



HAL
open science

Propagation d'une position dans les réseaux connectés

Magda Lilia Chelly

► **To cite this version:**

Magda Lilia Chelly. Propagation d'une position dans les réseaux connectés. Economies et finances. Institut National des Télécommunications, 2011. Français. NNT: 2011TELE0018 . tel-00843587

HAL Id: tel-00843587

<https://theses.hal.science/tel-00843587>

Submitted on 11 Jul 2013

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

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



Ecole Doctorale EDITE

**Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de
Docteur de Télécom & Management SudParis**

***Doctorat conjoint Télécom & Management SudParis et Université Pierre et
Marie Curie***

**Spécialité :
Télécommunications**

Par

CHELLY Magda Lilia

Titre

Propagation d'une position dans des réseaux connectés

Soutenue le 7 juillet 2011 devant le jury composé de :

Rapporteur	Jacques Ehrlich	Directeur de recherche
Rapporteur	François Spies	Professeur
Examineur	Houda Labiod	Maitre de conférences
Examineur	Georges Alquié	Professeur
Examineur	Frédéric Evennou	Ingénieur R&D
Examineur	Pierre-Yves Gilliéron	Research and Teaching Associate
Directeur de thèse	Nel Samama	Professeur

Thèse n° 2011TELE0018

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse et mon encadrant, M.Nel Samama, Professeur à TELECOM SudParis, pour m'avoir fait confiance et m'avoir donné l'opportunité d'effectuer ces travaux de recherches au sein du groupe Navigation du département EPH. Il m'a encouragée, soutenue, et conseillée. Il m'a guidée tout au long de ces trois années tout en me laissant une grande liberté. J'espère avoir été à la hauteur de ses espérances.

Mes remerciements vont également aux membres du Jury pour m'avoir fait l'honneur de participer à l'évaluation de mes travaux : Madame Houda Labiod, Maître de Conférences à Telecom ParisTech, Monsieur Georges Alquié, Professeur au Laboratoire d'Électronique et Électromagnétisme-Université Pierre et Marie Curie, Monsieur Jacques Ehrlich, Directeur de Recherche LIVIC, Monsieur Frédéric Evennou, Ingénieur R&D Orange Labs-Recherche et Développement, Monsieur Pierre-Yves Gilliéron, Research and Teaching Associate, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) Faculté ENAC - Laboratoire de Topométrie et François Spies, Professeur au Laboratoire d'Informatique de l'université de Franche-Comté (LIFC).

Je remercie Monsieur François Spies et Monsieur Jacques Ehrlich qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

Je remercie tous les membres du groupe Navigation et plus largement du département EPH de TELECOM SudParis. Avec un remerciement particulier pour Badr-Eddine BENKELFAT, Chef du département EPH.

Je fais une dédicace spéciale à :

Mme Patricia FIXOT, pour sa gentillesse et pour toute son aide pendant ces trois années.

M. François DELAVault, pour ses encouragements et les discussions qu'on pouvait échanger sur des sujets très variés,

M. Alexandre VIERVICH PICOIS, ancien collègue et ami, pour son soutien moral.

M. Alain LEBEGUE, pour sa présence, ses conseils, ses encouragements. Je le remercie surtout car il a toujours su me guider afin d'effectuer les bons choix dans ma vie professionnelle et personnelle,

Merci à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à finaliser cette thèse,

Encore merci à tous

Dédicace

*A mes parents, ceux qui m'ont toujours soutenu pendant ces longues années,
A Sandra ma petite sœur, celle qui m'apporte une énorme joie de vivre,
A Barbara ma tante, celle qui m'a toujours écouté,
A Agata, ma grand-mère,*

A tous ceux que j'aime et qui se reconnaîtront...

Résumé

Les systèmes de positionnement ont connu un progrès indéniable. Actuellement, la précision atteint quelques centimètres sous certaines conditions : espace ouvert, ciel dégagé, technique très spécifique, etc. Néanmoins, le problème du positionnement dans un environnement intérieur demeure persistant : les trajets multiples qui compliquent les modèles de propagation, l'atténuation, etc. Différents systèmes ont vu le jour, utilisant des technologies telles que l'UWB, le WiFi ou l'Infrarouge. Ces systèmes apportent des résultats de positionnement intéressants, atteignant l'ordre du mètre. Cette précision reste liée à certaines contraintes : une infrastructure, une technologie utilisée, une calibration, une technique de calcul, etc.

Afin de réduire toutes ces contraintes, nous proposons une nouvelle approche de positionnement. Notre approche utilise tous les équipements réseaux présents dans un environnement. Elle se base sur deux étapes fondamentales : l'étude de visibilité et l'élaboration de liens géographiques.

L'étude de visibilité permet d'obtenir les équipements visibles par un équipement. Nous avons exposé plusieurs modèles de visibilité et nous avons effectué une comparaison des résultats.

L'élaboration de liens géographiques permet de construire un graphe géographique tridimensionnel reliant tous les équipements de l'environnement. Ce graphe nous permet de visualiser la répartition des équipements et d'estimer les positions géographiques de chaque équipement.

Pour la mise en œuvre de notre approche, nous avons développé un simulateur sous Matlab. Le simulateur élaboré évalue d'abord le nombre d'équipements visibles. Il estime les distances séparant cet équipement de chaque équipement visible. Enfin, il construit un graphe géographique et calcul les positions géographiques.

Des résultats de simulations sont présentés pour valider notre approche qui permet d'aboutir à un système capable d'opérer, sans aucune infrastructure additionnelle, un positionnement dans un environnement intérieur et extérieur.

Mots clés: Localisation en intérieur, propagation, réseaux de télécommunications, graphe, visibilité,

Summarize

Positioning systems have undeniably progressed. Currently, in an outdoor environment, the accuracy reaches a few centimetres under certain conditions: open space, clear sky, specific measurement techniques, etc. Nevertheless, the problem of positioning in an indoor environment remains persistent: multipath, attenuation, etc. Different systems for indoor positioning have been developed, using technologies such as UWB, WiFi or Infrared. These systems provide interesting results that could allow to reach one meter accuracy. But, this accuracy is related to many criteria: infrastructure, technology, calibration, technical computing, etc.

To reduce these constraints, we propose a new approach for positioning. Our approach utilizes all the network equipments present in an environment. The approach is based on two fundamental steps: the study of visibility and the development of geographical links.

The study of visibility estimates the visible equipments in the environment. We have studied several models of visibility and we carried out a comparison of the results.

A three-dimensional graph is build using the study of geographical links between equipments. This graph allows us to visualize the distribution of equipments and to estimate the geographic positions of each device.

To implement our approach, we developed a simulator in Matlab. The simulator first studies the visible equipments for the unknown device. Then, it estimates the distances between the device and the visible equipments. Finally, it constructs a graph and calculates the geographical positions.

Simulation results are presented to validate our approach. Our approach is a positioning system capable of operating without additional infrastructure in an indoor environment.

Keywords: indoor location, propagation, telecommunications networks, graph, visibility,

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
DÉDICACE	3
RÉSUMÉ.....	4
SUMMARIZE	5
TABLE DES MATIÈRES	6
LISTE DES FIGURES.....	9
LISTE DES TABLEAUX.....	12
ACRONYMES	13
CHAPITRE 1.....	14
INTRODUCTION.....	14
1.1 Contexte scientifique et motivation.....	15
1.2 Objectifs de la thèse.....	18
1.3 Contributions de la thèse.....	19
CHAPITRE 2.....	20
ETAT DE L'ART DES TECHNIQUES DE POSITIONNEMENT	20
2.1 Introduction	20
2.2 Bref aperçu technologique.....	20
2.3 Méthodes de localisation par trilateration ou triangulation.....	21
2.4 Méthodes de localisation par fingerprinting.....	25
2.5 Méthodes de localisation symboliques.....	27
2.6 Autres méthodes de localisation	28
2.7 Méthodes hétérogènes de localisation	31
2.8 Méthodes de localisation multi-technologies.....	33
2.9 Récapitulatif et discussion	34
2.10 Conclusion	38
CHAPITRE 3.....	39
POSITIONNEMENT : ETUDE DE L'ACQUISITION ET DE LA PROPAGATION D'UNE POSITION PHYSIQUE	39
3.1 Introduction	39
3.2 Le contexte de l'application.....	39
3.3 Les limitations du système	41
3.4 Exigences du système.....	43
3.5 Etapes et stratégies	44
3.6 Les spécifications techniques	46
3.6.1 L'environnement	46
3.6.2 Les équipements.....	47
3.6.2.1 Les équipements fixes.....	47
3.6.2.2 Les équipements mobiles	47
3.6.3 Stratégies d'évaluation	48
3.7 Conclusion	49
CHAPITRE 4.....	50
LA VISIBILITÉ	50
4.1 Introduction	50
4.2 Contexte.....	50
4.3 L'étude de visibilité.....	51
4.3.1 Première Approche : Zone de portée.....	52
4.3.2 Deuxième Approche : Formule de Friis – Puissance estimée.....	53
4.3.3 Troisième Approche : Formule de Friis – Distance estimée.....	55
4.3.4 Quatrième approche : Voisins les plus proches	56
4.3.5 Cinquième approche : Nombre de sauts	57
4.4 La prise de décision	59
4.4.1 La méthode de visibilité zone de portée : statistiques et analyses	60

4.4.2 Les méthodes de visibilité Formule de Friis : statistiques et analyses	61
4.4.3 La méthode de visibilité algorithme de routage : statistiques et analyses	65
4.5 Conclusion	66
CHAPITRE 5	67
RELATIONS GÉOGRAPHIQUES, MODÈLES DE MOBILITÉ ET APPROCHE ITÉRATIVE	67
5.1 Introduction	67
5.2. Modélisation géographique	67
5.2.1 Approche algébrique	68
<i>Nous allons à présent présenter la deuxième approche.</i>	75
5.2.2 Raisonnement spatial	75
5.2.2.1 Bases théoriques : Le raisonnement spatial	76
5.2.2.2 Application du raisonnement spatial au système de positionnement	78
5.2.2.3 Simulations et résultats de l'approche raisonnement spatial	81
5.3. Modèles de mobilité	81
5.3.1 La mobilité de l'équipement	83
5.3.2 La mobilité de l'utilisateur	84
5.3.2.2 Le modèle sinusoïdal	87
5.3.2.3 Le modèle linéaire	87
5.3.2.4 Synthèse	88
5.3.3 La mobilité du réseau	89
5.4 Approche itérative de positionnement	89
5.4.1 Attribution de coordonnées aux équipements	89
5.4.2 Estimation des coordonnées	90
5.4.3 Trilatération	90
5.5 Conclusion	91
CHAPITRE 6	92
LE SIMULATEUR : ALGORITHME ET FONCTIONNALITÉS	92
6.1 Introduction	92
6.2 La mise en œuvre : langages de programmation	92
6.3 L'architecture de notre simulateur	93
6.3.1 La modélisation VRML	94
6.3.2 L'algorithme de localisation	95
6.4 Les fonctionnalités de notre simulateur	97
6.4.1 La modélisation VRML	97
6.4.2 L'algorithme de localisation	102
6.5 Conclusion	105
CHAPITRE 7	106
SIMULATIONS, TESTS ET VALIDATIONS	106
7.1 Introduction	106
7.2 La phase de test et de validation	106
7.2.1 Les tests de performance	109
7.2.2 Les tests de dégradation technique	109
7.2.3 Les tests de robustesse	110
7.2.4 Les tests de capacité	110
7.3 Les résultats des simulations	111
7.4 Conclusion	132
CHAPITRE 8	133
TESTS ET SIMULATIONS DE SCÉNARIOS APPLIQUÉS AUX SITUATIONS RÉELLES	133
8.1 Introduction	133
8.2 Caractéristiques des scénarios	133
8.2.1 Caractéristique temporelle des scénarios	133
8.2.2 Caractéristiques géographiques des scénarios	134
8.2.3 Caractéristiques réseaux des scénarios	135
8.2.3.1 Caractéristiques quantitatives des équipements	136
8.2.3.2 Caractéristiques technologiques des équipements	136
8.3 Type de scénarios	141
8.3.1 Scénarios statiques	141
8.3.1.1 Pause café	141
8.3.1.2 Journée habituelle vers 11h	142

8.3.2 Scénarios variables	143
8.3.2.1 Arrivée d'un professeur sur le campus	143
8.3.2.2 Arrivée d'un étudiant en cours	144
8.4 Résultats de simulations	145
8.4.1 Scénarios statiques	149
8.4.1.1 Pause café.....	149
8.4.1.2 Journée habituelle vers 11h	158
8.4.1.3 Comparaisons de résultats Bâtiment et Forum avec des erreurs de précisions	164
8.4.2 Scénarios dynamiques	169
8.4.2.1 Trajectoire du professeur.....	169
8.4 Récapitulatif des résultats	173
8.5 Conclusion	175
CHAPITRE 9	176
CONCLUSION	176
RÉFÉRENCES	179

Liste des figures

FIGURE 1 LISTE DES MÉTHODES PAR TRIANGULATION/TRILATÉRATION	22
FIGURE 2 IMAGE ACQUISE PAR INFRAROUGE	23
FIGURE 3 EQUIPEMENT ÉMETTEUR	24
FIGURE 4 L'APPROCHE COLA	25
FIGURE 5 MÉTHODE DE POSITIONNEMENT PAR FINGERPRINTING	26
FIGURE 6 TYPES DE SIGNATURES	27
FIGURE 7 MÉTHODE DE POSITIONNEMENT SYMBOLIQUE.....	27
FIGURE 8 AUTRES MÉTHODES	28
FIGURE 9 DÉPLOIEMENT DE BALISES	29
FIGURE 10 TRAJECTOIRE D'UNE BALISE MOBILE.....	30
FIGURE 11 LISTE DES MÉTHODES DE POSITIONNEMENT HÉTÉROGÈNES	33
FIGURE 12 DIAGRAMME DU SYSTÈME	40
FIGURE 13 DIAGRAMME DU CONTEXTE.....	43
FIGURE 14 MODÉLISATION SIMPLIFIÉE DE L'ENVIRONNEMENT	44
FIGURE 15 PROPAGATION DES ONDES DANS LE MILIEU	45
FIGURE 16 LES ÉTAPES DU SYSTÈME.....	51
FIGURE 17 LES ZONES DE PORTÉE .ENVIRONNEMENT EXTÉRIEUR. ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR	52
FIGURE 18 MODÉLISATION DE LA VISIBILITÉ – ZONE DE PORTÉE	52
FIGURE 19 PUISSANCES ESTIMÉES (dBm)	54
FIGURE 20 CHEMINS RÉSEAUX.....	58
FIGURE 21 PRISES DE DÉCISION	60
FIGURE 22 ERREUR DE DISTANCES (A) WiFi (B) BLUETOOTH	61
FIGURE 23 TEST DE VISIBILITÉ – MÉTHODE ZONE DE PORTÉE	61
FIGURE 24 ERREUR DE DISTANCES (A) N=2 (B) N=2.5 (C) N=3	62
FIGURE 25 ERREUR DE DISTANCES (D) N=3.5.....	63
FIGURE 26 LA PUISSANCE REÇUE EN FONCTION DE LA DISTANCE.....	63
FIGURE 27 PRISE DE DÉCISION DE PREMIER ORDRE	64
FIGURE 28 EQUIPEMENT VISIBLE VIA LES MÉTHODES BASÉES SUR LA FORMULE DE FRIIS.....	65
FIGURE 29 PRISE DE DÉCISION	65
FIGURE 30 ÉTAPES NÉCESSAIRES POUR LA MODÉLISATION GÉOGRAPHIQUE	68
FIGURE 31 GRAPHIQUE ALÉATOIRE D'ADJACENCE.....	69
FIGURE 32 RÉPARTITION DES ÉQUIPEMENTS DANS L'ENVIRONNEMENT	72
FIGURE 33 CAS SIMPLIFIÉ DE LA RÉPARTITION DES ÉQUIPEMENTS DANS L'ENVIRONNEMENT	73
FIGURE 34 GRAPHE D'ADJACENCE.....	75
FIGURE 35 LES RELATIONS SPATIALES	77
FIGURE 36 MODÉLISATION SPATIALE	79
FIGURE 37 MODÉLISATION SPATIALE – PLUSIEURS POINTS RÉFÉRENCES (EQUIPEMENTS MOBILES AVEC INFORMATION DE POSITIONNEMENT).....	80
FIGURE 38 PRINCIPE FSR.....	81
FIGURE 39 LA MOBILITÉ	82
FIGURE 40 LA MOBILITÉ UTILISATEUR (A) ET LA MOBILITÉ RÉSEAU (B).....	83
FIGURE 41 LA MOBILITÉ DE L'ÉQUIPEMENT	84
FIGURE 42 MODÈLE COMBINÉ GAUSS MARKOV ET RRW	86
FIGURE 43 MODÈLE DE MOBILITÉ SINUSOÏDAL	87
FIGURE 44 MODÈLE DE MOBILITÉ LINÉAIRE.....	88
FIGURE 45 APPROCHE ITÉRATIVE	89
FIGURE 46 LE SIMULATEUR	94
FIGURE 47 ENTITÉ DE LA MODÉLISATION GRAPHIQUE DU SIMULATEUR.....	94
FIGURE 48 LES FONCTIONS DU SIMULATEUR.....	95
FIGURE 49 LE MODULE « EQUIPEMENTS »	95
FIGURE 50 LE MODULE « DISTANCE »	96
FIGURE 51 LE MODULE « VISIBILITÉ ».....	96
FIGURE 52 LE MODULE « ERREUR DE DISTANCES »	96
FIGURE 53 LE MODULE « SYSTÈME NON LINÉAIRE »	96
FIGURE 54 LE NOM DU MONDE VIRTUEL	97
FIGURE 55 MODÉLISATION D'UN MONDE VIRTUEL	98

FIGURE 56 MODÉLISATION D'UN BÂTIMENT	99
FIGURE 57 LA MODÉLISATION DU ROBOT.....	100
FIGURE 58 LA VUE DU ROBOT	100
FIGURE 59 LE DÉPLACEMENT DU ROBOT ET DU VÉHICULE	101
FIGURE 60 LA MODÉLISATION D'UN ÉQUIPEMENT RÉSEAU	102
FIGURE 61 EQUIPEMENTS MOBILES : SMARTPHONES	103
FIGURE 62 EQUIPEMENTS MOBILES.....	103
FIGURE 63 LA MATRICE D'ADJACENCE	104
FIGURE 64 LA FONCTION « FSOLVE ».....	104
FIGURE 65 GRAFCET DU SIMULATEUR	107
FIGURE 66 REPRÉSENTATION 3D GÉOGRAPHIQUE (A) MODÈLE RÉEL (B) MODÈLE SIMULÉ	110
FIGURE 67 L'ERREUR EN FONCTION DU NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS DANS LE RÉSEAU	111
FIGURE 68 VARIATION DES PARAMÈTRES LORS DES SIMULATIONS	112
FIGURE 69 L'ERREUR EN FONCTION DU NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS INCONNUS (A) MODÈLE DE FRIIS (B) DISTANCE ERREUR (C) ZONE DE PORTÉE.....	113
FIGURE 70 L'ERREUR EN FONCTION DU POURCENTAGE D'ÉQUIPEMENTS INCONNUS (A) MODÈLE DE FRIIS	114
FIGURE 71 L'ERREUR EN FONCTION DU POURCENTAGE D'ÉQUIPEMENTS INCONNUS (B) DISTANCE ERREUR (C) ZONE DE PORTÉE	115
FIGURE 72 L'ERREUR EN FONCTION DU POURCENTAGE D'ÉQUIPEMENTS INCONNUS POUR 20 ÉQUIPEMENTS	116
FIGURE 73 L'ERREUR EN FONCTION DU POURCENTAGE D'ÉQUIPEMENTS VISIBLES (A) MODÈLE DE FRIIS (B) DISTANCE ERREUR (C) ZONE DE PORTÉE.....	117
FIGURE 74 L'ERREUR MOYENNE EN FONCTION DU NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS	118
FIGURE 75 L'ERREUR MOYENNE POUR CHAQUE ZONE GÉOGRAPHIQUE DE 5M-500M	119
FIGURE 76 L'ERREUR MOYENNE POUR CHAQUE ZONE GÉOGRAPHIQUE DE 5M-500M	120
FIGURE 77 L'ERREUR MOYENNE EN FONCTION DE LA DISTANCE MAXIMALE	121
FIGURE 78 L'ERREUR MOYENNE EN FONCTION DE LA DENSITÉ DES ÉQUIPEMENTS	121
FIGURE 79 L'ERREUR MOYENNE EN FONCTION DE LA DENSITÉ DES ÉQUIPEMENTS	122
FIGURE 80 L'ERREUR MOYENNE EN FONCTION DES ÉQUIPEMENTS INCONNUS – 60 ÉQUIPEMENTS	123
FIGURE 81 L'ERREUR MOYENNE EN FONCTION DES ÉQUIPEMENTS INCONNUS – 30 ÉQUIPEMENTS	123
FIGURE 82 LES DISTANCES RELATIVES ENTRE ÉQUIPEMENTS (A) 30 ÉQUIPEMENTS (B) 60 ÉQUIPEMENTS	124
FIGURE 83 L'ERREUR DE DISTANCES RELATIVES ENTRE ÉQUIPEMENTS (A) 30 ÉQUIPEMENTS (B) 60 ÉQUIPEMENTS	125
FIGURE 84 L'ERREUR MOYENNE EN FONCTION DE L'INCERTITUDE DES POSITIONS CONNUES	126
FIGURE 85 DIAGRAMME RÉCAPITULATIF	127
FIGURE 86 TELECOM & MANAGEMENT SUDPARIS	128
FIGURE 87 L'ERREUR MOYENNE DE LA DISTANCE ESTIMÉE EN FONCTION DU MODÈLE DE VISIBILITÉ	130
FIGURE 88 L'ERREUR MOYENNE DE LA DISTANCE ESTIMÉE EN FONCTION DE LA TECHNOLOGIE UTILISÉE	131
FIGURE 89 L'ERREUR MOYENNE : RÉCAPITULATIF.....	131
FIGURE 90 CRITÈRE TEMPOREL.....	134
FIGURE 91 VUE SATELLITE DE TELECOM & MANAGEMENT SUDPARIS.....	135
FIGURE 92 POURCENTAGE DES FONCTIONS DES ÉQUIPEMENTS MOBILES	137
FIGURE 93 POURCENTAGE DES TYPES D'ÉQUIPEMENTS MOBILES.....	138
FIGURE 94 EQUIPEMENTS, FONCTIONNALITÉS ET CONNEXIONS	138
FIGURE 95 UTILISATION QUOTIDIENNE	139
FIGURE 96 DONNÉES RÉCAPITULATIVES	139
FIGURE 97 TRAJECTOIRE DU PROFESSEUR.....	144
FIGURE 98 TRAJECTOIRE DE L'ÉTUDIANT	145
FIGURE 99 REPRÉSENTATION GÉOGRAPHIQUE	146
FIGURE 100 EQUIPEMENTS MOBILES.....	146
FIGURE 101 MODÉLISATION TELECOM ET MANAGEMENT SUDPARIS	147
FIGURE 102 MODÉLISATION DE LA CAFÉTÉRIA	147
FIGURE 103 MODÉLISATION DE L'ENTRÉE D'UN ROBOT AVEC UN VÉHICULE DANS LE CAMPUS	148
FIGURE 104 STATISTIQUES DES ÉQUIPEMENTS	148
FIGURE 105 MODÉLISATION RÉELLE DES LIENS GÉOGRAPHIQUES.....	149
FIGURE 106 L'ERREUR MOYENNE	150
FIGURE 107 L'ERREUR EN FONCTION DU POURCENTAGE DES ÉQUIPEMENTS.....	150
FIGURE 108 LES DISTANCES RELATIVES ENTRE ÉQUIPEMENTS.....	151
FIGURE 109 (A) L'ERREUR DE DISTANCES RELATIVES (B) LE NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS VISIBLES	152
FIGURE 110 L'ERREUR DE DISTANCE EN FONCTION DES POURCENTAGES DES ÉQUIPEMENTS	152
FIGURE 111 MODÈLE GÉOGRAPHIQUE RÉEL DES ÉQUIPEMENTS	153

FIGURE 112 MODÈLE GÉOGRAPHIQUE SIMULÉ DES ÉQUIPEMENTS	153
FIGURE 113 L'ERREUR EN FONCTION DES ÉQUIPEMENTS	154
FIGURE 114 L'ERREUR EN FONCTION DU POURCENTAGE DES ÉQUIPEMENTS	154
FIGURE 115 MODÈLE GÉOGRAPHIQUE RÉEL.....	155
FIGURE 116 L'ERREUR MOYENNE	155
FIGURE 117 L'ERREUR EN FONCTION DES POURCENTAGES DES ÉQUIPEMENTS.....	156
FIGURE 118 L'ERREUR POUR CHAQUE ÉQUIPEMENT	156
FIGURE 119 L'ERREUR MOYENNE EN FONCTION DES POURCENTAGES DES ÉQUIPEMENTS	157
FIGURE 120 L'ERREUR EN FONCTION DES ÉQUIPEMENTS - XY	157
FIGURE 121 L'ERREUR EN FONCTION DU POURCENTAGE ÉQUIPEMENTS – XY	158
FIGURE 122 MODÉLISATION GRAPHIQUE DES ÉQUIPEMENTS AVEC LES POSITIONS GÉOGRAPHIQUES RÉELLES	159
FIGURE 123 MODÉLISATION GRAPHIQUE DES ÉQUIPEMENTS AVEC LES POSITIONS GÉOGRAPHIQUES ESTIMÉES ...	159
FIGURE 124 L'ERREUR EN FONCTION DES ÉQUIPEMENTS	160
FIGURE 125 L'ERREUR EN FONCTION DU POURCENTAGE DES ÉQUIPEMENTS.....	160
FIGURE 126 LE NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS VISIBLES	161
FIGURE 127 MODÉLISATION GRAPHIQUE DES ÉQUIPEMENTS AVEC LES POSITIONS GÉOGRAPHIQUES RÉELLES	162
FIGURE 128 MODÉLISATION GRAPHIQUE DES ÉQUIPEMENTS AVEC LES POSITIONS GÉOGRAPHIQUES ESTIMÉE	162
FIGURE 129 L'ERREUR OBTENUE EN FONCTION DE L'ÉQUIPEMENT	163
FIGURE 130 L'ERREUR OBTENUE EN FONCTION DU POURCENTAGE DES ÉQUIPEMENTS	163
FIGURE 131 L'ERREUR OBTENUE EN FONCTION DE L'ÉQUIPEMENT	164
FIGURE 132 LES LIENS GÉOGRAPHIQUES ENTRE LES ÉQUIPEMENTS RÉELS	165
FIGURE 133 LES LIENS GÉOGRAPHIQUES ENTRE LES ÉQUIPEMENTS ESTIMÉS	165
FIGURE 134 L'ERREUR EN FONCTION DES ÉQUIPEMENTS	166
FIGURE 135 L'ERREUR EN FONCTION DES ÉQUIPEMENTS AVEC UNE IMPRÉCISION DE 1M.....	166
FIGURE 136 L'ERREUR EN FONCTION DES ÉQUIPEMENTS AVEC UNE IMPRÉCISION DE 2M.....	167
FIGURE 137 MODÉLISATION DES LIENS GÉOGRAPHIQUES ENTRE LES ÉQUIPEMENTS RÉELS	167
FIGURE 138 MODÉLISATION DES LIENS GÉOGRAPHIQUES ENTRE LES ÉQUIPEMENTS ESTIMÉS	168
FIGURE 139 L'ERREUR EN FONCTION DES ÉQUIPEMENTS	168
FIGURE 140 L'ERREUR EN FONCTION DES ÉQUIPEMENTS AVEC UNE IMPRÉCISION DE 1M.....	169
FIGURE 141 L'ERREUR EN FONCTION DES ÉQUIPEMENTS AVEC UNE IMPRÉCISION DE 2M.....	169
FIGURE 142 TRAJECTOIRE DU PROFESSEUR.....	170
FIGURE 143 L'ERREUR EN FONCTION DU POINT DE DÉPLACEMENT	170
FIGURE 144 LE NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS VISIBLES LORS DU DÉPLACEMENT.....	171
FIGURE 145 L'ERREUR EN FONCTION DU POURCENTAGE DES POINTS DE DÉPLACEMENT.....	171
FIGURE 146 TRAJECTOIRE DE L'ÉTUDIANT	172
FIGURE 147 L'ERREUR EN FONCTION DU POURCENTAGE DES POINTS.....	172
FIGURE 148 L'ERREUR EN FONCTION DU POINT	173
FIGURE 149 LE NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS VISIBLES EN FONCTION DU POINT DE DÉPLACEMENT.....	173

Liste des tableaux

TABLEAU 1 TABLEAU COMPARATIF DES TECHNOLOGIES	21
TABLEAU 2 COUVERTURE DES SYSTÈMES DE POSITIONNEMENT	35
TABLEAU 3 DISPONIBILITÉ DES SYSTÈMES DE POSITIONNEMENT	35
TABLEAU 4 CONTINUITÉ DES SYSTÈMES DE POSITIONNEMENT.....	36
TABLEAU 5 TYPE DE POSITIONNEMENT.....	36
TABLEAU 6 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES SYSTÈMES DE POSITIONNEMENT.....	37
TABLEAU 7 PUISSANCES POUR N=2, N=3 ET N=3.5	54
TABLEAU 8 ATTÉNUATION POUR DIFFÉRENTES ZONES GÉOGRAPHIQUES	56
TABLEAU 9 EXEMPLE DE PUISSANCES REÇUES.....	57
TABLEAU 10 TABLE DE ROUTAGE POUR L'ÉQUIPEMENT NUMÉRO 1	58
TABLEAU 11 TABLE DE ROUTAGE POUR L'ÉQUIPEMENT NUMÉRO 9	58
TABLEAU 12 ZONE DE PORTÉE	60
TABLEAU 13 ATTÉNUATIONS – PUISSANCES REÇUES.....	63
TABLEAU 14 DEGRÉ DES NŒUDS	69
TABLEAU 15 NŒUDS ADJACENTS.....	70
TABLEAU 16 LES NŒUDS ADJACENTS	74
TABLEAU 17 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES MODÈLES DE MOBILITÉ	88
TABLEAU 18 NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS	149
TABLEAU 19 COULEUR DES ÉQUIPEMENTS	150
TABLEAU 20 NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS DÉPLOYÉS	152
TABLEAU 21 NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS DÉPLOYÉS	155
TABLEAU 22 NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS DÉPLOYÉS	158
TABLEAU 23 NOMBRE ÉQUIPEMENTS.....	161
TABLEAU 24 NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS	164
TABLEAU 25 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES SCÉNARIOS STATIQUES.....	174
TABLEAU 26 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES SCÉNARIOS STATIQUES - DENSITÉ.....	174
TABLEAU 27 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES SCÉNARIOS STATIQUES – 2D ET 3D.....	174
TABLEAU 28 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES SCÉNARIOS STATIQUES – 1M, 2M.....	174
TABLEAU 29 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES SCÉNARIOS VARIABLES	175

Acronymes

AGNSS	: Assisted GNSS
AGPS	: Assisted GPS
AOA	: Angle Of Arrival
DOP	: Dilution Of Precision
FSR	: Fisheye State Routing
GDOP	: Geometrical Dilution Of Precision
GNSS	: Global Navigation Satellite System
GPS	: Global Positioning System
LBS	: Location Based Service
LOS	: Line Of Sight
NLOS	: Non LOS
PDOP	: Position Dilution Of Precision
RFID	: Radio Frequency IDentification
RSS	: Received Signal Strength
UWB	: Ultra Wide Band
WIFI	: Wireless Fidelity
WLAN	: Wireless Local Area Network.

Chapitre 1

Introduction

Les systèmes de positionnement géographiques ont subi une progression considérable depuis quelques années. Les applications permettant d'obtenir des informations concernant la position géographique d'un individu se trouvent de plus en plus sollicitées par les utilisateurs. L'intérêt pour un positionnement absolu a augmenté comme en témoignent les travaux actuels.

La localisation consiste à déterminer la position physique d'un équipement ou d'un individu. La technique la plus connue et utilisée est le GPS. Ce dernier utilise la méthode de triangulation afin d'aboutir à ses fins, à l'aide de quatre satellites visibles. Cette condition limite le fonctionnement de cet appareil dans des environnements où les signaux ne sont pas accessibles, tel que les bâtiments. Cette problématique de positionnement a intéressé vivement les industriels et les chercheurs. Il y a actuellement une forte tendance à élargir toutes ces recherches, en implémentant de nouveaux algorithmes se basant sur de nouvelles approches. L'évolution des technologies mobiles ainsi que la forte utilisation des équipements informatiques et électroniques nous a encouragé à nous diriger vers l'étude de l'interaction entre ces équipements afin d'en extraire des données utiles à des fins de localisations. Un tel cadre de développement requiert des connaissances approfondies des techniques de localisation existantes ainsi que des bases réseaux.

Les diverses études menées, en particulier dans le cadre de Galileo, convergent vers la mise en avant de deux principaux domaines : les transports et les « LBS » (Location Based Services), les services géo localisés. Les usages ainsi que les contextes d'emploi de la fonction « localisation » sont cependant très différents dans les deux cas. Il s'agit principalement d'une fonction de guidage et de navigation dans le monde de l'automobile, réclamant une précision de localisation de quelques mètres, uniquement disponible avec les systèmes de navigation par satellites. La majorité des applications envisagées dans les LBS (recherche d'un point d'intérêt local, retrouver un ami, jouer de façon géo-localisée, etc.) ne réclament qu'une localisation beaucoup plus « lâche » (quelques centaines de mètres peuvent même suffire dans certains cas). Par exemple, tous les opérateurs français proposent des services basés sur la localisation, et utilisent pour cela l'identification de cellule (le « Cell-Id » implémenté dans les réseaux mobiles). Cette technique n'autorise pas la navigation : les services proposés dans ce sens ont recours à un système de navigation par satellite.

Il est alors légitime de se poser la question de l'intérêt de la localisation en intérieur, ainsi que le besoin en précision dans un tel milieu, et pour quelles applications. Le constat technique est le suivant : il existe une solution de positionnement de précision (quelques mètres), qui ne fonctionne qu'à l'extérieur, et une autre, peu précise, qui fonctionne partout où le réseau mobile est disponible. Les applications de masse qui pourraient tirer profit d'une bonne

précision en intérieur sont actuellement la navigation et les services d'urgence. L'éventail des « cibles » potentiels de telles applications est très large, allant du monde des transports à celui du tourisme, en passant par la sécurité civile ou par l'assistance à des personnes présentant un risque médical.

De même, les notions de qualité de service ont été mises en avant. Les « plates-formes » visées sont également aussi variées que l'automobile, le train, l'individu et son téléphone mobile ou encore l'animal ou les biens. Enfin, la notion de continuité du service de localisation est fondamentale : peut-on déployer des systèmes différents, ayant la même fonctionnalité, et présentant des performances très différentes suivant les conditions d'environnement ?

Les solutions développées lors de la thèse sont de nature à apporter des éléments de réponse particulièrement innovants à toutes ces questions. L'approche originale proposée permettra de faire progresser le domaine du positionnement en milieux contraints, mais également celui du positionnement tout court. En effet, les techniques qui seront étudiées peuvent être déployées dans tous les environnements possibles, intérieurs et extérieurs. S'il n'est pas attendu un niveau de précision et de fiabilité comparable à GPS en extérieur, il faut souligner que l'idée est de fournir un positionnement dans toutes les situations. En particulier, lorsque le terminal mobile ne dispose pas de GPS, il sera tout de même possible de lui fournir des services basés sur sa position.

1.1 Contexte scientifique et motivation

Le marché du positionnement et de la localisation a été dynamisé par l'émergence non initialement planifiée des applications liées au système américain GPS ainsi que par la concrétisation du système en cours de déploiement européen Galileo. Ce dernier est le premier grand programme de recherche commun à l'ensemble de l'Union Européenne. Outre le développement rapide des applications du GPS (automobile, loisirs, sciences, etc.), il apparaît une dynamique spécifique à Galileo dont le principal avantage concurrentiel, par rapport à son homologue américain, concernera la notion d'intégrité qui permettrait de proposer des applications commerciales dans des domaines aussi variés que la banque, l'assurance, le péage routier, l'énergie, ainsi bien entendu que les transports et les télécommunications.

