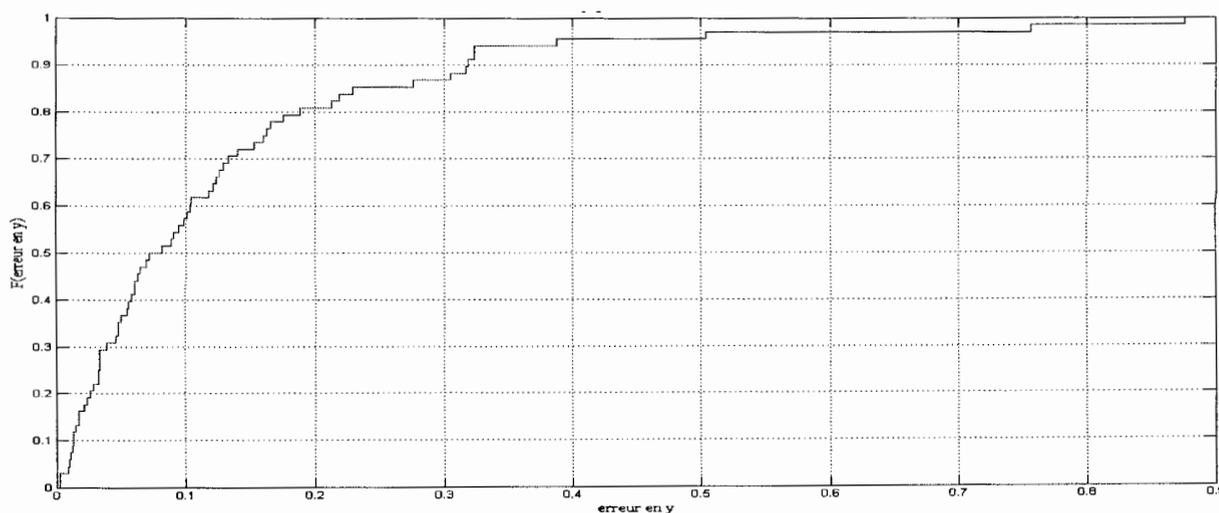


Fig. 6.17 : Distribution cumulative de l'erreur d'entraînement en y pour LOS\_2 - MLP.

L'erreur en 'y' sur les données d'entraînement (Figure 6.17) est aussi faible que celle de 'x' avec une précision de moins de '0.2'm pour 81% des cas. Il faut toujours prendre en considération le fait que les distances en 'y' sont plus petites que celles en 'x'. Le maximum d'erreur ici est de '0.87'm. Il est atteint dans 1% des cas.

La moyenne statistique de cette erreur est de '0.1309'm. La performance aussi est meilleure que pour MLP-LOS\_1.

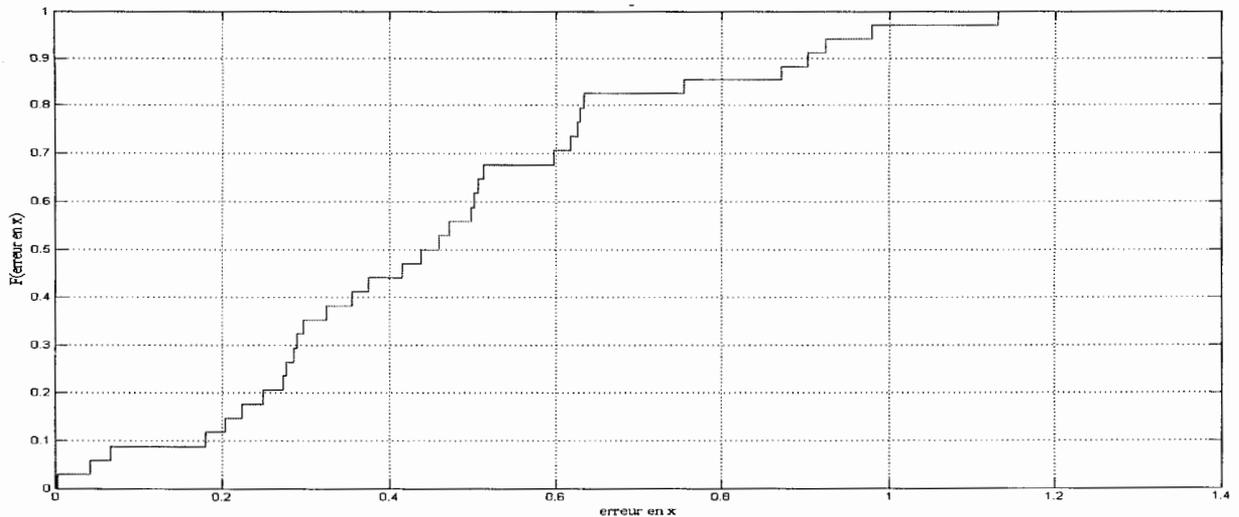


Fig. 6.18 : Distribution cumulative de l'erreur de test en x pour LOS\_2 – MLP.

Pour les données de test, et comme déjà prévu, la performance du système va se dégrader. Dans la figure 6.18, l'erreur de test en 'x' offre une précision de '0.6'm dans 68% des cas. Des réseaux avec une meilleure erreur de test en 'x' ont été trouvés, mais celui-là a été choisi parce que la combinaison d'erreur 'x;y' était la meilleure. La première chose à remarquer est le grand changement dans la valeur de l'erreur entre l'entraînement et le test. Cela est normal pour ce type d'entraînement puisqu'il n'est pas aussi puissant que l'algorithme Bayésien dans la généralisation. Par contre l'erreur maximale est toujours du même degré que celle dans les données d'entraînement. Finalement, la moyenne de l'erreur est de '0.4680'm, une dégradation de '0.03'm du cas LOS\_1, et donc le système total garde une performance comparable à celle du cas LOS précédent.

La figure 6.19 illustre l'erreur de test en 'y'. La performance est remarquable avec une précision de moins de '0.4'm avec une exactitude de 76%. La moyenne de '0.3285'm, moins bonne que celle de l'entraînement; garde une limite acceptable et

même favorable. L'erreur maximale de '0.91'm comparée à '0.87'm dans le cas d'entraînement apparaît dans 2% des cas.

Donc d'après les résultats vus dans figure 6.18 et 6.19, il est clair que la généralisation ici est moins performante que dans le scénario choisi dans LOS\_1. Par contre la performance totale du système est comparable à cette dernière. Donc l'algorithme SCG est capable de bien apprendre les caractéristiques de ce scénario aux réseaux. Un dernier mot sur la performance en 'y', on soupçonne que l'emplacement des antennes dans ce scénario était le facteur derrière cette amélioration dans l'approximation en 'y'. En fait, dans le premier cas l'antenne de transmission était placée à équidistance des 2 parois, alors qu'ici l'antenne était placée proche de la paroi gauche permettant ainsi une plus grande variation entre les mesures allant de gauche à droite.

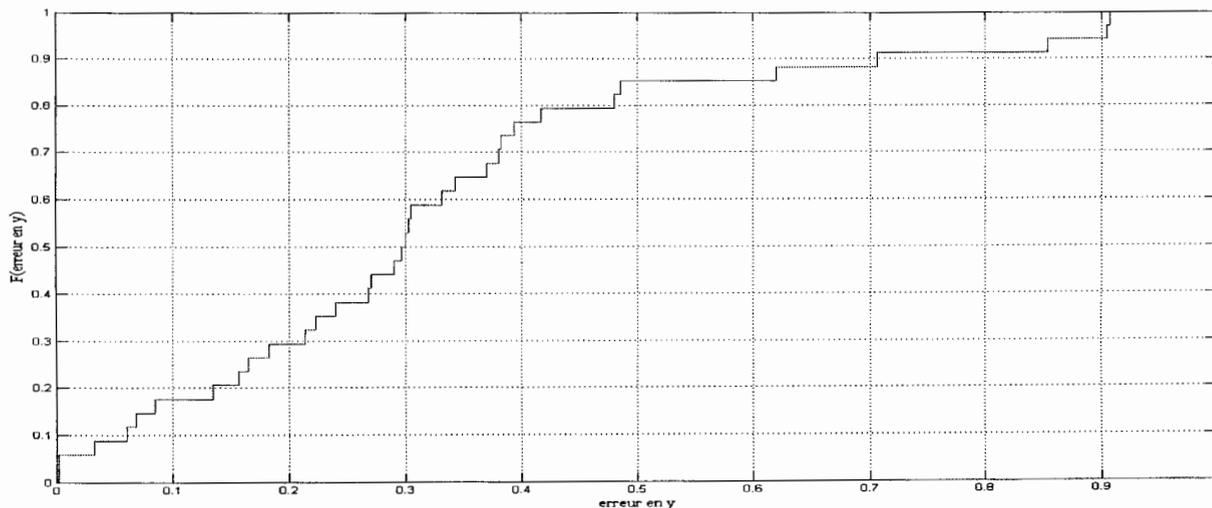


Fig. 6.19 : Distribution cumulative de l'erreur de test en y pour LOS\_2 - MLP.

Les figures 6.20 et 6.21 offrent une vue plus réaliste sur l'estimation du système et les vraies valeurs des coordonnées.

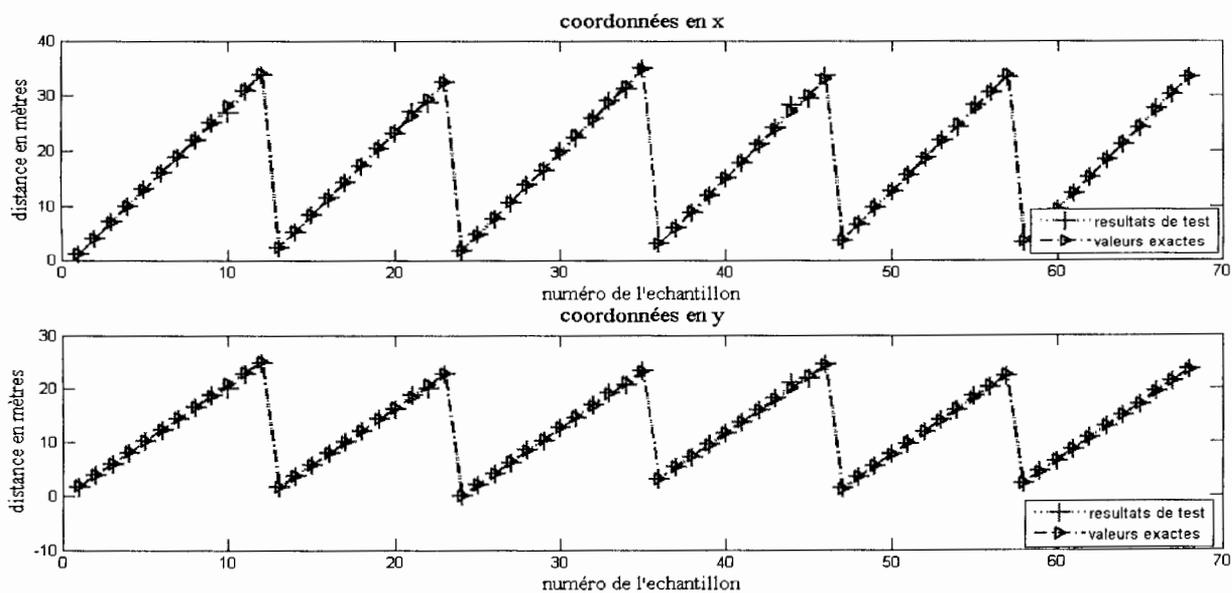


Fig. 6.20 : Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données d'entraînement pour LOS\_2 - MLP.

Vu la forte capacité d'entraînement des algorithmes SCG, les deux courbes représentant les vraies valeurs et celles estimées pour les données d'entraînement sont presque parfaitement superposées.

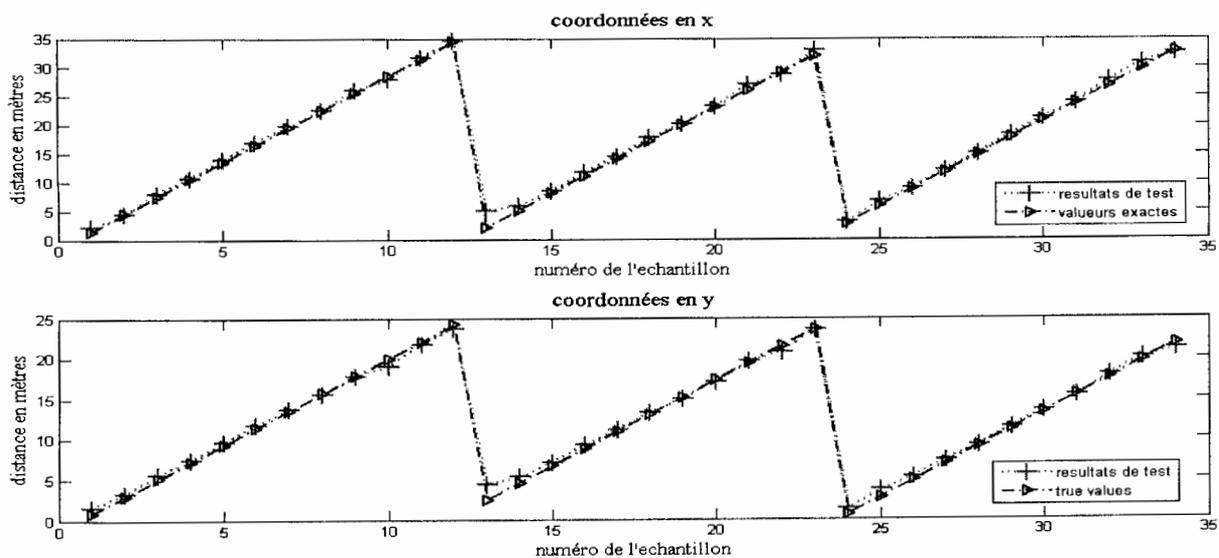


Fig. 6.21 : Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données de test pour LOS\_2 - MLP.

Pour les données de test, la figure 6.21 est en accord avec les discussions effectuées précédemment. Par la suite, on remarque visuellement que l'erreur est plus grande que le cas d'entraînement puisque les désaccords entre les 2 courbes sont plus grands. Mais il est clair aussi que cette erreur est acceptable. Le tableau 6.7 résume les valeurs discutées pour ce scénario.

Tableau 6.7 : Les différentes valeurs statistiques pour LOS\_2 et MLP.

	Données d'apprentissage		Données de test	
	Composante-x	Composante-y	Composante-x	Composante-y
Moyenne statistique	0.1796	0.1309	0.4680	0.3285
25% percentile	0.0368	0.0332	0.2771	0.1651
50% percentile	0.0955	0.0769	0.4477	0.2976
75% percentile	0.2282	0.1620	0.6266	0.3935

#### 6.4.2 Avec les réseaux GRNN

Le réseau GRNN n'est pas capable de fournir la même performance que le réseau MLP. Par contre les discussions incluses dans la section 6.3.2 sont aussi valables ici. Subséquemment dans cette section, on se contente d'inclure les figures et de noter les valeurs importantes sans grande discussion de ces valeurs. Néanmoins, il faut spécifier qu'ici le réseau GRNN ayant donné la meilleure performance avait un paramètre d'étalonnage avec une valeur de 0.0512. Et puisque d'habitude plus ce paramètre est grand, plus le réseau est capable d'approximer les relations sous étude, on peut s'attendre à ce que la performance ne soit pas très bonne.

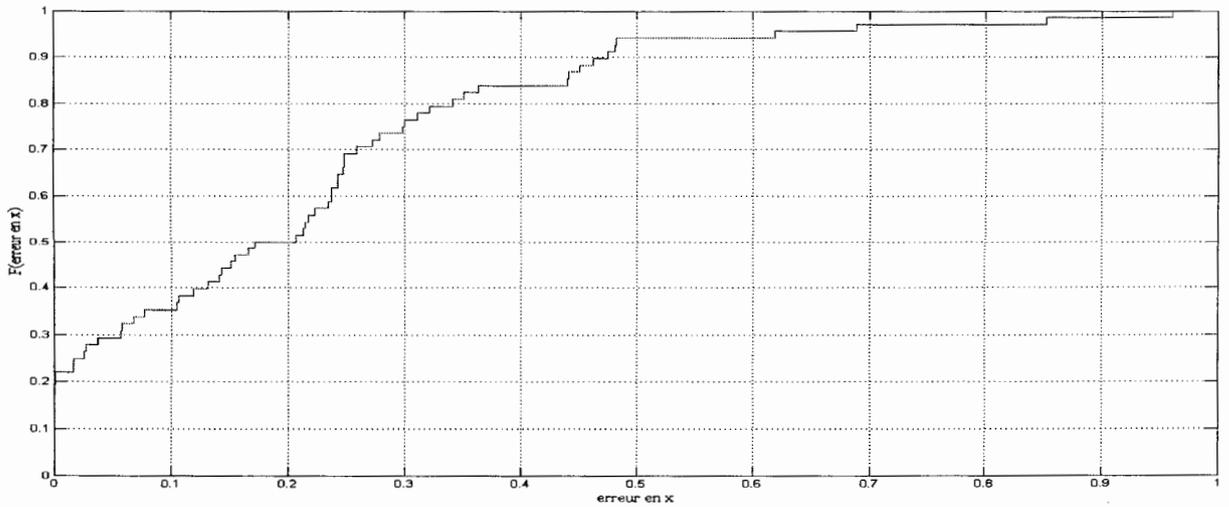


Fig. 6.22 : Distribution cumulative de l'erreur d'entraînement en x pour LOS\_2 – GRNN.

La précision de ce système est de moins de '0.3'm pour une exactitude de 75%. La moyenne de cette erreur est de '0.2093'm, et l'erreur maximale de '0.96'm est atteinte dans 1% des cas (Figure 6.22).

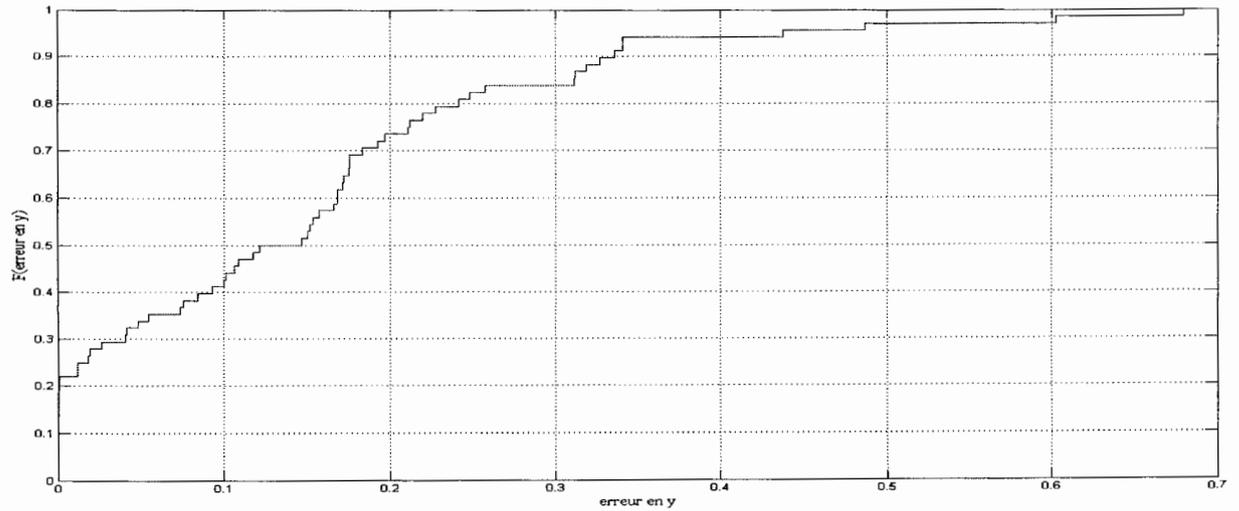


Fig. 6.23 : Distribution cumulative de l'erreur d'entraînement en y pour LOS\_2 – GRNN.

L'erreur en 'y' provenant des données d'entraînement (Figure 6.23) présente une précision de '0.2'm avec une exactitude de 73%. La moyenne statistique de cette erreur a une valeur de '0.1480'm, et la valeur maximale est de '0.68'm pour 1% des cas.

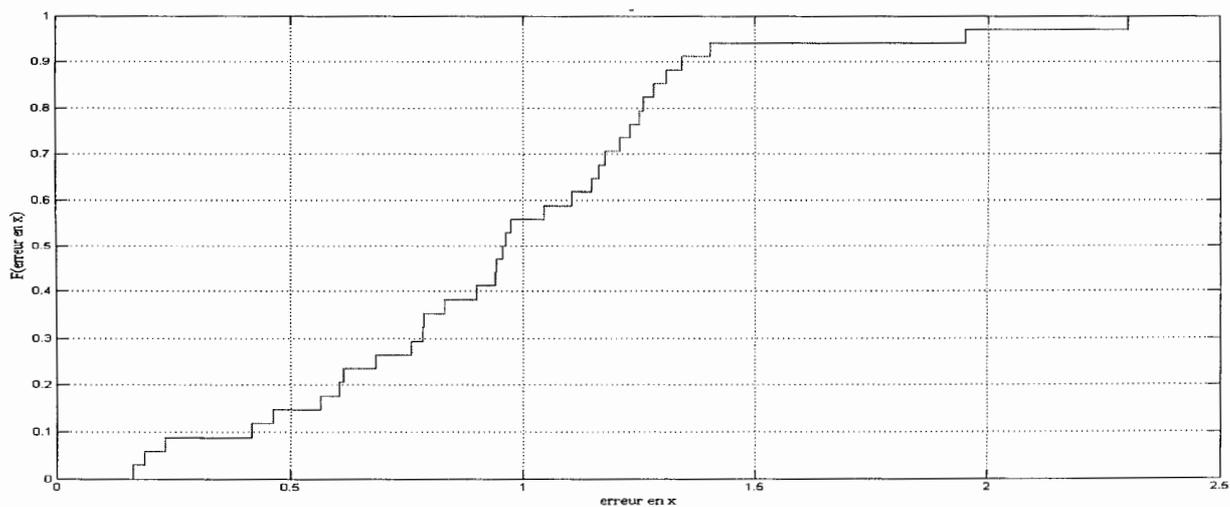


Fig. 6.24 : Distribution cumulative de l'erreur de test en x pour LOS\_2 - GRNN.

Comme déjà prévu, l'erreur sur l'ensemble des tests est pire que celle sur l'ensemble des données d'entraînement. La figure 6.24 montre une précision de '1' m dans 56% des cas, une grande dégradation par rapport à celle vue dans la figure 6.22. L'erreur maximale est de '2.35' m dans 1% des cas et la moyenne de cette erreur est de '0.9685' m.