En août 2001, le rapport du Volpe National Transportation Centre, commissionné par le gouvernement Américain, a clairement mis en évidence certaines limites de fiabilité du système GPS et fait des propositions afin d'accroître la robustesse des systèmes de navigation en général. Galileo s'inscrit nettement dans cette voie. Le nombre d'utilisateurs qui seront, à l'horizon 2020, concernés par les applications découlant des systèmes de navigation par satellites est estimé à plus de 3 milliards. Dans le même temps, le budget de recherche et développement alloué spécifiquement à Galileo dans le 7ème PCRD est porté à 350 Millions d'Euros pour la période 2007-2013.

De façon concomitante, des acteurs du monde de la téléphonie mobile entrent dans le monde du positionnement. Nokia, par exemple, est en cours d'acquisition du cartographe NavTeq pour environ 6 milliards d'euros. Lors du "Growing Galileo Event" qui s'est tenu à Bruxelles les 14 et 15 novembre derniers, Teemu Toroi, Director of Strategy and Business Development de Nokia, exposait les objectifs de son entreprise par rapport au positionnement par la phrase suivante [Teemu 2007] : *"Nokia aims to be the Location Product and Service Leader by compelling and novel location enabled products that exceed customer expectations"*. Il ajoutait immédiatement après *"Location products and services work in all environments via implementation of best available technologies"*. Ceci prouve l'intérêt des systèmes de positionnement dans les services de télécommunications, et que les acteurs sont conscients des limitations actuelles de ces derniers.

Les diverses limites des systèmes de positionnement par satellites GNSS (Global Navigation Satellite Systems) sont connues ([Carver & al 2005], [Eissfeller 2004]) et font l'objet de nombreux travaux dans les communautés "traitement du signal" et "positionnement": il ne semble cependant pas que toutes les réponses soient définitives. C'est le cas en particulier de la disponibilité, de la précision, de la fiabilité ou encore du fonctionnement dans certains environnements contraints (intérieur en particulier, mais canyons urbains également). Ainsi, de nombreuses autres techniques sont analysées dans le but de trouver de nouvelles orientations, comme par exemple l'utilisation de systèmes de télécommunications (WPAN, WLAN ou réseaux mobiles). Le fait que les applications et les services basés sur la localisation ne se développent pas plus rapidement (beaucoup moins rapidement que les prévisions de ces trois ou quatre dernières années) est sans doute dû, en partie, à la difficulté actuelle de proposer une continuité de la donnée de position dans des environnements variés (mais réels).

En extérieur, le GPS et à terme Galileo sont d'excellents candidats. Ils présentent même une convergence d'atouts: faible coût (d'équipement et d'utilisation), maturité technique, performances, etc. Le GPS fait donc son apparition dans les téléphones mobiles et les prévisions de marché sont là encore impressionnantes. Il en va autrement dans les autres environnements: canyons urbains ou intérieur. Or, lorsque le positionnement s'invite dans les téléphones mobiles, la cible devient "naturellement" le piéton. Le GPS avoue alors des limites non résolues à ce jour. Nous proposons d'aborder ces diverses limites (couverture, disponibilité, précision et éventuellement consommation électrique) par le biais des "télécommunications sans fil". Les principales directions des travaux mondiaux actuels sont les GNSS haute sensibilité ou "assistés" ([Sun & al 2005], [Syrjarinne & al 2006]), ainsi que l'hybridation [6]. Cette dernière approche se décline en de très nombreuses versions, allant de l'intégration de systèmes (GPS et système inertiel par exemple), jusqu'à la fusion de données partielles, comme par exemple quelques signaux GPS et quelques signaux WiFi. Un autre domaine en cours d'étude concerne la localisation des capteurs dans les WSN (Wireless Sensor Networks). La référence [Kubrak 2007] donne une analyse intéressante des approches: les techniques déployées ne sont pas uniquement fondées sur du positionnement par triangulation, mais prennent en compte la diversité des positionnements physiques parfois disponibles (précis ou pas, fixe ou pas, etc.).

Nous nous proposons, dans le cadre de la thèse, de mixer un ensemble de techniques afin d'évaluer les performances d'algorithmes nouveaux de "propagation" d'une donnée de position dans un réseau sans fil. Le caractère innovant de l'approche repose sur le fait que le positionnement et sa propagation de proche en proche dans les nœuds du réseau utilisent les mêmes types d'algorithmes: ceci permet alors d'utiliser le système de communication pour enrichir le positionnement. De plus, ces algorithmes doivent être capables de gérer la diversité des performances de positionnement disponibles, ainsi que prendre en compte une donnée temporelle de "datation" des positions. La vitesse de propagation de la position ainsi que la dégradation de sa précision étant alors des paramètres importants permettant la classification des performances des diverses approches.

Une analyse des solutions techniques envisagées ainsi que des applications et contextes d'emploi à venir, sur la base de travaux internationaux, nous laisse penser qu'il sera très difficile de trouver une solution basée uniquement sur l'utilisation de signaux de navigation par satellites. Par ailleurs, il nous semble important de mener des investigations sur les rapprochements possibles entre le monde des télécommunications et celui du positionnement. La motivation que nous trouvons dans les solutions proposées réside dans les possibilités de déploiements qu'elles suggèrent. Les applications liées aux télécommunications que permettrait la disponibilité d'une information fiable de positionnement sont incroyablement variées. En particulier, l'arrivée du GPS dans les téléphones mobiles va très vite montrer ses limites dans le cadre du positionnement des piétons (qui passent environ 70% de leur temps en intérieur par exemple) et entraîner des "déceptions" dans le grand public. Les constructeurs de téléphones mobiles en ont pleinement conscience: tout en considérant, à juste titre, que la brique de base reste le GPS, ou plus exactement l'Assisted-GNSS, ils cherchent à trouver des solutions afin de permettre une couverture dans tous les environnements (voir référence [Teemu 2007]).

De plus, l'approche proposée ici est tout à fait complémentaire des travaux mondiaux actuels sur le GPS ou Galileo, orientés principalement vers les développements de l'Assisted-GPS et des récepteurs de haute précision (références [Sun & al 2005], [Syrjarinne & al 2006], [Kaplan & al 2006] et [Parkinson & al 1996]). Enfin, ces travaux pourraient être une première passerelle entre le monde du positionnement et celui des télécommunications à l'Institut TELECOM, étant ainsi le catalyseur pour d'importants développements et projets futurs (gestion des réseaux, sécurité, auto-adaptation, etc.).

Les différents acteurs, tant Français qu'étrangers, travaillent en général sur l'un ou l'autre des aspects "*positionnement*" ou "*réseaux sans fil*". Il est ainsi souvent fait l'hypothèse que le positionnement est disponible par un moyen qui n'est pas l'objet des travaux. Les références bibliographiques citées dans le présent document constituent une exception à cette règle. Dans le domaine du positionnement, de nombreuses équipes sont actives en France (ENAC, ENPC, UMLV, ULCO, Université de Rennes, etc.), mais également en Europe avec par exemple le Politecnico di Torino (Italie) ou l'Universitat Politècnica de Catalunya (Espagne). D'autres très grosses équipes universitaires sont également des acteurs majeurs (IESSG - University of

Nottingham, Department of Geomatic Engineering - University college, London, GPS Lab - Stanford University, California, Laboratory of Geodetic Engineering - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Department of Telecommunications - Norwegian University of Science and Technology, SNAP group - University of New South Wales, Sydney, PLAN group - University of Calgary). Aucune ne propose cependant de pousser l'intégration du positionnement dans les réseaux de télécommunication comme c'est le cas du sujet de la thèse.

Côté industriels, il faut noter les efforts de France Telecom R&D (Grenoble en particulier) dans le domaine du positionnement à l'aide de réseaux locaux sans fil (WiFi), ainsi bien sûr que les groupes comme Thales (GNSS, A-GNSS, etc.), SAGEM ou encore EADS. Certaines PME sont également très performantes dans le domaine comme par exemple BCI à Evry ou Pôle Star et M3Systems à Toulouse.

Le monde du positionnement bouge, des acteurs majeurs des télécommunications s'investissent, des applications et services se développent: il est important de pouvoir proposer des solutions efficaces et innovantes afin de permettre aux systèmes futurs d'avoir un accès cohérent à la donnée de position des terminaux mobiles. Les approches que nous proposons de mettre en place dans cette thèse sont assurément de nature à répondre à cette demande dans une perspective durable car elles sont fondées sur une vision conjointe des télécommunications et du positionnement.

1.2 Objectifs de la thèse

L'idée de base est de trouver des mécanismes de propagation d'une position dans un réseau. Plusieurs pistes sont envisageables: celles fondées sur les diverses techniques classiques de positionnement (intersection de sphères, "fingerprinting" ou encore triangulation) ([Lymberopoulos 2005], [Priyantha 2003] et [Capkun & al 2002]), mais aussi sur des techniques de type positionnement des nœuds dans des WSN (GPS-less [Bulusu & al 2000], Bounding Box [Simic & al 2003], APIT [He & al 2003], Robust Quads [Moore & al 2004], etc.), et également sur des approches de type "détection de proximité" [Pugh & al 2008] ou "positionnement symbolique" [Chelly & al 2008]. L'ensemble des références bibliographiques ([Costa & al 2006], [Eren & al 2004], [Haza & al 2004], [Kushwaha & al 2005], [Langendoen & al 2003], [Niculescu & al 2003], [Polastre & al 2005], [Priyantha 2000], [Stoleru & al 2004], [Whitehouse & al 2006], [Whitehouse & al 2005] et [Zetik & al 2004]) donnent une bonne idée des diverses techniques abordées dans le contexte international.

Notre approche consiste en fait à imaginer qu'une position, disponible à un instant donné (cette notion temporelle est un différentiateur très fort des travaux que nous proposons par rapport à l'état de l'art actuel), peut se transmettre par des moyens de télécommunication d'un terminal mobile à un autre. Ces mêmes moyens sont également utilisables afin de fournir une donnée supplémentaire pouvant permettre de préciser le positionnement, ou simplement d'aider à la détermination d'un indicateur de précision et/ou de fiabilité. En fait, il s'agit, d'une certaine façon, de proposer un "routage de positionnement": de proche en proche la position des nœuds se propage, comme dans le cas du routage des données dans un réseau sans fil. Bien sûr, il est tout à fait possible qu'un nœud du réseau possède une localisation par ailleurs,

par exemple car il dispose d'un GPS et que la position fournie par ce dernier est de bonne qualité: dans ce cas, ce nœud sera considéré comme un point d'ancrage potentiel et devra permettre de préciser la position des autres nœuds. Il est également possible d'imaginer que la fiabilité du positionnement sera améliorée par la présence de telles "ancres".

1.3 Contributions de la thèse

Par rapport aux travaux actuels dans les domaines du positionnement d'une part et de la localisation dans les réseaux de capteurs sans fils d'autre part, nous nous proposons d'inclure des aspects temporels, la détermination et l'utilisation de notion de dynamique des terminaux (vitesse de déplacement si disponible, notion de mobilité, etc.) ainsi que la disponibilité d'un paramètre de précision temps réel de la position d'un nœud quelconque. En effet, le fait que cette information soit disponible pour GPS, mais pas pour d'autres systèmes de positionnement, WLAN par exemple, est de nature à réduire considérablement l'utilisation potentielle de cette donnée de positionnement. Comment une application pourrait-elle gérer une variabilité de la précision de la localisation fournie par le terminal si aucune information n'est disponible à ce sujet?

Le Chapitre 2 est une introduction à la problématique de la localisation ainsi qu'une description non exhaustive des techniques déjà existantes. Les techniques varient et se diversifient en passant par des techniques de trilatération ou de triangulation, des techniques par « fingerprinting », des techniques symboliques, etc.

Le Chapitre 3 est consacré à détailler notre approche de localisation. La stratégie adoptée consiste à étudier les diverses possibilités de propagation d'une position géographique d'un terminal à l'autre à un instant donné dans un milieu défini, par des moyens de télécommunications ainsi que d'effectuer à ce titre une répartition géographique de ces appareils.

Le Chapitre 4, décrit la première approche de localisation. Dans sa première partie, le chapitre regroupe les outils de base nécessaires à la définition et l'étude de la visibilité d'un équipement dans un milieu hétérogène. Dans la deuxième partie, le chapitre porte sur le problème de la mise en correspondance de ces résultats et l'établissement d'une modélisation géographiques des équipements. Il évoque ensuite les différents modèles de mobilité appliqués.

Le Chapitre 5 décrit la notion et les principes de la représentation géographique.

Le Chapitre 6 présente le simulateur développé. Le Chapitre 7 et 8 décrivent les résultats des différentes simulations, obtenus avec notre système. Nous faisons une analyse des résultats ainsi qu'une comparaison pour des scénarios différents.

Chapitre 2

Etat de l'art des techniques de positionnement

2.1 Introduction

Les systèmes de positionnement utilisent différentes technologies tel que le GPS, le Wifi ou le Bluetooth, suivant le type d'environnement géographique. Elles se basent sur différentes méthodes : la trilatération, le fingerprinting ou l'approche symbolique, par exemple. La trilatération reste la méthode la plus répandue et la plus populaire grâce aux techniques de positionnement GNSS. Le fingerprinting a été développé par plusieurs laboratoires de recherche et reste une technique souvent appliquée avec le WiFi. Une variété d'autres techniques a vu le jour au cours des années.

Dans ce chapitre, nous présentons les systèmes de positionnement classés en cinq familles : les méthodes de localisation par trilatération, les méthodes de localisation par fingerprinting, les méthodes de localisation symboliques, les méthodes de localisation hétérogènes et les méthodes de localisation multi-technologies. Nous concluons par un récapitulatif ainsi qu'une comparaison des avantages et des limites de chaque méthode, suivi d'une discussion. Il découlera de cette discussion qu'il serait intéressant d'imaginer une solution permettant de pallier les inconvénients des différentes méthodes tout en gardant les avantages.

2.2 Bref aperçu technologique

Avant d'entamer la description des techniques de positionnement, nous faisons un bref descriptif des technologies sans fil. Ces différentes technologies connaissent un vrai essor depuis plusieurs années.

La technique WiFi (IEEE 802.11) est très utilisée de nos jours. Les particuliers comme les professionnels n'hésitent pas à utiliser les avantages de cette technique afin de transmettre leurs données. Le WiFi permet aux équipements de communiquer et de se connecter à Internet via des points d'accès ou des réseaux Ad-Hoc.

La technique Bluetooth (IEEE 802.15.1) est une technologie destinée aux connexions de courte distance. L'utilisation la plus fréquente se reporte aux téléphones portables. L'un des avantages de cette technologie réside dans l'utilisation d'équipements à bas coût.

La technique Ultra Wide Band (UWB – IEEE 802.15.3a) repose sur la transmission d'impulsions de faible durée. La bande passante peut atteindre alors être importante d'où le nom. La technique UWB se base sur deux méthodes de modulation radio : modulation en position d'impulsions et modulation temporelle. La technique UWB est utilisée pour des communications de courte distance avec de faibles puissances.

La technique ZigBee (IEEE 802.15.4) a été développée pour les réseaux d'équipements consommant une puissance minimale, possédant un besoin de communication sur une zone géographique restreinte à 10m. La technique ZigBee offre des réseaux fiables, auto-organisés, multi-sauts tout en permettant une durée de vie importante des batteries.

Nous faisons une comparaison des différentes technologies décrites ci-dessus, à travers un descriptif succinct des caractéristiques techniques.

Technologie	WiFi	Bluetooth	UWB	RFID	ZigBee
IEEE Spécification	802.11 a/b/c	802.15.1	802.15.3a	802.15	802.15.4
Bande de fréquence	2.4 Ghz - 5 Ghz	2.4 Ghz	3.1-10.6 Ghz	de 125 kHz à 5.8 Ghz	868/915 Mhz à 5 Ghz
Débit maximal	54 Mb/s	1 Mb/s	480 Mb/s	de 2 Kb/s à 10 Mb/s	250 Kb/s
Portée maximale	200 - 300m	10m	10m	de 10 à 70 cm (passifs)	10 - 100m
Puissance d'émission	20 dBm (100 mWatt)	0 - 10 dBm (1 mWatt-0,01 Watt)	-41.3 dBm/Mhz (7,4×10 ⁻⁸ Watt)	33 dBm (2 Watt)	0 dBm (1 mWatt)

Tableau 1 Tableau comparatif des technologies

Nous pouvons constater que la technique WiFi possède la portée la plus importante, jusqu'à 300m. La technique de RFID émet avec une puissance élevée égale à 33dBm. La technique de UWB offre un débit allant jusqu'à 480 Mb/s. Chaque technique possède des avantages. En effet, la performance de ces technologies reste liée à des critères extrinsèques : type d'équipement, type de milieu, nombre d'obstacles, etc.

Dans les paragraphes suivants, nous décrivons les systèmes de positionnement utilisant ces différentes technologies.

2.3 Méthodes de localisation par trilateration ou triangulation

Dans ce qui suit, nous allons décrire l'un des principes les plus connus pour le calcul de la position géographique, la trilatération ou la triangulation, principe de base des systèmes GNSS. Cette technique utilise les distances ou les angles entre récepteur et émetteur pour le calcul de la position. Aujourd'hui, le système le plus connu est le système GPS, qui est basé sur trilatération. La performance de cette méthode est intéressante. Dans des conditions particulières (espace libre, par exemple) elle peut atteindre une précision de quelques centimètres. Nous pouvons considérer la triangulation comme origine de la trilatération. La triangulation est le processus consistant à déterminer l'emplacement d'un point par mesures d'angles par rapport à une base fixe. Or la trilatération utilise la distance entre émetteur et récepteur pour calculer le résultat final.

Les systèmes de positionnement basés sur le principe de la trilatération se multiplient et utilisent, différentes méthodes de mesure. Nous établissons une liste non exhaustive de systèmes de positionnement, développées ces dernières années.

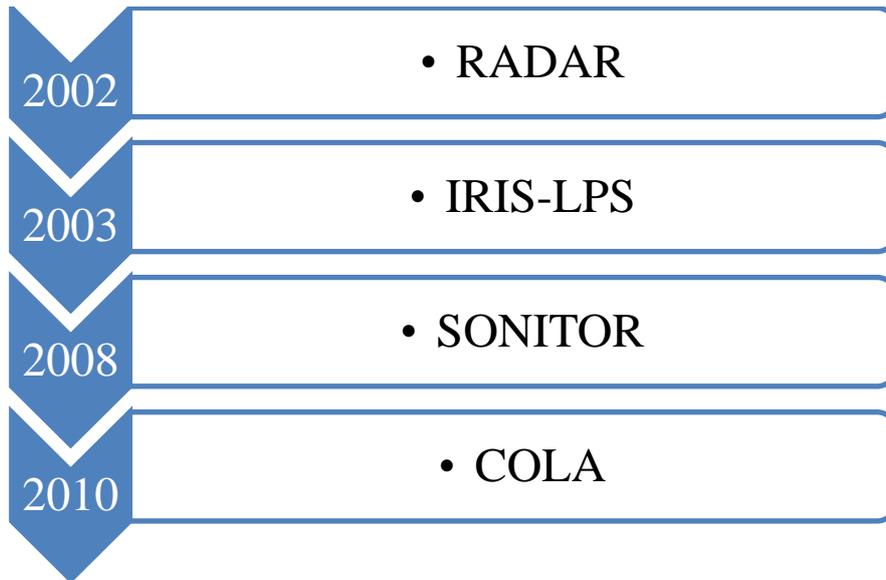


Figure 1 Liste des méthodes par triangulation/trilatération

RADAR [Bahl & al 2000] a été l'un des premiers systèmes de positionnement basé sur les radiofréquences. Ce système a été développé par Bahl au sein du département de recherche de Microsoft en 2000. RADAR utilise les niveaux de puissance reçus de plusieurs émetteurs afin de calculer la position finale en effectuant une triangulation.

Pour ce système de positionnement, plusieurs émetteurs sont placés dans l'environnement géographique. Les zones de portée de ces émetteurs doivent se chevaucher. Une approche empirique est menée afin d'adapter le modèle de propagation.

La mise en place du système a nécessité plusieurs étapes :

- L'étude du modèle de propagation adapté à l'environnement : une collecte de données est effectuée à travers la relève des différents niveaux de puissance reçus. Les niveaux de puissances reçues sont détectés à l'aide d'un ordinateur portable équipé d'un récepteur (WiFi). En outre, lors de cette collecte, l'utilisateur avec son ordinateur portable note sa position géographique au fur et à mesure de son déplacement. Cette étape permet de conclure que les niveaux de puissance reçus varient en fonction de l'orientation de l'utilisateur. La valeur de cette orientation sera prise en compte lors de la collecte. L'objectif de cette collecte est l'établissement d'un modèle de propagation adapté à l'environnement. Pour ce faire, l'étude prend en considération les données précédentes : les positions enregistrées de l'utilisateur, les puissances reçues et les différentes directions attribuées.
- Le choix des k plus proches voisins avec k supérieur à 3 : l'étude a été effectuée pour des valeurs de k variables. Le modèle de propagation appliqué $10 * \log_{10}(\text{signal}/\text{bruit}) \text{ dB}$ permet d'estimer les distances entre les émetteurs et le récepteur. Le système choisi les k émetteurs les plus proches, en utilisant le calcul de la distance euclidienne.
- Le calcul de la position en se basant sur triangulation : La liste des k plus proches voisins permet d'appliquer le principe de la triangulation afin de calculer la position du récepteur. En effet, chaque équipement est caractérisé par une orientation spécifique et donc une direction d'émission.

Les résultats expérimentaux ont été fournis pour un environnement de 43.5m*22.5m. La précision atteinte dans cet environnement est de 2m.

RADAR est un système de positionnement qui nécessite une phase de calibration et de collecte de données. En effet, la première étape nécessite une intervention humaine pour l'enregistrement des données. L'étape de calcul de la position basée sur la triangulation est précédée impérativement par une phase de synchronisation des émetteurs et des récepteurs.

En 2003, un laboratoire allemand de l'Université de Technologie a développé un système de positionnement basé sur la technologie Infrarouge (IRIS-LPS) [Aitenbichler & al 2003].

Les objets à localiser sont équipés de tags actifs émettant des signaux infrarouges vers une caméra statique. Le système se base sur l'étude des caractéristiques intrinsèques des rayons lumineux reçus par la caméra de l'émetteur. La lumière émise par une diode infrarouge apparaît comme une tache lumineuse sur l'image. La taille ainsi que l'intensité dépend de la distance. Les caméras sont reliées à des ordinateurs. Le traitement de l'image nécessite la mise en place de bases de morphologie mathématique :

- L'image est en niveaux de gris. Elle est convertie en une image binaire.
- Une soustraction des zones très claires est ensuite effectuée à la suite. Ce traitement permet de ne pas prendre en compte la lumière émanant du soleil ou de source externe.
- Les coordonnées des points lumineux restants sont déterminées.

La figure 2 montre un exemple d'image acquise. Nous avons des points clairs qui représentent des points à localiser.

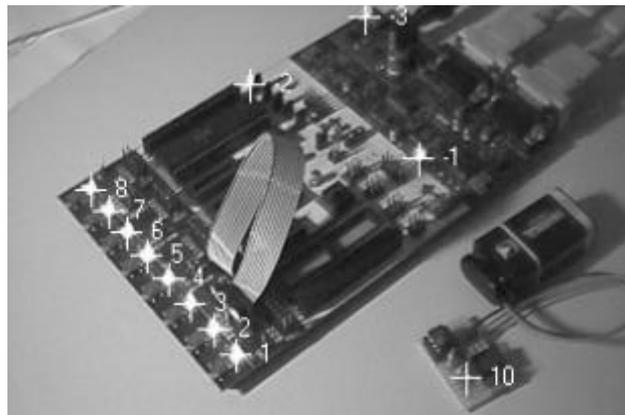


Figure 2 Image acquise par Infrarouge

Suite à cette étude, des distances émetteurs-récepteurs sont estimées et un processus de triangulation est établi pour le calcul de la position.

Une étude fut établie en 2004 par Castano à l'université allemande [Castano 2004], utilisant la technologie Bluetooth. Les équipements doivent être équipés de capteurs Bluetooth. Les calculs sont effectués avec la technique de trilatération, en analogie avec le système GPS et à l'aide de trois stations. Une quatrième station est utilisée pour l'obtention de la précision. Une estimation des distances entre émetteurs et récepteur est établie, en utilisant le modèle de propagation de Friis. Aucune synchronisation entre les équipements n'est nécessaire.

En 2008, IBM en collaboration avec UPMC (Centre hospitalier en Pennsylvanie aux Etats-Unis : <http://www.upmc.com>) a développé un système de positionnement utilisant les

ultrasons : Le SONITOR (<http://www.sonitor.com>). Ce système a été développé essentiellement pour les hôpitaux et les cliniques, afin de permettre une surveillance continue des patients.



Figure 3 Equipement émetteur

Comme le montre la figure 3, un utilisateur est équipé d'un petit émetteur, qui émet à des intervalles réguliers, un numéro d'identification. Les récepteurs fixés à des endroits prédéfinis auparavant reçoivent les signaux émis. La position de l'utilisateur est ainsi calculée grâce à la triangulation.

Le système a été commercialisé essentiellement dans les hôpitaux. Pour la mise en place du système, il est nécessaire d'ajouter une nouvelle infrastructure. De nouveaux équipements émetteurs et récepteurs d'ultrasons doivent être placés. L'utilisateur (Patient, en général) est équipé d'un émetteur. Si cet utilisateur transmet le signal à trois récepteurs minimum, l'utilisateur se trouve dans la même pièce que les trois récepteurs.

Les ultrasons n'interfèrent pas avec les autres signaux présents dans l'environnement. Ce fait représente un point positif du système. Les ultrasons ne se propagent pas au delà des murs d'une pièce. Néanmoins, le système reste coûteux dans la mise en œuvre.

L'approche de trilatération à complexité réduite dans les réseaux sans fil (COLA) [Chai-Yen 2010] a été développée dans un laboratoire de recherche allemand par Chai Yen, en 2010. Cette approche met en œuvre un système utilisant la puissance reçue ainsi que la méthode de trilatération simplifiée au bidimensionnel pour le calcul de la position géographique. La base essentielle de cette approche réside dans l'utilisation de nœuds référence.

Contrairement aux systèmes de positionnement basés sur la trilatération 3D, le système présenté se limite à l'espace bidimensionnel.

L'approche COLA utilise des nœuds de référence pour l'estimation des distances. Chaque nœud possède des positions géographiques qui diffèrent au niveau de l'altitude. L'approche assume aussi que les nœuds de référence puisse transmettre des signaux à deux autres nœuds, situés sur le même axe vertical. Le nœud de référence est équipé de deux émetteurs et de deux antennes de tailles différentes. Les coordonnées du nœud sont définies par x_i , y_i et z_i . Le processus de localisation s'effectue suite à une réception d'un signal radio du nœud non référencé. L'objectif de l'approche COLA est la détermination de la position géographique en se basant sur l'estimation de la distance via la Formule de Friis ainsi que la trilatération.

La figure 4 présente le concept COLA avec plusieurs nœuds déployés sur les mêmes axes verticaux. Un nœud central S est localisé grâce aux nœuds références A1, A2 et A3.

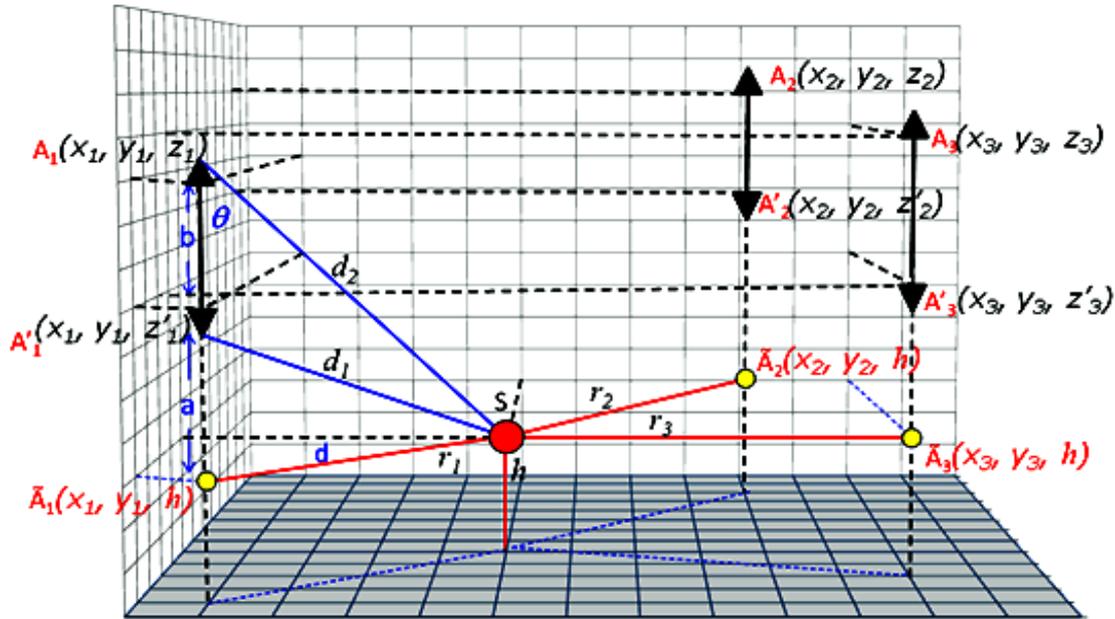


Figure 4 L'approche COLA

La distance d d'un équipement est estimée grâce à la puissance reçue.

Pour la résolution du système, comme mentionné précédemment, il est nécessaire d'effectuer une estimation de la distance. A cette fin, le système modélise la puissance reçue pour un environnement extérieur, comme suit :

$$P(d) = P(0) - 10 \times 2 \times \log_{10}(f) - 10 \times 2 \times \log_{10}(d) + 27.56$$

Où P_d est la puissance reçue en dBm à la distance d en mètres, P_0 est la puissance émise, f est la fréquence.

La puissance reçue pour un environnement intérieur, se présente comme suit :

$$P(d) = P(0) - 10 \times 2 \times \log_{10}(f) - 10 \times 2 \times \log_{10}(d) - 32.44$$

L'étude prend en considération un paramètre n compris entre 2.7 et 4.3.

$$d = 10 \times \frac{[P(0) - F_m - P_r - 10 \times n \times \log_{10}(f) + 30 \times n - 32.44]}{10 \times n}$$

Où F_m est le paramètre d'atténuation.

Le passage d'une trilération 3D à une trilération 2D s'effectue en établissant une projection de la coordonnée z du nœud.

L'approche COLA permet de simplifier les méthodes de trilération et de les ramener à des calculs avec deux inconnus. Ce point représente un point positif. Néanmoins, la mise en place de nœuds référence présente une nécessité d'opération de calibrage. Cette opération n'est pas toujours aisée à réaliser.

2.4 Méthodes de localisation par fingerprinting

La technique de « fingerprinting » est la deuxième technique, la plus connue. L'approche se base sur une modélisation expérimentale des niveaux de puissances reçues à l'aide d'une carte de niveaux. Cette carte de niveaux est affectée à des positions géographiques de l'environnement.

Les algorithmes basés sur la technique de « fingerprinting » sont considérés comme les plus robustes. Ils prennent en compte, les atténuations subies par les ondes radio dans les

environnements intérieurs à travers des mesures expérimentales. La création de la carte de niveaux est appelée phase de calibration. Les positions géographiques avec des niveaux enregistrés sont appelées point de calibration. Les étapes de la technique « fingerprinting » se résument à travers une phase de collecte et une phase de comparaison. L'équipement souhaitant se localiser effectue une comparaison des données reçues aux données enregistrées et en déduit sa position.

Malgré l'amélioration de la précision des résultats de positionnement, la technique de « fingerprinting » présente plusieurs inconvénients. Afin de mettre en place un système de positionnement par « fingerprinting », une intervention humaine longue est nécessaire afin d'effectuer la collecte des données. Une mise à jour régulière est indispensable, suite aux changements qui peuvent affecter l'environnement, pour obtenir des résultats fiables.

Les systèmes de positionnement peuvent être classés en systèmes basés sur la reconnaissance des points sur la carte de niveaux et en systèmes basés sur des algorithmes probabilistes. Dans le premier cas, des vecteurs de reconnaissances sont construits. Ces vecteurs contiennent des informations concernant les niveaux de puissance de tous les points d'accès. Chaque vecteur est associé à un point de calibration. Dans le deuxième cas, les systèmes basés sur les algorithmes probabilistes, les données acquises lors de la phase de calibration sont résumés à l'aide d'une fonction de densité de probabilité. Chaque point de calibration contient sa propre fonction de densité de probabilité des niveaux de puissance. La figure 5 ci-dessous schématise les résultats obtenus. La position est estimée en utilisant le maximum de vraisemblance.



Figure 5 Méthode de positionnement par fingerprinting

Développée en 2000, aux Etats-Unis [Caruso 2000], essentiellement pour la localisation des robots, la technique du COMPASS se base sur l'utilisation de compas électronique.

Un compas électronique fournit des résultats compris entre 0° et 360° ; décrivant le nord pour 0° , l'est pour 90° , le sud pour 180° et l'ouest pour 270° . Il est facilement utilisé pour la localisation des robots dans un environnement extérieur. Dans un environnement intérieur, les mesures magnétiques peuvent subir des interférences causées par d'autres sources comme par exemple des parois métalliques. Pour les besoins de ce système, une collecte de données est effectuée dans un couloir d'un bâtiment. Suite à cette collecte, une extraction des différents types d'interférences est effectuée en appliquant le modèle polynomial des moindres carrés. Cette extraction permet d'établir des « signatures » d'interférences liées aux différents endroits géographiques. Une « signature » est définie comme suit :

- Une signature ne peut être détectée qu'au niveau d'un nombre défini « m » de positions géographiques
- Une signature doit être définie pour un maximum ou un minimum de points géographiques

- Les intersections de directions ne sont pas comptabilisées
- L'ensemble des critères doit être propre à chaque signature

La figure 6 ci-dessous présente les exemples de signatures obtenues. Nous pouvons constater qu'une signature est reliée à l'allure de la courbe à un endroit bien défini. Ces signatures sont enregistrées dans la base de données à des fins de localisation.

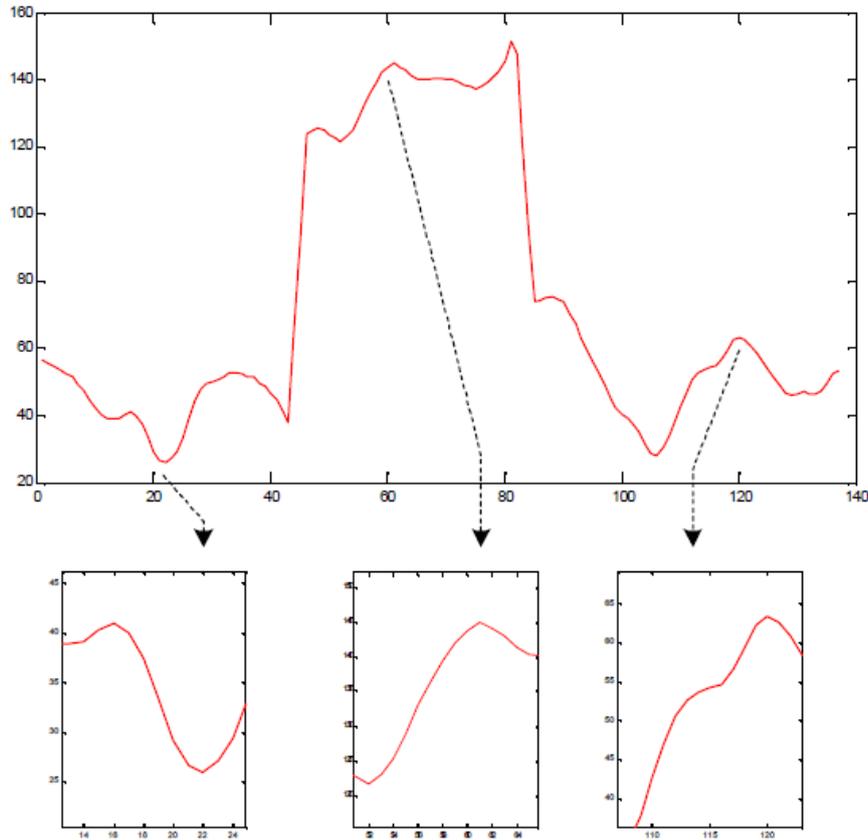


Figure 6 Types de signatures

Ce système a été appliqué lors d'un déplacement d'un robot dans un environnement intérieur, constitué de trois couloirs. Les « signatures » stockées ont permis la localisation du robot. A chaque point le système compare les données reçues avec les données enregistrées dans la base et déduit sa position relative, comme décrit auparavant.

2.5 Méthodes de localisation symboliques

Parmi les travaux effectués par notre groupe de recherche [Chelly 2007], nous pouvons retrouver le système de positionnement basé sur l'approche symbolique.