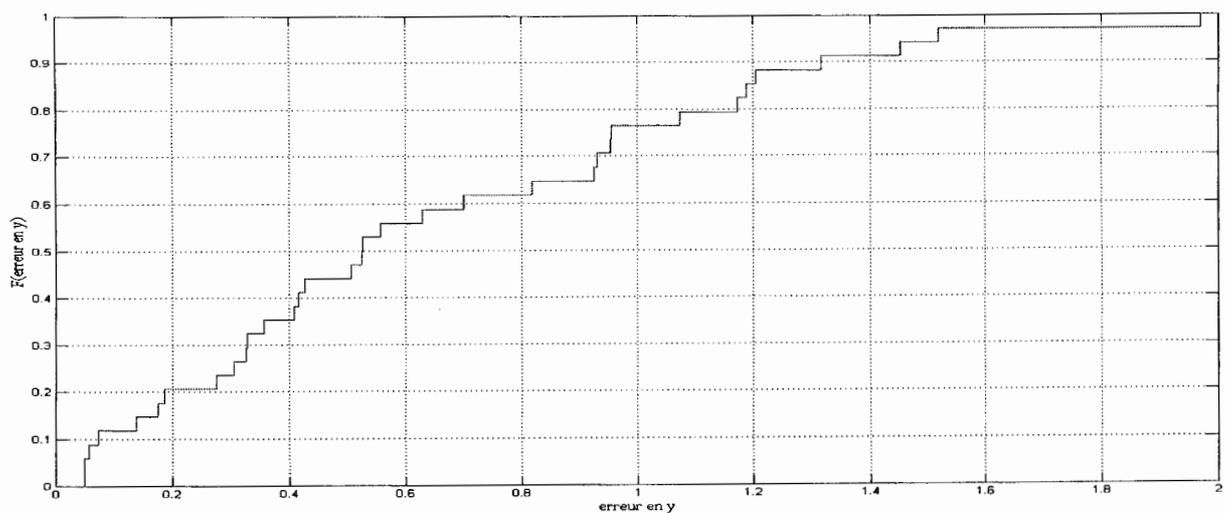


Fig. 6.25 : Distribution cumulative de l'erreur de test en y pour LOS\_2 - GRNN.

L'erreur en 'y' (Figure 6.25), bien que plus petite que celle en 'x', est quand même inacceptable par comparaison aux valeurs obtenues auparavant. La précision est de '0.7'm avec une exactitude de 59%. L'erreur maximale a une valeur de '1.97'm atteinte dans 2% des cas. Finalement, la moyenne de l'erreur en 'y' est de '0.6617'm.

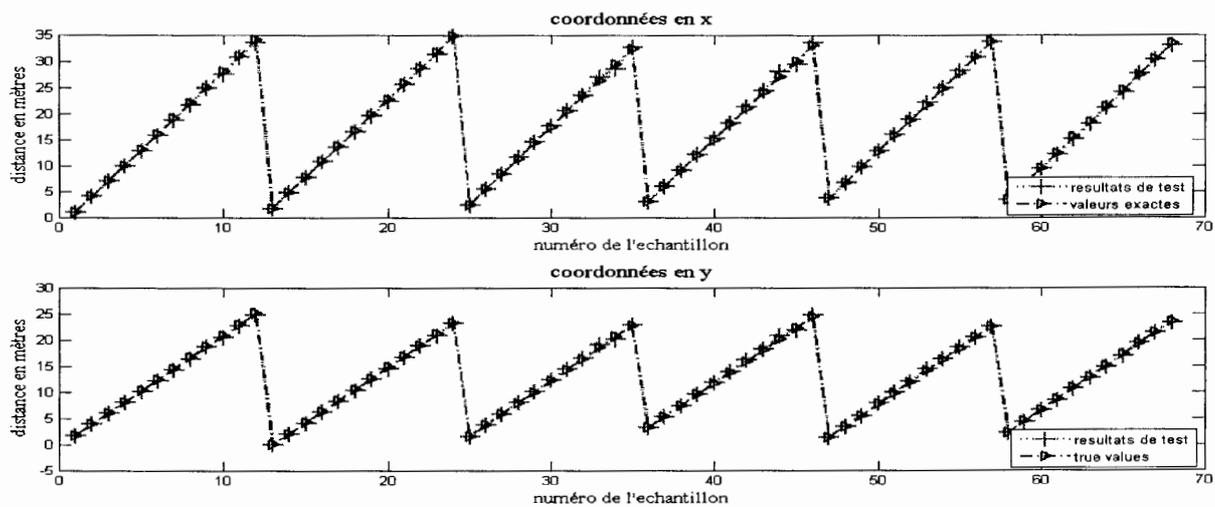


Fig. 6.26 : Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données d'entraînement pour LOS\_2 - GRNN.

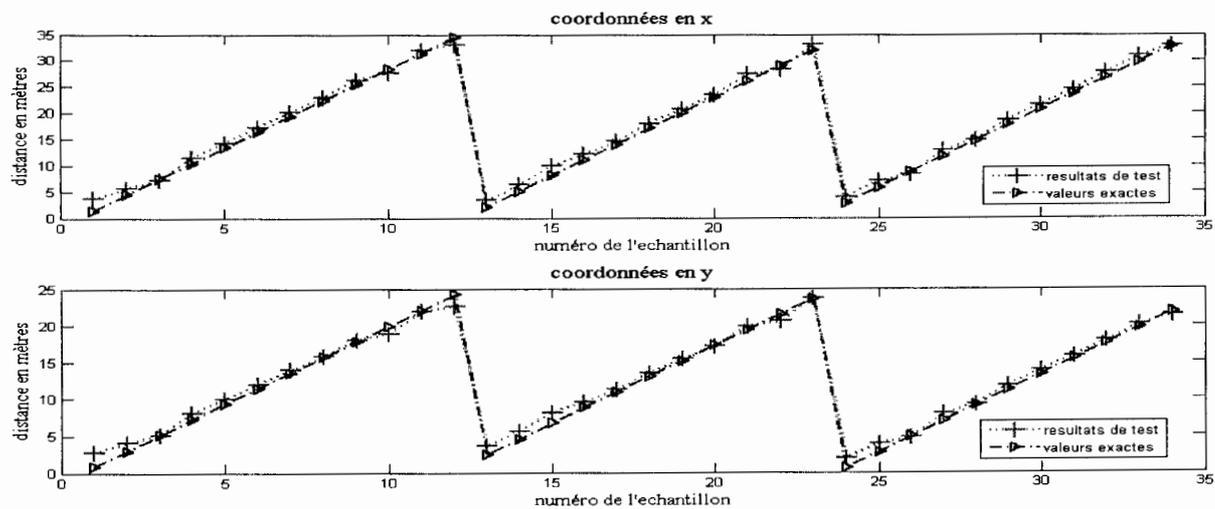


Fig. 6.27 : Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données de test pour LOS\_2 - GRNN.

Finalement les figure 6.26 et 6.27 montrent les différences entre les positions réelles et celles estimées par les réseaux GRNN, pour les données de testes.

Tableau 6.8 : Les différentes valeurs statistiques pour LOS\_2 et GRNN.

	Données d'apprentissage		Données de test	
	Composante-x	Composante-y	Composante-x	Composante-y
Moyenne statistique	0.2093	0.1480	0.9685	0.6617
25% percentile	0.0211	0.0149	0.6811	0.3059
50% percentile	0.1891	0.1337	0.9587	0.5246
75% percentile	0.2987	0.2112	1.2316	0.9564

## 6.5 Résultats de localisation pour la troisième campagne NLOS

Pour le scénario NLOS, les mesures ont été prises jusqu'à une distance de 36 mètres après laquelle le signal s'est rendu inidentifiable. En analysant ces mesures, et à cause de grandes fluctuations et pertes dans ce signal, on a pu utiliser des mesures jusqu'à 27 mètres dans le système de localisation étudié. En réalité, la précision du système était plus grande pour une distance allant à 20 mètres après laquelle la performance a diminué. Mais puisque les signaux, jusqu'à 27 mètres, étaient analysables, on a choisi de garder cette distance.

### 6.5.1 Avec les réseaux MLP

Les réseaux MLP avec la meilleure performance dans ce scénario sont ceux entraînés par l'algorithme du gradient pondéré (SCG) déjà décrit dans le cas du LOS\_2. L'architecture du réseau ici est légèrement différente des cas précédents. Le nombre de couches cachées reste 2. Par contre, le nombre d'éléments par couche est de '7' et '12' éléments, respectivement. Le nombre d'altérations utilisées pour l'entraînement du réseau est de 800. Il faut noter qu'à ce nombre, il n'y a pas eu une mémorisation (un sur-apprentissage) des données d'entraînement. Logiquement, on s'attend à une performance moindre que celles des cas LOS vu les paramètres et conditions des signaux reçus dans un cas d'absence de ligne directe. La majorité des

travaux dans la littérature vient appuyer cette supposition. Les graphes et figures ci-dessous présentent les résultats à analyser.

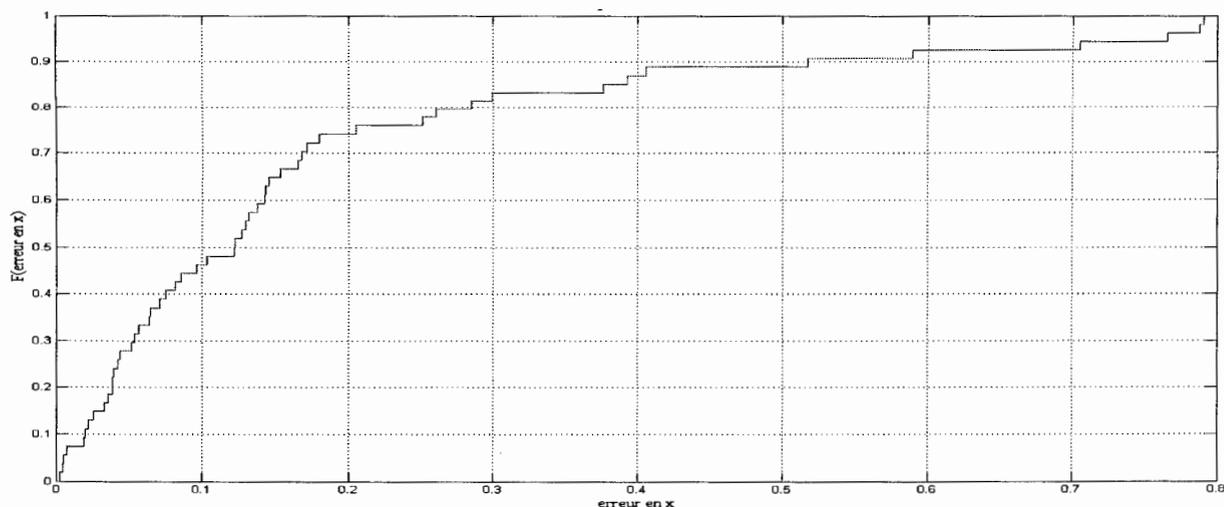


Fig. 6.28 : Distribution cumulative de l'erreur d'entraînement en x pour NLOS – MLP.

Dans la figure 6.28, on remarque que la précision est de '0.2'm à une exactitude de 74%. Alors qu'à première vue cette valeur semble être très bonne, il faut prendre en considération que ce sont les données déjà vues par le réseau et que l'algorithme SCG est performant à ce niveau. Une autre considération à prendre en compte est la distance totale couverte dans ce cas, qui est de '7'm moins que les cas LOS. Néanmoins une telle performance pour un état NLOS est supérieure à une grande majorité des valeurs vues dans notre recherche bibliographique. La valeur maximale de l'erreur est de '0.79'm dans 2% des cas. La moyenne totale de l'erreur est de '0.1825'm, une très bonne valeur dans un cas NLOS et pour une distance de '27'm. En regardant cette erreur, on peut voir l'avantage de l'adoption d'un algorithme de localisation par empreinte. En effet, bien que c'est un cas NLOS, la performance du système semble garder toujours un niveau stable.

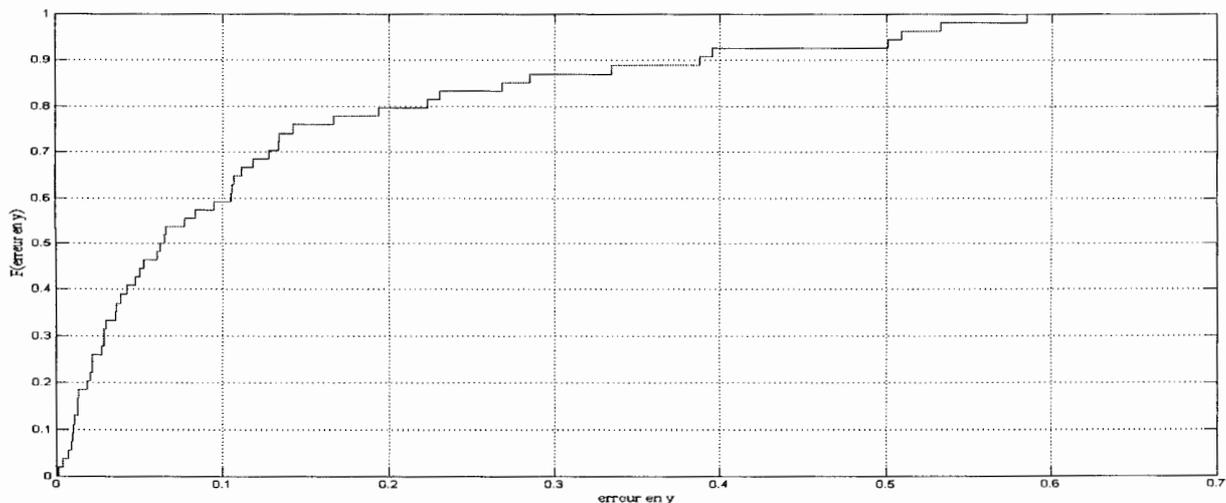


Fig. 6.29 : Distribution cumulative de l'erreur d'entraînement en y pour NLOS – MLP.

L'erreur en 'y' (Figure 6.29) présente le même comportement que celle en 'x'. Avec une précision de '0.195'm dans 80% des cas, la performance du système est remarquable. L'erreur maximale est de '0.59'm dans 2% des cas, ce qui représente la meilleure valeur obtenue jusqu'à présent. L'erreur moyenne est de '0.1259'm. On peut conclure que l'estimation de 'y' a une performance comparable à celle de 'x'.

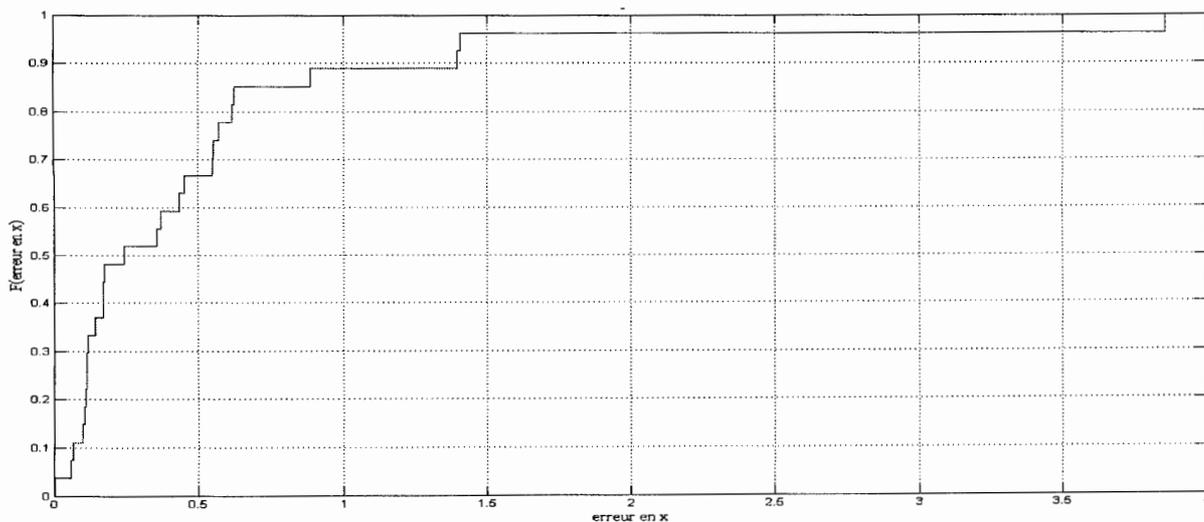


Fig. 6.30 : Distribution cumulative de l'erreur de test en x pour NLOS – MLP.

Puisque l'algorithme SCG est moins performant que l'algorithme BR au niveau de la généralisation, on s'attend à ce que l'erreur en 'x' pour les nouvelles

données soit plus grande que dans les cas d'entraînement. D'après la figure 6.30, qui illustre cette erreur, la précision du système est de '0.5'm dans 67% des cas. Cela représente une grande dégradation par rapport à l'erreur d'entraînement. Toutefois elle représente une très bonne valeur pour un scénario NLOS comme le notre. La moyenne de cette erreur est de '0.510'm, donc supérieure de '0.08'm par rapport au meilleur cas LOS, ce qui rend cette erreur acceptable dans un cas NLOS. Par contre l'erreur maximale est de '3.7'm mais pour seulement 2% des cas, ce qui peut être supporté dans un système de localisation

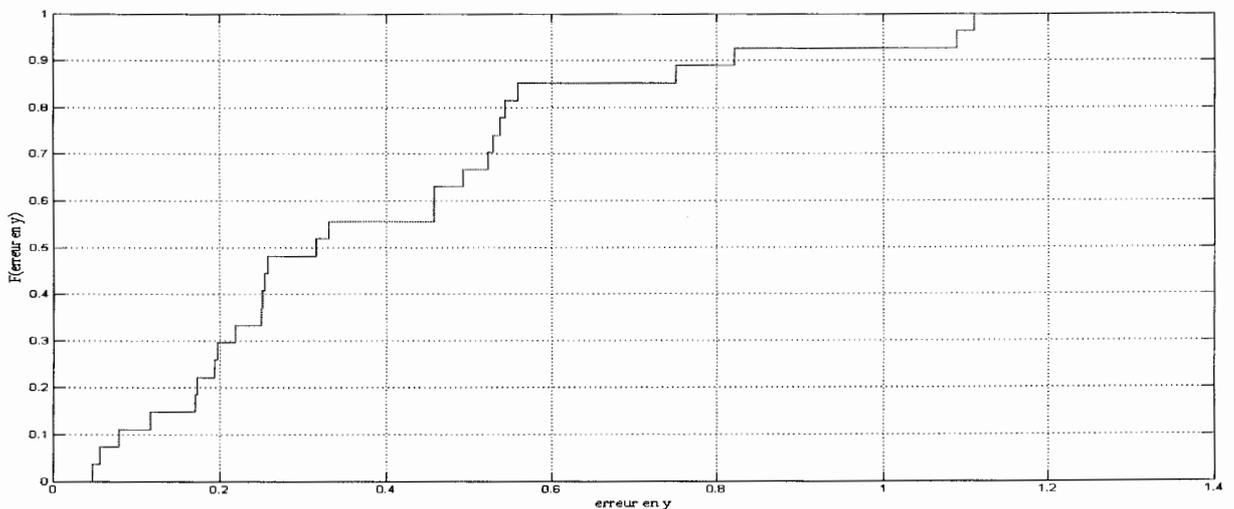


Fig. 6.31 : Distribution cumulative de l'erreur de test en y pour NLOS - MLP.

L'erreur de test en 'y' (Figure 6.31) est tolérable aussi. Elle réalise une précision de '0.5'm avec une exactitude de 55%, et un maximum de '1.1'm pour 7% des cas, ce qui représente une dégradation acceptable par rapport aux données de test. La moyenne de l'erreur sur l'ensemble est de '0.3991'm, donc une bonne valeur même en comparaison aux scénarios LOS\_1 et LOS\_2.

Les figures 6.32 et 6.33 offrent une représentation graphique de la performance du système en comparant les positions réelles et estimées en 'x' et 'y'. On ne va pas commenter ces graphes puisque leurs résultats reflètent d'une manière directe tout ce qui a été discuté auparavant pour MLP-NLOS dans cette section.

On rappelle une dernière fois qu'ici la localisation s'effectue jusqu'à '27'm. Alors bien qu'à première vue il semble que la performance dans le cas NLOS est meilleure que celle dans LOS, en vérité elle ne l'est pas. Conséquemment, il est possible de dire que la performance du MLP dans le cas NLOS est moins bonne que celle du cas LOS.

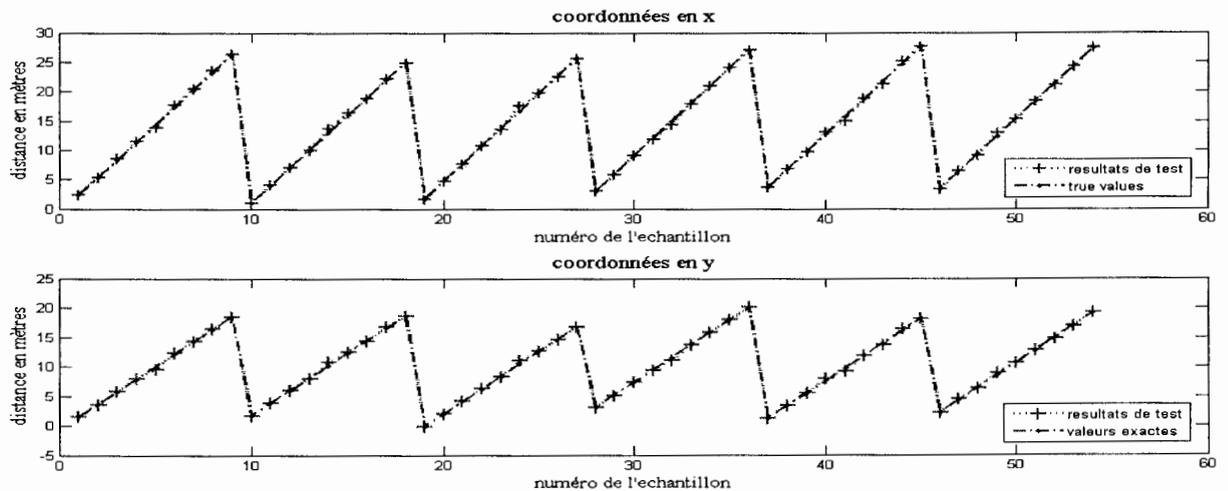


Fig. 6.32 : Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données d'entraînement pour NLOS – MLP.