Figure 7 Méthode de positionnement symbolique

L'approche symbolique utilise des symboles (bureau, couloir, etc.) pour situer une personne dans un environnement. Cette approche ne se focalise pas sur une précision importante mais une fiabilité de résultat. Le résultat du système de positionnement ne se limite plus à un point avec des coordonnées géographiques mais à une pièce ou un couloir, par exemple.

Cette approche nécessite la mise en place de plusieurs équipements ou points d'accès Wifi déployés dans l'environnement ainsi qu'un équipement récepteur.

L'approche symbolique utilise les niveaux de puissances reçues par l'équipement mobile. Chaque point d'accès est caractérisé par trois zones. La première zone englobe toutes les pièces où puissance supérieure au premier seuil. La deuxième zone englobe toutes les pièces où puissance supérieure au deuxième seuil. La troisième zone englobe toutes les pièces où puissance supérieure au troisième seuil. Les différents tests établis pendant ces recherches ont permis de fixer les seuils pour l'environnement de Telecom SudParis. Un équipement mobile pendant son déplacement reçoit plusieurs signaux de plusieurs points d'accès. Pour chaque point d'accès, le système définit la zone correspondante. La localisation finale de l'équipement présente l'intersection des différentes zones.

2.6 Autres méthodes de localisation

La figure 8 présente l'évolution des systèmes de positionnement, basés sur d'autres méthodes.

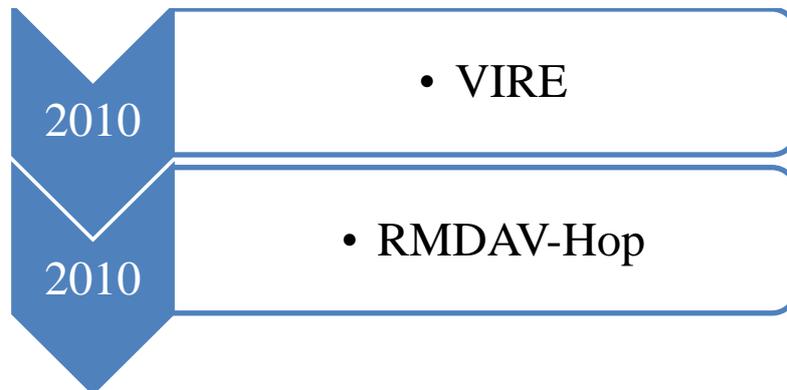


Figure 8 Autres méthodes

En 2010, des recherches menées en Chine à l'Université des Sciences et des Technologies, se sont dirigées vers une technique de positionnement, utilisant la technologie RFID : VIRE (Virtual Reference Elimination) [Yiyang 2007]. Des balises de référence avec des coordonnées géographiques connues ainsi que des balises objets sont placées dans une grille plane. Cette grille peut être divisée en plusieurs petites grilles. Chaque grille est couverte par quatre balises de référence. Celle-ci est divisée en $N \times N$ grilles virtuelles. Les grilles virtuelles sont couvertes par des balises de références virtuelles. L'algorithme VIRE utilise une interpolation afin de déterminer la puissance reçue des balises de référence virtuelles.

VIRE introduit aussi le concept de carte de proximité qui couvre toute la zone géographique de positionnement. La carte est construite pour des petites zones géographiques et le centre de chaque carte correspond à une balise de référence virtuelle. La technique VIRE aborde la notion de balises de références virtuelles et améliore ainsi la précision des résultats.

Dans un environnement réel, la modélisation de la propagation des ondes reste complexe. L'interpolation linéaire ne permet pas d'atteindre des résultats satisfaisants. De ce fait, le système VIRE se base sur l'interpolation de Newton. Pendant la phase de positionnement, si le nombre de balises objets à positionner augmente, le nombre de balises références doit suivre cette évolution. Chaque groupe de huit nouvelles balises de référence est situé autour d'anciennes balises de références. Chaque grille est donc divisée en $2N \times 2N$.

Dans tout ce qui précède nous avons décrit les principes théoriques de l'approche. La figure 9 présente un cas expérimental.

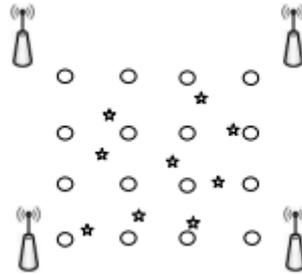


Figure 9 Déploiement de balises

Les balises de référence sont distribuées sur une grille 4×4 . Les balises RFID sont placées aux quatre coins de la zone de positionnement. La distance entre les deux balises de références les plus proches s'élève à 1m et la distance entre une balise de référence ainsi qu'une balise RFID. Pendant le temps d'acquisition (5mn), toutes les valeurs des puissances sont estimées. Le système VIRE effectue une interpolation dynamique. Chaque grille couverte par quatre balises de références est décomposée en grilles virtuelles couvertes par quatre grilles virtuelles, en passant d'une taille 30×30 à 60×60 .

Un autre système de positionnement a été développé par un laboratoire chinois du ministère de l'éducation, en 2010 utilisant une approche originale [Tingting 2010]. En effet, la base du système réside dans l'estimation de la distance entre les différents équipements d'un environnement via le nombre de sauts effectués. Dans les algorithmes classiques, ces distances peuvent être calculées en effectuant par exemple le produit entre le nombre de sauts ainsi que la distance moyenne entre équipement. Dans un réseau complexe, cette approximation peut s'avérer très peu fiable. Le système RMADV-hop utilise des balises de références mobiles. Ces balises de références se déplacent suivant une trajectoire prédéfinie et émettent leurs positions géographiques respectives à des intervalles réguliers.

L'environnement de positionnement est défini comme une zone géographique rectangle de dimensions $L \times W$. La trajectoire de la balise mobile est définie comme suit :

La balise de référence passe d'une position $(0, W)$ à une deuxième position $(D, 0)$. La vitesse de la balise est fixe.

La trajectoire est linéaire. Quand la balise atteint le bord de la zone géographiques, la balise se déplace vers la position $(2D, W)$.

Pendant sa trajectoire, la balise émet ses coordonnées géographiques à des intervalles réguliers. La distance D est ajustée suivant les besoins du système.

La figure 10 présente une trajectoire possible d'une balise mobile.

La trajectoire prédéfinie de la balise mobile présente la clé de ce système. En effet, cette dernière permet de limiter l'erreur due à une localisation classique basée sur le nombre de sauts.

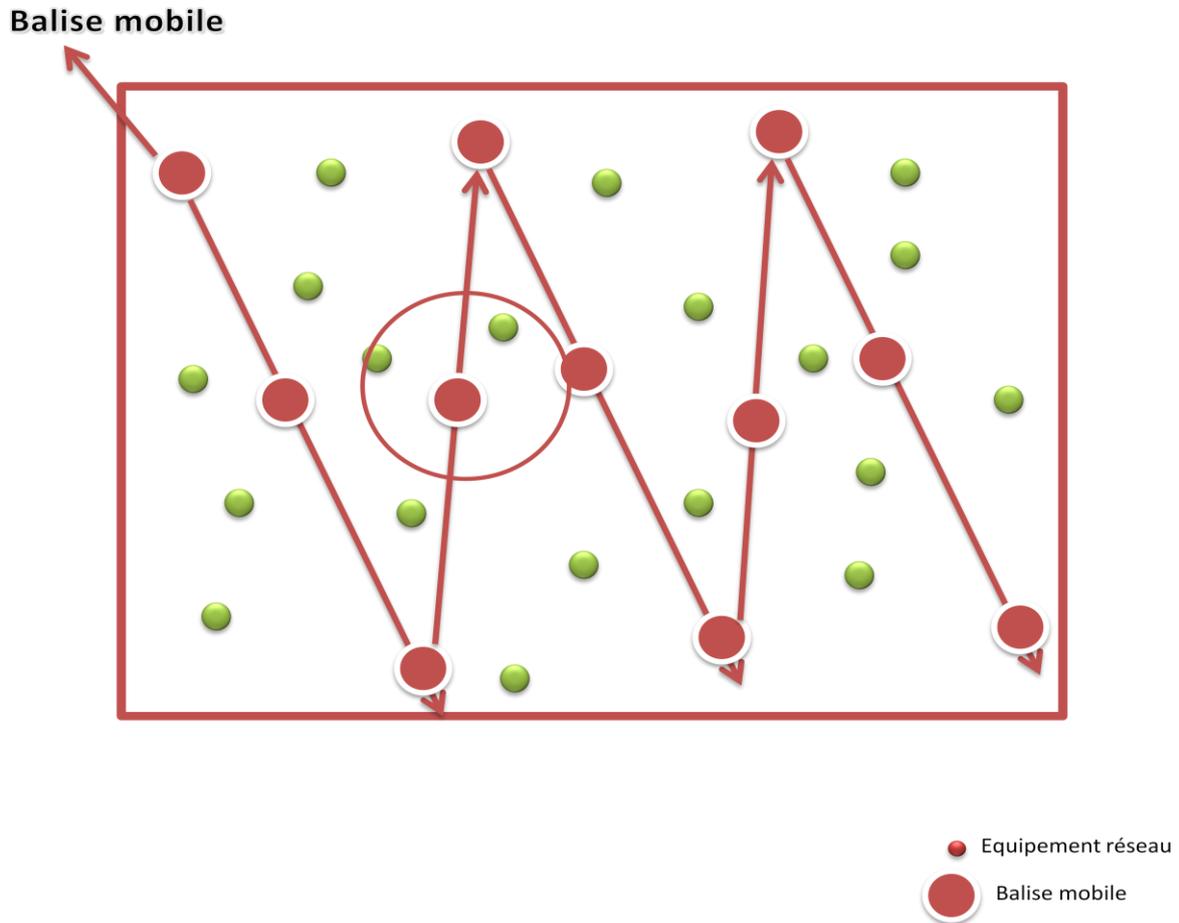


Figure 10 Trajectoire d'une balise mobile

La localisation s'effectue en quatre étapes :

- La balise mobile émet ses coordonnées lors de sa trajectoire.
- Les équipements réseau sans coordonnées connues, reçoivent des informations de la balise mobile ainsi que des autres nœuds du réseau. Ils enregistrent les niveaux de puissances reçues et estiment les différentes distances.
- A la fin de la trajectoire, le système calcul la distance moyenne entre les équipements suivant les différentes puissances reçues ainsi que le nombre de sauts.
- Le calcul de la position d'un équipement s'effectue : par le calcul des coordonnées du centre des deux équipements connectés, par trilatération ou par la méthode du maximum de vraisemblance.

Le système aborde une nouvelle approche intéressante avec une balise mobile. Néanmoins, une intervention humaine préalable est nécessaire. Une trajectoire doit être établie et doit être respectée afin de fiabiliser les résultats de positionnement.

2.7 Méthodes hétérogènes de localisation

Locate Pro Indoor [Pujol & al 2000] est un système développé aux environs de 2000, basé sur le système EKAHAU : Système de positionnement commercialisé basé sur le Wifi. Ce système localise les biens et les personnes en intérieurs. C'est un parmi les systèmes de localisation en intérieur commercialisé.

Le principe de la technique réside dans le calibrage et l'étude de l'empreinte digitale de la force du signal. La précision du système atteint 1-2 m. Toutes les données sont stockées sur un serveur, qui est un handicap en cas de panne.

Les études effectuées par l'université de Californie en 2001 [Bing & al 2001] se sont focalisés sur l'optimisation convexe pour calculer la position d'un nœud d'un réseau Ad-Hoc. Dans ces réseaux, un nœud peut communiquer avec un autre nœud du réseau si et seulement 'il est distant d'une distance d inférieure à un seuil préétabli.

Cette théorie permet donc de mettre en œuvre un schéma de distribution des nœuds et en déterminer leurs positions respectives.

La technique développée nécessite une configuration centralisée du réseau. Tous les nœuds doivent communiquer leurs informations à un nœud central afin de résoudre le problème d'optimisation. L'algorithme de calcul se base sur une optimisation polynomiale, les principes utilisés sont :

Minimiser $c^T \times x$

En sachant que : $Ax < b$

Ceci revient à minimiser une fonction linéaire à travers un polyèdre.

La condition essentielle dans un réseau utilisant des ondes radio est la limitation de distance pour communiquer entre deux nœuds. Cette condition est représentée par une sphère entourant le point de référence et dont le rayon est égal à la distance entre les deux nœuds.

Dans la suite des recherches, la méthode fut implémentée en limitant la surface entre les deux communicants à un cône.

Les travaux futurs peuvent être redirigés selon le document vers une combinaison entre l'approche circulaire et l'approche angulaire représentée par les cônes.

L'université de New Jersey en 2003 [Drago & al 2003] a étudié la localisation dans les réseaux Ad-Hoc. Les réseaux Ad-Hoc sont des réseaux sans fil capables de s'organiser sans infrastructure définie préalablement. Chaque entité communique directement avec sa voisine. Pour communiquer avec d'autres entités, il lui est nécessaire de faire passer ses données par d'autres qui se chargeront de les acheminer.

La méthode utilisée par cette université consiste à développer des algorithmes de positionnements dans ces réseaux. Cinq méthodes ont été mises en place.

La première méthode consiste à prendre en considération les sauts effectués lors de la transmission du message d'un nœud à l'autre. A chaque saut, la distance parcourue est calculée. A la fin de la réception, la distance finale est atteinte grâce à la somme de toutes les distances. Au final, la position est calculée avec la méthode de trilatération connue dans le calcul GPS classique. L'inconvénient de cet algorithme est le calcul des distances à chaque saut pouvant ainsi augmenter les erreurs au fur et à mesure.

La deuxième méthode calcule le nombre de sauts effectués de l'émetteur au récepteur ainsi que la distance moyenne entre les nœuds. La distance résultante est le nombre de saut multiplié par la distance moyenne. Ce type de méthode peut amener à des erreurs aberrantes dans le cas où on peut avoir des distances entre nœuds de différence importante.

La troisième méthode consiste à mesurer la distance entre les nœuds à l'aide de la force du signal reçu et non pas le nombre de sauts. Le principe reste le même.

La quatrième méthode utilise la distance euclidienne. En effet, les principes géométriques sont utilisés. Afin de calculer la distance par rapport à un point de référence, deux nœuds voisins sont nécessaires ainsi qu'un troisième pour enlever l'ambiguïté par la suite.

La dernière méthode utilise une localisation locale et non globale avec les distances euclidiennes.

Les résultats obtenus diffèrent selon les topologies utilisées. Pour les méthodes utilisant les distances euclidiennes, la précision est meilleure pour les topologies non isotopiques. Les méthodes utilisant le nombre de sauts, les résultats sont pratiquement les mêmes pour les différentes topologies.

Un système de positionnement développé par les chercheurs de Lausanne en 2004 utilise les détecteurs infrarouges afin de localiser les robots.

Le robot doit détecter les récepteurs avec la puissance la plus forte dans son entourage. Il calcule ainsi l'angle entre ces deux équipements grâce à la formule suivante :

$$\theta = a \times (V1 - V2)$$

Avec V1, V2 les deux signaux reçus et a une constante prédéfinie auparavant calibrée grâce à des mesures expérimentales.

Trois façons de calcul de la position finale ont été mises en place.

La première méthode calcule la distance avec l'équation suivante :

$$D = V1 / \cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right)$$

La deuxième méthode calcule la distance avec les équations suivantes :

$$\theta = b(V1 - V2) / V1$$

$$\text{Et } D = \sqrt{V1^2 + V2^2}$$

La troisième méthode calcule la distance avec les équations suivantes :

$$D = \sqrt{V1^2 + V2^2} + V1^2 \times \cos(\varphi)$$

$$\varphi = \text{anglequadrature} + \theta$$

Les résultats dépendent des signaux reçus et varient donc avec le nombre d'émetteurs infrarouge positionnés. L'inconvénient de ce mécanisme est que ces équipements doivent être impérativement en visibilité directe avec le robot. Ces émetteurs ne peuvent émettre des signaux à une distance élevée.

En 2010, un centre de recherche à Singapour [Thompson & al 2010] a développé un système de positionnement basé sur la technique de « fingerprinting » ainsi que l'échelonnage multidimensionnel. La technique d'échelonnage multidimensionnel explore les similarités ainsi que les dis-similarités dans les données acquises. C'est une technique basée sur les calculs statistiques. Le système présenté utilise la distance euclidienne entre les équipements RFID ainsi que les similarités caractéristiques. L'environnement a été équipé de balises RFID

et chaque balise couvre la totalité de l'environnement. Le système mesure les niveaux de puissances à différents points de référence. Ensuite, la localisation s'effectue à l'aide de la mesure de la puissance des balises RFID ainsi que les mesures de balises de référence. Après avoir utilisé la technique de « fingerprinting », le système améliore les résultats obtenus à travers les données statistiques.

2.8 Méthodes de localisation multi-technologies

Les méthodes dans la suite sont décrites comme suit :

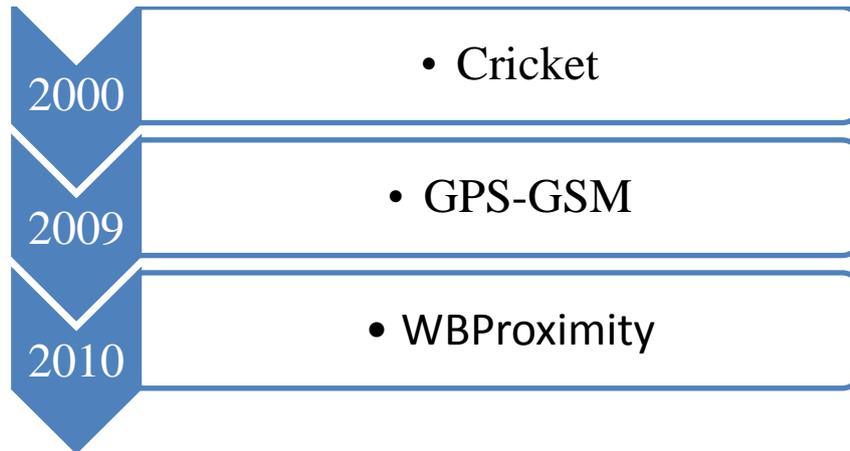


Figure 11 Liste des méthodes de positionnement hétérogènes

La méthode Cricket [Birch & al 2000] utilisée par l'université « Cambridge » en 2000 utilise les ondes radio ainsi que les ultrasons.

L'objectif est de développer un système qui permet aux équipements mobiles de connaître leurs emplacements physiques.

En effet, l'équipement à localiser doit être muni des deux récepteurs. Il pourra ainsi déterminer le point de référence le plus proche et calculer sa position en étudiant la différence de vitesse de propagation entre le signal radio et le signal sonore. En ayant cette différence, le calcul de la position est mené.

Le système Cricket utilise des balises pour diffuser des informations sur une même zone géographique d'auditeurs. Une balise est un petit périphérique rattaché à certains emplacements géographiques. En règle générale, il est obtenu par le "propriétaire" de l'emplacement, et mis à un endroit discret comme un plafond ou au mur.

Chaque point de référence possède son propre identifiant et il transmet avec les informations utiles. Le choix du point le plus proche est effectué à l'aide de trois algorithmes différents. Le premier «Majority » utilise seulement les ondes radio et détermine le point le plus proche en choisissant celui émettant le signal le plus élevé. Les résultats ne sont pas satisfaisants avec cette méthode. Le deuxième algorithme « MinMean » calcule la distance moyenne de chaque point de référence et choisi la distance minimale. Cette méthode ne prend pas en considération l'impact des chemins multiples lors des propagations. Le troisième algorithme « MinMode » consiste à étudier les signaux émis pendant un « n » fenêtres de temps et choisir ainsi le point de référence avec la distance moyenne la plus courte.

Le positionnement d'une balise dans une salle ou dans un espace représente une tâche non triviale. Une façon de surmonter l'erreur de positionnement est de maintenir un référentiel centralisé à l'emplacement physique de chaque balise et de fournir ces données aux utilisateurs.

L'inconvénient majeur de cette idée consiste dans la possible interférence entre les différents signaux, entraînant ainsi une erreur au niveau du résultat final. La localisation des points de référence doit être minutieusement étudiée afin de permettre l'amélioration des résultats réels et donc une étude au préalable est nécessaire. L'utilisation de la notion de temps implique une synchronisation entre les appareils qui est alors précédée donc d'un calibrage impératif.

L'université allemande de Paderborn, a développé en 2009 [Pesche & al 2009], un système de positionnement basé sur les technologies GPS et GSM. Celle-ci a extrait ses bases des techniques inertielles en effectuant des calculs de vitesse grâce au système GSM. Le système est mis en œuvre pour des déplacements en véhicule, lors de la perte de signaux GNSS.

En 2010, l'université de Darmstadt en Allemagne [Zaid & al 2010] a mis au point un système de positionnement basé sur la technique de « fingerprinting » : WBroximity. Le point qui diffère avec les techniques précédentes réside dans le fait que les technologies utilisées sont le Bluetooth ainsi que le WiFi. L'utilisation de deux technologies différentes pour l'acquisition de données permet d'obtenir une précision plus importante. Le système utilise une approche symbolique dans le cas pratique pour localiser l'utilisateur. Par exemple, un utilisateur se situe dans un bureau ou dans un couloir.

Le système utilise une application qui permet à l'utilisateur de mettre à jour des données telles que sa position GPS, si ce dernier peut l'acquérir ou la description de son emplacement.

2.9 Récapitulatif et discussion

Les systèmes décrits précédemment peuvent être définis comme systèmes de positionnement en intérieur ou système de positionnement en extérieur. Ils peuvent aussi être classés suivant leurs techniques de calcul, l'étendue de la couverture, la précision, le type de positionnement, etc. Nous avons établi un tableau récapitulatif avec quelques caractéristiques principales.

Malgré le développement et les progrès des nouvelles technologies, beaucoup de systèmes de positionnement nécessitent encore le déploiement d'infrastructures additionnelles. Cela engendre un coût supplémentaire, une intervention humaine ainsi qu'un temps de déploiement important.

Les systèmes de positionnement utilisant une des technologies suivantes : RFID, WiFi ou Bluetooth élaborent des algorithmes avec la mise en place d'équipements supplémentaires tels que des points d'accès dans l'environnement géographique.

Les systèmes de positionnement diffèrent aussi au niveau de la couverture. Si un système est accessible sur la totalité de la zone habitable, il est décrit comme global. Si ce dernier est accessible, par exemple seulement dans un lieu privé tel qu'un hôpital, ce dernier est local.

Le tableau 2 présente un aperçu de différentes couvertures.

Système	Global/Local
GNSS : HSGPS/AGPS Pseudolites/Répéteurs	Global Local
Réseaux Mobile	Global
WLAN, UWB, Bluetooth, Infrarouge	Local
Réseaux de capteurs	Local
Systèmes inertiels	Global

Tableau 2 Couverture des systèmes de positionnement

D'autre part, les systèmes de positionnement peuvent proposer une qualité de service. Cette qualité dépend entre autre de la disponibilité du service ainsi que de la précision du positionnement. Une disponibilité de service définit la possibilité de l'équipement à fournir une position à l'utilisateur. Cette disponibilité est liée par exemple à la portée des ondes radio. La précision définit l'erreur de la position calculée par rapport à la position réelle. Le tableau 3 résume quelques systèmes de positionnement et qualifie leurs disponibilités.

Système	Disponibilité
GNSS : - HSGPS - AGPS - Pseudolites - Répéteurs	Moyenne ou nulle Moyenne Très bonne Très bonne
Réseaux Mobile : - Cell-ID - E-OTD - U-TDOA - AOA	Très bonne
Réseaux Locaux sans fil : - WiFi - Bluetooth - UWB	Fonction du nombre de points d'accès déployés
Réseaux de capteurs : - Infrarouge - Ultrason - RFID	Fonction du nombre de capteurs déployés

Tableau 3 Disponibilité des systèmes de positionnement

Un système de positionnement avec un service continu peut être décrit comme universel. Le système doit fournir la même précision lors d'un passage d'un environnement extérieur vers

un environnement intérieur. Actuellement, la précision des systèmes de positionnement se dégradent considérablement lors de changement de type d'environnement.

La continuité des systèmes de positionnement n'est pas encore totalement effective :

Technique	Continuité intérieur/extérieur
GNSS : - HSGPS/AGPS - Pseudolites/Répéteurs	- Oui - Non
Réseaux Mobile	Oui
WLAN, UWB	Non
Réseaux de capteurs	Non
Systèmes inertiels	Oui

Tableau 4 Continuité des systèmes de positionnement

Les systèmes de positionnement peuvent être classés en tant que absolu, relatif ou symbolique. Un système de positionnement absolu fournit à l'utilisateur une position géographique définie dans un repère universel comme le WGS84, par exemple : Système GPS. Un système de positionnement relatif offre un positionnement par rapport à la position précédente. Un système de positionnement symbolique se limite à une zone géographique en tant que résultat de positionnement tel qu'un bureau ou un couloir.

Le tableau 5 spécifie le type de positionnement obtenu par certains systèmes de positionnement.

Technique	Type du positionnement
GNSS	Absolu
Réseaux Mobile : - Cell-Id - E-OTD - U-TDOA - AOA	- Symbolique - Absolu - Absolu - Absolu
Réseaux Locaux sans fil : - WiFi - Bluetooth - UWB	- Symbolique/Absolu - Symbolique/Absolu - Absolu
Réseaux de capteurs : - Infrarouge - Ultrason - RFID	- Symbolique - Absolu - Symbolique
Systèmes inertiels	Relatif

Tableau 5 Type de positionnement

L'examen du tableau récapitulatif global ci-dessous, nous aide à chercher à profiter des avantages de chaque technique et à mettre en place un système global assurant une continuité de service de positionnement sans nécessité de déployer d'infrastructure quelconque. L'approche développée est décrite dans la suite du document.

Systèmes de positionnement	Technologie	Précision	Méthodes	Range Free	Range Based	Impact de la synchronisation	Impact du multi-trajet	Calib/Hist
Active Badge	Infrarouge	Grandeur d'une pièce	RSSI	x		Faible	Moyen	-
Active Bat	Ultrason	3cm	Multilateration		x	Haut	Haut	-
COLA	WLAN	2m	Trilateration		x	Faible	Haut	-
COMPASS	WLAN	1m	Fingerprinting	x		Faible	Faible	-
Cricket	Ultrason - RF	10cm	TOA - Triangulation		x	Haut	Haut	-
EKAHAU	WLAN	1m	RSSI	x		Faible	Haut	-
Fg-Mds	RFID	de 1m à 1.7m	Fingerprinting + MDS		x	Inexistant	Faible	-
Firefly	Infrarouge	3mm	-			-	-	-
IRIS-LPS	Infrarouge	16cm	Triangulation		x	Haut	Haut	-
KNNWIT	WLAN	de 2m à 3.75m	Fingerprinting + Trilateration	x	x	Inexistant	Faible	Nécessaire
OPTOTRAK	Infrarouge	0.1mm à 0.3mm	-			-	-	-
RADAR	WLAN	2m	Triangulation		x	Haut	Haut	Nécessaire
RMADV-Hop	WLAN	-	DV-Hop	x		Inexistante	Inexistant	Non nécessaire
SCORE	WiMax	5m	Fingerprinting	x		Inexistante	Faible	Nécessaire
Sonitor	Ultrason	Grandeur d'une pièce	-			-	-	-
Système hybride GPS-GSM	GPS - GSM	-	Evénements extérieurs	x		Haut	Inexistant	Nécessaire
Système inertiel	GPS - GSM	26m	Trilateration		x	Haut	Haut	Non nécessaire
Ubisense	UWB	10cm	TDOA et AOA		x	Haut	Haut	Nécessaire
VIRE	RFID		Interpolation	x		Faible	Faible	Nécessaire
WBProximity	WLAN - Bluetooth	-	Fingerprinting	x		Inexistant	Faible	Nécessaire
WhereNet	RFID	2m à 3m	TDOA		x	Haut	Haut	Nécessaire
ZigBee	Zigbee	0.5m	Fingerprinting	x		Inexistant	Faible	Nécessaire

Tableau 6 Tableau récapitulatif des systèmes de positionnement

2.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différentes approches qui ont été proposées ces dernières années pour des systèmes de positionnement.

Nous avons présenté des techniques de positionnement basées sur la triangulation/la trilateration, des techniques de positionnement basées sur le « fingerprinting », des techniques de positionnement symboliques, etc. Les systèmes de positionnement basés sur la technique de triangulation ou de trilateration tel que les systèmes GNSS fournissent une précision pouvant atteindre l'ordre du centimètre dans des conditions favorables : espace ouvert, visibilité direct, etc. Les systèmes de positionnement basés sur la technique de fingerprinting sont considérés comme les plus répandus pour du positionnement intérieur. Une intervention humaine préalable est nécessaire et reste coûteuse et longue. Les systèmes de positionnement symbolique ne fournissent pas de position géographique sous forme de point ou de coordonnées mais sous la forme d'un symbole : pièce, couloir, etc. Plusieurs autres systèmes de positionnement ont été énumérés. Toutes les techniques décrites mettent en évidence la difficulté du positionnement en environnement intérieur, en particulier. Elles utilisent des technologies variées, sont déployées dans différents environnements ou nécessitent une intervention humaine pour la mise en œuvre. La continuité du service de positionnement n'est de ce fait pas toujours disponible pour l'utilisateur. La garantie d'un service de positionnement est liée à sa disponibilité ainsi qu'à sa précision. Suite aux différentes limitations, l'utilisateur peut être confronté à des coupures de service.

L'examen des différents systèmes développés ces dernières années, nous a poussés à nous orienter vers une nouvelle approche de positionnement. L'examen du tableau récapitulatif présenté à la fin du chapitre justifie notre choix d'approche. Nous nous sommes orientés vers un système de positionnement universel, se basant sur la propagation de la position géographique dans les réseaux sans fil déployés dans l'environnement.

Chapitre 3

Positionnement : Étude de l'acquisition et de la propagation d'une position physique

3.1 Introduction

Nos travaux de recherche visent l'élaboration d'un système de positionnement fondé sur la propagation de la position physique à travers les réseaux de télécommunication. Un équipement mobile avec une position géographique connue permet la localisation de plusieurs équipements mobiles présents dans l'environnement géographique.

Ce chapitre présente les aspects théoriques de la mise en place d'un système de positionnement sans infrastructure additionnelle et sans historique. Il s'intéresse aux spécifications fonctionnelles et techniques détaillées de l'approche, afin de démontrer la faisabilité du système. Nous étudions donc la possibilité d'utiliser les réseaux déployés dans les différents environnements dans le but d'obtenir des informations de positionnement géographique. Toutes les fonctionnalités prévues sont précisées en indiquant les exigences techniques et les limitations de l'approche.

3.2 Le contexte de l'application

Avant de détailler les spécifications du système, il convient d'étudier l'environnement du système.

Le système développé étudie d'une manière non exhaustive les différentes technologies existantes afin d'en déduire une possible collaboration entre les équipements appartenant à des réseaux de télécommunications. L'environnement simulé doit présenter quelques particularités, notamment la présence d'équipements ou nœuds, ayant la capacité d'utiliser les technologies récentes telles que le wifi. La mise en place de l'environnement de simulation nécessite des connaissances réseaux ainsi que des connaissances de positionnement.

Le diagramme, figure 12 établi ci-dessous démontre une certaine logique de cette étude pour une meilleure compréhension.

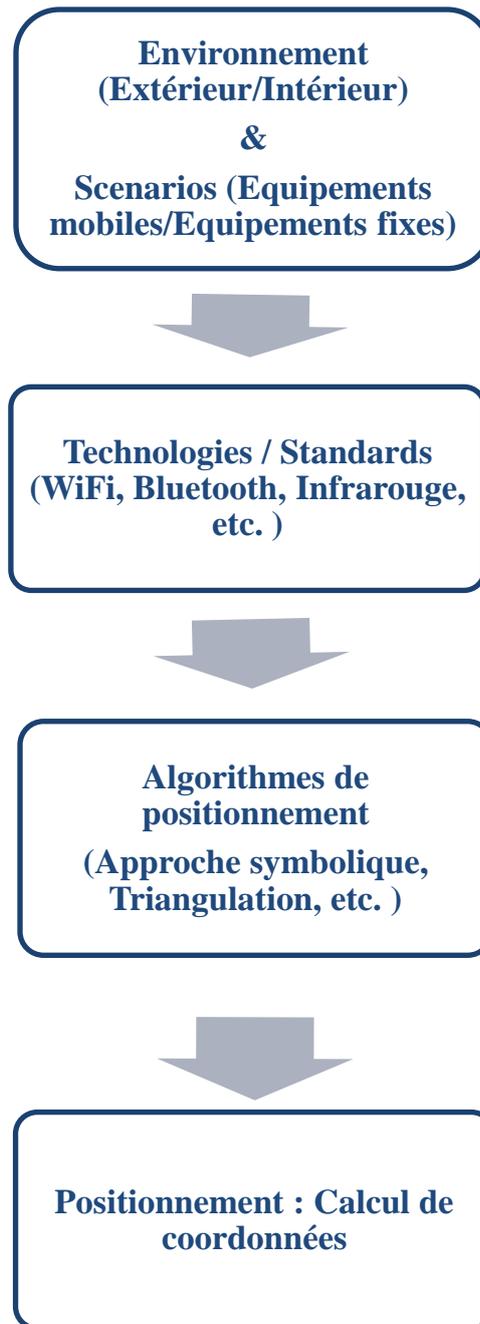


Figure 12 Diagramme du système

Les objectifs finaux souhaités par notre système sont:

- L'utilisation de l'infrastructure existante : aucune implémentation nécessaire d'équipements étrangers aux milieux.
- La limitation des coûts : la considération d'algorithmes à bases simples pour l'implémentation ainsi que la limitation des coûts de développement pour des interfaces de natures différentes.
- L'obtention d'un positionnement fiable : un compromis entre la précision et la fiabilité pour les résultats obtenus.

- L'utilisation d'un système universel : un système n'ayant pas le besoin de mise à disposition de dispositifs spécifiques.
- Un « handover » invisible à l'utilisateur entre les différents milieux : la migration transparente entre un milieu extérieur et intérieur.
- Considération des avantages de différentes technologies disponibles : analyse des données utiles de toutes les technologies détectées présentes dans l'environnement de simulation.

Afin d'atteindre ces objectifs, nous devons passer par deux étapes. Il est nécessaire d'établir une étude de l'aspect possible et intéressant de l'interaction entre plusieurs terminaux, présents dans un environnement, défini à un instant donné. Cette interaction se manifeste sous la forme de transmission ou de propagation de données utiles (telles que les coordonnées d'une position géographique), traitées par la suite. Dans un second temps, il est nécessaire d'établir une étude de la localisation relative et/ou absolue de ses équipements ainsi qu'une étude comparative des résultats obtenus avec les autres systèmes de positionnement actuels et pour les différents cas de simulation.

3.3 Les limitations du système

Dans ce paragraphe, nous identifions les différentes limitations et contraintes du système.

Les limitations matérielles sont nombreuses. En effet, des contraintes réelles doivent être prises en compte dans la conception de l'approche ainsi que du simulateur final tel que le type d'environnement, le type d'équipement, les protocoles de communications, etc.

Un environnement peut être qualifié d'intérieur ou extérieur. Un environnement intérieur décrit une zone géographique enfermée dans laquelle les ondes radio sont atténuées. Un environnement extérieur décrit une zone géographique ouverte. Dans ce type d'environnement les affaiblissements et les pertes des ondes radio sont moins importants que dans un environnement intérieur.

Les équipements réseaux sont qualifiés de mobiles ou fixes. Ils sont rattachés à différentes technologies : WiFi, Bluetooth, GSM, etc. Les protocoles de communication sont nécessaires pour établir des communications entre les différents équipements.

Dans un milieu avec un nombre important d'équipements étant régis par des technologies différentes, les événements influençant les résultats finaux et le bon fonctionnement du système se multiplient. La maintenance d'un des réseaux faisant parti du milieu peut interrompre la communication entre les équipements. De mauvaises conditions météorologiques peuvent accentués les limitations de la réception des signaux GSM et satellites. Des changements au niveau de l'infrastructure du milieu lors de travaux peuvent contribuer à une dérégulation de l'environnement. Le système est, aussi sujet à des variations au cours du temps. Les équipements mobiles ou fixes peuvent changer de positions ou changer de technologies de réception ou autre. Tous ces facteurs doivent être pris en considération avant la mis en place des simulations. Cette variation peut mener à une «disparition» temporaire d'une technologie utilisée et donc une diminution de données utiles. La variation au cours du temps de la force de détection des différents signaux ou les interférences engendrées par la mobilité des personnes est minutieusement analysée.

Prenant en compte ces différentes limitations, nous transcrivons cela au niveau des besoins de programmation.