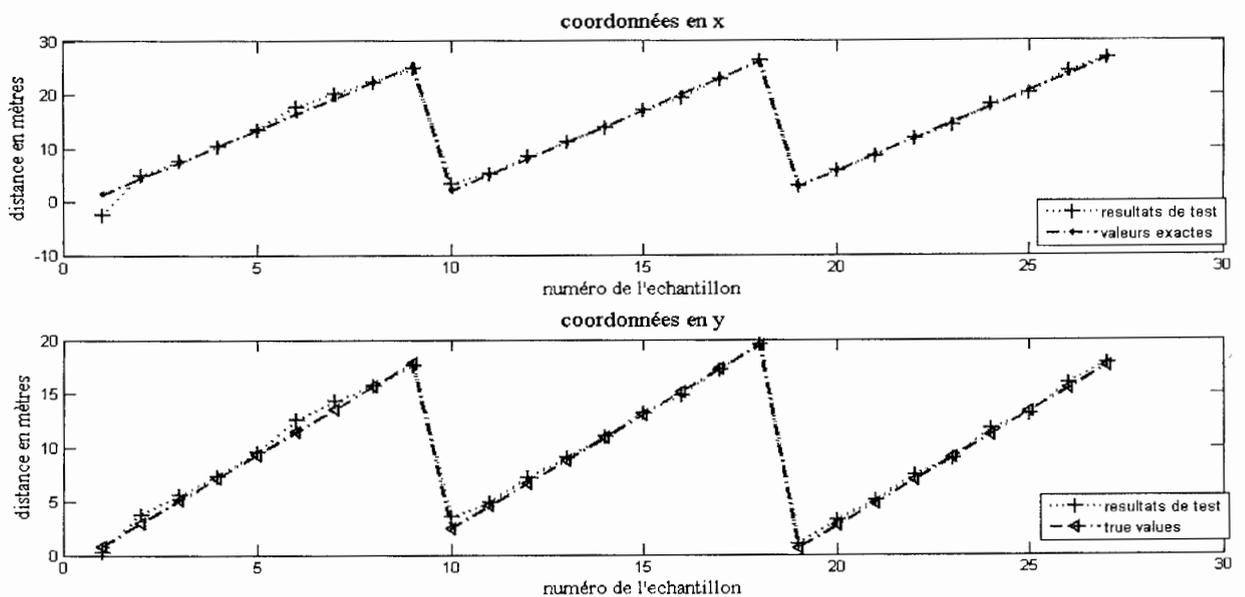


Fig. 6.33 : Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données de test pour NLOS – MLP.

Tableau 6.9 : Les différentes valeurs statistiques pour NLOS et MLP.

	Données d'apprentissage		Données de test	
	Composante-x	Composante-y	Composante-x	Composante-y
Moyenne statistique	0.1825	0.1259	0.5100	0.3991
25% percentile	0.0422	0.0219	0.1129	0.1947
50% percentile	0.1226	0.0638	0.2431	0.3161
75% percentile	0.2053	0.1422	0.5668	0.5350

D'après le tableau 6.9, le système de localisation dans le cas NLOS présente une précision de '0.535'm avec une exactitude de 75% pour la coordonnée en 'y', et une précision de 0.5668 dans 75% des cas en 'x'. Par la suite, si on compare ces valeurs à la plupart des résultats se trouvant dans la littérature, on trouve que ce sont de très bonnes valeurs surtout que c'est un cas NLOS qui couvre une distance de 27 mètres. Mais il faut aussi mentionner que pour des distances plus petites, et donc semblables à la plupart des distances couvertes dans la littérature, l'erreur de ce système diminue considérablement aussi.

### 6.5.2 Avec les réseaux GRNN

Dans le cas NLOS, la performance des réseaux GRNN n'est pas meilleure que celle du MLP non plus. Toutefois, dans ce scénario les réseaux GRNN ont une meilleure performance totale que dans les cas LOS. Pour expliquer cette amélioration, il faut regarder les fonctions entre les paramètres et la distance dans ce scénario. On peut formuler que dans le cas NLOS la relation empreintes/position est plus identifiable par les éléments constructifs des réseaux GRNN. Comme toujours pour les réseaux GRNN, l'architecture est plutôt identique aux cas précédents. Par contre une fois de plus on a dû chercher le facteur d'étalonnage qui donne la meilleure performance et sa valeur était égale à 0.1456. Les figures et graphes ci-dessous étalent les différentes erreurs et valeurs obtenues dans notre investigation de ce scénario.

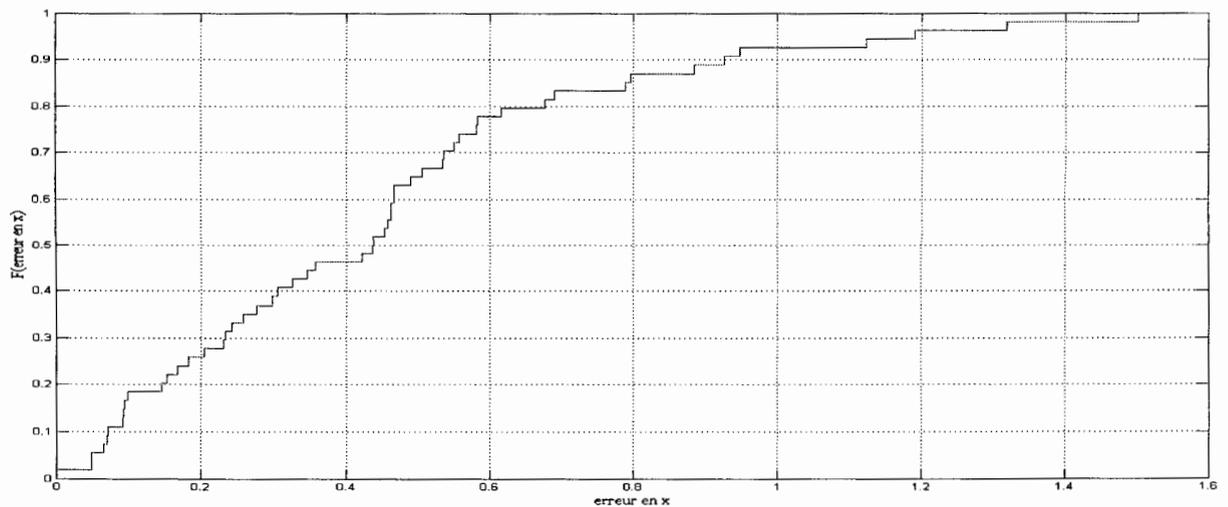


Fig. 6.34 : Distribution cumulative de l'erreur d'entraînement en x pour NLOS – GRNN.

Pour les données d'entraînement, l'erreur en 'x' (Figure 6.34) a une précision de '0.6'm dans ~80% des cas. Déjà il est clair que dans ce scénario, les résultats du réseau GRNN sont assez proches de ceux du réseau MLP. Le maximum est de '1.5'm dans 2% des cas, qui est relativement large. En fait l'erreur maximale est 2 fois plus grande que celle du réseau MLP. La moyenne a une valeur de '0.4495'm qui est aussi 2 fois plus élevée que celle du réseau MLP. Néanmoins, cette valeur est acceptable pour un système de localisation couvrant 27 mètres de distance, et c'est le premier cas (le seul) où la performance du GRNN est qualifiée d'acceptable dans les trois scénarios étudiés.

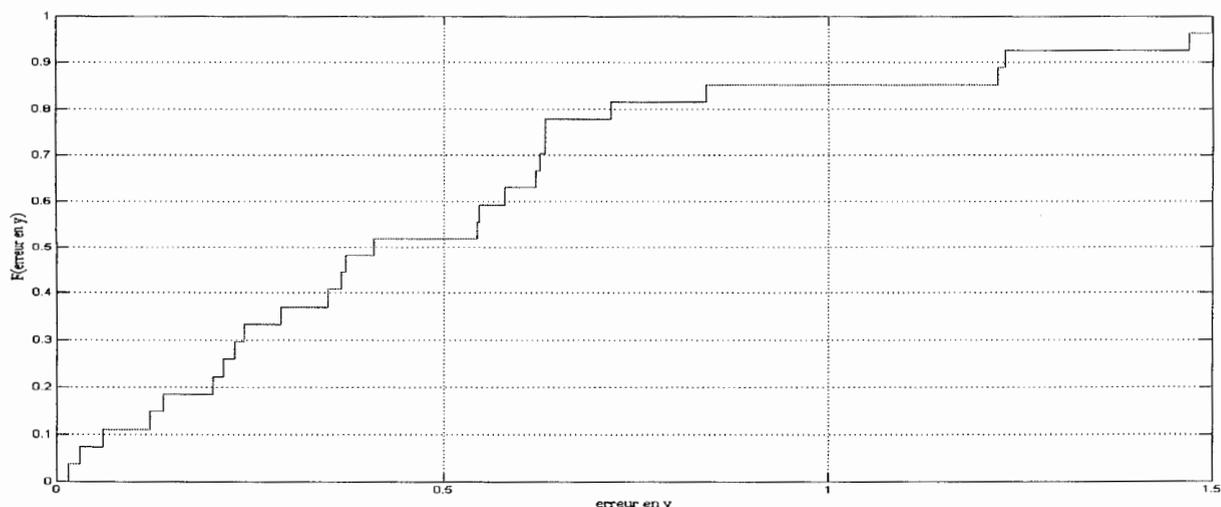


Fig. 6.35 : Distribution cumulative de l'erreur d'entraînement en y pour NLOS – GRNN.

L'erreur d'entraînement en 'y' (Figure 6.35) atteint une précision de '0.65'm avec une exactitude de 70% environ. Ici aussi le réseau GRNN surpasse les cas précédents. La valeur maximale de cette erreur est de '1.5'm dans 8% des cas. Donc l'exactitude en 'y' est pire que sur la coordonnée en 'x'. La moyenne statistique de cette erreur est de '0.3179'm qui est une bonne valeur surtout en considérant que les réseaux GRNN n'ont pas pu avoir une telle performance antérieurement.

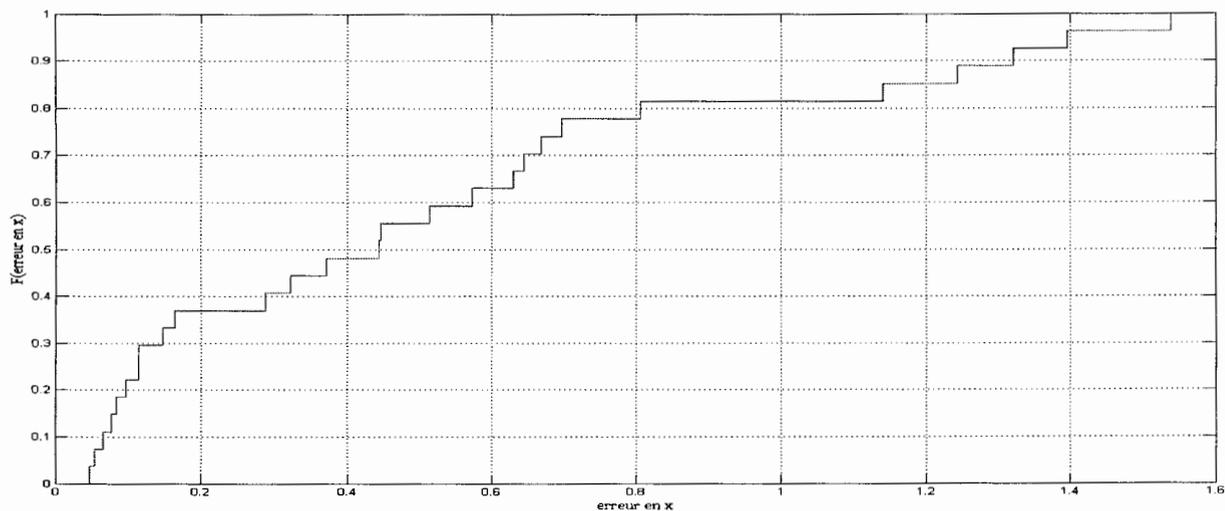


Fig. 6.36 : Distribution cumulative de l'erreur de test en x pour NLOS – GRNN.