Les points abordés avant la mise en place d'un simulateur du système de positionnement sont les suivants :

Comment définir l'environnement de simulation ?

Un simulateur nécessite une définition précise de l'environnement de simulation. L'environnement géographique considéré est l'environnement environnant Telecom SudParis. Nous avons analysé les coordonnées de cette zone géographique et nous les avons transcrits. La définition de l'environnement géographique dans notre cas est effectuée à travers des matrices avec des valeurs attribuées de {0} et {1}. Le {1} va indiquer le milieu intérieur et le {0} le milieu extérieur. Ces matrices seront nécessaires pour un meilleur traitement des données acquises.

Comment disperser les équipements dans l'environnement de simulation ?

L'environnement de simulation est composé d'un environnement géographique mais aussi d'équipements réseaux. Le déploiement de ces équipements nécessite une étude préalable et précise. Le choix du nombre d'équipements total est lié au nombre de personnes présentes dans l'environnement géographique à un instant donné. Les équipements doivent être dispersés en tenant en compte une distance minimale entre les équipements ainsi qu'un nombre raisonnable d'équipements par mètre carré. Des études statistiques sont effectuées à ces fins, décrites dans les chapitres suivants.

Comment définir le nombre d'équipements dans les réseaux ?

Suivant la technologie visée, le nombre d'équipements utilisé va varier. Des études statistiques adéquates sont établies afin de déterminer un nombre moyen pour chaque cas d'utilisation. Ces études prennent en compte les pourcentages des parts de marché des différents équipements mobiles. Dans une population jeune, nous pouvons estimer un nombre moins accru de Smartphones.

Comment définir les réseaux ou les connectivités entre les équipements ?

La visibilité d'un équipement est définie dans notre approche suivant plusieurs critères. Selon la technique utilisée décrite dans le chapitre suivant, l'équipement définit son voisin direct ou pas, comme visible.

Quels types de données peuvent être transmis ou sont nécessaires ?

Les données utiles sont définies dans notre cas, comme la position avec des coordonnées (x,y,z) par exemple ou la fiabilité, etc.

Comment appliquer les nouveaux algorithmes de positionnement ?

Les calculs ainsi que les données nécessaires étant de taille importante, une application client/serveur est préférable. La taille et la capacité des équipements mobiles est en général limitée et cela implique la nécessité de traitement des opérations assez coûteuses au niveau d'un équipement plus puissant.

3.4 Exigences du système

Le système est développé pour des environnements intérieurs et/ou extérieurs avec des équipements réseaux.

L'environnement réel est constitué de bâtiments bâtis avec des matériaux limitant la réception de signaux satellite pour une localisation via le système GPS ainsi qu'une étendue géographique découverte avec une visibilité de satellites satisfaisante. Différents équipements réseaux sont dispersés dans cet environnement géographique.

L'environnement final de simulation doit transcrire une image réelle de cette situation.

Pour une meilleure compréhension de la complexité de l'environnement, nous décrivons la composition de Telecom SudParis. En effet, ce pôle d'enseignement est composé de plusieurs bâtiments constitués de bureaux séparés par des cloisons métalliques. Entre chaque bâtiment se présente un air découvert avec une visibilité partielle ou totale des satellites. Dans ce pôle, plusieurs équipements peuvent être détectés : des ordinateurs portables ou fixes, connectés ou non aux réseaux Ethernet ou WiFi, des téléphones portables appartenant au réseau GSM ou connectés par Bluetooth, des équipements mobiles tels que les iPhones connectés au réseau 3G, des GPS dans les voitures présentes dans le parking du pôle, des points d'accès permettant un accès WiFi, les stations de bases du réseau GSM pouvant être détectées dans le pôle, etc. Tous ces équipements sont distribués d'une façon plus ou moins aléatoire dans le pôle et varient au cours du temps.

Notre système de positionnement doit pallier aux différentes limitations et répondre aux exigences.

Le diagramme figure 13 définit le contexte du système :

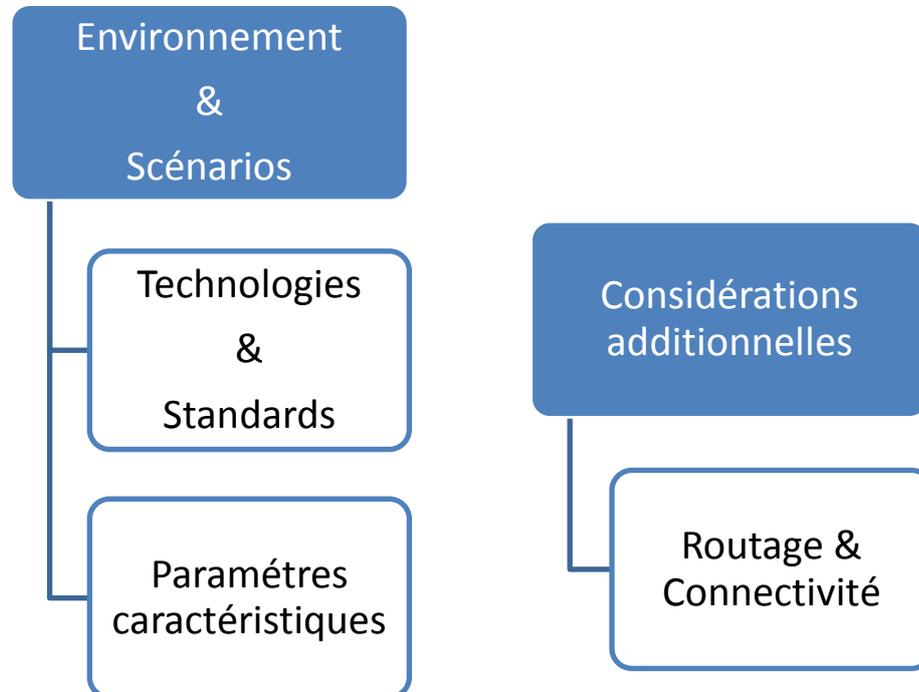


Figure 13 Diagramme du contexte

3.5 Etapes et stratégies

Suite à la description des limitations et des exigences, nous détaillons les étapes nécessaires au développement de l'application.

Les équipements réseaux répandus dans l'environnement géographique doivent établir des communications afin d'échanger des données entre eux.

Le schéma figure 14 décrit la vision simplifiée de cet environnement.

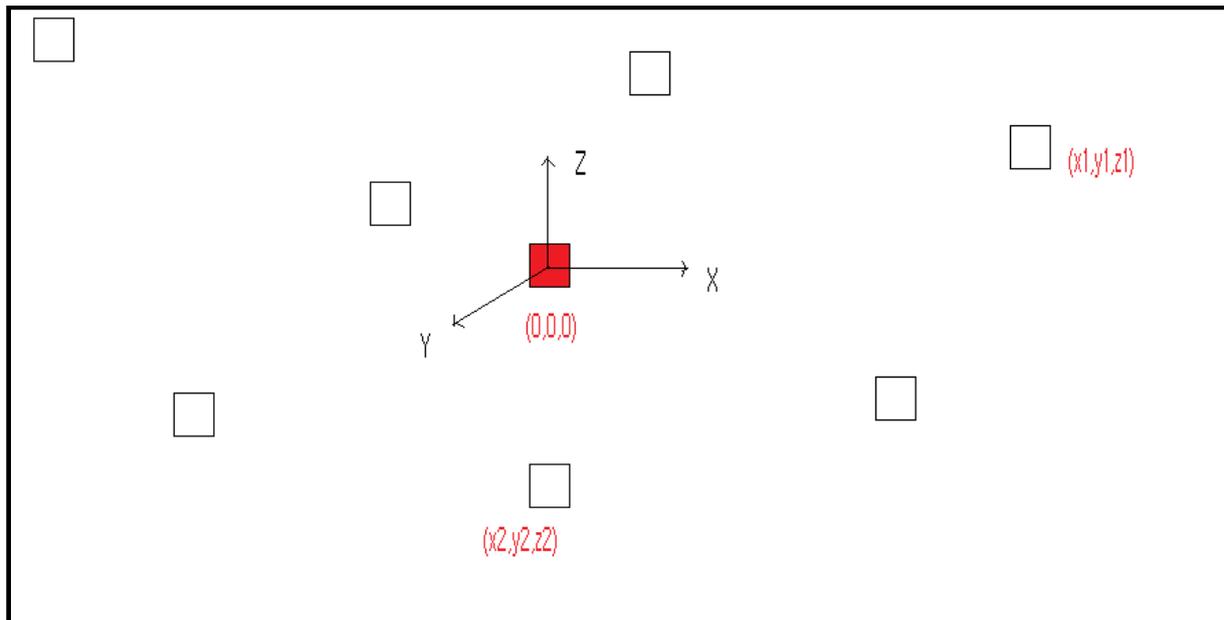


Figure 14 Modélisation simplifiée de l'environnement

L'environnement de simulation présente un environnement géographique ainsi que des équipements réseaux déployés.

Parmi les équipements réseaux, certains auront accès à leurs positions géographiques. Cette information leur sera transmise grâce aux différentes technologies utilisées, telle que le GPS. Un équipement situé dans une zone géographique extérieur peut recevoir les signaux des satellites et se positionner. D'autres équipements ne pourront pas se positionner suite aux limitations des technologies utilisées décrites dans les chapitres précédents. Un équipement dans un bâtiment perd les signaux GNSS et ne peut donc se positionner.

Notre système modélise cette situation. A cette fin, nous devons rattacher l'environnement de simulation à un repère afin de positionner les équipements. Deux types de repères sont définis : un repère local et un repère global. L'environnement géographique est lié à un repère local. Tous les équipements présents dans cet environnement de simulation sont positionnés dans ce repère. Si des équipements ont la possibilité d'acquérir leurs positions géographiques à travers des techniques telles que le GPS, les coordonnées calculées sont transcrites dans le repère global.

Nous décrivons en détail les étapes de mise en place de cette situation au niveau du simulateur comme suit :

Tous les équipements ne possèdent pas de coordonnées calculées, à l'instant initial, dans le référentiel local.

Première étape : Détermination du référentiel local.

Deuxième étape : Positionnement local des autres équipements par rapport à l'équipement de base, grâce aux différentes méthodes de connectivité décrites dans la suite (Communication hétérogène).

Troisième étape : Arrêt du positionnement relatif au bout d'un équipement avec coordonnées connues.

Cinquième étape : Recherche de la matrice de conversion grâce aux points avec des coordonnées connues globales situés relativement par rapport à notre point de base.

Sixième étape : Conversion de la généralité des points et obtention des coordonnées du point de base, aboutissement ainsi à une carte avec tous les coordonnées. (Stockage de la carte limité à un certain temps pour une réutilisation possible, lors d'une deuxième requête de positionnement.)

Septième étape : Finalisation avec une re-calibration des coordonnées des points et vérification.

Après la description des étapes nécessaires, nous mettons en avant les principes de la deuxième étape : le positionnement relatif des équipements.

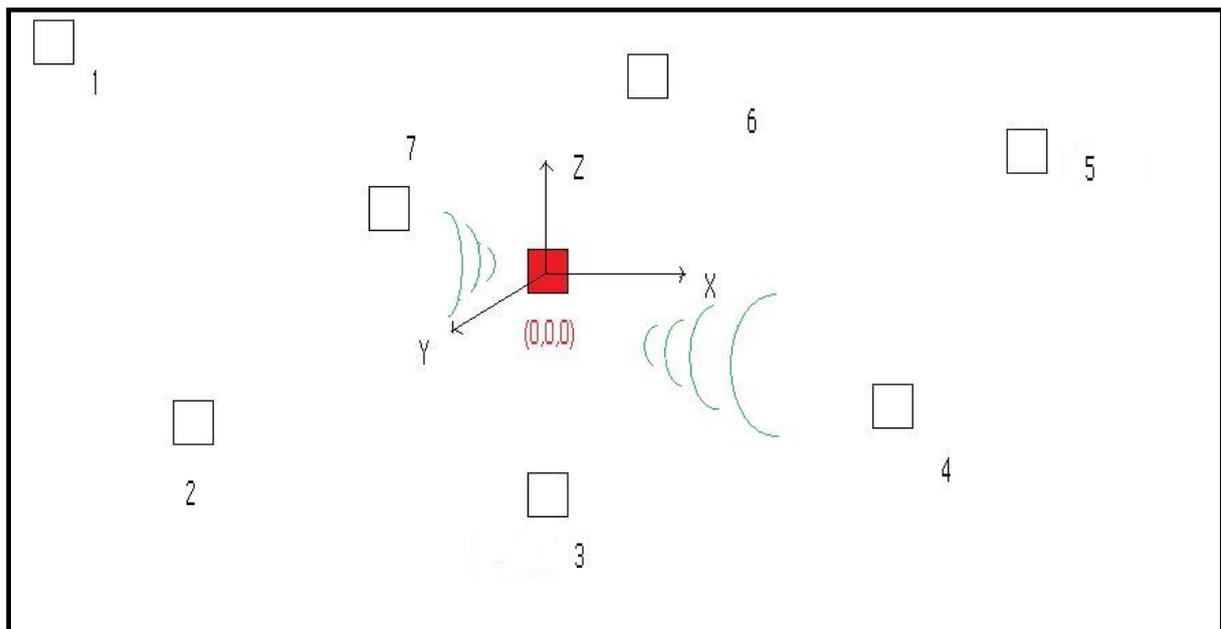


Figure 15 Propagation des ondes dans le milieu

Le principe consiste à effectuer une étude minutieuse de la capacité des équipements déployés dans l'environnement à communiquer et se connecter avec les autres équipements grâce aux différentes technologies.

Le terme « connecté » est défini comme suit :

Tout équipement pouvant recevoir une réponse à une requête envoyée via tout canal de transmission à un autre équipement pendant un temps supérieur à 2s est connecté à celui-ci, sans prendre en considération la nature de la liaison physique effectuée.

Première étape : Initialisation des coordonnées du point de référence dans un repère local.

Deuxième étape :

1^{er} niveau → Envoi d'une requête « Who I see ? » aux voisins directs. Les voisins directs sont définis par un nombre de saut égal à un, selon le mode de transmission. Enregistrement des adresses mac des équipements dont on reçoit une réponse à la requête.

2^{ème} niveau → Envoi de la même requête par les équipements présents dans la liste enregistrée par l'équipement de base. Enregistrement des listes au niveau de l'équipement de base (ou serveur, selon la capacité de l'équipement (type, etc) ainsi que la grandeur de l'environnement.)

.

.

.

n^{ème} niveau → Envoi de la même requête par les équipements avec des coordonnées globales connus dans un référentiel terrestre global. (GPS, PDA, etc)

La condition de fin ou limite d'itération est la présence d'équipements avec des coordonnées pour chaque équipement présent dans toutes les listes.

Troisième étape : Etude des listes et établissement d'un graphe de liens entre les nœuds. Enregistrement des listes pour une courte durée de temps. (Temps nécessaire pour l'étude)

Quatrième étape : Etude de la relation entre le graphe de liens ainsi que les coordonnées géographiques des points.

Cinquième étape : Localisation de tous les points de l'environnement. Enregistrement des données pour un certain temps à des fins de positionnement futures.

Sixième étape : Etablissement de la position du point de référence dans un repère global.

Dans la suite, nous passons aux spécifications techniques de notre système.

3.6 Les spécifications techniques

3.6.1 L'environnement

La première étape est de mettre en œuvre un modèle en 3D de Telecom SudParis ainsi que des environs.

Les référentiels utilisés comme décrit dans le paragraphe précédent, sont composés de deux types : local et global. Pour le référentiel local, le point de référence sera le point R numéro 1 vu de face du bâtiment B. Le référentiel global se base sur les coordonnées utilisées notamment par le GPS : latitude, longitude et altitude : WGS 84 ; World Geodetic System 1984 ; système géodésique mondial. Il s'est rapidement imposé comme une référence "standard" pour la cartographie.

Telecom SudParis est composé de plusieurs bâtiments, de parkings ainsi que d'espaces ouverts. Un bâtiment est composé de salles, couloirs, étages et forums (espaces largement plus grands que les salles). Les parkings sont des parkings collectifs ouverts ou fermés. Les espaces ouverts entourent les différents bâtiments mais peuvent aussi se trouver entre deux bâtiments.

On définit chaque bâtiment par huit points ou quatre points avec l'altitude du bâtiment. Le choix entre ces définitions est lié au logiciel qu'on utilise ainsi que le temps de calcul qu'on souhaite avoir. La définition classique du bâtiment peut être modifiée en implémentant une fonction représentative des différents bâtiments, par exemple :

Pour $x > 0$ et $x < 10$ $f(x, y, z) = \text{Parallélépipède}(x_1, y_1, z_1, L, H)$

Avec (x_1, y_1, z_1) les coordonnées du point de base et L, H ; respectivement la largeur et la hauteur.

Les salles, les couloirs et les étages seront caractérisés chacun par des fonctions du même type que le bâtiment en entier.

Soient :

$$Salle(x, y, z, l) = Parallélépipède(x, y, z, l)$$

$$Couloir(x, y, z) = Parallélépipède(x, y, z)$$

(largeur définie par défaut suivant la largeur du bâtiment)

$$Couloir(x, y, z) = Parallélépipède(x, y, z, h)$$

avec h la hauteur de chaque étage.

Ces fonctions sont définies sur $R/g(x, y, z)$

L'environnement global est composé des bâtiments et des alentours.

Les environs du bâtiment sont définis comme $g(x, y, z)$ tel que g est définie pour $R/f(x, y, z)$ avec $f(x, y, z)$ étant la fonction du bâtiment.

Dans les environs, nous distinguons deux types de matières : l'aire et le sol.

De ce fait, la fonction g sera composée de deux sous-fonctions appelées h et s .

$S(x, y, z)$ est définie pour tout $z < 0$ dans le référentiel local.

Et $h(x, y, z)$ est définie pour tout $z \geq 0$, dans $R/f(x, y, z)$, toujours dans le référentiel global.

Pour chaque fonction, définissant un milieu particulier, on attribue un certain facteur d'atténuation α , qu'on va utiliser et définir par la suite.

3.6.2 Les équipements

Les équipements utilisés sont mobiles ou fixes.

3.6.2.1 Les équipements fixes

Dans notre cas, les équipements fixes seront dispersés dans l'environnement selon une base de données préétablie ou une fonction de répartition.

Les satellites, les BTS ainsi que quelques points WIFI connus et stables seront reflétés dans les simulations à travers leurs coordonnées réelles (x, y, z) .

Les autres équipements fixes vont varier pour différents cas de simulations. Chaque distribution de point fixe va nous permettre d'effectuer des essais sur le lancement du programme final. La fonction « randn » sera appliquée sur ces points la.

Les équipements fixes seront caractérisés par leurs coordonnées connues au préalable (x, y, z) , dans le référentiel 3D.

3.6.2.2 Les équipements mobiles

Les équipements mobiles seront fixés suivant leur type.

3.6.2.2.1 GSM

De nos jours, les utilisateurs sont très souvent équipés de téléphones portables. Les réseaux GSM ont une couverture importante et peuvent recevoir avec une bonne qualité dans les bâtiments. La loi appliquée à ce type d'équipement est une loi de probabilité, avec des probabilités uniformes en milieu continu ainsi qu'une répartition aléatoire dans les bâtiments et aux alentours.

Le nombre d'équipement GSM sera limité à $2n$, avec n = nombre de personnes à Télécom SudParis. Le nombre de téléphones portables sera limité à deux fois le nombre total de personnels et d'étudiants, en prenant en compte un cas extrême de visiteurs externes, lors d'un événement tel que la fête de la science.

$0 \leq n \leq Z$; Z = nombre maximale de personnes

La fonction utilisée pour la répartition de ces appareils est : randn, qui met en place des variables aléatoires comprises dans l'intervalle $[0,1]$.

L'intervalle sera compris entre les coordonnées maximales de la zone géographique de simulation. La répartition de ces équipements prendra en compte, la limite maximale au niveau de la coordonnée en hauteur, qui estimera que la distribution des équipements mobiles sera fortement décroissante sur un étage, en prenant en compte la hauteur. Les stations de bases BTS appartenant au réseau GSM seront mises en place selon les coordonnées réelles.

3.6.2.2.2 WiFi

Les points d'accès connus sont définis dès le début avec leurs coordonnées réelles (x,y,z). Ils sont uniformément répartis. Les premières simulations sont établies avec cette configuration stable des points d'accès. Dans un second temps, la distribution de ces points d'accès suit une loi de probabilité, uniformément distribuée. Les points d'accès sont caractérisés par leur présence dans les bâtiments.

Les équipements munis de cartes réseaux sans fil suivent une loi de probabilité discrète, répartis aléatoirement dans le bâtiment ainsi qu'aux environs dans un rayon maximum de 100m autour du bâtiment.

3.6.2.2.3 GPS

Les équipements équipés de GPS suivent une loi normale aussi de moyenne a et d'écart b . Ces équipements seront répartis à l'extérieur du bâtiment. Le nombre d'équipements sera limité à une vingtaine. Les équipements seront en majorité distribués dans le parking de Télécom SudParis. Quelques équipements avec un nombre inférieur à 10 seront dispersés aux environs du bâtiment.

3.6.2.2.4 Bluetooth

Les équipements Bluetooth seront compris entre 10 et 200 équipements dispersés dans les bâtiments et aux environs. Chaque équipement ne pourra pas être détecté au delà de 100m, limite maximale entre les équipements Bluetooth.

Pour chaque type de point, nous mettrons en place des étiquettes indiquant le type de réseau auquel il appartient.

3.6.3 Stratégies d'évaluation

L'analyse des résultats sera basée sur des statistiques ainsi que des analyses.

En premier lieu, nous effectuerons une étude minutieuse des équipements présents dans l'environnement et l'impact de la variation de ce nombre sur les résultats.

En deuxième lieu, nous établirons une étude de la fiabilité et de la précision. L'étude de la fiabilité sera réalisée en variant le nombre minimal d'équipements présents dans le réseau ayant une position géographique connue.

En troisième lieu, une étude qualitative et comparative des deux types de résultats sera effectuée (coordonnées ou aire géographique).

En quatrième lieu, une étude quantitative, qualitative et comparative sera établie.

En dernier lieu, dans le but d'analyser les limites du système dans les cas réels, nous allons effectuer une étude du nombre de cas sans résultat, qualitativement et quantitativement.

3.7 Conclusion

Dans le choix d'une technique de positionnement il est primordial de satisfaire les exigences en termes d'infrastructure non coûteuse et de qualité de positionnement convenable. Ce chapitre nous a effectué une vision plus en détail de notre nouvelle approche. En effet, la présence de nouvelles technologies et l'évolution du nombre d'équipements nous a permis de profiter de cette situation afin de modéliser un nouvel outil de simulation pour un système de positionnement universel. Notre approche se repose sur les communications entre les équipements présents dans l'environnement et la propagation d'informations de positionnement via deux étapes essentielles : l'étude de la visibilité et l'établissement de liens géographiques entre équipements.

Le chapitre suivant décrit la première étape : l'étude de visibilité et détaille les différentes prises de décisions nécessaires pour l'intégration de cette nouvelle notion dans le simulateur.

Chapitre 4

La visibilité

4.1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que notre système de positionnement doit pallier à plusieurs exigences. Le positionnement doit s'établir de façon fiable dans tout type d'environnement et d'une façon ininterrompue. Notre système va utiliser, à cette fin, les réseaux sans fil présents dans l'environnement. Ce choix est soutenu par l'évolution de la situation actuelle des réseaux de télécommunications. Le développement important des réseaux sans fil a influencé les tarifs des dispositifs. Les coûts ont chuté considérablement. Ce facteur a augmenté le nombre d'acheteurs potentiels. Un grand nombre de ces équipements est équipé de différentes technologies telles que Wifi ou Bluetooth. D'autre part, le développement des services Internet joue un rôle primordial dans les interconnexions entre réseaux. Ces équipements mobiles sont devenus très répandus dans la société.

Notre système de positionnement se base sur l'étude de la visibilité des équipements mobiles à des fins de positionnement. Le terme de visibilité désigne, dans nos approches, la détection d'un équipement à l'aide d'une technologie bien déterminée (Wifi, Bluetooth, GSM, etc.).

Ce chapitre s'intéresse aux méthodes de visibilité dans un premier temps et exploite les résultats obtenus dans l'objectif d'établir une cartographie géographique.

4.2 Contexte

L'objectif des travaux est de localiser un objet (ou une personne) dans un milieu où les signaux GPS ne sont pas toujours disponibles. En réalité, un équipement GPS peut se connecter à un autre type de réseau de télécommunications, via une autre technologie. C'est le cas des Smartphones, Iphones, etc. Ces derniers présents dans un environnement extérieur ont la possibilité de se positionner grâce aux des signaux des satellites. La précision de cette position obtenue reste variable, du aux facteurs tels que la visibilité ou la disposition des satellites et les trajets multiples. Dans tout type d'environnement, ces équipements peuvent accéder aux réseaux Wlan, Bluetooth, GSM, etc.

Cette dualité GPS-autre technologie est la base de nos travaux. En franchissant des murs, les signaux des satellites sont atténués considérablement et le positionnement devient quasi-impossible. Nous pallions cette difficulté, en étudiant les relations entre les équipements et en les utilisant afin d'estimer leurs coordonnées géographiques.

Une vaste zone géographique peut être composée d'environnement intérieur et extérieur. Dans cette zone, plusieurs types d'équipements réseaux sont déployés. Ces équipements rattachés à des réseaux de télécommunications sont visibles les uns par rapports aux autres. Par exemple, un téléphone ayant activé le Bluetooth est visible par les équipements ayant activé la même technologie dans un rayon limite. En effet, lorsqu'un tel équipement effectue une recherche par Bluetooth, il obtient une liste de plusieurs équipements. Nous pouvons en déduire que les équipements visibles ne peuvent se situer au delà de la zone de portée maximale définie pour chaque technologie. Cette information nous permet de définir une relation spatiale entre les différents équipements et d'en déduire les positions relatives.

Nos recherches consistent à utiliser cette visibilité entre les équipements afin d'établir une vision géographique globale des équipements présents dans l'environnement.

A cette fin, deux étapes sont indispensables :

- L'Etude de la visibilité.
- L'Etude géographique relationnelle.

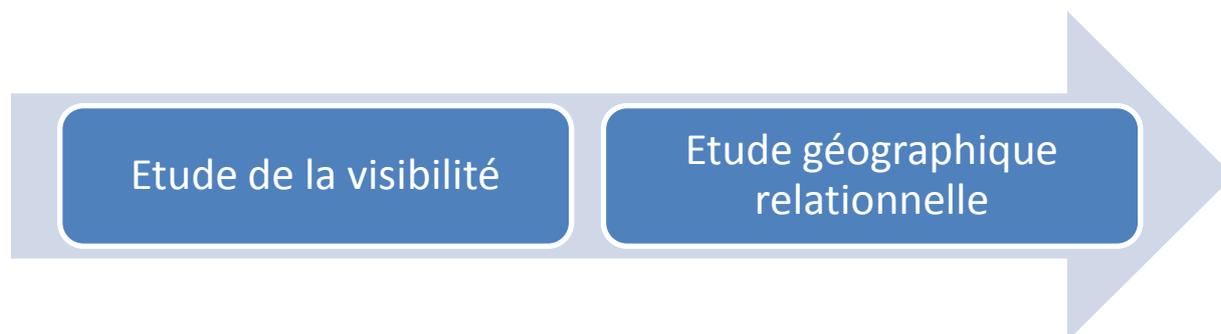


Figure 16 Les étapes du système

Cette section présente, telle que le présente la figure16, deux étapes théoriques développées pour notre système de positionnement. La première repose sur l'étude de la visibilité. La seconde, qui est celle avec laquelle nous avons obtenu les résultats de positionnement, repose sur l'étude géographique relationnelle entre les équipements.

4.3 L'étude de visibilité

Dans cette section, nous définissons et détaillons les différentes méthodes de visibilité.

Tel que décrit dans le paragraphe précédent, un équipement est visible pour un autre si ce dernier apparaît sur son écran lors d'une recherche effectuée par l'utilisateur, en activant une technologie bien donnée. Ces données sont les résultats d'une communication entre les équipements. Un équipement émet une onde radio qui atteint un autre équipement. Ces deux derniers sont visibles l'un par rapport à l'autre. Si l'onde radio ne parvient pas à l'équipement récepteur, les deux équipements ne sont pas visibles l'un par rapport à l'autre.

Dans un cas pratique, cela semble évident. La modélisation d'une telle situation reste néanmoins complexe. Afin d'estimer la visibilité des équipements déployés dans un environnement, nous sommes dans l'obligation d'étudier les différentes techniques de

propagation des ondes radio. Ces techniques diffèrent suivant le type d'environnement et le type de technologie.

Pour les besoins de notre système de positionnement, nous avons ajusté ces différentes techniques. Nous les détaillons dans les paragraphes suivants et argumentons nos choix.

4.3.1 Première Approche : Zone de portée

Un équipement est visible par un autre équipement si ce dernier se trouve dans sa zone de portée. La zone de portée est définie par une sphère de rayon r et de centre les coordonnées de l'équipement émetteur. Le rayon dépend de la technologie utilisée. La figure 17 montre les différentes grandeurs des rayons de zones de portée, suivant la technologie et le type d'environnement.

WiFi	Bluetooth	GSM
<ul style="list-style-type: none"> • 200m • 50m 	<ul style="list-style-type: none"> • 100m • 20m 	<ul style="list-style-type: none"> • 3000m

Figure 17 Les zones de portée .Environnement extérieur. Environnement intérieur

Chaque équipement présent dans la zone géographique va effectuer une recherche des équipements présents dans sa zone de portée. Ces équipements sont stockés dans une liste. Cette opération est itérée pour chaque équipement dans la zone géographique.

Equipement 1	Equipement 2	Equipement 3	Equipement 4
<ul style="list-style-type: none"> • Equipement 2 • Equipement 3 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipement 1 • Equipement 4 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipement 1 • Equipement 4 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipement 2 • Equipement 3

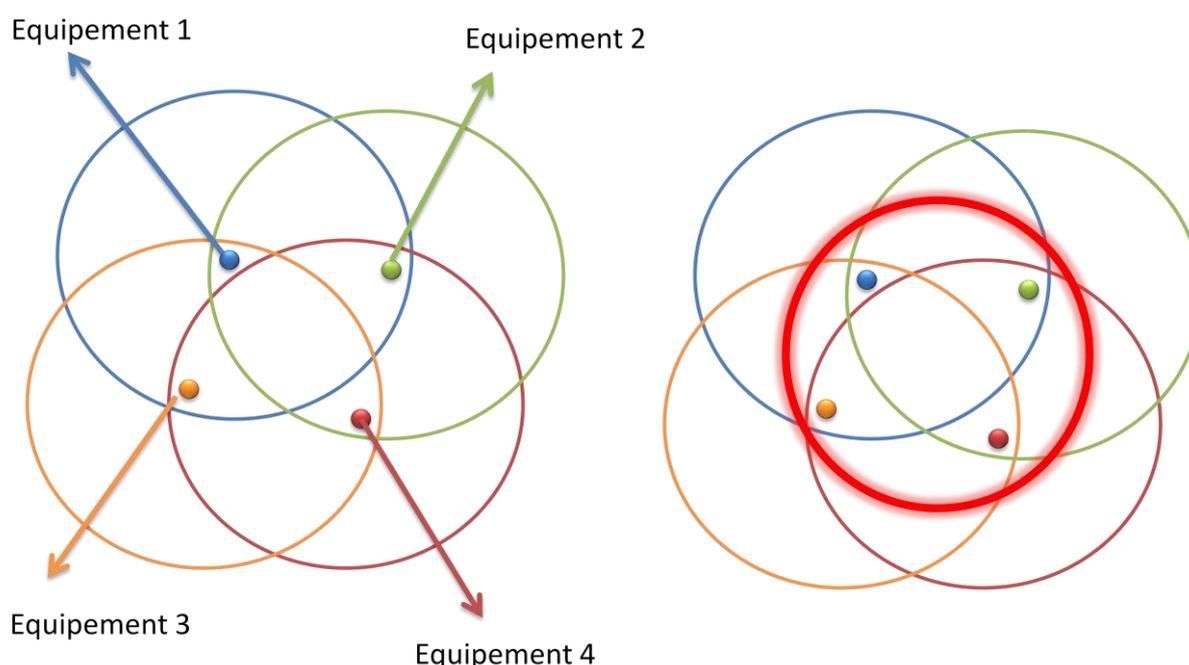


Figure 18 Modélisation de la visibilité – zone de portée

La figure 18 présente le résultat d'une étude de visibilité pour quatre équipements. Nous remarquons d'après la figure que cela permet de délimiter la zone géographique des quatre équipements et d'en déduire les positions relatives les uns par rapports aux autres. Les configurations possibles suite à de telles analyses sont semblables et ne peuvent différer considérablement.

Afin de mettre en œuvre cette méthode de visibilité, les paramètres suivants doivent être définis :

Le type de technologie : Wifi, Bluetooth, GSM, etc.

Le type d'environnement : Intérieur ou Extérieur.

L'atténuation $\alpha \in [0;1]$: Une diminution du rayon de la zone de portée suite à différents obstacles (Murs, cloisons, etc). Ce paramètre doit être établi par l'utilisateur au préalable suivant les caractéristiques du milieu, par exemple la nature des murs. Dans le cas d'un bâtiment muni de murs métalliques, ce paramètre prendra une valeur petite. Des murs métalliques impliquent un paramètre d'atténuation faible, égal à 0.25. Le rayon de portée va être affaibli de 75% pour les équipements présents dans ce milieu.

Un équipement est visible, avec cette méthode de visibilité si la distance entre l'équipement émetteur et l'équipement récepteur est inférieure au rayon de la zone de portée de l'émetteur.

$$\sqrt{(xe - xr)^2 + (ye - yr)^2 + (ze - zr)^2} < r$$

Avec (xe, ye, ze) les coordonnées de l'équipement émetteur et (xr, yr, zr) les coordonnées du récepteur.

Soient d la distance entre les deux équipements étudiés et r le rayon de la sphère de portée, si $d \leq r$, alors l'équipement émetteur est visible par le récepteur. Dans le cas contraire, le récepteur n'est pas visible.

4.3.2 Deuxième Approche : Formule de Friis – Puissance estimée

Pour cette approche, nous nous sommes basés sur la formule de Friis, habituellement utilisée pour estimer les distances entre émetteurs et récepteurs radio en espace libre.

Un équipement est visible par un autre équipement si ce dernier reçoit un signal. L'équipement émetteur transmet des ondes radio vers l'équipement récepteur. L'équipement récepteur calcule alors la puissance reçue du signal avec la formule de Friis :

$$P_r = P_t \times G_t \times G_r \times \left(\frac{\lambda}{4 \times \pi \times d}\right)^n$$

Avec P_t la puissance transmise, G_t le gain à la transmission, G_r le gain à la réception, d la distance émetteur-récepteur et λ la longueur d'onde.

Pour les besoins de notre simulateur, nous mettons en place un tableau récapitulatif des puissances émises, suivant les différentes technologies.

La formule de Friis utilise un paramètre n . Ce paramètre est étroitement lié à l'environnement de propagation. Dans un environnement extérieur ou espace libre, n est égal à 2. Cette valeur permet d'obtenir des estimations de distances fiables et précises.

Dans un environnement intérieur ou dans un environnement avec un nombre important de bâtiments, par exemple, la valeur du paramètre doit être adaptée.

La variation de ce paramètre est due au changement de composition de l'environnement. Un environnement intérieur est composé d'obstacles tels que les murs, les fenêtres, etc. Ces obstacles donnent naissance à différents mécanismes de propagation tels que la réflexion, la réfraction, la transmission, la diffusion, etc. Ainsi, la formule de Friis avec un paramètre égal à 2 n'est plus optimale.

Lors de nos simulations, le paramètre n prend la valeur 2 lorsque l'équipement se trouve dans un environnement extérieur et reste compris entre 2.1 et 4 lorsque l'équipement se situe dans un environnement intérieur. L'environnement intérieur constitué de plusieurs matériaux et très varié (Forum de Telecom SudParis ou Salle A306 – Bâtiment A) nous a incité à élargir les valeurs possibles du paramètre n .

Le tableau 7 présente les valeurs estimées de puissances reçues en fonction des distances entre un émetteur et un récepteur, à titre d'exemple.

n = 2			n = 3			n = 3,5		
Distance (m)	Puissance (dBm)	Atténuation (dB)	Distance (m)	Puissance (dBm)	Atténuation (dB)	Distance (m)	Puissance (dBm)	Atténuation (dB)
1	-20	40	1	-40	60	1	-50	70
5	-34	54	5	-61	81	5	-74	94
10	-40	60	10	-70	90	10	-85	105
15	-43	63	15	-75	95	15	-91	111
20	-46	66	20	-79	99	20	-95	115
25	-48	68	25	-82	102	25	-99	119
30	-49	69	30	-84	104	30	-101	121
35	-50	70	35	-86	106	35	-104	124

Tableau 7 Puissances pour $n=2$, $n=3$ et $n=3.5$

Le tableau ci-dessous présente les puissances estimées avec différentes valeurs du paramètre n . Afin de bien visualiser la variation des résultats obtenus, nous les exposons dans la figure 19.

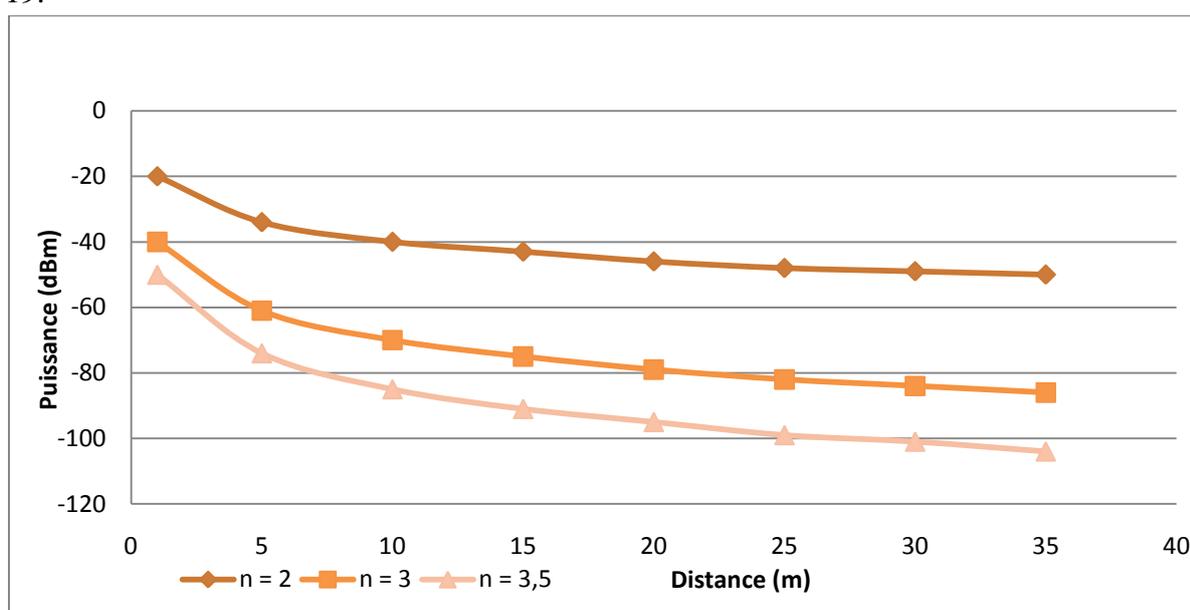


Figure 19 Puissances estimées (dBm)

Dans les simulations, nous utilisons les distances entre équipements afin de calculer des puissances estimées. Ces dernières diffèrent pour la même distance initiale. Cette différence est due à la variation du paramètre n mentionné.

Dans un environnement intérieur, les ondes radio peuvent subir plusieurs phénomènes physiques : la réfraction, la diffraction et l'absorption. Ces phénomènes influent considérablement la puissance de l'onde et donc influent sur l'estimation de la distance entre émetteur et récepteur. Dans un tel environnement, les ondes se heurtent à des obstacles. Lors d'un contact avec un obstacle, une partie de l'onde continue à se propager, une partie est absorbée et une partie est réfléchi. Le paramètre n dépend des difficultés rencontrées par ces ondes radio, dans un environnement intérieur. Dans un environnement tel que Telecom SudParis, constitué de plusieurs matériaux, l'affaiblissement des ondes radio peut varier suivant le type d'obstacle :

- Air: Aucun – Espace ouvert environnant de Telecom SudParis
- Bois : Faible – Bureaux et tables
- Plastique : Faible – Cloisons entre ordinateurs dans un bureau
- Verre : Faible – Grandes Vitres à l'entrée, Vitres dans les salles de cours et bureaux
- Etres vivants : Moyen – Foule (Forum, classe pleine, etc.)
- Briques : Moyen - Murs
- Plâtre : Moyen – Cloisons entre bureaux
- Béton : Elevé - Murs porteurs, étages
- Métal : Très élevé - Béton armé, armoire métallique, cage d'ascenseur

Pour une valeur de n égale à 3,5, les puissances estimées sont plus faibles que pour les valeurs de n égales à 2 et 3. Suite à une composition très variée de Telecom SudParis, nous nous dirigeons vers la valeur de n égale à 3,5. Lors de nos travaux antérieurs, nous avons eu l'occasion d'effectuer plusieurs tests au sein de Telecom SudParis et nous avons opté pour une valeur de n égale à 3,5, pour les environnements intérieurs. Cette valeur est utilisée par notre simulateur. [Lassabe 2005] [Hogg & al 1993] [Chu & al 1965]

4.3.3 Troisième Approche : Formule de Friis – Distance estimée

Un équipement est visible par un autre équipement s'il reçoit un signal permettant l'estimation de la distance émetteur-récepteur.

$$d = \frac{\lambda}{4 \times \pi} \times \left(\frac{P_t \times G_t \times G_r}{P_r} \right)^{1/n}$$

Avec P_t la puissance transmise, G_t le gain à l'émission, G_r le gain à la réception, P_r la puissance reçue et λ la longueur d'onde.

Comme dans l'approche précédente, la valeur du paramètre n est liée au type d'environnement. Nous rappelons que le paramètre n prend la valeur 2 lorsque l'équipement

se trouve dans un environnement extérieur et reste compris entre 2.1 et 4 lorsque l'équipement se situe dans un environnement intérieur.

Le tableau 8 présente les valeurs estimées des distances entre un équipement émetteur et un équipement récepteur, à titre d'exemple.

Atténuation (dB)	Distance (m)	Exemple de zone géographique correspondante
-50	1 m	Le même bureau
-71	4 m	La même salle de cours
-81	8 m	Le même couloir
-91	15 m	Le même bâtiment
-107	45 m	La même zone géographique

Tableau 8 Atténuation pour différentes zones géographiques

Les informations de distances permettent d'obtenir des informations concernant l'emplacement des équipements :

- Si un équipement reçoit un signal avec une puissance égale à -50dB, nous pouvons en déduire que les deux équipements émetteur et récepteur se trouvent dans une zone géographique d'une taille équivalente à un bureau.
- Si un équipement reçoit un signal avec une puissance égale à -70dB, nous pouvons en déduire que les deux équipements émetteur et récepteur se trouvent dans une zone géographique d'une taille équivalente à une salle de cours.
- Si un équipement reçoit un signal avec une puissance égale à -80dB, nous pouvons en déduire que les deux équipements émetteur et récepteur se trouvent dans une zone géographique d'une taille équivalente à un couloir.
- Si un équipement reçoit un signal avec une puissance égale à -90dB, nous pouvons en déduire que les deux équipements émetteur et récepteur se trouvent dans une zone géographique d'une taille équivalente à un bâtiment.
- Si un équipement reçoit un signal avec une puissance égale à -105dB, nous pouvons en déduire que les deux équipements émetteur et récepteur se trouvent dans une zone géographique d'une taille équivalente à une étendue géographique telle que Telecom SudParis.

4.3.4 Quatrième approche : Voisins les plus proches

L'approche des voisins les plus proches se base aussi sur la formule de Friis, comme les deux approches précédentes. Un équipement est visible par un autre équipement si ce dernier est son voisin. Un voisin est défini comme l'équipement le plus proche ou l'équipement recevant la puissance la plus élevée. Nous nous limitons ici aux distances minimales estimées ainsi qu'aux puissances les plus fortes. Nous appelons les équipements visibles, les voisins d'ordre 1.

Equipement	Distance (m)	Puissance (dBm)
1	3	-29
2	6	-35
3	2	-26

4	29	-49
5	23	-47
6	20	-52
7	9	-45
8	24	-53
9	2	-32
10	17	-50

Tableau 9 Exemple de puissances reçues

Le tableau ci-dessus illustre les différentes données, qui peuvent être acquises par un équipement. Un équipement est visible par un équipement s'il est son voisin. Dans cet exemple, nous avons :

- La distance minimale estimée est égale à 2m. Le 3^{ème} équipement ainsi que le 9^{ème} équipement sont considérés comme voisins de premier ordre.
- La puissance maximale reçue est égale à -26dBm. Le 3^{ème} équipement est considéré comme l'unique voisin.

4.3.5 Cinquième approche : Nombre de sauts

L'approche nombre de sauts utilise des notions réseaux. Un équipement est visible par un autre si ce dernier est distant d'un saut. Un saut est défini suivant un algorithme de routage. Il décrit l'équipement directement attribué à travers une table de routage. Dans une configuration statique, une table de routage présente les chemins possibles entre les différents équipements présents dans le réseau. Ces chemins permettent l'acheminement des données transmises de l'émetteur au récepteur sans tenir compte de la distance géographique.

La figure 20 est une représentation simplifiée des chemins possibles entre des équipements d'un même environnement.

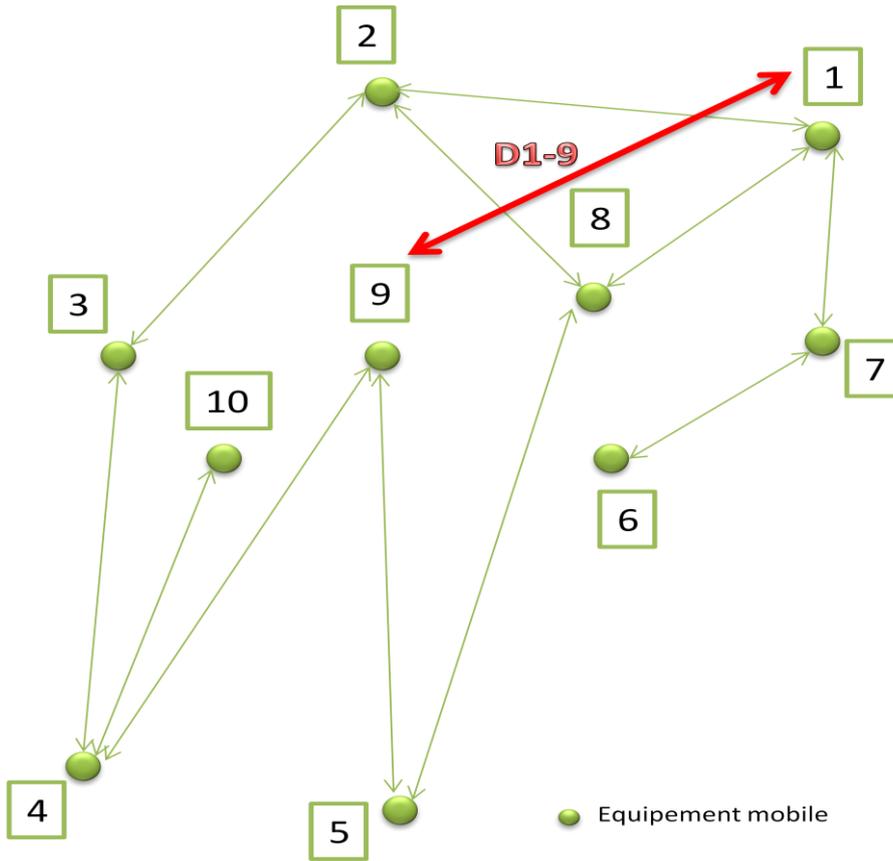


Figure 20 Chemins réseaux

Destination	Prochain Saut
2	2
3	2
4	2
5	8
6	7
7	7
8	8
9	8
10	2

Tableau 10 Table de routage pour l'équipement numéro 1

Destination	Prochain Saut
1	5
2	5
3	4
4	4
5	5
6	5
7	5
8	5
10	4

Tableau 11 Table de routage pour l'équipement numéro 9

Les tableaux précédents présentent les tables de routage respectivement des équipements 1 et 9. Un équipement est visible par un autre s'il est distant d'un saut. Dans cet exemple, nous avons :

- Pour le 1^{er} équipement, trois voisins : le 2^{ème} équipement, le 7^{ème} équipement ainsi que le 8^{ème} équipement.
- Pour le 9^{ème} équipement, deux voisins : le 4^{ème} équipement et le 5^{ème} équipement.

Les équipements visibles sont tous distants d'un saut par rapport à l'équipement émetteur.

Les tables de routage telle que nous pouvons l'apercevoir ci-dessus ne prennent pas en compte en priorité l'emplacement géographique mais les chemins réseaux possibles. Le 1^{er} équipement est proche du 9^{ème} équipement géographiquement. Néanmoins, il ne peut l'atteindre qu'en effectuant quatre sauts successifs : 1-2-3-4-9. Le 9^{ème} équipement n'est donc pas visible par le 1^{er} équipement.

4.4 La prise de décision

Après l'étude des différents modèles de visibilité, nous analysons et décrivons nos choix dans ce paragraphe.

L'intégration ainsi que la mise en place des modèles de visibilité dans nos simulations soulève plusieurs problèmes. Chaque réseau a ses propres caractéristiques : zone de couverture, puissance, etc. L'environnement global est constitué d'une zone géographique avec des équipements réseaux déployés. La zone géographique est constituée de différents types d'environnements : intérieur et extérieur. Chaque type d'environnement a ses propres caractéristiques, également : murs métalliques, murs en béton, etc. Ces différents critères influent sur le choix des modèles de visibilité les plus adaptés. La procédure de choix se base sur deux principales approches :

- Les paramètres intrinsèques du modèle de visibilité : Variation du paramètre n, par exemple.
- Les paramètres extrinsèques du modèle de visibilité : Erreur d'estimation des distances entre équipements.

-

Les analyses suivantes portent un intérêt pour l'amélioration de la qualité des simulations (situations proches des conditions réelles) et la décision de visibilité. Le modèle de visibilité choisi permet de définir si un équipement reçoit un signal d'un autre équipement. Un des points importants réside dans le choix des équipements pris en compte parmi tous les équipements visibles. Dans une zone géographique restreinte telle qu'un bâtiment, le nombre d'équipements visibles via une méthode de visibilité peut être très important (200 personnes = 190 équipements, par exemple). Dans l'objectif de résultats performants, les équipements visibles seront limités. Le choix de cette limitation constitue la deuxième prise de décision. La limitation des équipements visibles s'effectue à travers le choix d'un seuil de visibilité.

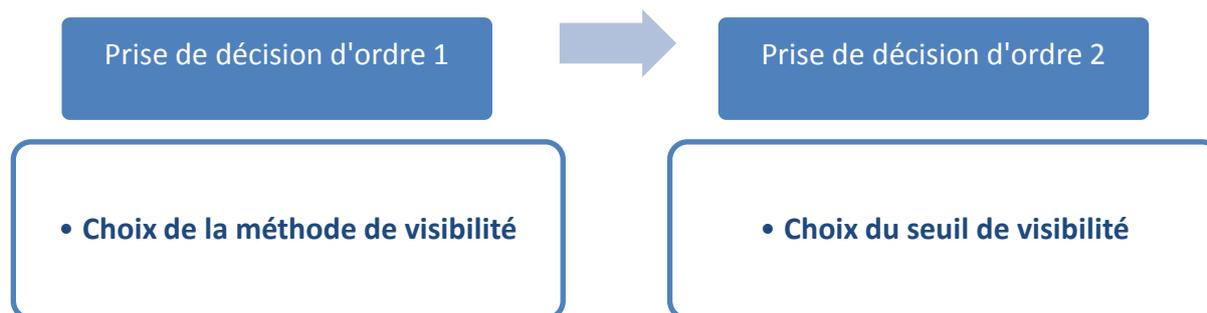


Figure 21 Prises de décision

Des tests et statistiques ont été effectués dans le but d'obtenir des informations complémentaires pour effectuer nos décisions. Dans la suite, nous présentons ces statistiques et développons les critères de choix ainsi que les seuils de visibilité appliqués. [Umm-e-Habiba & al 2009] [Matsuda & al 2006] [Chowdhury & al 1993]

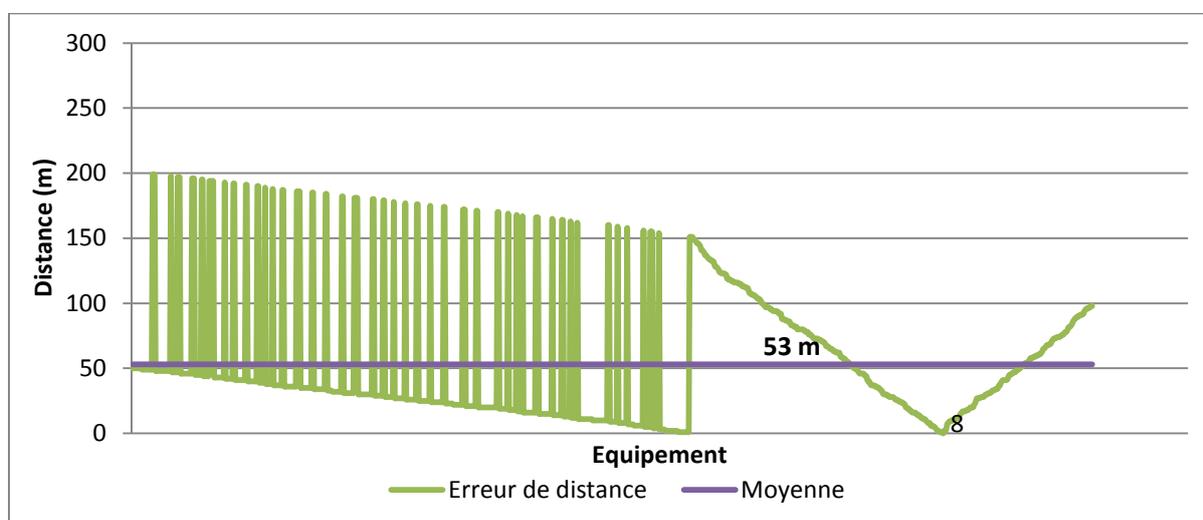
4.4.1 La méthode de visibilité zone de portée : statistiques et analyses

Comme décrit dans les paragraphes précédents, cette méthode de visibilité considère un équipement visible par un autre équipement si ce dernier se trouve dans sa zone de portée. Les équipements mobiles rattachés aux différentes technologies possèdent des zones de portée de tailles différentes. Cette taille dépend aussi du type d'environnement. Les dimensions de la zone de portée sont réduites dans un environnement intérieur. Nous rappelons les dimensions prises en compte dans notre approche à travers le tableau suivant :

	WiFi	Bluetooth	GSM
Zone de portée - Extérieur	200 m	100 m	3000 m
Zone de portée - Intérieur	50 m	20 m	3000 m

Tableau 12 Zone de portée

La figure 22 présente les erreurs de distance ainsi que l'erreur moyenne pour les deux technologies : WiFi et Bluetooth.



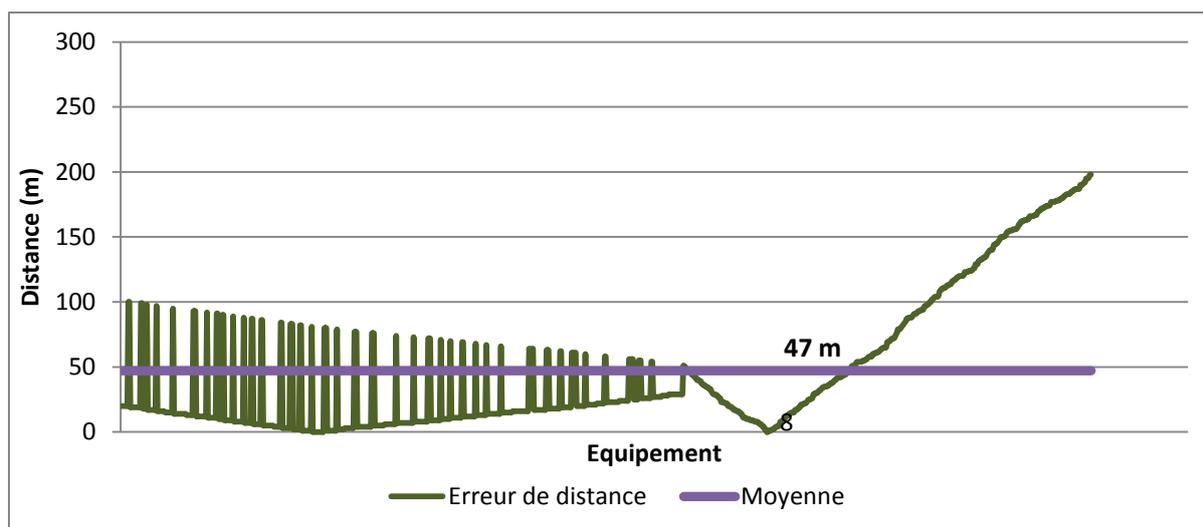


Figure 22 Erreur de distances (a) WiFi (b) Bluetooth

Nous observons une erreur moyenne égale à 53m, pour le WiFi ainsi qu'une erreur de 47m pour le Bluetooth.

Cette méthode de visibilité définit deux cas possibles :

- Un équipement est visible par un autre.
- Un équipement n'est pas visible par un autre.

La prise de décision est automatique et s'effectue dès l'instant où l'équipement appartient à la zone de portée. La figure 23 présente le processus de prise de décision, pour la méthode zone de portée.

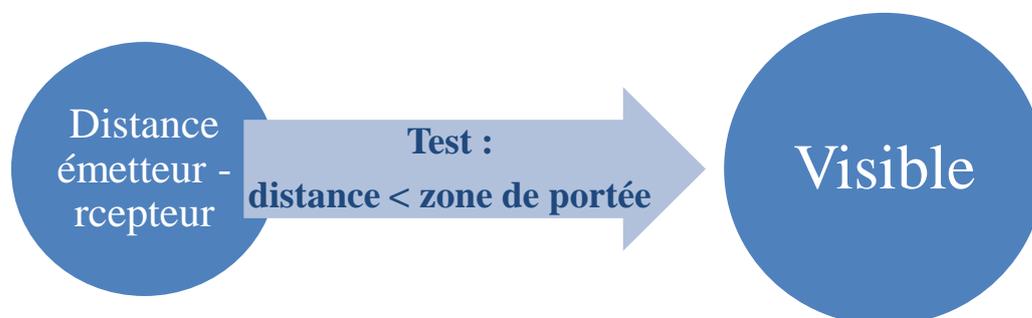


Figure 23 Test de visibilité – Méthode zone de portée

4.4.2 Les méthodes de visibilité Formule de Friis : statistiques et analyses

Cette méthode de visibilité considère un équipement visible par un autre équipement si ce dernier reçoit un signal. La puissance du signal reçu dépend de la distance géographique entre les deux équipements ainsi que du type d'environnement de propagation. Dans ce paragraphe, nous analysons le choix du paramètre n dans la formule de Friis ainsi que la limite de visibilité.

Dans les figures 24 et 25, nous présentons les erreurs de distance ainsi que l'erreur moyenne pour différentes valeurs du paramètre n variant de 2 à 3.5. Pour 100 valeurs de distances réelles allant de 1m à 100m, nous calculons les distances estimées. Nous appliquons la formule de Friis et nous analysons les valeurs des distances estimées. Une erreur allant jusqu'à 5dBm est appliquée sur les affaiblissements calculés.

Nous notons que :

- Pour n égal à 2, l'erreur moyenne de distance estimée est égale à 5.16m.
- Pour n égal à 2.5, l'erreur moyenne de distance estimée est égale à 5.99m.
- Pour n égal à 3, l'erreur moyenne de distance estimée est égale à 5.61m.
- Pour n égal à 3.5, l'erreur moyenne de distance estimée est égale à 6.38m.

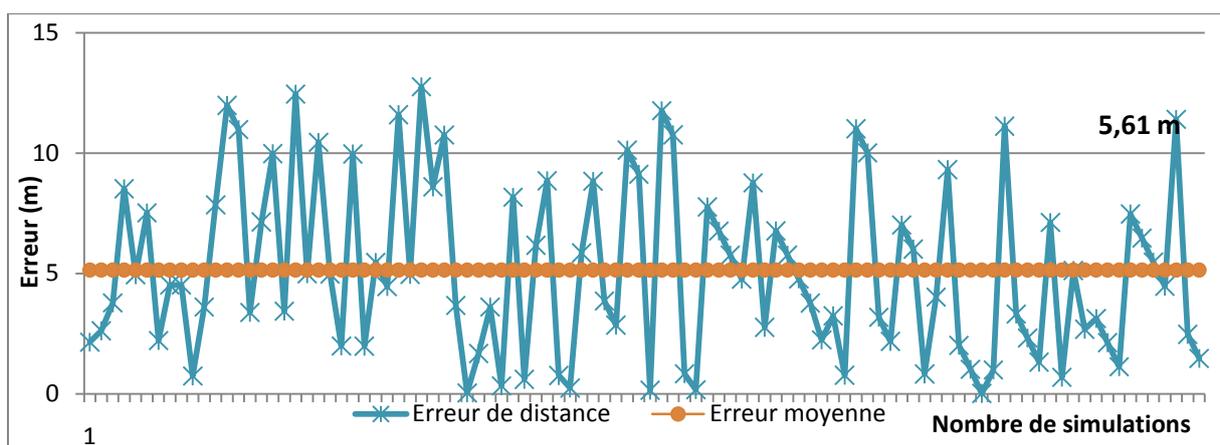
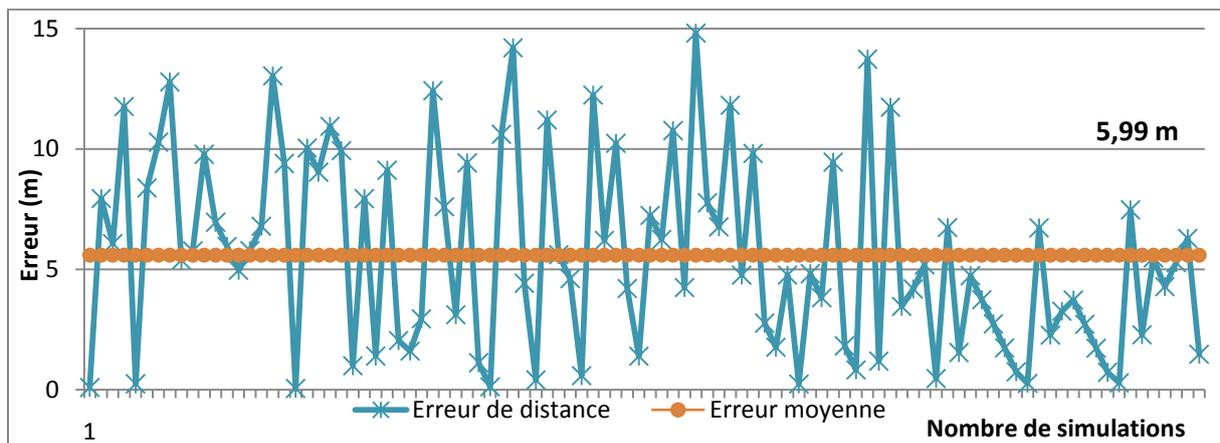
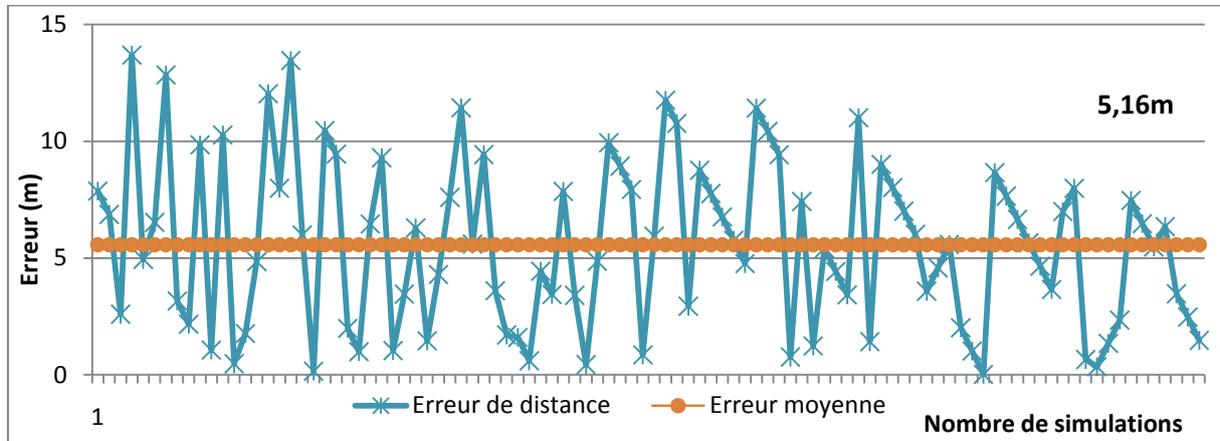


Figure 24 Erreur de distances (a) $n=2$ (b) $n=2.5$ (c) $n=3$

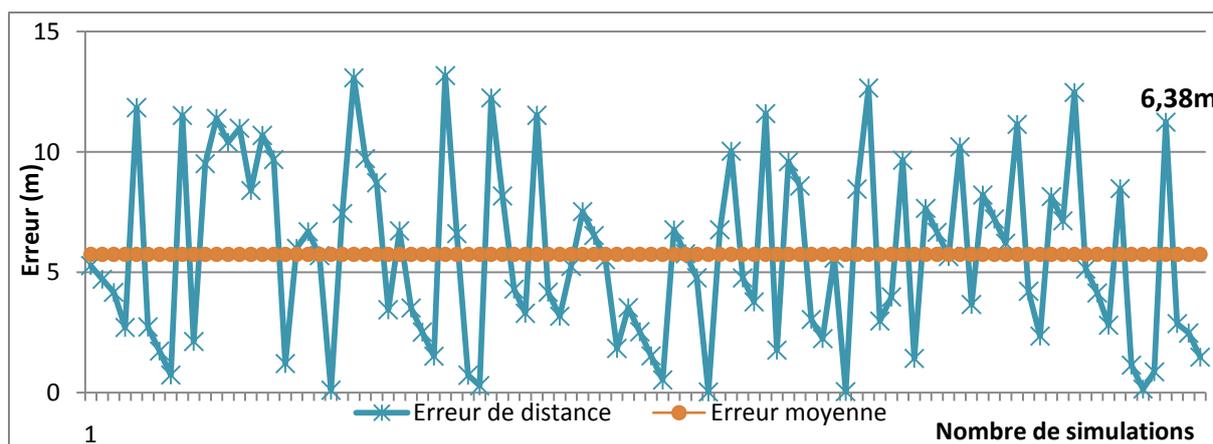


Figure 25 Erreur de distances (d) n=3.5

Les erreurs moyennes pour les valeurs de n variant de 2 à 3.5 varient aux alentours de 5m. D'autre part, nous observons que les erreurs de distance pour les différentes valeurs de n peuvent atteindre jusqu'à 15m. Les statistiques précédentes ne permettent pas d'effectuer un choix quant au paramètre n.

L'indicateur erreur moyenne de distance ne nous permet pas d'effectuer la prise de décision. Selon la littérature, la valeur 2 du paramètre n est la valeur optimale pour l'estimation des distances de propagation en espace libre. Pour nos simulations effectuées dans un environnement mixte : intérieur et extérieur, nous avons fixé la valeur de n pour les environnements intérieurs, égal à 3.5 et la valeur de n pour les environnements extérieurs, égal à 2. Comme mentionné précédemment, ce choix est appuyé suite aux différents tests effectués lors de nos travaux antécédents.

Puissance émise (mWatts)	100	100	100	100	100	100
Puissance émise (dBm)	20	20	20	20	20	20
Puissance reçue (dB)	-50	-74	-85	-91	-95	-110
Distance (m)	1	5	10	15	20	25
Célérité (m/s)	$3 \cdot 10^9$					
Fréquence (Hz)	2400000000	2400000000	2400000000	2400000000	2400000000	2400000000
Atténuation Friis (dB)	70,0804948	94,5444449	105,080495	111,243689	115,616545	130,059759

Tableau 13 Atténuations – Puissances reçues

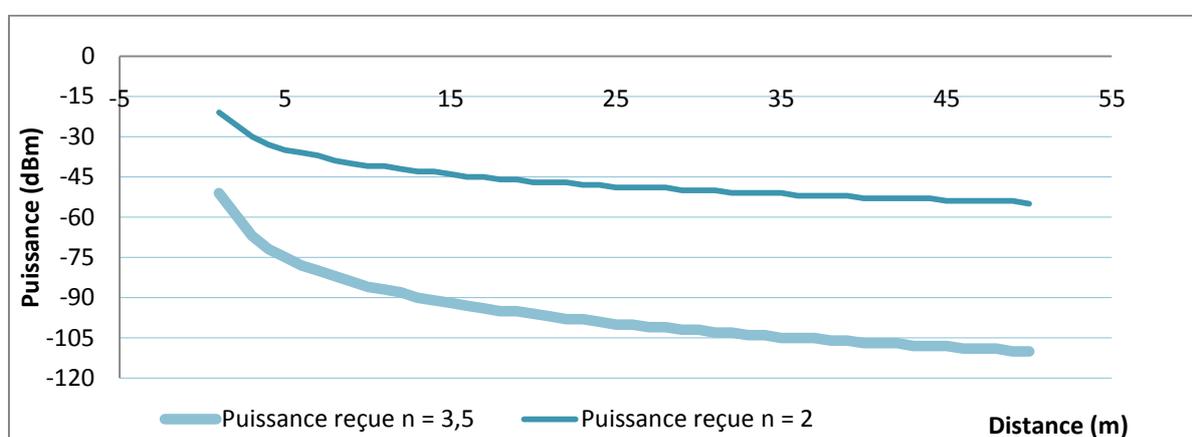


Figure 26 La puissance reçue en fonction de la distance

Dans cette première partie, nous avons analysé le paramètre indispensable pour notre estimation. Dans une deuxième partie, nous nous intéressons à la limite de visibilité.

Dans un environnement tel que Telecom SudParis, un équipement mobile est visible par un nombre important d'équipements. Afin d'optimiser les calculs et nous permettre d'utiliser les indicateurs les plus fiables, nous avons décidé de limiter la visibilité. L'intérêt majeur de cette étude consiste à approfondir la notion de visibilité, en ajustant le nombre d'équipements visibles, dans la mesure où nous devons minimiser les coûts ainsi que les temps de traitements des données.

Suivant les méthodes de visibilité basées sur la formule de Friis, théoriquement, tous les équipements présents dans un environnement géographiques sont visibles. Dans le cas pratique, les équipements qui reçoivent une puissance moyenne inférieure à -100 dBm ne sont plus en mesure de détecter le signal, dans le cas le plus défavorable.

La figure 27 schématise la prise de décision pour les méthodes de visibilité basées sur la formule de Friis.

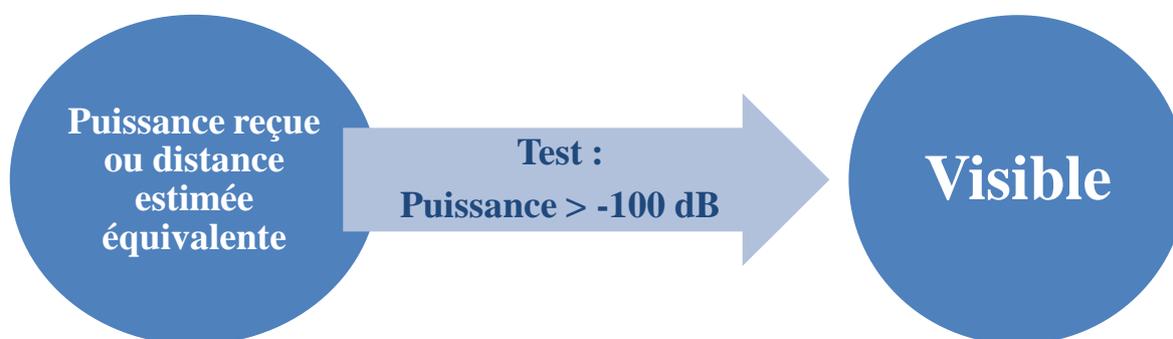


Figure 27 Prise de décision de premier ordre

Après le choix de la limite de visibilité, nous nous dirigeons vers le choix du nombre d'équipements visibles utilisés lors nos simulations. La présence d'un nombre important d'équipements mobiles dans l'environnement géographique, nous oblige à effectuer une deuxième limitation. Nous effectuons un tri des équipements visibles suivant soit la puissance la plus élevée, soit la distance minimale la plus faible et nous nous limitons à 10% du nombre total.

La figure 28 établi un récapitulatif des prises de décisions de premier ordre et du second ordre.