Pour les données de test en 'x' (Figure 6.36), le réseau GRNN montre une précision de '0.6'm dans 60% des cas. C'est une dégradation par rapport à l'erreur sur les données d'entraînement. Mais d'autre part, c'est la première fois que le réseau GRNN arrive à garder un si bon taux de généralisation. Cette erreur est même comparable à celle du réseau MLP bien que toujours supérieure à cette dernière. L'erreur maximale est de '1.48'm dans 3% des cas. Cette valeur est de la même grandeur que celle de l'entraînement, appuyant une fois de plus l'hypothèse que le GRNN est assez performant (capable de bien apprendre les fonctions et d'interpoler sur ces connaissance acquises). Finalement, la moyenne de l'erreur est de '0.5188'm, qui est pratiquement égale à celle du réseau MLP (cette dernière étant de 0.510 m).

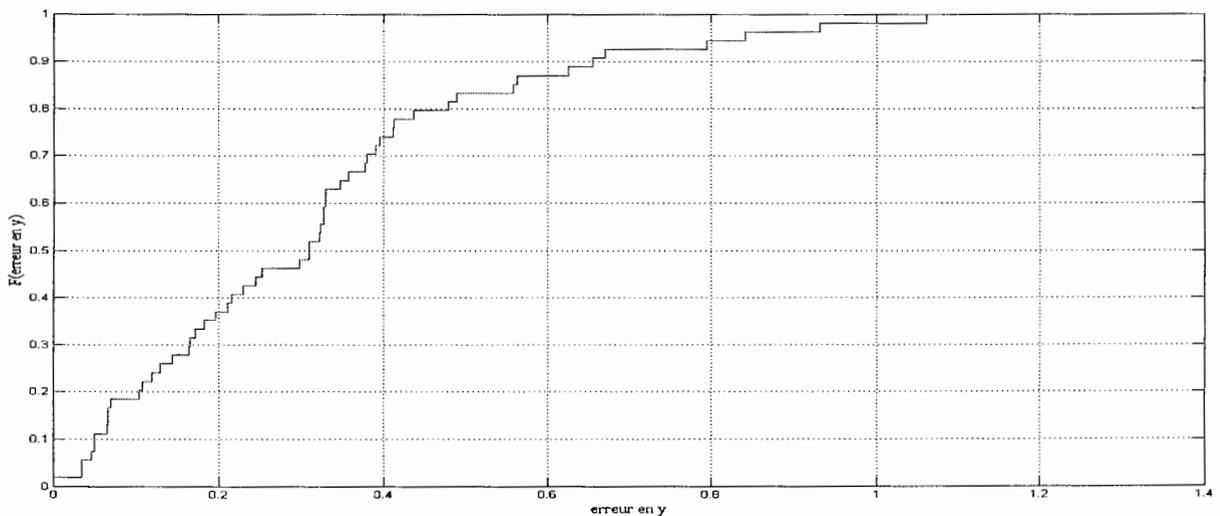


Fig. 6.37 : Distribution cumulative de l'erreur de test en y pour NLOS - GRNN.

L'erreur de test en 'y' (Figure 6.37) suit le même chemin que celle en 'x'. Avec une précision de '0.4'm à une exactitude de 73%, et une valeur maximale de '1.06'm sur 2% des cas, cette erreur est proche de celle de l'entraînement, et par la suite la généralisation du réseau est confirmée. Par contre, cette valeur est plus grande que celle du cas MLP. Mais il semble que MLP était tout simplement plus capable d'interpréter la relation entre les empreintes et la sortie en 'y'. Une dernière valeur à

analyser, la moyenne est de '0.5260' qui comme prévu, est moindre que celle du réseau MLP mais admissible.

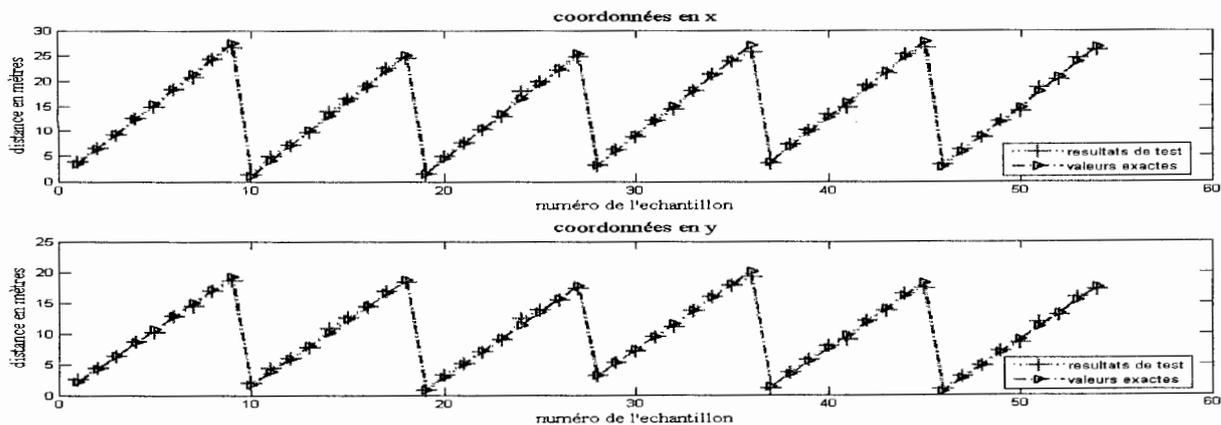


Fig. 6.38 : Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données d'entraînement pour NLOS – GRNN.

La figure 6.38 illustre la localisation du système en comparant l'estimation des coordonnées avec les vraies valeurs. Puisque ce graphe est pour les données déjà vues par les réseaux, on remarque que les courbes sont presque complètement superposables et donc en cas d'erreur, il est clair que cette dernière est assez petite. Il est intéressant de remarquer que les grandes erreurs se font en parallèle pour 'x' et 'y', ce qui implique qu'à cette position précise l'empreinte présente un comportement non-compatible avec son comportement général.

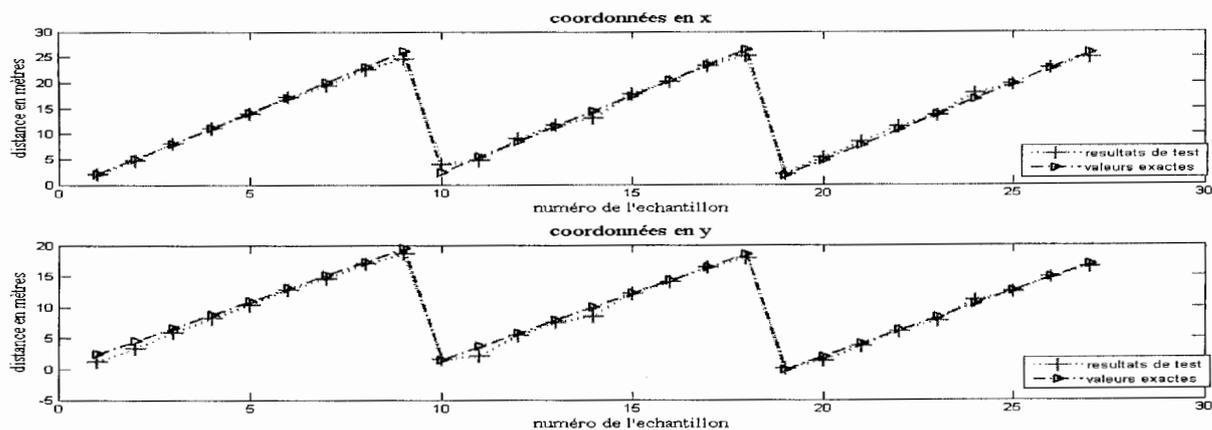


Fig. 6.39 : Comparaison entre sortie du système et valeur réelle pour les données de test pour NLOS – GRNN.

Pour les données de test, la figure 6.39 représente la différence entre les coordonnées estimées et celles réelles. On remarque que conformément aux analyses effectuées antérieurement dans cette section, l'erreur en 'y' est relativement moins bonne que celle en 'x' surtout que les distances en 'x' sont plus grandes. Un autre caractère exposé par cette figure, est le parallélisme de l'erreur entre 'x' et 'y', le même qu'on a vu pour l'apprentissage. À noter aussi que l'erreur en 'y' est plus accentuée que celle en 'x'.

Tableau 6.10 : Les différentes valeurs statistiques pour NLOS et GRNN.

	Données d'apprentissage		Données de test	
	Composante-x	Composante-y	Composante-x	Composante-y
Moyenne statistique	0.4495	0.3179	0.5188	0.5260
25% percentile	0.1821	0.1288	0.1139	0.2191
50% percentile	0.4372	0.3092	0.4439	0.4086
75% percentile	0.5817	0.4113	0.6906	0.6325

En comparant le contenu du tableau 6.10 à celui du tableau 6.9, il est évident que le réseau MLP offre une meilleure performance totale. Mais il est aussi clair que les comportements des 2 systèmes sont proches.

## 6.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats des campagnes de mesures ainsi que les différentes analyses effectuées sur les données cueillies ont été présentés.

En analysant les CIR obtenus suite à la campagne de mesure, on a pu identifier les distances pour lesquelles les données restent utiles à notre étude. On a pu aussi identifier les différents inconvénients avec les empreintes ainsi que leurs relations avec les positions à estimer et par la suite la capacité des réseaux de neurones à offrir une bonne performance. En analysant l'espace des coordonnées, on a pu identifier un inconvénient avec les valeurs des coordonnées en 'y' qui se répète

parfois sur des positions différentes. Cette découverte nous a permis d'introduire une troisième entrée aux réseaux qui consiste en un simple drapeau mais qui a amélioré la performance du système en 'y' de '0.2'm environ.

Finalement, on a présenté et analysé la performance du système de localisation par empreinte proposé dans cette thèse. Les résultats ont montré un taux d'erreur acceptable qui tombe dans les valeurs rapportées dans la littérature. Mais aussi il est clair et d'après la comparaison entre les réseaux MLP et GRNN, que l'architecture ainsi que l'entraînement et la complexité du réseau de neurones jouent un très grand rôle dans ce système. Dans les différents scénarios, bien que les réseaux MLP aient toujours la meilleure performance (par comparaison avec les GRNN), ils n'avaient pas toujours la même architecture interne et n'étaient pas entraînés avec le même algorithme d'apprentissage.

Pour conclure, la performance totale du système était meilleure dans le cas LOS, mais la différence avec le scénario NLOS était minime, alors que les réseaux GRNN n'étaient capables de bien performer sauf dans le troisième scénario, celui du NLOS.