Figure 28 Equipement visible via les méthodes basées sur la formule de Friis

4.4.3 La méthode de visibilité algorithme de routage : statistiques et analyses

Comme décrit auparavant, la méthode de visibilité algorithme de routage considère un équipement visible par un autre équipement si ce dernier est distant d'un saut. Cette méthode nécessite la mise en place de tables de routage pour chaque équipement du réseau. En contrepartie, la prise de décision est automatique tel que pour la méthode zone de portée.

Un équipement A souhaite envoyer une requête à l'équipement B, les chemins possibles sont définis comme suit :

- De A vers B. (1 saut)
- De A vers B, en passant par un équipement intermédiaire C. (2 sauts)
- De A vers B, en passant par deux équipements intermédiaires C et D. (3 sauts)
- De A vers B, en passant par n équipements intermédiaires C, D, E, etc. (n+1 sauts)

Seul dans le premier cas, l'équipement B est visible par A. Dans les autres cas, cet équipement ne peut être visible suite au nombre de sauts qui est supérieur à 1.

La figure 29 montre la prise de décision.

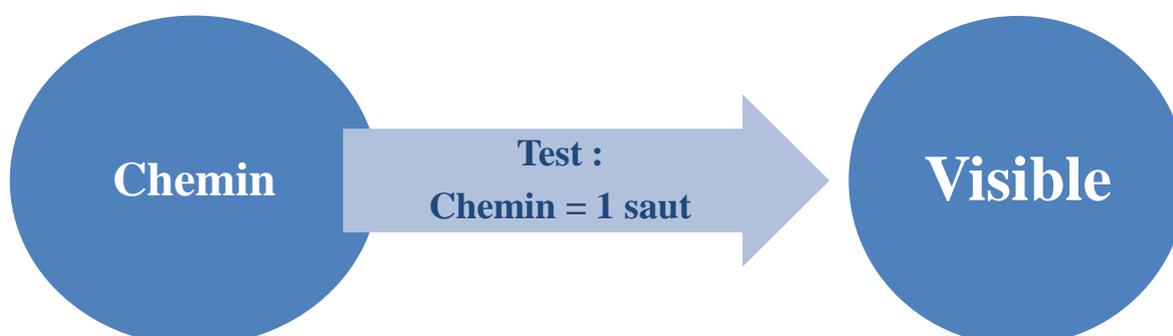


Figure 29 Prise de décision

4.5 Conclusion

Nous avons présenté au sein de ce chapitre les différentes approches de visibilité. L'approche zone de portée considère un équipement visible par un autre s'il se trouve dans sa zone de portée. L'approche puissance estimée considère un équipement visible par un autre s'il reçoit une puissance supérieur à -100dBm . L'approche distance estimée considère un équipement visible par un autre s'il se trouve à une distance inférieur à un seuil. L'approche le plus proche voisin définit comme visible un équipement voisin. Un équipement voisin est l'équipement qui reçoit la puissance la plus élevée ou l'équipement le plus proche. La dernière approche de visibilité définit un équipement visible par un autre si ce dernier si situe à un saut de l'autre. Nous étions, en outre face à des choix, concernant les différents seuils de visibilité. Nous avons analysé les différentes approches et nous avons décrit les méthodes de prise de décision.

Chapitre 5

Relations géographiques, modèles de mobilité et approche itérative

5.1 Introduction

Afin de mettre en œuvre un système de positionnement utilisant la visibilité, nous avons vu qu'il était nécessaire de passer par une étude géographique. Cette étude géographique nous permet d'obtenir les résultats de positionnement. Les phases indispensables pour cette étude sont la conversion des données de visibilité en données géographiques et la mise en place de modèles de mobilité. L'influence de la première phase sur le fonctionnement du système de positionnement est considérable. Comme nous l'avons décrit dans le chapitre précédent, cette étape succède l'étude de la visibilité et permet d'obtenir une cartographie géographique de tous les équipements dans l'environnement. La deuxième phase est importante dans la mesure où elle modélise le déplacement d'un équipement mobile dans l'environnement. La position géographique de cet équipement nécessite alors une mise à jour régulière.

Dans ce chapitre, nous décrivons dans une première partie, deux méthodes différentes d'étude géographique et dans une deuxième partie, nous détaillons les modèles de mobilité adaptés à notre système. Une approche différente basée sur la triangulation itérative est décrite, dans la troisième partie. Avant la mise en place du simulateur, nous décrivons les aspects théoriques de notre approche.

5.2. Modélisation géographique

Un environnement géographique peut contenir plusieurs équipements mobiles. Suite à une étude de visibilité, nous obtenons une liste d'équipements visibles pour chaque équipement. Nous utilisons ces données de visibilité afin de déterminer des liens géographiques entre les équipements. Ces liens géographiques nous permettent d'estimer les distances entre les équipements visibles et de calculer par la suite les positions géographiques correspondantes. Les positions géographiques estimées sont des positions relatives, dans un premier temps. Parmi les équipements présents dans l'environnement, nous supposons que certains peuvent acquérir des informations de positionnement via un autre système de positionnement tel que le

GPS, par exemple. Dans un tel cas, les positions relatives obtenues seront mises à jour en effectuant un calibrage du système et l'obtention de positions géographiques absolues.

Dans la figure 30, nous schématisons les étapes du système : l'étude de visibilité suivie de l'étude géographique.

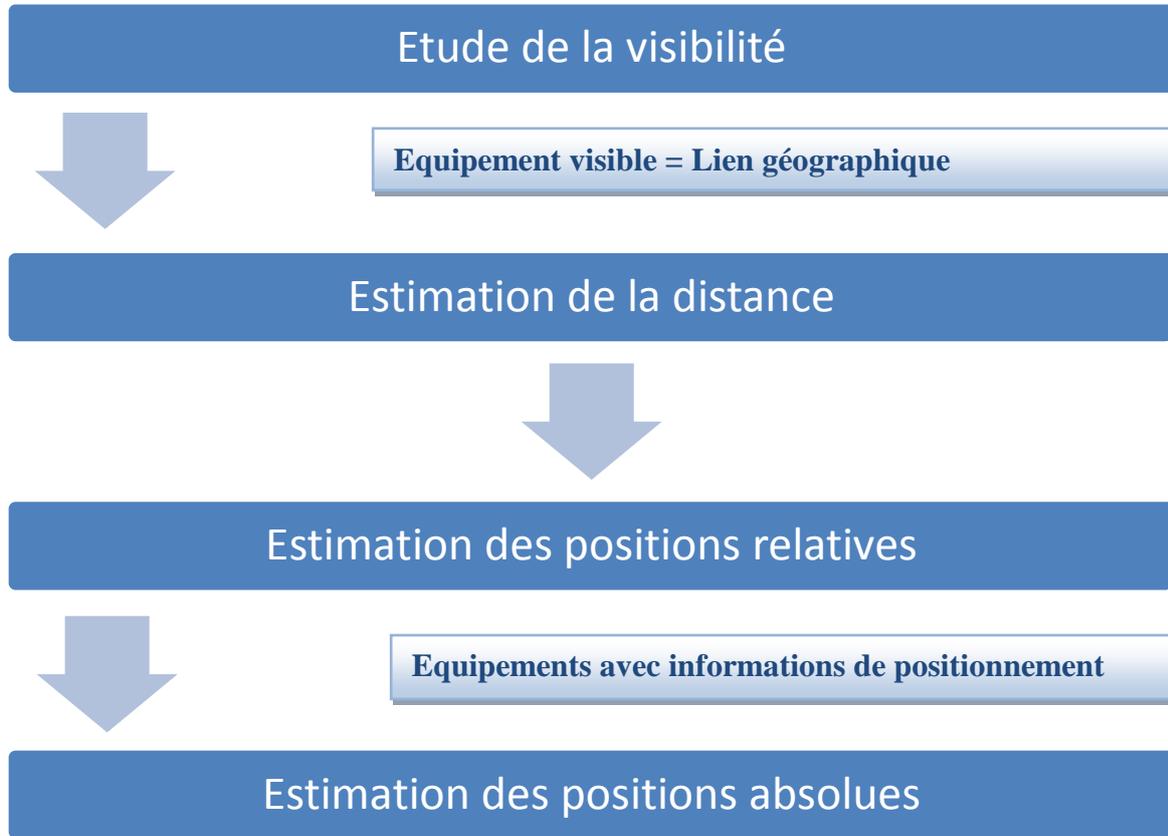


Figure 30 Étapes nécessaires pour la modélisation géographique

Notre système de positionnement effectue une étude de visibilité qu'il traduit en données géographiques. Nous avons développé deux approches différentes pour la modélisation géographique, basées sur les relations spatiales (géographiques) entre les équipements. Ces deux approches permettent d'obtenir un graphique bidimensionnel ou tridimensionnel représentant la distribution des équipements dans l'environnement. La première approche est basée sur une méthode algébrique et la deuxième approche est basée sur la théorie du raisonnement spatial. Dans les paragraphes suivants, nous expliquons ces deux approches en détails et analysons les modèles obtenus. Les modèles sont comparés et testés pour évaluer les performances.

5.2.1 Approche algébrique

Notre environnement de simulation doit représenter un environnement géographique dans lequel nous avons des équipements mobiles. Les équipements peuvent se situer dans un environnement intérieur ou extérieur. Comme mentionné auparavant, certains équipements présents peuvent avoir déjà des informations de positionnement. La seule information supposée connue pour l'environnement réseau est le type de technologie utilisé. Nous n'avons

aucune autre information complémentaire : topologie, etc. Nous utilisons donc le principe de la théorie des graphes, afin de modéliser cet environnement. [Wang & al 2010] [Nakayama & al 2010] [Rajappa & al 2008] [Lelin & al 2007] [Cederbaum 1984]

5.2.1.1 Bases théoriques : La théorie des graphes

Avant d'appliquer la nouvelle approche, il convient tout d'abord de revoir les bases théoriques de la théorie des graphes. Un graphe est défini comme une construction pour modéliser les relations entre les éléments d'un ensemble.

Un graphe est constitué de sommets reliés par des arcs (si la connexion est unidirectionnelle) et des arêtes (si la connexion est bidirectionnelle). Les sommets sont assimilés à des nœuds. Deux nœuds reliés par une arête sont appelés voisins. L'ensemble des sommets voisins à un nœud est appelé le voisinage du nœud. Un nœud voisin est aussi appelé nœud adjacent. Un graphe se présente comme nous pouvons l'apercevoir sur la figure 31.

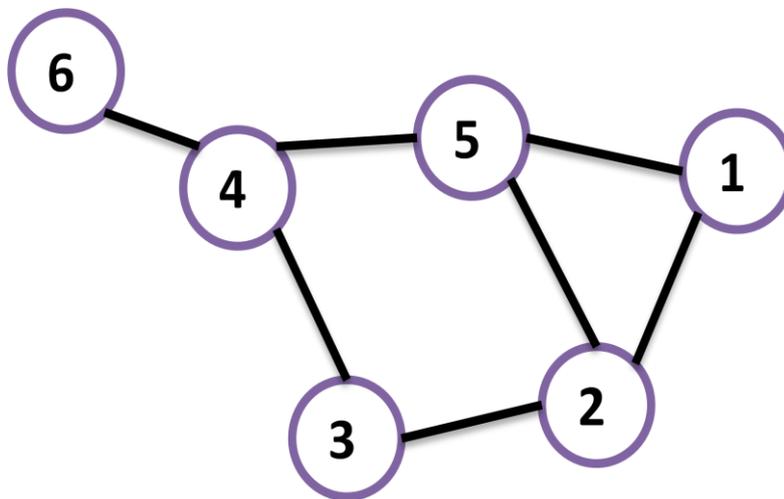


Figure 31 Graphique aléatoire d'adjacence

Le graphe figure 31 est un défini par le couple $G(6,7)$ où 6 est le nombre de nœuds et 7 est le nombre d'arêtes. L'ordre du graphe est égal au nombre de nœuds. Le degré de chaque nœud correspond au nombre de liens. Les caractéristiques des nœuds du graphe sont les suivantes :

Nœud	Degré
1	2
2	3
3	2
4	3
5	3
6	1

Tableau 14 Degré des nœuds

Le graphe ci-dessus définit des chemins. Un chemin est une suite de nœuds, telle que deux nœuds consécutifs sont adjacents. La représentation mathématique de ce type de graphe, est donnée par une matrice appelée matrice d'adjacence. Les valeurs de cette matrice sont

constituées à partir de liste d'adjacence entre les nœuds. La liste pour le graphe de la figure 31 se présente comme suit :

Nœud	Nœud(s) adjacent(s)
1	2 5
2	1 3 5
3	2 4
4	3 5 6
5	1 2 4
6	4

Tableau 15 Nœuds adjacents

La matrice correspondante pour cette liste d'adjacence est donnée ci-dessous:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

La taille de la matrice est égale au nombre de nœuds dans le graphe. Dans l'exemple ci-dessus, la dimension de la matrice est égale à 6. Les éléments de la matrice peuvent prendre deux valeurs : 0 ou 1. Si la valeur de l'élément de la matrice est égale à 1, cela signifie que les deux nœuds correspondants (nœud avec le numéro de ligne et le nœud avec le numéro de colonne) sont adjacents ou voisins.

La matrice de grade D est une matrice diagonale dont les éléments D_{ii} présentent les degrés de chaque nœud. La matrice D permet d'analyser le nombre liens entre les nœuds. Pour l'exemple précédent, elle est définie comme suit :

$$D = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La matrice D peut être transformée en une matrice Laplacienne, résultant de l'équation:

$$L' = D^{-\frac{1}{2}} \times L \times D^{-\frac{1}{2}}$$

$$L' = I - D^{-\frac{1}{2}} \times A \times D^{-\frac{1}{2}}$$

Avec I matrice d'identité.

La matrice Laplacienne normalisée L est calculée suivant l'équation suivante :

$$l_{i,j} := \begin{cases} 1 & \text{si } i=j \\ -\frac{1}{\sqrt{\deg(v_i) * \deg(v_j)}} & \text{si } i \neq j \text{ et } (i,j) \in E \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Avec $\deg(v)$ le degré d'un sommet.

Les valeurs de L pour l'exemple précédent sont données ci-dessous:

$$L = \begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 3 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & -1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Chaque sommet d'un graphe possède une étiquette. Dans notre exemple, les étiquettes correspondent à 1, 2, 3, 4, 5 et 6. Les matrices A et L dépendent de ces étiquettes. Le changement des étiquettes entraînent un changement au niveau des matrices. Ce changement se manifeste à travers le changement de l'ordre des colonnes. Cependant, certains éléments restent invariants tels que la taille de la matrice, etc.

Avant d'appliquer notre approche, nous précisions les différentes adaptations effectués pour nos besoins de positionnement à travers les paragraphes suivants. [Chitcharoen & al 2008] [Bin & al 2002] [Shea 2000]

5.2.1.2 Application de la théorie des graphes au système de positionnement

Nous avons appliqué la théorie des graphes afin de modéliser notre environnement géographique avec les différents équipements déployés.

Dans l'objectif d'obtenir un graphe de positionnement, nous sommes dans l'obligation de fixer les définitions suivants :

- Un équipement représente un nœud
- Si un équipement est visible par un autre, les deux équipements sont considérés comme adjacents. La valeur correspondante dans la matrice d'adjacence est égale à 1.
- Si un équipement est visible par un autre, les deux équipements représentés par des nœuds sont reliés par un arc sur le graphe.

Notre environnement de simulation présente une zone géographique avec différents équipements réseaux. Certains équipements déployés se trouvent dans l'environnement intérieur et certains se trouvent dans l'environnement extérieur. Cet indicateur nous est indispensable dans la mesure où nous pouvons estimer que les équipements présents à

l'extérieur peuvent obtenir plus aisément des informations de positionnement via un autre système (GPS). La présentation de cette situation est exposée sur la figure 32.

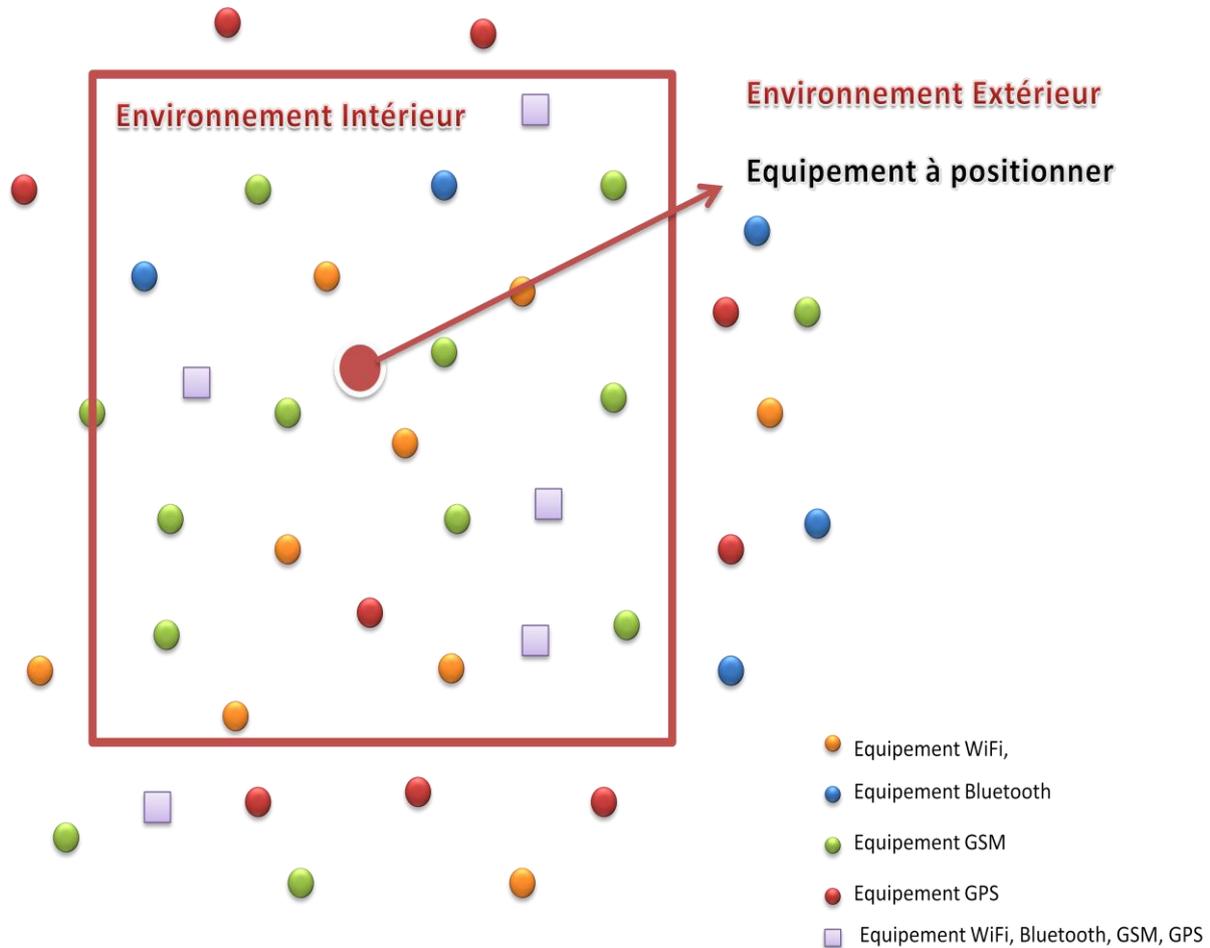


Figure 32 Répartition des équipements dans l'environnement

Comme le montre la figure 32, la répartition des équipements dans l'environnement présente une particularité très importante : des équipements sont déployés à l'extérieur et des équipements sont déployés à l'intérieur. L'équipement dont on souhaite obtenir la position géographique se trouve dans l'environnement intérieur. Cet équipement détermine la liste des équipements visibles afin d'établir une liste d'adjacence. Cette procédure est effectuée par chaque équipement présent dans l'environnement. Nous obtenons avec les différentes listes d'adjacence, la table d'adjacence. Une table d'adjacence est constituée de toutes les listes d'adjacence pour tous les équipements. Avec les résultats précédents, nous pouvons construire le graph d'adjacence. La construction d'un graph de positionnement nécessite la prise en compte d'un élément essentiel : le référentiel. En effet, tout nœud présente un équipement déployé dans un environnement spatial. Nous devons donc spécifier la position du nœud dans l'espace. Cette opération nécessite deux phases spécifiques :

- L'association du graph à un référentiel.
- Le calibrage du graphe à l'aide des nœuds avec des informations de positionnement.

La deuxième phase constitue la phase la plus intéressante. Après avoir obtenu un graph tridimensionnel dans un repère local, nous effectuons un calibrage avec les nœuds possédant

des informations de positionnement. Ces nœuds nous permettent d'effectuer une conversion entre les coordonnées locale ainsi que les coordonnées absolues.

5.2.1.3 Simulations et résultats de l'approche algébrique

Nous cherchons dans ce paragraphe à appliquer les notions théoriques abordées dans un cas simple afin d'analyser les résultats obtenus.

Afin de simplifier ce qui suit, nous définissons un nombre faible d'équipements égal à 7 déployés dans un environnement géographique de dimensions inconnues.

La figure 33 schématise une zone géographique constituée de deux types d'environnement : extérieur et intérieur. Dans cette zone géographique, nous avons déployés aléatoirement 7 équipements avec des technologies variées. Quatre équipements situés dans l'environnement extérieurs sont des équipements GPS. Cette distribution est effectuée de façon consciente afin de montrer l'importance de l'impact des équipements avec des informations de positionnement sur la phase de calibrage.

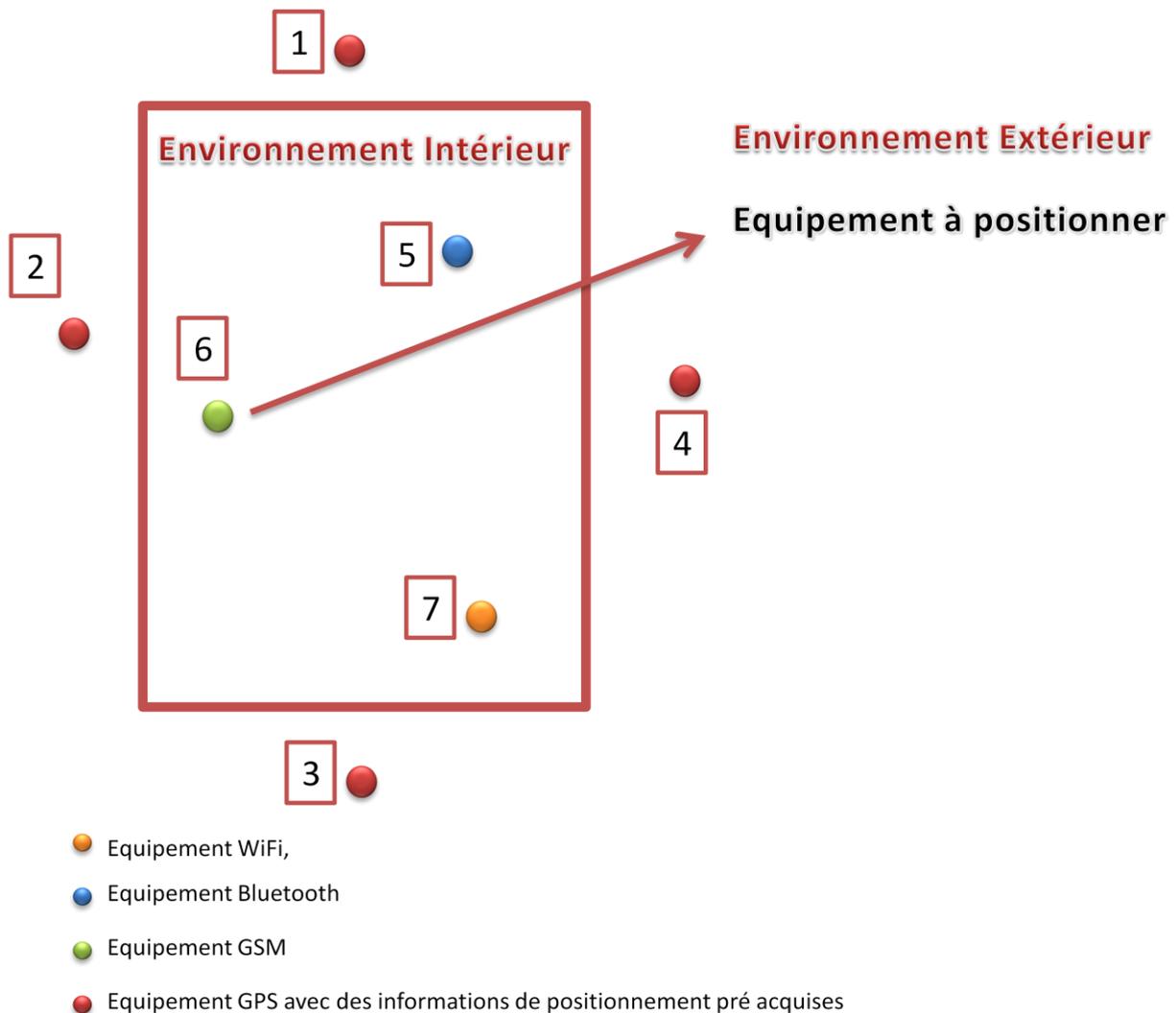


Figure 33 Cas simplifié de la répartition des équipements dans l'environnement

La mise en place du graphe représentant cette situation nécessite trois étapes : l'établissement des listes d'adjacence, l'établissement de la matrice d'adjacence et la représentation.

Nous avons établi une étude de visibilité pour cet exemple. Cette étude nous a permis de déterminer les listes de visibilité pour chaque équipement :

Nœud	Nœud(s) adjacent(s)
1	2 4 5
2	1 3 6
3	2 4 7
4	1 3 5 7
5	1 4 6
6	2 5 7
7	3 4 5 6

Tableau 16 Les nœuds adjacents

Ces listes d'adjacence nous permettent d'obtenir la matrice d'adjacence correspondante. Elle est sous la forme suivante :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Le graphe tridimensionnel obtenu en fonction des listes de visibilité est construit sur la figure 34.

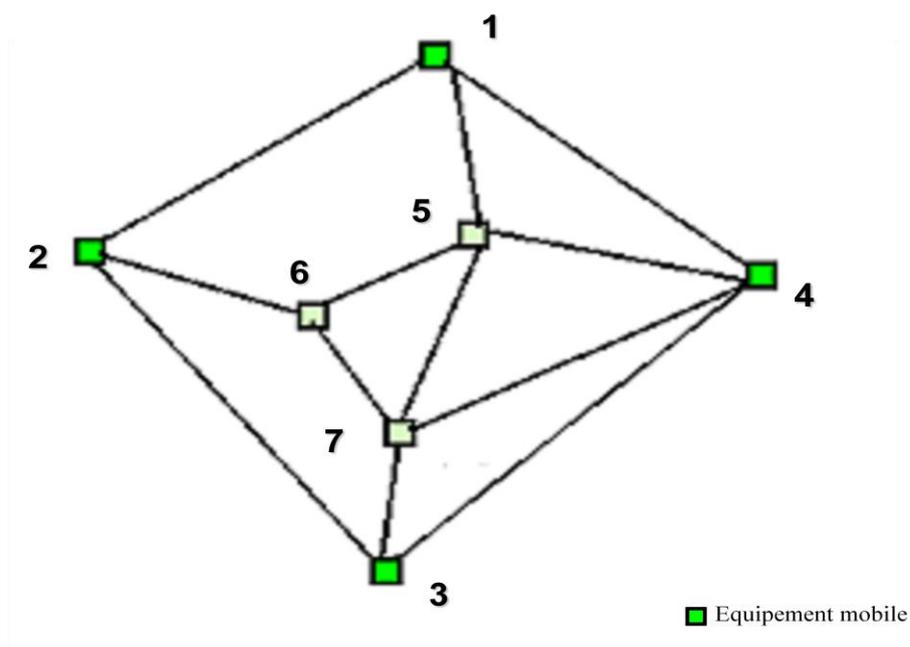


Figure 34 Graphe d'adjacence

Selon notre étude théorique, les caractéristiques d'un graphe se réduisent sous forme matricielle. Nous calculons donc dans la suite la matrice D ainsi que la matrice Laplacienne L. Pour notre exemple, la matrice D et L sont égales, respectivement à :

$$D = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{pmatrix} \quad L = \begin{pmatrix} 3 & -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 3 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 4 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 3 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 4 \end{pmatrix}$$

La matrice Laplacienne L' normalisée obtenue est :

$$L' = \begin{pmatrix} 1 & -0.33 & 0 & -0.28 & -0.33 & 0 & 0 \\ -0.33 & 1 & -0.33 & 0 & 0 & -0.33 & 0 \\ 0 & -0.33 & 1 & -0.28 & 0 & 0 & -0.28 \\ -0.28 & 0 & -0.28 & 1 & -0.28 & 0 & -0.25 \\ -0.33 & 0 & 0 & -0.28 & 1 & 0 & -0.28 \\ 0 & -0.33 & 0 & 0 & -0.33 & 1 & -0.28 \\ 0 & 0 & -0.28 & -0.25 & 0 & -0.28 & 1 \end{pmatrix}$$

La matrice Laplacienne permet de décrire les degrés des nœuds ainsi que les priorités attribuées aux liens. Nous n'utilisons pas cette matrice dans notre approche pratique, étant donné que nous ne donnons pas d'ordre de priorité aux liens entre équipements.

Nous allons à présent présenter la deuxième approche.

5.2.2 Raisonnement spatial

Dans ce paragraphe nous exploitons les notions théoriques du raisonnement spatial afin de l'adapter à notre approche de positionnement.

La théorie du raisonnement spatial est une représentation spatiale basée sur les relations spatiales des objets. Cette théorie est largement utilisée dans le domaine de l'intelligence artificielle et dans le domaine du traitement d'images.

Notre environnement de simulation doit représenter un environnement géographique dans lequel nous avons des équipements mobiles, comme décrit dans le paragraphe précédent. [Alboody & al 2008] [Abdelmoty & al 2006] [Morales & al 2006] [El-Geresy & al 1997] [El-Geresy & al 1996]

5.2.2.1 Bases théoriques : Le raisonnement spatial

Le raisonnement spatial est fondé sur une étude des relations spatiales entre les objets dans l'objectif d'obtenir une représentation totale de l'espace. Les relations spatiales sont déterminées à travers des opérateurs directionnels. Contrairement à la théorie des graphes, le raisonnement spatial nécessite la connaissance de critères environnementaux : topologie, orientation, distance, forme, etc.

Le raisonnement spatial se base sur les principes suivants :

- Ensemble de conventions syntaxiques et sémantiques
- Représentations logiques
- Sélection de critères pertinents
- Mise en avant des propriétés importantes

Plusieurs modes de fonctionnement ont été développés. Celui qui a attiré notre attention est le raisonnement spatial à travers les relations cardinales dans l'espace.

Plusieurs normes doivent être définies :

- La direction, relation directionnelle entre deux objets reliés par une ligne ainsi qu'une référence (« est au sud de » par exemple).
- La référence, représentée par l'un des deux objets reliés.
- L'angle de vue
- L'objet primaire.

La relation directionnelle de l'objet primaire est définie par rapport à la référence. Son orientation est définie grâce à l'angle de vue. Ces deux indicateurs sont nécessaires au raisonnement. D'un point de vue pratique de la relation spatiale « A est au nord de B », nous pouvons conclure que A est l'objet primaire et que B est la référence. L'opérateur « nord » est une des quatre relations directionnelles primaires cardinales. Les trois autres sont : « sud », « est » et « ouest ». Les relations directionnelles cardinales sont exprimées en degrés avec un angle compris entre 0 et 360° : du nord-sud au est-ouest. Outre les relations directionnelles primaires, d'autres relations ont été définies, comme le présente la figure 35.

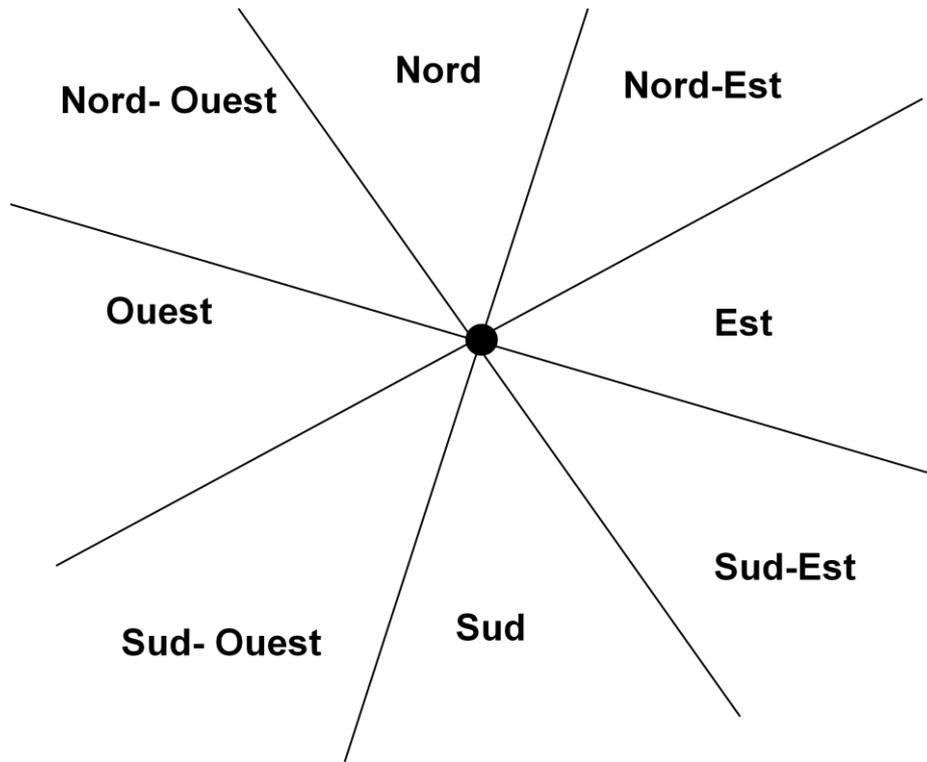


Figure 35 Les relations spatiales

La figure 35 illustre l'espace sous forme de huit cônes avec des dimensions égales. Les objets de l'espace sont assimilés à des points.

D'un point de vue mathématique, les relations spatiales sont présentées sous forme de relations algébriques. Soit «a» l'objet de référence de coordonnées (ax, ay, az) et «B» l'objet primaire des coordonnées (bx, by, bz) les relations possibles entre les deux objets sont définies à travers les équations suivantes :

$$eastOf_hs(A,B) \Leftrightarrow \forall a : \exists b : a_x \succ b_x$$

$$westOf_hs(A,B) \Leftrightarrow \forall a : \exists b : a_x \prec b_x$$

Un objet A se trouve à l'est d'un autre objet B, si son abscisse est supérieure à l'abscisse de l'objet B.

Un objet A se trouve à l'ouest d'un autre objet B, si son abscisse est inférieure à l'abscisse de l'objet B.

$$northOf_hs(A,B) \Leftrightarrow \forall a : \exists b : a_y \succ b_y$$

$$southOf_hs(A,B) \Leftrightarrow \forall a : \exists b : a_y \prec b_y$$

Un objet A se trouve au nord d'un autre objet B, si son ordonnée est supérieure à l'ordonnée de l'objet B.

Un objet A se trouve au sud d'un autre objet B, si son ordonnée est inférieure à l'ordonnée de l'objet B.

$$above_proj(A,B) \Leftrightarrow \forall a : \exists b : a_z \succ b_z$$

$$below_proj(A,B) \Leftrightarrow \forall a : \exists b : a_z \prec b_z$$

Un objet A se trouve devant un objet B, si son altitude est supérieure à l'altitude de l'objet B.

Un objet A se trouve derrière un objet B, si son altitude est inférieure à l'altitude de l'objet B.

[Canlin & al 2009] [Han-Young & al 2006] [Holt & al 1995]

5.2.2.2 Application du raisonnement spatial au système de positionnement

Il s'agit d'illustrer ce qui a été décrit dans la section précédente. L'environnement de simulation est défini comme un espace tridimensionnel dans lequel les équipements sont assimilés à des points. Nous appliquons la théorie du raisonnement spatial afin de modéliser les relations spatiales entre les différents équipements.

Nous décomposons les équipements déployés dans l'environnement en deux groupes : les équipements sans aucune information de positionnement et les équipements avec des informations de positionnement.

La mise en œuvre du raisonnement spatial au niveau de notre système de positionnement nécessite deux étapes fondamentales :

- L'étude des relations spatiales entre les équipements avec des informations de positionnement
- L'étude des relations spatiales entre les équipements sans aucune information de positionnement
- Le lien entre les deux études

La première étape nous permet d'obtenir un tableau avec les relations directionnelles pour chaque équipement avec information de positionnement. La deuxième étape nous permet d'obtenir un tableau avec les relations directionnelles pour les équipements sans information de positionnement. Cette deuxième étape nécessite une opération intermédiaire, basée sur un algorithme de routage. Les chemins définis par l'algorithme nous aident à déterminer les relations spatiales entre les équipements. Nous décrirons le principe de l'algorithme appliqué dans la suite. En utilisant une approche itérative, également décrite ci-dessous, les relations spatiales se remplissent progressivement pour tous les équipements de l'environnement.

La figure 36 présente la situation décrite ci-dessus. Les équipements-points sont caractérisés par leurs attributs directionnels liés à la référence.

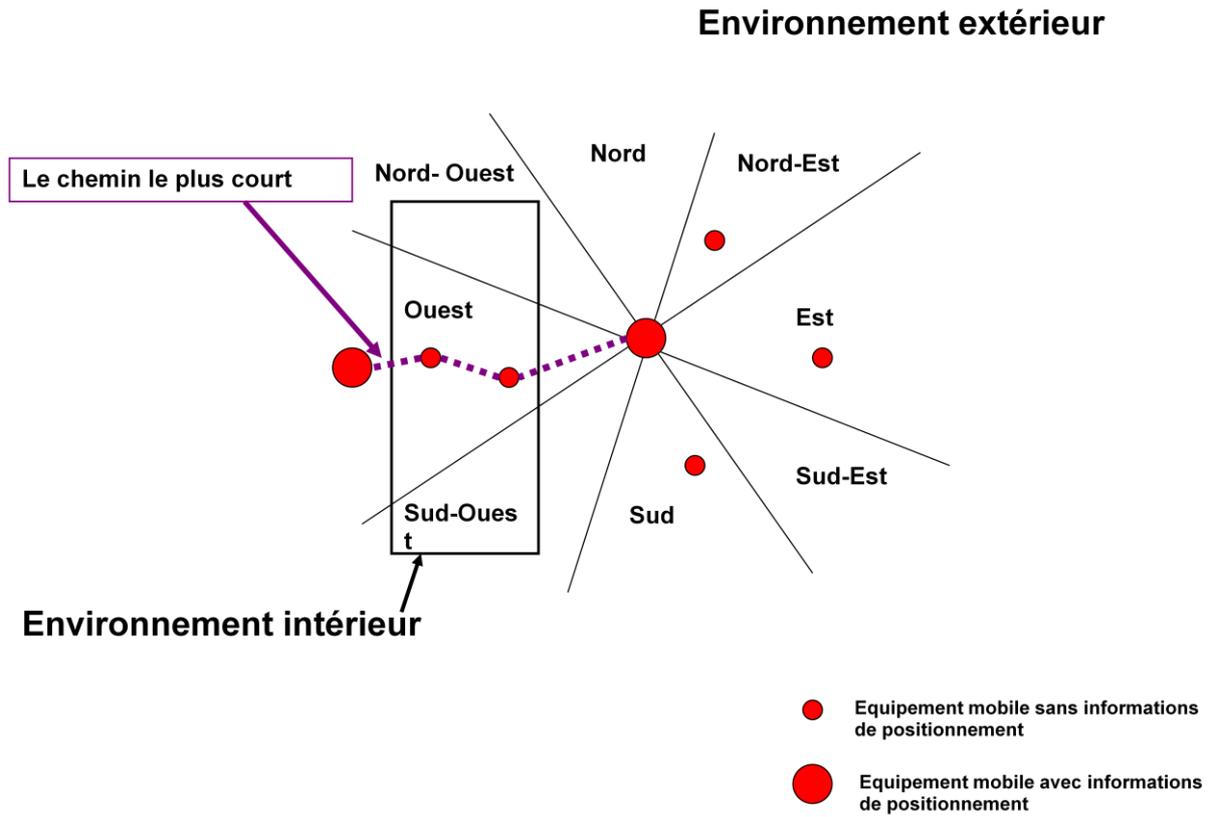


Figure 36 Modélisation spatiale

La figure 37 montre l'adaptation de la théorie du raisonnement spatial à l'environnement.

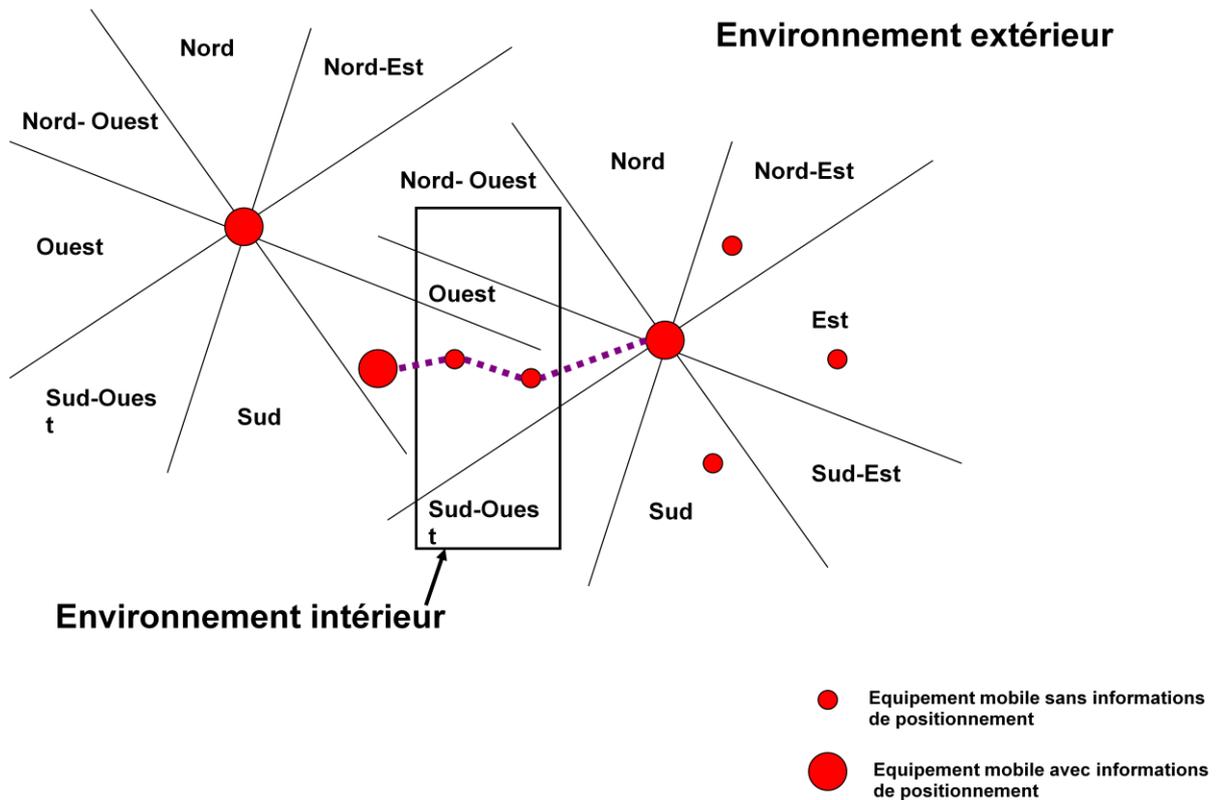


Figure 37 Modélisation spatiale – Plusieurs points références (Equipements mobiles avec information de positionnement)

Les relations spatiales décrites dans l'approche sont des relations liées à un objet de référence pris en considération et non pas des directions géographique absolues.

Les figures 36 et 37 illustrent des équipements mais aussi des chemins entre les équipements. Les chemins attribués sont définis, comme mentionné précédemment, à travers un algorithme de routage.

Les relations spatiales entre des points mobiles nous permettent d'avoir une représentation de l'espace utilisant des zones d'intersection. Afin de définir l'appartenance des équipements aux régions considérées, nous décidons de mettre en œuvre un algorithme de routage qui puisse définir un certain nombre d'itinéraires possibles. Ces chemins nous permettent de construire une base de données avec les équipements qui ne sont pas positionnés (représentés dans la figure 37) et leurs régions.

L'algorithme de routage considéré est basé sur le protocole Fisheye State Routing "RSF". Nous adaptons les bases de l'algorithme à nos besoins. Fisheye State Routing est un protocole de routage proactif. Les équipements d'un réseau sont caractérisés par une table avec tous les chemins possibles pour transmettre les informations vers un autre équipement. Le protocole est appelé proactif en raison de son calcul périodique des routes et l'envoi du routage à la suite d'une demande.

FSR (Fisheye State Routing) est basé sur un routage état des liens et il est en mesure de fournir immédiatement des informations de route si nécessaire. Dans un routage à état de liens, un équipement possède une carte topologique complète. Les paquets concernant l'état des liens sont échangés périodiquement, ce qui permet au réseau de disposer d'informations sur l'état de la connexion entre les équipements. Les tableaux de topologie sont envoyés aux

voisins locaux uniquement. FSR est un algorithme de routage à état de liens. [Song Liu & al 2008] [Abdallah & al 2006] [Ogasawara & al 1996] [Pham& al 1999]

Notre application de ce protocole est limitée à un saut.

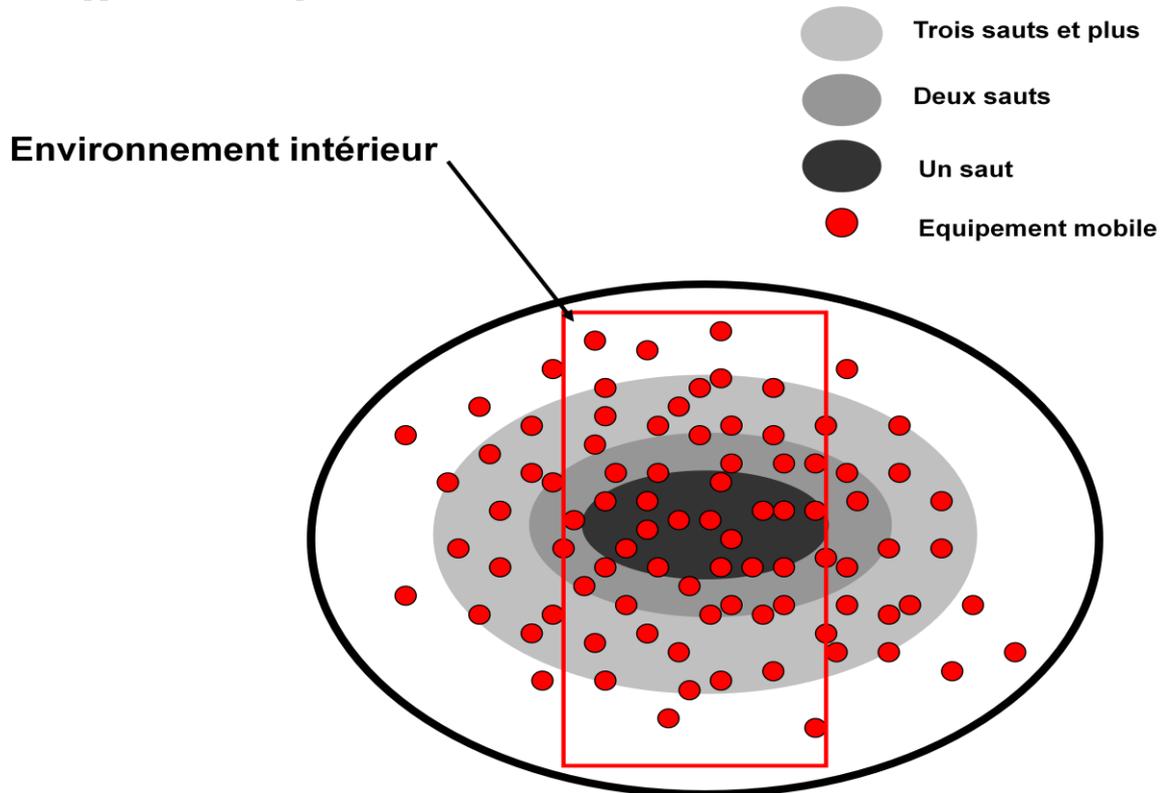


Figure 38 Principe FSR

5.2.2.3 Simulations et résultats de l'approche raisonnement spatial

Notre recherche ci-dessous est fondée sur une approche prenant en considération les relations entre les équipements en utilisant un algorithme de routage.

Suite au coût élevé (Nombre d'opérations important) de cette théorie, nous nous limitons à la première théorie pour nos simulations.

Dans la section suivante, nous exposons une autre approche de positionnement reprenant le principe de triangulation.

5.3. Modèles de mobilité

Dans un environnement géographique, la position de chaque équipement peut varier au cours du temps. Cette variation est liée soit au déplacement de l'utilisateur, soit au déplacement du réseau. Les déplacements géographiques induisent une mobilité spatiale. Cette mobilité se présente, comme le montre la figure 39, sous différents aspects : au niveau de l'équipement, au niveau de l'utilisateur et au niveau du réseau.

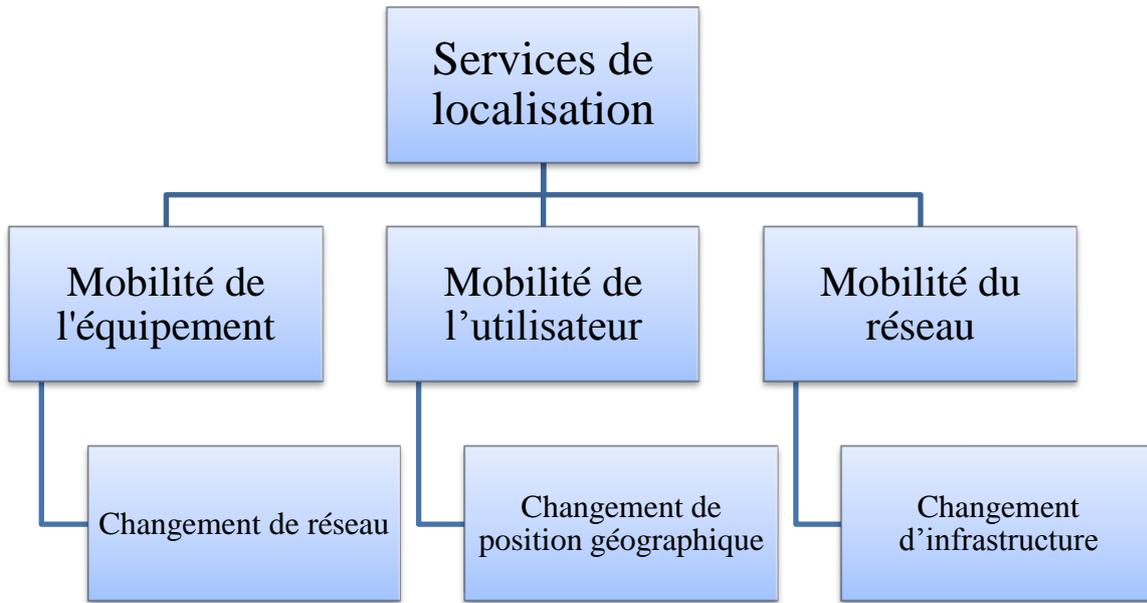
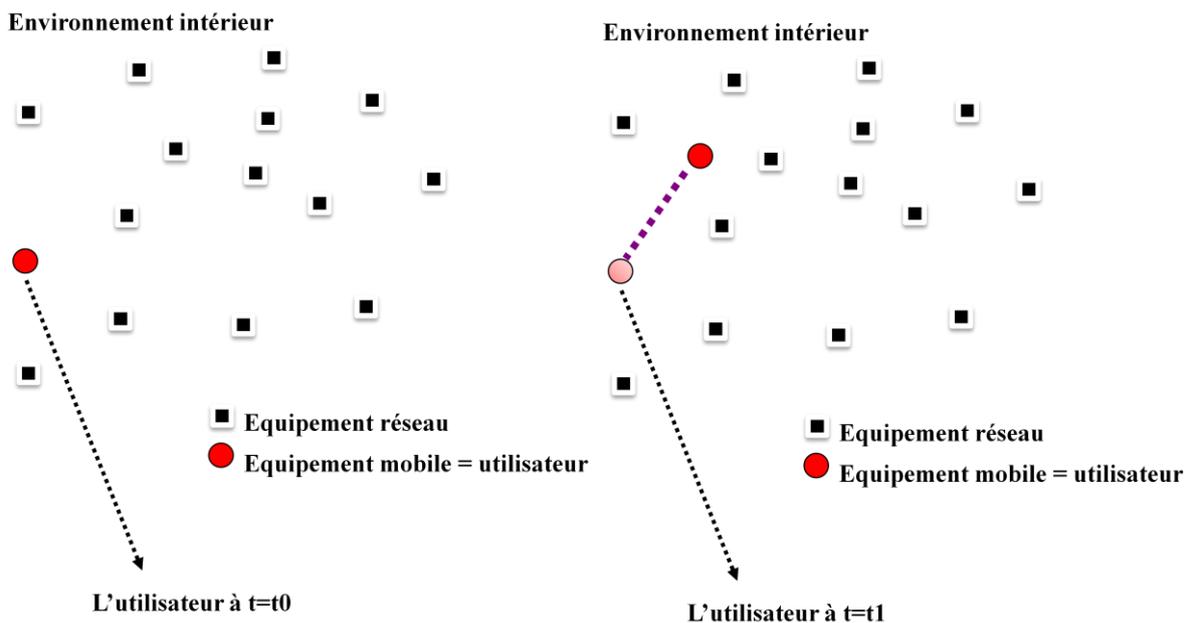


Figure 39 La mobilité

La mobilité de l'équipement est différente de la mobilité de l'utilisateur. La mobilité de l'utilisateur engendre une variation continue de la position de l'équipement, au cours de temps. La mobilité de l'équipement désigne le changement du réseau de rattachement. La mobilité du réseau concerne le déplacement de l'infrastructure du réseau.

La figure 40 détaille la différence entre la mobilité de l'utilisateur et la mobilité du réseau.



Mobilité de l'utilisateur

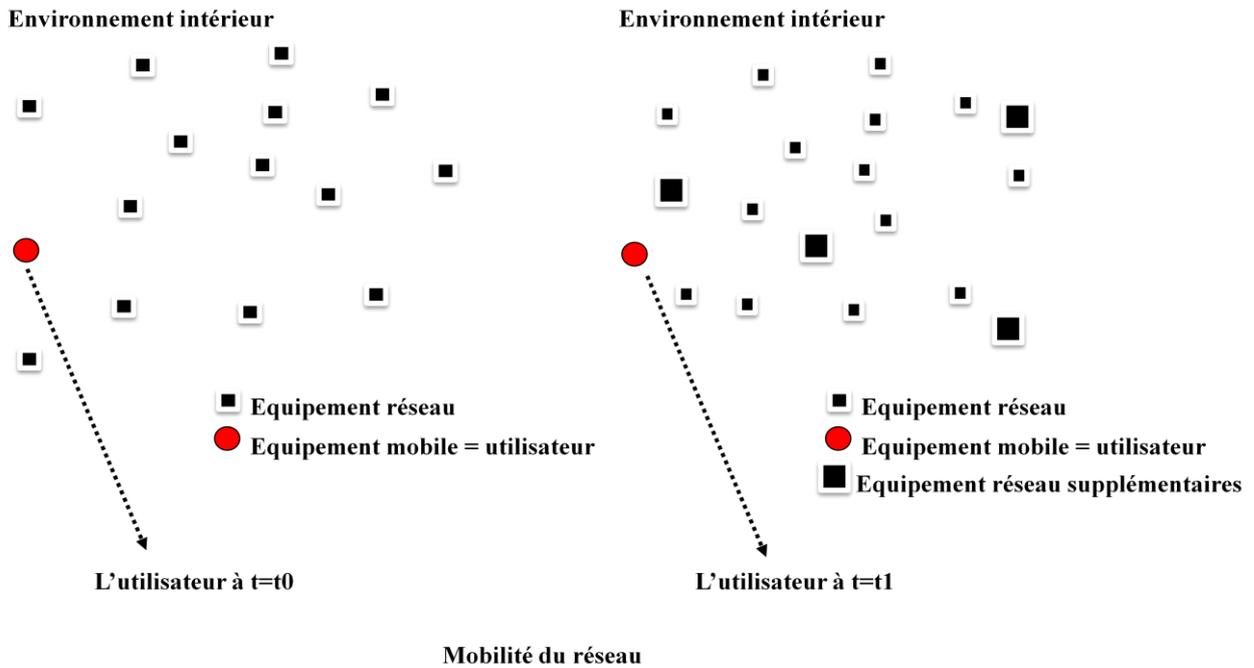


Figure 40 La mobilité utilisateur (a) et la mobilité réseau (b)

Si nous comparons les figures 40-a et 40-b, nous constatons que nous avons différentes évolutions possibles de l'environnement, au cours du temps. La mobilité de l'utilisateur, présentée sur la figure 40-a, décrit le déplacement de l'équipement mobile avec une infrastructure réseau constante. L'équipement mobile migre d'une position à $t=t_0$ vers une autre position à $t=t_1$. La mobilité du réseau, présentée par la figure 40-b, décrit une modification de l'infrastructure réseau, au cours du temps à travers l'ajout d'équipements réseaux supplémentaires. L'équipement mobile garde la même position géographique. [Au & al 2010] [Bo & al 2009] [Liu & al 2009] [Prabhakaran & al 2006] [Gowrishankar & al 2000] Nous allons détailler les différents types de mobilité dans les paragraphes suivants.

5.3.1 La mobilité de l'équipement

La mobilité de l'équipement est souvent liée à la mobilité de l'utilisateur. Néanmoins, ces deux aspects diffèrent. La mobilité de l'équipement dépend du changement du réseau de rattachement et la mobilité de l'utilisateur dépend de la position géographique, uniquement. La figure 41 présente un exemple de mobilité d'équipement. Comme nous pouvons l'apercevoir l'équipement mobile lors de son déplacement traverse plusieurs réseaux : réseau GPS, réseau GSM et réseau Wifi. Lors de ce déplacement, il peut communiquer à travers l'un de ces trois réseaux.

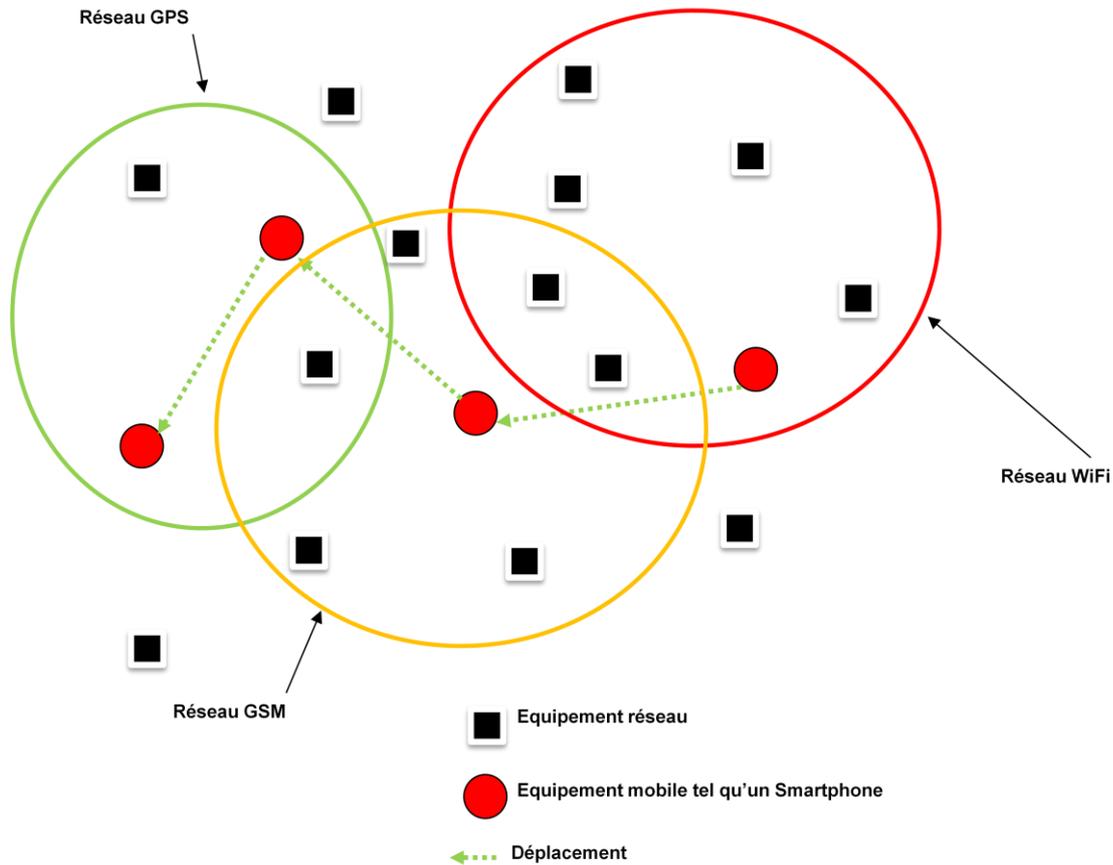


Figure 41 La mobilité de l'équipement

La mobilité d'équipement se rapporte à un équipement qui se déplace à travers différents réseaux. Ce type de mobilité doit permettre une continuité de la connectivité. Cette continuité est assurée à travers le processus de Handover. Ce processus technique permet le passage d'un point d'attache réseau à un deuxième point d'attache réseau sans coupure. Les recherches effectuées actuellement dans le domaine des réseaux mobiles visent des techniques de Handover totalement transparentes et continues.

Notre environnement de simulation est constitué de plusieurs réseaux différents : GSM, GPS, Bluetooth et Wifi. Le processus de Handover est donc nécessaire. Dans le cadre de nos travaux, nous allons admettre qu'un Handover transparent et automatique est tout à fait possible.

5.3.2 La mobilité de l'utilisateur

Dans un environnement géographique, un utilisateur peut se déplacer au cours du temps. La mobilité de l'utilisateur se rapporte au changement de position géographique de l'utilisateur. Le comportement de l'utilisateur au cours du temps est modélisé à travers de modèles de mobilité. Le modèle de mobilité doit être suffisamment représentatif de la situation réelle. Néanmoins, ce dernier doit être simple pour l'implémentation. Un modèle de mobilité prend en considération les caractéristiques de l'environnement : une trajectoire rectiligne sur une autoroute ou une trajectoire curviligne lors d'une entrée dans un bâtiment, par exemple. Nous pouvons décrire ces modèles comme aléatoires, déterministes ou hybride. Les modèles aléatoires définissent des positions successives de l'utilisateur totalement arbitraires. Ce sont

des modèles simples et très utilisés. Les modèles déterministes se basent sur l'étude des différents comportements d'un utilisateur dans un environnement donné. Ce type d'étude permet de définir la trajectoire la plus courante. Les modèles hybrides constituent un mélange des principes des deux modèles précédents : une estimation de la trajectoire courante avec des paramètres arbitraires. La littérature décrit différents modèles de mobilité, dans le but de modéliser des situations réalistes : Gauss Markov, Random Waypoint, etc.

Dans notre environnement de simulation, un équipement mobile peut changer de position géographique au cours du temps. Afin de modéliser les comportements de l'utilisateur, nous devons tenir d'autres facteurs dus à :

- À un changement de milieu : intérieur, extérieur
- A un changement d'étage
- A un changement de vitesse de déplacement
- A un changement de direction,

Dans l'objectif d'obtenir les modèles les plus adéquats à nos simulations, nous avons adaptés des modèles de mobilité existants.

5.3.2.1 *Modèle Combiné Gauss Markov et Restricted Random Waypoint (RRW)*

Le modèle de Gauss Markov est le modèle le plus utilisé dans les simulations réseau. Il simule la mobilité des utilisateurs en utilisant la vitesse et la direction. La position de l'utilisateur change très rapidement. Il ne prend pas en considération la mobilité 3D. Le modèle de Gauss Markov dépend d'un unique paramètre aléatoire, appelé entropie. L'entropie varie entre 0 et 1.

Une vitesse initiale ainsi qu'une direction initiale est attribuée à chaque point d'une façon arbitraire. Après un intervalle de temps spécifique, quand un mouvement se produit, le modèle met à jour les valeurs de la vitesse et de la direction du point. Les valeurs de la vitesse et de la direction dépendent de la vitesse, de la direction et du paramètre aléatoire à l'instant précédent. Les bords ainsi que les coins présentent des cas limites. Lorsque la position calculée s'approche des cas limite, un changement de direction s'impose.

Une vitesse et une direction au temps n spécifique sont calculées en utilisant les données à n-1, avec une variable aléatoire.

$$S_n = \alpha \times S_{n-1} + (1 - \alpha) \times S + \sqrt{\alpha(1-\alpha)} \times S \times X_{n-1}$$

$$D_n = \alpha \times D_{n-1} + (1 - \alpha) \times D + \sqrt{\alpha(1-\alpha)} \times D \times X_{n-1}$$

Où:

S_n et D_n sont la vitesse et la direction du nœud mobile au moment n

S et D sont des constantes représentant la valeur moyenne de la vitesse et de la direction

$0 < \alpha < 1$, est le paramètre utilisé pour faire varier le caractère aléatoire

Il convient de préciser les modalités de calcul du paramètre alpha. Nous utilisons la fonction random afin de calculer ce paramètre. Cette fonction est basée sur une distribution uniforme de valeurs aléatoires.

Enfin, à l'instant n, une position mobile nœuds est donnée par les équations:

$$X_n = X_{n-1} + S_{n-1} \times \cos(D_{n-1})$$

$$Y_n = Y_{n-1} + S_{n-1} \times \sin(D_{n-1})$$

Le modèle RRW prend en considération le fait que les personnes restent dans un lieu géographique limité pendant un laps de temps prédéfini, avant de changer d'endroit. Ce modèle définit un temps de pause entre les changements de direction ou de vitesse. L'équipement mobile se déplace donc, dans le cas 2D dans un rectangle pendant un certain temps avant d'effectuer une transition plus importante.

Dans le RRW, un équipement mobile défini par une position géographique alterne les périodes de mouvement et d'immobilité. Initialement, les équipements mobiles sont déployés aléatoirement dans une zone limitée. Un équipement mobile reste dans cette zone pendant une certaine période ou temps de pause. A la fin de cette période prédéfinie, l'équipement mobile définit une direction aléatoire et une vitesse comprise entre V_{min} et V_{max} . L'équipement se déplace vers la nouvelle position géographique calculée. Nous définissons V_{min} et V_{max} égales à 1 m/s et 5 m/s.

Afin d'effectuer un modèle reflétant le comportement réel, nous avons combiné deux modèles existants : le modèle Gauss-Markov et le RRW. Ils ont chacun des caractéristiques intéressantes pour l'étude de la mobilité 3D. Le modèle Gauss Markov offre une approche basée sur la direction et la vitesse. De son côté, le modèle RRW permet de limiter les résultats dans une zone géographique étroite. Nous avons combinés ces deux modèles dans le but d'obtenir un modèle 3D adapté à notre environnement.

La figure 42 modélise le comportement d'un équipement mobile dans un environnement 3D, en utilisant le modèle combiné.

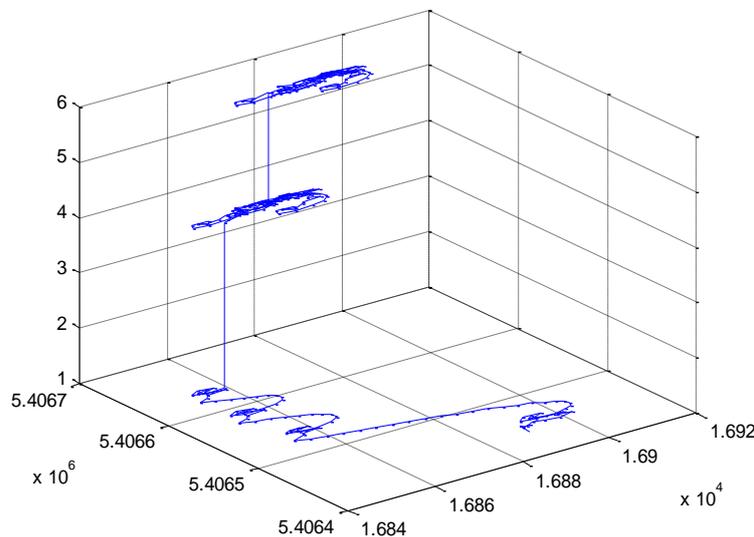


Figure 42 Modèle combiné Gauss Markov et RRW

A travers ce modèle combiné, nous pouvons estimer la trajectoire d'un équipement mobile lors d'un changement d'environnement intérieur/extérieur, d'un changement d'étage, d'un changement de vitesse et/ou d'un changement de direction. En outre, ce modèle de mobilité permet une analyse de l'impact d'une évolution rapide de la position de l'utilisateur sur

l'approche. [Gowrishankar & al 2009] [Towsley 2008] [Ariyakhajorn, & al 2006] [Blazevic & al 2005]

5.3.2.2 Le modèle sinusoïdal

Le modèle développé permet de prendre en compte un déplacement aux positions extrêmes. C'est un modèle de mobilité basée sur une fonction sinusoïdale.

La figure 43 présente un déplacement 3D basé sur le modèle sinusoïdale. Les points extrêmes représentent des positions le long des murs des bâtiments ou à côté des fenêtres. Dans ces cas, les signaux GNSS sont de bonne qualité et le système de positionnement intègre ces données automatiquement au calcul de position. Chaque changement d'altitude présente un changement d'étage.

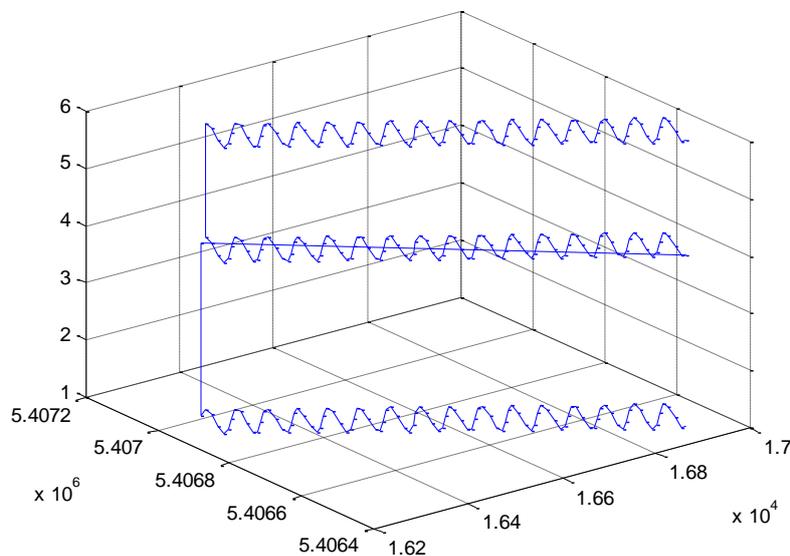


Figure 43 Modèle de mobilité sinusoïdal

Le modèle de mobilité sinusoïdale s'appuie sur une expression du sinus. En fait, la coordonnée y est une fonction sinusoïdale de la coordonnée x . Pour chaque nœud, nous avons:

$$Y_n = \alpha \times \sin(X_n)$$

Où α représente la mesure de la moitié de la largeur du bâtiment.

5.3.2.3 Le modèle linéaire

Après avoir élaboré un modèle de mobilité pour les positions extrêmes, il convient de prendre en considération d'autres positions géographiques caractéristiques. Les positions aux milieux des bâtiments représentent des positions géographiques spécifiques. Les signaux GNSS lors d'un tel déplacement sont totalement perdus. Afin de modéliser un tel déplacement, nous avons conçus le modèle linéaire.

Le modèle de mobilité linéaire est basé sur une fonction linéaire. Chaque équipement a un mouvement rectiligne uniforme. La figure 44 modélise un déplacement basé sur le modèle

linéaire. Elle montre la progression de l'équipement mobile à travers les zones 3D, en utilisant le modèle linéaire.