## CHAPITRE 7

### Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire est d'étudier la localisation dans les milieux internes non traditionnels en particulier les mines. Nous avons utilisé la technique de localisation par signature et nous avons évalué l'impact de l'UWB et des réseaux de neurones sur la performance du système. Pour cela, des campagnes de mesure ont été effectuées dans la mine CANMET au niveau 40, plus précisément dans un canal considéré stationnaire. Par la suite, des traitements et des analyses ont été réalisés sur les données recueillies en utilisant Matlab. Une interprétation de la performance du système a été effectuée.

Les résultats obtenus montrent un bon fonctionnement du système proposé qui est comparable à celui des meilleurs<sup>24</sup> systèmes trouvés dans la littérature surtout en considérant la difficulté de l'environnement étudié. Nous avons prouvé que l'association de l'UWB et des réseaux de neurones avec la technique de localisation par empreinte offre plusieurs avantages permettant un bon fonctionnement du système final. En réalité, le concept de localisation par signature est dépendant de l'environnement et par la suite des changements et des considérations différentes doivent être faits suivant le milieu de déploiement. Dans notre cas, la solution que nous avons employée pour remédier au problème de multi-trajets est l'utilisation de l'UWB qui, avec ses propriétés de propagations aide à mieux surmonter ce phénomène et grâce à sa grande largeur de bande, elle offre plusieurs autres

---

<sup>24</sup> Par meilleurs on veut dire les systèmes avec les meilleures précisions.

avantages. Ils consistent à la création d'une empreinte unique et reproductible qui est à la base de l'amélioration du système. Par contre, l'UWB présente quelques inconvénients surtout une réduction de la portée du système où on a dû se limiter à une distance ne dépassant les 40 mètres.

D'autre part, d'après les différentes analyses et résultats du chapitre 6, le rôle des réseaux de neurones est mieux clarifié. On remarque que dans un même scénario il y a une grande dégradation dans la performance du système suivant le type de réseau utilisé. En plus, les résultats montrent que différents scénarios requièrent différentes architectures et algorithmes d'apprentissages. Bien que cela rende le système moins général, il lui donne une meilleure performance. En plus, si on considère le fait que l'apprentissage est réalisé dans la phase passive avant le déploiement du système, un changement de l'algorithme d'apprentissage devient plus assimilable (réaliste). Par contre, si on cherche à rendre l'apprentissage plus universel, il faut payer le prix d'une performance moins bonne.

Les différents scénarios étudiés présentent des résultats assez proches. La dégradation du cas NLOS par rapport à celui du LOS est petite relativement à celle trouvée dans la littérature. Cela est dû à différents facteurs dont en premier lieu; la nature même du système. Que ce soit pour le cas LOS ou NLOS, c'est l'empreinte spécialement choisie qui va décider le résultat; contrairement aux autres algorithmes où des formules prédéfinies vont décider du résultat. Un autre facteur est la particularité des réseaux de neurones (architecture, apprentissage, etc.) suivant les scénarios. À noter que l'empreinte peut changer suivant l'environnement, où d'autres composantes comme le RMSDS peuvent être ajoutées. Un troisième facteur est la propagation UWB dans les milieux internes qui nous offre une empreinte assez représentative du milieu. Il faut remarquer qu'il y a une sorte de compromis entre précision et généralisation (d'un réseau) d'une part et stabilité et universalité (du système) d'autre part. En fait, les réseaux MLP sont plus difficiles à entraîner mais ils

ont offert de meilleurs résultats que ceux obtenus avec GRNN pour les trois scénarios. D'autre part, la performance des algorithmes d'apprentissages change aussi suivant les scénarios mais on peut dire que l'algorithme du gradient pondéré (SCG) a été le plus utilisé et il a donné les meilleurs<sup>25</sup> résultats sur 2 des 3 scénarios. Ainsi, dans la logique d'un modèle plus universel<sup>26</sup>, un apprentissage SCG peut être utilisé d'une manière systématique.

Les suggestions proposées dans la partie des travaux non accomplis peuvent améliorer la performance du système, comme ils peuvent aussi mieux unifier les différentes parties. Dans une première phase, une localisation par secteur permet de mieux choisir entre les différents scénarios/algorithmes d'apprentissages. Comme nous l'avons déjà vu dans les résultats, un réseau de neurones peut mieux présenter un secteur alors qu'un réseau distinct a une meilleure performance dans un autre secteur. Par la suite, si dans une première phase on établit le secteur de présence, il sera possible au système de choisir la configuration convenable pour une bonne localisation (exacte) dans la phase suivante. Une autre manière d'améliorer la performance sera de fournir des points de référence et de calibrage qui permettent au système de détecter les erreurs et de les intégrer dans l'estimation d'une position comme dans un système de feedback.

---

<sup>25</sup> Sachant que la différence entre les résultats est de quelques centimètres.

<sup>26</sup> Il faut que ca soit dans des environnements assez comparable à notre cas.

## Références

- [1] I.Oppermann, M. Hämäläinen, J. Linatti “UWB Theory and Applications”, *John Wiley and sons*, 2004
- [2] M.G. Di Benedetto, and G. Giancola, “Understanding Ultra Wide Band Radio Fundamentals”, *Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series*, 2004
- [3] C.R. Anderson, A. Annamadi, A. Attiya, N. August, R. Buehrer, W. Davis, M. Gong, S. Griggs, D.S. Ha, J. Ibrahim, S. Licul, S.F. Midkiff, S. Muthuswamy, J.O. Neel, S.M. Riad, B.M. Sadler, A.Safaai-jazi, A. Swami, D.Sweeney, and W.H. Tranter, “An Introduction to Ultra WideBand Communications Systems”, *Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series*, Jun. 2005
- [4] P. Cain, “Direct-Sequence UWB Signal Generation and Measurement”, *RF Design*, Nov. 2004
- [5] T. Iwasaki, T. Hirao, and L. Hamada, “Measurement and Calculation of Electric Field Waveforms in the Vicinity of Small Antennas Excited by a Pulse”, *IEEE: Topical Conference on Wireless Communication Technology*, 2003
- [6] C.C Chong, Y. Kim, and S.S. Lee, “UWB Indoor Propagation Channel Measurements and Data Analysis in Various Types of High-Rise Apartments”, *IEEE: Vehicular Technology Conference*, fall 2004
- [7] A. Gupta, and P. Mohapatra, “A Survey on Ultra Wide Band Medium Access Control Schemes”, *University of California: computer science department*, Jul. 2006
- [8] R.D. Weaver, “Frequency domain processing of ultra-wideband signals”, *IEEE: Signals, Systems, and Computers conference*, Vol.2, pp. 1221-1224, Nov. 2003
- [9] T.W. Barrett, “History or Ultra Wideband Radar and Communications: Pioneers and Innovators”, *Cambridge: Progress in Electromagnetics Symposium2000*, Jul. 2000

- [10] A.M. Hayar, and G.M. Vitetta, "Channel Models for Ultra-Wideband Communications: an Overview", *European Community: IST Work of Excellence*, 2005
- [11] R.M. Buehrer, A. Safaai-Jazi, W. Davis, and D. Sweeney, "Ultra wide band Propagation and Modeling Final Report: Chapter 3: Indoor Measurements", *DARPA NETEX Program, Virginia Tech*, Jan. 2004
- [12] A. Bayram, A.M. Attiya, A. Safaai-jazi, and S.M. Riad, "Frequency Domain Measurement of Indoor UWB Propagation", *IEEE: Antennas and Propagation Society Symposium*, Vol.2, pp. 1303-1306, Jun. 2004
- [13] A.H. Muqaibel, A. Safaai-jazi, A.M. Attiya, ABayram, and S.M. Riad, "Measurement and Characterization of Indoor Ultra-Wideband Propagation", *IEEE: Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies*, pp. 295-299, Nov. 2003
- [14] S. Geng, S. Ranvier, X. Zhao, J. Kivinen, and P. Vainikainen, "Multipath Propagation Characterization of Ultra-Wide band Indoor Radio Channels", *IEEE: 2005 international conference on Ultra-Wideband*, pp.11-15, sept.2005
- [15] J. Padgett, "Overview of Ultra Wide Band (UWB) Impulse Radio", *Telcordia Technologies: Wireless Systems and Networks Seminar*, Mar. 2004
- [16] A.M. Street, L. Lukama, and D.J. Edwards, "Use of VNAs for Wideband Propagation Measurements", *IEEE Proceedings communication*, Vol. 148 No.6, Dec. 2001
- [17] B.M. Donlan, S. Venkatesh, V. Bharadwaj, R. M. Buehrer, and J.A. Tsai, "The Ultra-Wideband Indoor Channel", *IEEE: 59<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference*, Vol.1, pp. 208-212, May 2004
- [18] R.M. Buehrer, A. Safaai-Jazi, W. Davis, and D. Sweeney, "Ultra wide band Propagation and Modeling Final Report: Chapter 2: UWB Antennas: Selection, Characterization, and Modeling", *DARPA NETEX Program, Virginia Tech*, Jan. 2004
- [19] J. Jamsa, V. Hovinson, A. Karjalainen, and J. Linatti, "Frequency Dependency of Delay Spread and Path Loss in Indoor Ultra-Wideband Channels", *The Institute of Engineering and Technology*

- [20] A. Muqaibel, A. Safaai-Jazi, A. Attiya, B. Woerner, and S. Riad, "Path-Loss and Time Dispersion Parameters for Indoor UWB Propagation", *IEEE: Transactions on Wireless Communications*, Vol.5 No.3, Mar. 2006
- [21] J.M. Cramer, R.A. Scholtz, and M.Z. Win, "Spatio-temporal Diversity in Ultra-Wideband radio", *IEEE: Wireless Communication and Networking Conference*, Vol.2, pp. 888-892, Sept. 1999
- [22] M.L. Welborn, "System Considerations for Ultra-Wideband Wireless Networks", *IEEE: Radio and Wireless Conference RAWCON2001*, Aug. 2001
- [23] T. Takeuchi, and H. Mukai, "Ultra Wide Band Channel Sounding for Indoor Wireless Propagation Environments", *IEEE: Topical Conference on Wireless Communication Technology*, Oct. 2003
- [24] D. Cassioli, W. Ciccognani, and A. Durantini, "UWB Channel Model Report", *ULTRAWAVES: Information Society Technologies*, Nov. 2003
- [25] J.R. Forester, "The Effects of Multipath on the Performance of UWB Systems in an Indoor Wireless Channel", *IEEE: 2001 Vehicular Technology Conference*, Vol.2, pp. 1176-1180, May 2001
- [26] C.C Chong, Y. Kim, and S.S. Lee, "Statistical Characterization of the UWB Propagation Channel in Various Types of High-Rise Apartments", *IEEE: 2005 Wireless Communications and Networking Conference*, Vol.2, Mar. 2005
- [27] J.Y. Lee, R.A. Scholtz, "Ranging in a Dense Multipath Using an UWB Radio Link", *IEEE: Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.20 Iss. 9, pp. 1677-1683, Dec. 2002
- [28] A. El Fawal, and J.Y. Le Boudec, "A Robust Signal-Detection Method For Ultra-Wideband Networks with Uncontrolled Interference", *IEEE: Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54 No.4, pp.1769-1782, Apr. 2006
- [29] D. Barras, F. Ellinger, and H. Jackel, "A Comparison between Ultra-wideband and Narrowband Transceivers", *Swiss Federal Institute of Technology: Laboratory of electronics*, 2002
- [30] J. Karedal, S. Wyne, P. Almers, F. Tufvesson, and A.F. Molisch, "Statistical Analysis of the UWB Channel in an Industrial Environment", *IEEE: Vehicular Technology Conference*, Vol.1, pp. 81-85, Sept. 2004

- [31] S. Ghassemzadeh, R. Jawa, C. Rice, W. Turin, and V. Tarokh, "A Statistical Path Loss Model for In-home UWB Channels", *IEEE: conference on Ultra-Wideband Systems and Technologies*, pp.59-64, May. 2002
- [32] J.R. Andrews, "UWB Signal Sources, Antennas and Propagation", *Picosecond Pulse Labs*, Aug. 2003
- [33] J. Lansford, "Wimedia UWB: Coexistence with Other Wireless technologies", *Alereon*
- [34] B. Alavi, K. Pahlavan, "Analysis of Undetected Direct Path in Time of Arrival Based UWB Indoor Geolocation", *IEEE: Vehicular Technology Conference*, Vol.4, pp. 2627-2631, Sep.2005
- [35] G.R. Opshaug, and P. Enge, "Integrated GPS and UWB Navigation System: (Motivates the Necessity of Non-Interference)", *IEEE: Ultra Wideband Systems and Technologies*, pp. 123-127, 2002
- [36] J.S. Gutmann, W. Burgard, D. Fox, and K. Konolige, "An experimental Comparison of Localization Methods", *IEEE: Intelligent Robots and Systems*, Vol.2, pp. 736-743, Oct. 1998
- [37] C. Nerguizian, C. Despins, and S. Affes, "Geolocation in Mines with an Impulse Response Fingerprinting Technique and Neural networks", *IEEE: Transactions on Wireless Communications*, Vol.5 Iss.3, pp. 603-611, Mar. 2006
- [38] S. Gezici, T. Zhi, G.B. Giannakis, H. Kobayashi, A.F. Molisch, H.V. Poor, and Z. Sahinoglu, "Localization Via Ultra-Wideband Radios: a Look at Positioning aspects for Future Sensor Networks", *IEEE: Signal Processing Magazine*, Vol.22 Iss.4, pp. 70-84, Jul. 2005
- [39] J. Hightower, and G. Borriello, "Location Systems for Ubiquitous Computing", *IEEE: Computer*, Vol.34 Iss.8, Aug. 2001
- [40] Z. Guoping, and S.V. Rao, "Position Localization with Impulse Ultra Wideband", *IEEE: International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics*, pp. 17-22, Apr. 2005
- [41] J.S. Gutmann, W. Burgard, D. Fox, and K. Konolige, "An experimental Comparison of Localization Methods Continued", *IEEE: Intelligent Robots and Systems*, Vol.1, pp. 454-459, Oct. 2002

- [42] J. Hightower, and G. Borriello, "Location Sensing Techniques", *University of Washington, Computer Science and Engineering*, Aug. 2001
- [43] D. Dardari, and A. Conti, "a Sub Optimal Hierarchical Maximum Likelihood Algorithm for Collaborative Localization in Ad-Hoc Networks", *IEEE: First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, pp. 425-429, Oct. 2004
- [44] E. Elnahrawy, X. Li, and R.P. Martin, "Using Area Based Presentations and Metrics for Localization Systems in Wireless LANs", *IEEE: Annual International Conference on Local Computer Networks*, pp. 650-657, Nov. 2004
- [45] P. Bahl, and V.N. Padmanabhan, "RADAR: an in -building RF-based user location and tracking system", *IEEE: Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Vol.2, pp. 775-784, Mar. 2000
- [46] D.B. Jourdan, J.J. Deyst, M.Z. Win, and N. Roy, "Monte Carlo Localization in Dense Multipath Environments using UWB Ranging", *IEEE: International Conference on Ultra-Wideband*, pp. 314-319, Sept. 2005
- [47] H. Laitinen, J. Lahteenmaki, and T. Nordstrom, "Database Correlation Method for GSM Location", *IEEE: Vehicular Technology Conference*, Vol.4, pp. 2504-2508, May 2001
- [48] H. Koshima, and J. Hoshen, "Personal Locator Services Emerge", *IEEE: Spectrum*, Vol.32 Iss.2, pp. 41-48, Feb. 2000
- [49] K. Kaemarungsi, and P. Krishnamurthy, "Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting", *IEEE: Twenty\_third Annual Joint Conference Of the IEEE Computer and Communications Societies*, Vol.2, pp. 1012-1022, Mar.2004
- [50] W. Ciccognani, A. Durantini, and D. Cassioli, "Time Domain Propagation Measurements of the UWB Indoor Channel Using PN-Sequence in the FCC-Compliant Band 3.6-6 GHz", *IEEE: Transactions on Antennas and propagation*, Vol.53 No.4, pp. 1542-1549, Apr. 2005
- [51] M. Boquet, C. Loyez, and A. Benlarbi-Delai, "Using Enhanced-TDOA Measurement for Indoor Positioning", *IEEE: Microwave and Wireless Components Letters*, Vol.15 Iss.10, Oct. 2005

- [52] C. Zhang, M. Kuhn, B. Merkl, A.E. Fathy, and M. Mahfouz, "Accurate UWB Indoor Localization System Utilizing Time Difference of Arrival Approach", *IEEE: Radio and Wireless Symposium*, pp. 515-518, Jan. 2006
- [53] G.Y. Jin, X.Y. Lu, and M.S. Park, "An Indoor Localization Mechanism Using Active RFID Tag", *IEEE: International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing*, Vol.1, pp. 40-43, Jun. 2006
- [54] Y. Zhang, and J. Zhao, "Indoor Localization Using Time Difference of Arrival and Time-Hopping Impulse Radio", *IEEE: International Symposium on Communications and Information Technology*, Vol.2, pp. 964-967, Oct. 2005
- [55] A.M. Ladd, K.E. Bekris, A.P. Rudys, D.S. Wallach, and L.E. Kavraki, "On the Feasibility of Using Wireless Ethernet for Indoor Localization", *IEEE: Transactions on Robotics and Automation*, Vol.20 Iss.3, Jun. 2004
- [56] A. Bayram, A.M. Attiya, A. Saffaai-Jazi, and S.M. Riad, "Frequency-domain Measurement of Indoor UWB Propagation", *IEEE: Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol.2, pp. 1303-1306, Jun. 2004
- [57] H. Saarnisaari, and T. Bräysy, "Systematic Errors and Location Accuracy in Wireless Networks", *EURASIP: Journal on Applied Signal Processing*, Vol.2006, pp. 1-9, Mar. 2006
- [58] K.J. McGarry, S. Wermter, and J. MacIntyre, "Knowledge extraction from radial basis function networks and multi-layer perceptrons", *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'99)*, Vol.4 No.4, Jul. 1999, pp.2494-2497
- [59] S.S. Ghassemsadeh, R. Jana, C.W. Rice, W. Turn, and V. Tarokh, "Measurement and Modeling of an Ultra-Wide Bandwidth Indoor Channel", *IEEE: Transactions on Communications*, Vol.52 Iss.10, Oct. 2004
- [60] Z. Iarrahauten, A. Yarovoy, G.J.M Janssen, H. Nikoogar, and L.P. Ligthart, "Suppression of Noise and Narrowband Interference in UWB Indoor Channel Measurements", *IEEE: International Conference on Ultra-Wideband*, pp. 108-112, Sept. 2005
- [61] A. Nashashibi, N. Behdad, and K. Sarabandi, "A Sensitive Ultra Wideband Propagation Measurement System", *IEEE: Antennas and Propagation International Symposium*, Vol.4, pp. 759-762, Jun. 2003

- [62] S. Haykin, "Neural Networks a Comprehensive foundation", *Prentice-Hall In.*, 2de edition, 1999
- [63] R. Zetik, J. Sachs, and R. Thoma, "UWB Localization – Active and Passive Approach", *IEEE: Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2004. IMTC 04. Proceedings of the 21st IEEE*, Vol.2, pp. 1005-1009, May 2004
- [64] C.D. Doan and, S.Y. Liong, "Generalization for Multilayer Neural Network Bayesian Regularization or early stopping", *APHW 2004: The 2nd APHW Conference*, Jul. 2004
- [65] Matlab user manual
- [66] M.G. Di Benedetto, and G. Giancola, "Understanding Ultra Wide Band Radio fundamentals", *Prentice Hall: Communications Engineering and Emerging Technologies Series*, 1<sup>st</sup> printing, 2004
- [67] E. Elnahrawy, X. Li, and R.P. Martin, "The Limits of Localization Using RSS", *IEEE: First Annual Sensor and Ad-Hoc Communications and Networks conference, 2004*, pp. 406-414, Oct. 2004
- [68] C. Alippi, A. Mottarella, and G. Vanini, "A RF map-based Localization Algorithm for Indoor Environments", *IEEE: First Annual Sensor and Ad-Hoc Communications and Networks conference, 2005*, pp. 652-655, Oct. 2005
- [69] V. Otsason, A. Varshavsky, A. LaMarca, and E. de Lara, "Accurate GSM Indoor Localization", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, *UbiComp 2005*, pp. 141-158, fall 2005
- [70] M. Terré, "Communication en Ultra Large Bande (UWB)", *RNRT: projet ERABLE seminaire CNFRS/URSI, 2001*
- [71] T. W. Barret, "History of UltraWideBand (UWB) Radar & Communications: Pioneers and Innovators", *Cambridge:Progress in Electromagnetics Symposium 2000,PIERS2000*, Jul. 2000
- [72] S. Lasaulce, J. Dumont, et S. Hassanaly, "Signaux a bande ultra large: caracteristiques et performances ", *France Telecom R&D*, 2004
- [73] J. Chiang, "A War to End All Wars between UWB WPAN Systems", *IEEE: First Annual Sensor and Ad-Hoc Communications and Networks conference, 2004*, pp. 406-414, Oct. 2004

- [74] A. F. Molisch, "Ultrawideband propagation channels – theory, measurement, and modeling draft", *IEEE : Transactions on Vehicular Technology, special issue on UWB, fall/ winter 2005*, Apr. 2005
- [75] B. Alavi, N. Alsindi, K. Pahlavan, "UWB Channel Measurements for Accurate Indoor Localization", *IEEE: Military Communications Conference, 2006 MILCOM 2006*, pp. 1-7, Oct. 2006
- [76] D.B. Jourdan, D. Dardari, and M.Z. Win, "Position Error Bound for UWB Localization in Dense Cluttered Environments", *IEEE: International Conference on Communication ICC 2006*, pp. 3705-3710, 2006
- [77] A.F.Molisch, "Ultrawideband propagation channels – theory measurement, and modeling", *IEEE: Transactions on Vehicular Technology, special issue on UWB, Draft*, Apr. 2005
- [78] L.E.Miller, "Why UWB ? A review of Ultra wideband Technology", *NIST: report to netex project office, DARPA*, Apr. 2003
- [79] M.Tuchler, V. Schwarz, and A. Hubert, "Location Accuracy of an UWB Localization System in a Multi-path Environment", *IEEE: International conference on Ultra-Wideband Zurich*, Sept. 2005
- [80] J. Svohroeder, S. Galler, and K. Kyamakya, "A Low-Cost Experimental Ultra-Wideband Positioning System", *IEEE: International conference on Ultra-Wideband Zurich*, Sept. 2005