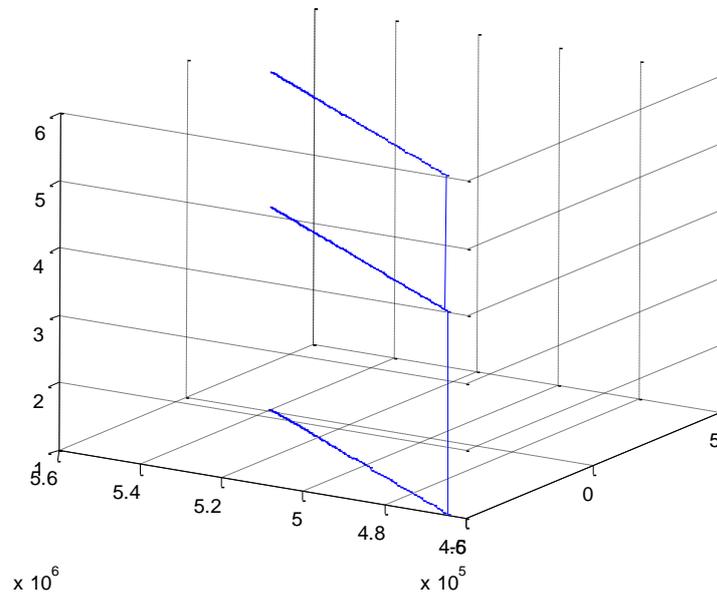


Figure 44 Modèle de mobilité linéaire

Le modèle est basé sur:

$$Y_n = \alpha \times X_n + \beta$$

Où Alpha et beta sont des valeurs fixes, afin de parvenir à un mouvement linéaire maximisant la distance entre le mur et le point mobile.

5.3.2.4 Synthèse

Dans l'objectif de prendre en considération la mobilité global des équipements, nous utilisons plusieurs modèles de mobilité.

	Mobilité Gauss Markov RRW	Mobilité Sinusoidale	Mobilité Linéaire
3D	x	x	x
Positions avec signaux GNSS	x	x	
Positions sans signaux GNSS	x		x

Tableau 17 Tableau récapitulatif des modèles de mobilité

Le premier modèle combiné Gaus markov-RRW fournit des résultats réalistes, néanmoins il ne prend pas en considération des positions spécifiques telles que les bords, les coins ou les fenêtres. Afin de pallier à cet inconvénient, nous optons pour deux autres modèles de mobilité 3D : le modèle linéaire et le modèle sinusoidale.

Ces trois modèles de mobilité nous permettent d'étudier l'impact des signaux GNSS sur notre système de positionnement.

Nous effectuons une analyse détaillée dans les chapitres suivants.

5.3.3 La mobilité du réseau

Un environnement géographique est constitué de différents réseaux et est caractérisée par une infrastructure ou topologie. La topologie des réseaux peut changer au cours du temps suite à différents aspects tels que le mouvement des équipements mobiles.

5.4 Approche itérative de positionnement

L'objectif de nos études est de pallier aux inconvénients du GPS et de fournir une position géographique d'un terminal sans contraintes.

Pour cela, nous avons étudié dans les paragraphes précédents des stratégies prenant en compte les relations entre des équipements présents dans une vaste aire géographique.

L'approche décrite ci-dessous, utilise les mêmes équipements et se base sur l'étude de la propagation de coordonnées ou de distances entre ces derniers. On attribue aux coordonnées initiales des valeurs estimées ou approximatives. A la suite avec la triangulation, l'algorithme définit la position du terminal à localiser, jusqu'à obtention de coordonnées fiables et précises, par exemple suite à un récepteur GPS. La dernière phase sera la réitération de toutes les étapes de calcul afin d'obtenir les coordonnées exactes. Une itération est nécessaire pour fiabiliser les résultats. Les principes de l'approche sont présentés grâce au schéma- figure 45 ci-dessous :

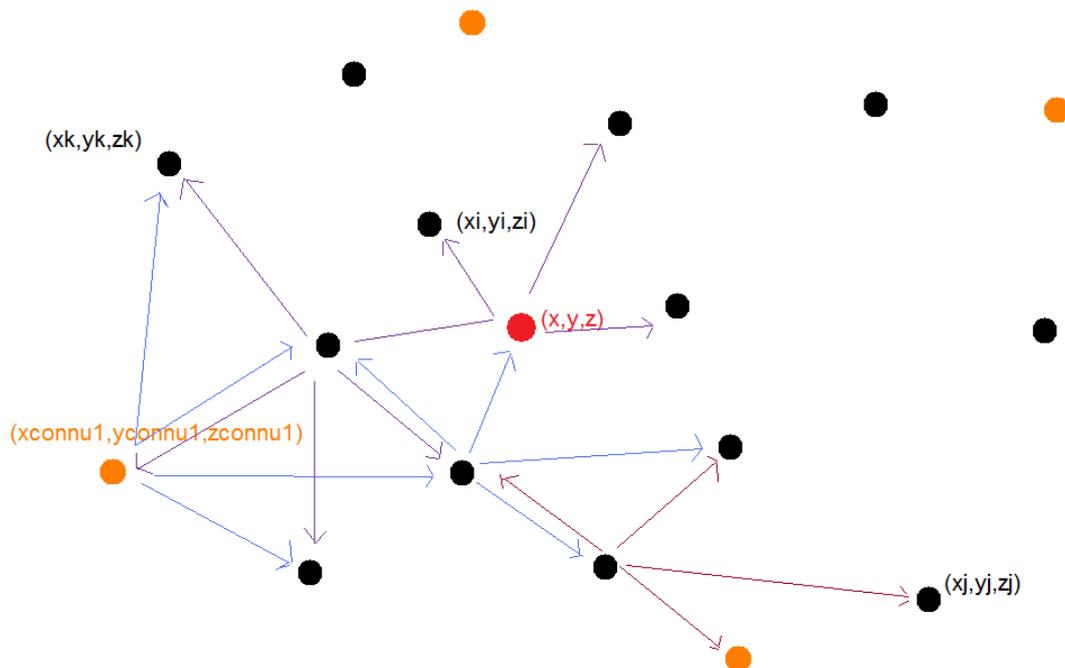


Figure 45 Approche itérative

5.4.1 Attribution de coordonnées aux équipements

Afin de mettre en place l'approche, les équipements doivent posséder des coordonnées initiales. Ces coordonnées sont des données approximatives ou estimées.

De nos jours, la majorité des équipements a accès à Internet. Grâce à l'adresse IP de l'équipement, nous sommes en mesure de connaître des coordonnées géographiques. Ces coordonnées géographiques sont de natures diverses suivant le type de l'équipement.

Un équipement fixe peut avoir des coordonnées géographiques avec une fiabilité importante.

Un équipement mobile peut avoir accès aux coordonnées de la passerelle qui lui permet l'accès à Internet et acquérir ainsi des coordonnées géographiques avec une fiabilité faible.

Le terminal souhaitant se positionner est en général un terminal mobile.

Ce terminal mobile, comme par exemple l'iphone a accès aux coordonnées de sa passerelle suivant l'opérateur. Pour chaque équipement mobile appartenant au même opérateur et présent sur la même aire géographique, ces coordonnées seront identiques. Pour nos calculs, nous attribuerons, à ces équipements des coordonnées tels que :

Coordonnées terminal_mobile $x = \text{coordonnées passerelles} + 10 * \text{randn}(2)$

Coordonnées terminal_fixe $y = \text{coordonnées acquis avec adresse ip}$

Ces coordonnées seront envoyées vers le terminal mobile, avec un paramètre « beta » indiquant la fiabilité. Si un terminal GPS, envoi ces coordonnées au terminal suivant, le paramètre « beta » aura comme valeur : 100%.

5.4.2 Estimation des coordonnées

Notre approche nécessite la présence de coordonnées géographiques initiales afin de les transmettre aux autres terminaux.

Dans le cas, où l'équipement ne peut avoir des coordonnées géographique suite à une connexion défailante ou inexistante à Internet, nous devons appliquer un algorithme d'approximation de coordonnées.

Un terminal qui a déjà utiliser des services de localisation une fois depuis sa première utilisation peut nous renvoyer des coordonnées de son historique.

Coordonnées terminal_x (t) = Coordonnées terminal_x (t-1) ou = Coordonnées terminal_x (t-2), etc

Dans le cas où l'historique du terminal serait inaccessible, les coordonnées du terminal seront initialisées suivant le pays dans lequel le terminal est configuré. Si la langue du terminal est le français, les coordonnées seront initialisées avec les coordonnées de Paris.

Ce type de configuration allonge le temps de calcul et de la mise en place de l'algorithme.

L'attribution de qualitatif pour la fiabilité des coordonnées permet de faire le tri entre les équipements suffisants pour la localisation.

5.4.3 Trilatération

En acquérant les coordonnées au niveau du serveur, de tous les équipements (jusqu'à obtention d'équipements avec un paramètre de fiabilité égal à 100%), l'algorithme calcul les distances séparant les équipements et crée au fur et à mesure un mappage des terminaux.

Après le calcul des distances, nous appliquons la triangulation, afin d'effectuer un recalibrage, si possible des données.

Les distances à la suite vont être recalculées grâce à la formule habituelle utilisées pour les systèmes GNSS. Le facteur de temps est calculé grâce à la connexion au serveur centrale qui permet d'avoir l'heure exacte d'envoi de l'information.

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} + c t_u$$

Chaque terminal, déterminera un système d'équations non linéaires :

$$\Delta d = \begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \Delta d_3 \\ \Delta d_4 \\ \Delta d_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x_1} & a_{y_1} & a_{z_1} & 1 \\ a_{x_2} & a_{y_2} & a_{z_2} & 1 \\ a_{x_3} & a_{y_3} & a_{z_3} & 1 \\ a_{x_4} & a_{y_4} & a_{z_4} & 1 \\ a_{x_5} & a_{y_5} & a_{z_5} & 1 \end{bmatrix} * \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta X_u \\ \Delta Y_u \\ \Delta Z_u \\ -c * \Delta t_u \end{bmatrix}}_{\Delta X}$$

La position calculée est de la forme suivante :

$$x_u = \hat{x}_u + \Delta x_u$$

$$y_u = \hat{y}_u + \Delta y_u$$

$$z_u = \hat{z}_u + \Delta z_u$$

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé deux approches de modélisation géographique : la théorie des graphes et le raisonnement spatial. La théorie des graphes modélise les équipements dans le réseau à travers des sommets reliés par des arcs dans un graphe tridimensionnel. Le raisonnement spatial utilise les relations directionnelles afin de modéliser les équipements de l'environnement. Après un comparatif des deux approches, nous avons décrit les modèles de mobilité. Le modèle Gauss Markov est utilisé pour la simulation de protocoles pour les réseaux ad hoc. Le modèle Restricted Random Waypoint limite la mobilité d'un utilisateur a une zone géographique. Nous avons opté pour une combinaison des deux modèles afin d'adapter notre modèle de mobilité à un déplacement tridimensionnel. Deux autres modèles de mobilité ont été développés : le modèle de mobilité sinusoïdal et le modèle de mobilité linéaire. Le modèle de mobilité sinusoïdal prend en considération des positions extrêmes lors d'un déplacement au bord des murs ou à coté des fenêtres. Les positions extrêmes sont des positions dans lesquelles des signaux GNSS peuvent être détectés. Le modèle linéaire est élaboré pour un déplacement avec des positions au centre des bâtiments. Ces positions sont des positions dans lesquelles les signaux GNSS sont pratiquement inaccessibles. La fin de ce chapitre est consacrée à la description d'une nouvelle approche de positionnement basée sur la trilateration itérative. Dans la suite de ce document, nous décrivons les résultats de simulations de notre approche.

Chapitre 6

Le simulateur : Algorithme et Fonctionnalités

6.1 Introduction

Afin d'exposer les résultats obtenus avec notre simulateur, ce chapitre présente son architecture, ses entités et son fonctionnement. Le simulateur est adapté à la simulation de l'environnement réseau et de l'environnement géographique. Il contient les fonctionnalités nécessaires à la mise en œuvre de la notion de visibilité ainsi que de l'algorithme de localisation.

Dans ce chapitre, nous explicitons l'architecture considérée dans cette thèse et justifions les hypothèses retenues pour définir notre système. Dans une première partie nous argumentons le choix des langages de programmation. Dans une deuxième partie nous exposons l'architecture de notre simulateur et dans la troisième partie nous présentons les différentes fonctionnalités.

6.2 La mise en œuvre : langages de programmation

Pour évaluer l'influence des paramètres de notre système, nous avons implémenté un simulateur développé sous Matlab. Il simule l'environnement de Telecom SudParis avec un environnement réseau : plusieurs équipements avec différentes technologies (WiFi, Bluetooth, GPS et GSM).

Matlab est un outil qui est largement utilisé pour le calcul numérique et la visualisation graphique. Dans Matlab, les variables et les scalaires sont manipulés comme des matrices de "n" colonnes par "m" rangées. Nous avons donc implémenté notre propre simulateur avec Matlab pour différentes raisons :

- La facilité de traitement et de modélisation des données.
- Un traitement rapide d'opérations mathématiques importantes.
- Plusieurs sessions peuvent être lancées simultanément.
- Interaction facile avec Microsoft Office (.xml)
- La possibilité de mixage des langages de programmation : collaboration entre le JavaScript, le VRML et le Matlab.
- Matlab dispose de nombreuses fonctions préétablies et permet un développement rapide.

L'extension des fichiers Matlab possèdent l'extension « .m ».

Le choix du langage « Vrml : Virtual Reality Modeling Language – Langage pour la modélisation de la réalité virtuelle » pour la modélisation graphique se justifie par une modélisation 3D précise. Le langage « Vrml » est un langage de description d'univers virtuels en 3 dimensions. Les fichiers VRML ont pour extension .wrl. Le langage VRML permet de modéliser différentes scènes ou « mondes virtuels » où nous pouvons définir des entités telles que les bâtiments ou des voitures. Ce format qui contient des informations de couleur et texture sur les surfaces peut représenter des géométries complexes. Nous pouvons aussi définir l'angle de vue pour une scène.

Chaque entité est composée de groupe d'objets élémentaires. Ces objets élémentaires sont appelés nœuds et doivent contenir différentes données :

- Un type : Il définit le type du nœud considéré
- Des champs : Ils définissent les différents attributs du nœud (texture, couleur, etc)
- Des événements : Ils permettent la modification des valeurs des différents champs du nœud

Nous avons utilisé aussi le langage JavaScript qui nous a permis d'effectuer le lien entre le langage « Vrml » et « Matlab ». JavaScript est un langage de programmation de scripts principalement utilisé dans les pages web interactives. Dans nos fichiers « .m » nous faisons appel aux différents mondes virtuels avec des mouvements ou des événements grâce aux scripts JavaScript.

6.3 L'architecture de notre simulateur

Notre simulateur prend en compte à la fois l'environnement géographique, l'environnement réseau ainsi que les déplacements de l'utilisateur. Les entités du simulateur sont :

- Plusieurs équipements mobiles de types différents capables de communiquer avec les autres entités du système. Ces équipements mobiles sont déployés dans l'environnement géographique et peuvent changer de position ou de technologie. Chaque technologie est représentée par une couleur.
- L'environnement géographique qui est composé d'un environnement intérieur et un environnement extérieur. L'environnement intérieur est composé de plusieurs bâtiments. La modélisation est effectuée en VRML. Suivant le type d'environnement nous avons adapté les paramètres du simulateur.
- Un robot modélisé en VRML et JavaScript modélisant le déplacement de l'utilisateur dans l'environnement géographique.

Notre simulateur est composé de deux grandes parties indépendantes :

- Une partie de modélisation avec VRML et JavaScript de l'environnement géographique et réseau ainsi que du déplacement du robot.
- Une partie de programmation des différentes fonctions sous Matlab uniquement avec la mise en œuvre de l'algorithme de positionnement.

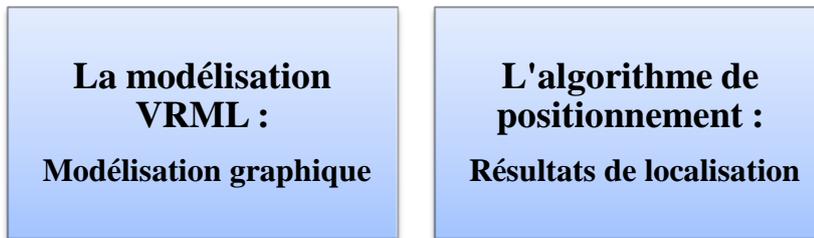


Figure 46 Le simulateur

6.3.1 La modélisation VRML

La première partie de modélisation géographique est composée d'un fichier utilisant la fonctionnalité « World ». Cette fonctionnalité nous permet de créer un monde virtuel avec Matlab en lisant un fichier « .Vrml ».

Nous avons créé plusieurs mondes virtuels pour le besoin de notre simulateur :

- Premier monde virtuel : « world1 » présente la modélisation statique de l'environnement géographique : bâtiments, parkings, etc, ainsi que la modélisation du déplacement du robot dans cet environnement à travers une vue de hauteur.
- Deuxième monde virtuel : « world2 » présente la vision du robot lors de son déplacement dans l'environnement.
- Troisième monde virtuel : « world3 » présente l'environnement réseau avec les différents équipements mobiles déployés dans l'environnement.
- Quatrième monde virtuel : « world4 » présente des informations en temps réel du nombre d'équipements « visibles » par l'équipement détenu par le robot.

Tous ces mondes virtuels sont lancés simultanément et sont affichés dans quatre fenêtres différentes. Les entités utilisées sont présentées ci-dessous :

Bâtiment	Robot	Equipement réseau	Informations
<ul style="list-style-type: none"> •Type de bâtiment •Coordonnées •Point de vue •Texture •Salle •Couloir •Fenêtres •Portes •Escalier •etc 	<ul style="list-style-type: none"> •Type de mouvement •Coordonnées de départ •Point de vue •Silhouette 	<ul style="list-style-type: none"> •Type de technologie (Couleur) •Sphère •Point de vue •Texture 	<ul style="list-style-type: none"> •Texte •Couleur •Font

Figure 47 Entité de la modélisation graphique du simulateur

Chaque entité comme le présente la figure ci-dessus se compose de plusieurs sous entités ainsi que des descriptifs : coordonnées, point de vue.

6.3.2 L'algorithme de localisation

La deuxième partie du simulateur met en place l'algorithme de localisation. Ce dernier utilise successivement cinq blocs différents. Il renvoie en sortie sur un fichier « .xml » contenant les résultats des simulations, enregistrées automatiquement.

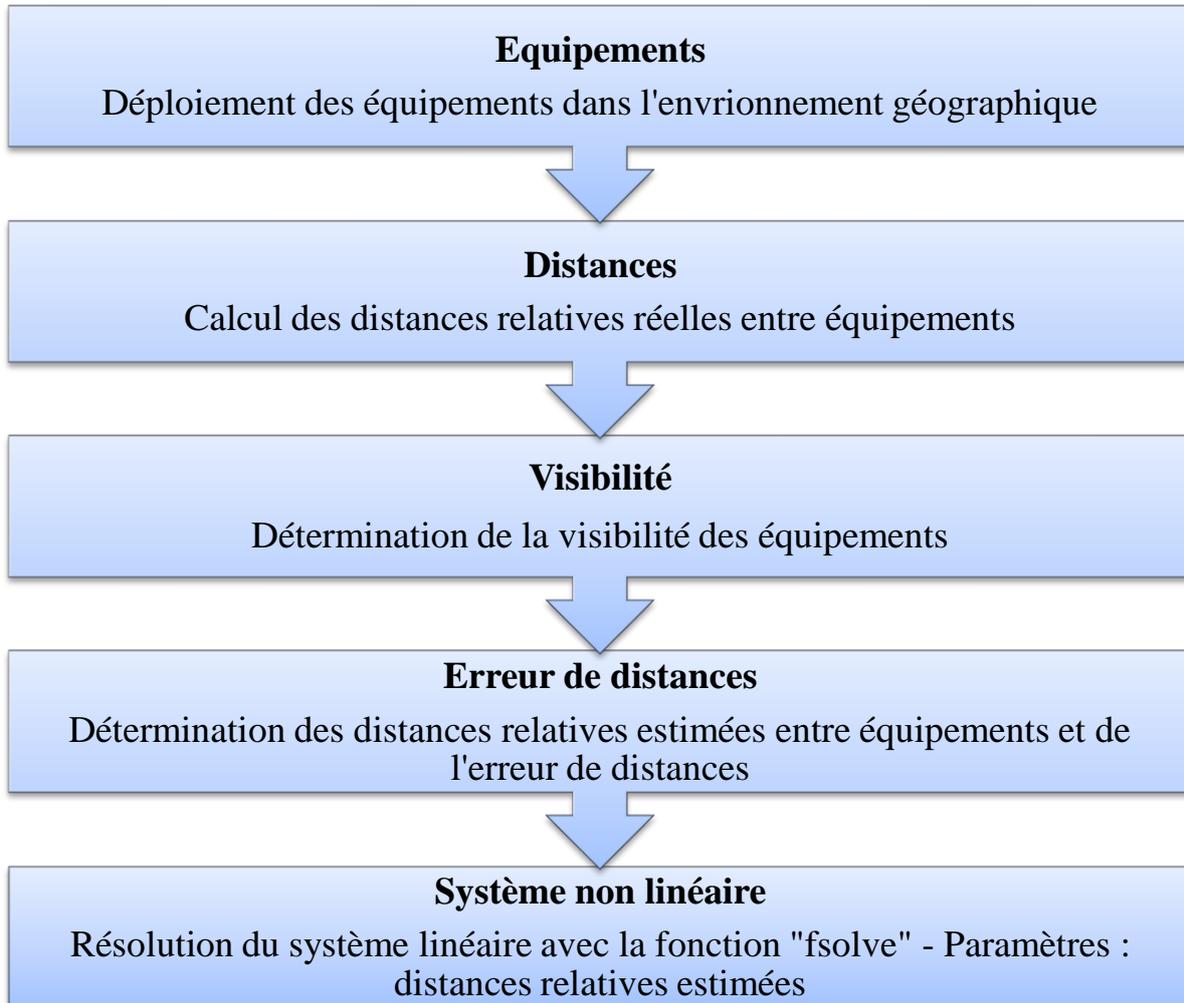


Figure 48 Les fonctions du simulateur

Le module « Equipements » initialise des matrices de tailles différentes correspondantes au nombre d'équipements déployés dans l'environnement géographique. Ensuite, chaque équipement est défini par ses coordonnées x, y et z et est enregistré dans une matrice suivant la technologie utilisée. Si nous avons un équipement GPS, il est enregistré dans une matrice GPS.

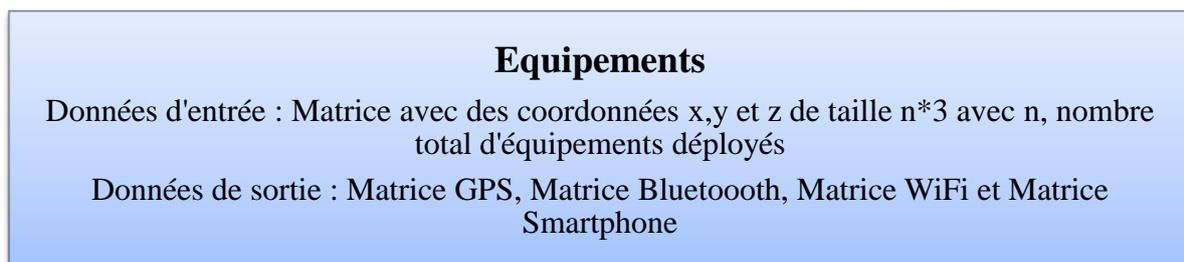


Figure 49 Le module « Equipements »

Le module « Distance » calcule les distances relatives réelles entre les différents équipements présents dans l'environnement sans tenir compte des différentes technologies.

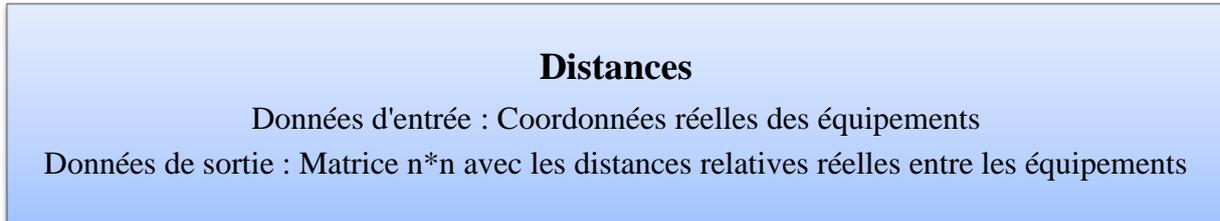


Figure 50 Le module « Distance »

Le module « Visibilité » met à jour le nombre d'équipements sans coordonnées connues et établit la matrice de visibilité ou d'adjacence entre les équipements.

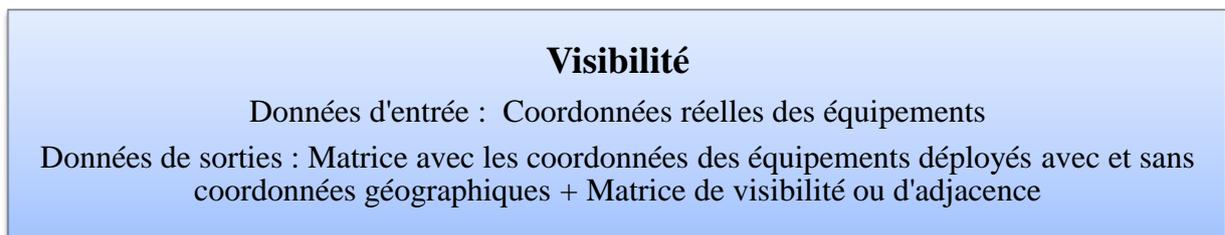


Figure 51 Le module « Visibilité »

Le module « Erreur de distances » calcule l'erreur entre les distances relatives estimées et les distances relatives réelles.

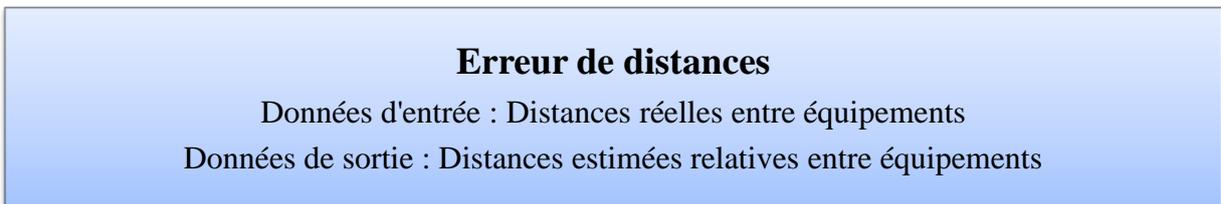


Figure 52 Le module « Erreur de distances »

Le module « Système linéaire » résout le système non linéaire en utilisant les distances relatives estimées entre équipements ainsi que les coordonnées des équipements déjà connues.

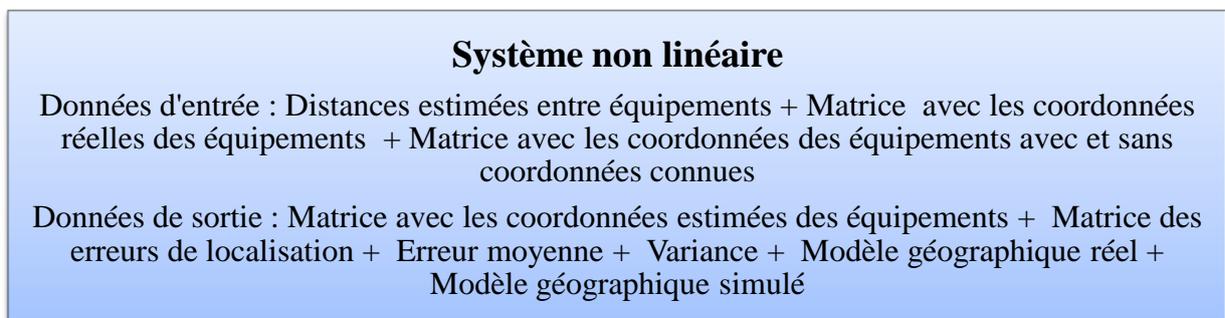


Figure 53 Le module « Système non linéaire »

Tous les résultats obtenus sont enregistrés automatiquement dans un fichier « .xml ».

Les fichiers sont stockés dans un dossier contenant tous les fichiers « .m » et sont réinscriptibles. Nous pouvons ainsi mettre à jour les différents résultats lors d'erreurs de déploiement.

6.4 Les fonctionnalités de notre simulateur

Dans la suite nous présentons les différentes fonctionnalités plus en détails et nous présentons quelques types de résultats obtenus.

6.4.1 La modélisation VRML

Après une présentation de l'architecture du simulateur, nous développons les tâches de chaque module utilisé.

Les modules développés avec le langage « Vrlm » permettent une modélisation 3D de l'environnement.

Chaque monde virtuel est décrit à travers le nom ou le titre, les informations de navigation, l'angle de vue (l'orientation, la position, etc), le fond, etc.

```
#VRML V2.0 utf8

WorldInfo {
  title "Modélisation Telecom & Management SudParis"
}
```

Figure 54 Le nom du monde virtuel

Le premier monde virtuel constitue l'environnement global : les bâtiments, l'environnement extérieur ainsi que le robot et son véhicule. L'angle de vue présente une vision éloignée de l'environnement et permet d'avoir une idée générale du déplacement du robot.

```

#VRML V2.0 utf8

WorldInfo {
  title "Modélisation Telecom & Management SudParis"
}

NavigationInfo {
  avatarSize      [0.01, 0.01, 0.01]
  headlight TRUE
  type "EXAMINE"
}

DEF View1 Viewpoint {
  orientation 1 0 0 -0.2
  position 50, 48, 150
  fieldOfView 1
  description "View 1 - Observer"
}

Background {
  skyColor [
    0.56 0.64 0.71
    0.67 0.76 0.85
    0.80 0.91 1.00
    0.96 1.00 1.00
  ]
  skyAngle [ 1.571 1.658 1.745 ]
  groundAngle [
    1.5708
  ]
  groundColor [
    0.0 0.0 0.0
    0.0 0.50196 0.0
  ]
}

```

Figure 55 Modélisation d'un monde virtuel

Un bâtiment se définit comme un groupe d'entités ou d'enfants. Nous pouvons déterminer les pièces ou salles, les couloirs comme des entités-enfants. Chaque entité doit être définie par sa position géographique ainsi que tous ses attributs.

```

DEF batiment Group {
    children [
        DEF etage Group {
            children [
                DEF piece Group {
                    children [
                        Transform
                        {
                            translation 5.76 1.065 -6.565
                            children [DEF Porte_ouvrable Shape {geometry Box {size 0.90,2.13,0.05}}]
                        }
                    ]
                }
                Transform
                {
                    translation 3.705 0.375 -0.11
                    children [DEF Radiateurs Shape {geometry Box {size 6.29,0.75,0.20}}]
                }
                Transform
                {
                    translation 6.055 2.90 -6.845
                    children [DEF Placard_haut_porte Shape {geometry Box {size 1.59,0.84,0.61}}]
                }
            ]
        }
    ]
}

```

Figure 56 Modélisation d'un bâtiment

Nous devons bien définir les positions de tous les éléments afin d'obtenir un bâtiment reproduisant la réalité.

Le deuxième monde présente une vue lors du déplacement du robot. Nous avons mis en relation l'angle de vue avec la position réelle du robot lors du déplacement.

La modélisation d'un robot est proche d'un individu en déplacement. Le langage « Vml » permet de modéliser des « avatars » avec des silhouettes humaines. Pour les besoins du simulateur ainsi que pour l'optimisation du temps de développement nous nous sommes limités au développement d'un robot. Le robot est décrit comme un groupe d'entités qui représentent les différentes parties de son corps.

```

DEF LAB_ALSO_BAL-ROOT Transform {
  translation -0.2649 -120.1 -2.379
  rotation -0.9949 -0.07347 0.06889 -0.07475
  scale 1 1 1
  scaleOrientation -0.9458 0 0.3249 -0.1283
  children [
  DEF LAB_ALSO_BAL-POS-INTERP PositionInterpolator {
    key [0, 0.075, 0.15, 0.225, 0.3, 0.375, 0.45, 0.525, 0.6,
        0.675, 0.75, 0.825, 0.9, 0.975, 1, ]
    keyValue [-0.2649 -120.1 -2.379, -0.3209 -120 -3.094,
              -0.3889 -119.9 -3.817, -0.346 -119.8 -4.463,
              -0.2334 -119.9 -4.016, -0.1983 -120.1 -1.644,
              0.3183 -120.1 -1.869, 1.933 -118.9 -9.584,
              5.291 -111.4 -25.89, 8.364 -95.47 -40.19,
              9.775 -79.61 -45.76, 6.885 -89.28 -43.48,
              5.734 -107 -31.38, 2.534 -118.6 -10.72, 0.8829 -120 -3.201,
              ] },
  DEF LAB_ALSO_BAL-ROT-INTERP OrientationInterpolator {
    key [0, 0.075, 0.15, 0.225, 0.3, 0.375, 0.45, 0.525, 0.6,
        0.675, 0.75, 0.825, 0.9, 0.975, 1, ]
    keyValue [-0.9949 -0.07347 0.06889 -0.07475, -0.9968 -0.03548 0.07142 -0.08926,
              -0.9971 -0.005656 0.07586 -0.1041, -0.9982 -0.0002257 0.06021 -0.1172,
              -0.9981 -0.04569 0.04123 -0.108, -0.9639 -0.2602 0.0558 -0.06163,
              -0.9284 -0.3553 -0.1083 -0.06881, -0.978 -0.09466 -0.1858 -0.2275,
              -0.9804 -0.01693 -0.1964 -0.5997, -0.9815 0.01105 -0.1914 -1.044,
              -0.9839 0.03315 -0.1759 -1.389, -0.9903 0.1212 -0.06854 -1.194,
              -0.9513 0.305 -0.04373 -0.782, -0.6221 0.7826 -0.02403 -0.4066,
              -0.2635 0.9647 0.001106 -0.3543, ] },
  ] },

```

Figure 57 La modélisation du robot

Le point de vue pour ce monde virtuel est rattaché à la position du robot.

```
vue.position = robo.translation
```

Figure 58 La vue du robot

Le déplacement du robot ainsi que du véhicule est mis à jour en temps réel grâce à un changement de position géographique toutes les 0.1 secondes. Le robot possède comme attribut sa position : x, y et z. Cette position est importée du fichier « .wrl » vers le fichier « .m » et est mise à jour. Après la mise à jour, la position du robot est affichée dans le monde virtuel.

```

car.translation = [120 0 75];
robo.translation = [120 0 75];

x=120;
y=75;
z=0;

for i=1:175

    vrdrawnow;

    if i<75
        car.translation = [x 0 y-i];
        robo.translation = [x 0 y-i];
        vue.position = robo.translation
        vrdrawnow;
        pause(0.1);
        positiony = y-i
        positionx = x
        xuserposition(i)=x
        yuserposition(i)=y-i
        zuserposition(i)=0
    end
end

```

Figure 59 Le déplacement du robot et du véhicule

Le troisième monde virtuel présente les différents équipements réseau. Chaque technologie est représentée par une couleur différente. Un équipement est défini par une sphère.

Nous avons utilisé le langage « JavaScript » afin d'utiliser la possibilité de reproduire la même forme plusieurs fois dans le monde virtuel. Un environnement réseau est constitué par plusieurs équipements dont le nombre peut varier et peut augmenter. Afin d'optimiser notre développement et simplifier notre modélisation, le script nous permet de réutiliser la même forme pour redéployer un équipement plusieurs fois avec des positions géographiques différentes ainsi que des couleurs et des tailles différentes suivant la technologie.

Ce monde virtuel est déployé dans un environnement web suite à l'utilisation du script. Il s'affiche donc automatiquement lors du lancement du simulateur dans le navigateur web par défaut.

Le module « Equipements » nous permet de classier les équipements dans des matrices suivant la technologie utilisée Wifi, Bluetooth et/ou GPS.

Smartphone =

21.5238	14.8647	1.1164
29.9613	1.4072	1.7793
21.0665	17.3142	7.4270
28.6869	1.5198	4.2175
22.5987	14.4012	2.5008
29.1065	3.2732	3.1846
21.4554	2.4492	4.5718
25.7970	9.8975	12.0031
28.5303	11.1970	2.6916
20.0000	6.0000	9.5000

Figure 61 Equipements mobiles : Smartphones

Les équipements de type Smartphone peuvent se connecter aux différents réseaux via WiFi, Bluetooth ou GPS. Le module « Distance » permet le calcul des distances relatives réelles entre les différents équipements présents dans l’environnement.

$$d_n = \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + (z_n - z_i)^2}$$

Avec d_n la distance d’un équipement « n » à un autre « i », (x_n, y_n, z_n) les coordonnées de l’équipement n à positionner et (x_i, y_i, z_i) les coordonnées de l’équipements « i ».

Les distances sont enregistrées dans une matrice n*n.

Le module « Visibilité » permet de mettre à jour les coordonnées des équipements qui ne peuvent pas acquérir des coordonnées géographiques en mettant toutes les valeurs à 0. Nous obtenons une matrice composée de coordonnées d’équipements WiFi, GPS et/ou Bluetooth avec des équipements sans coordonnées géographiques.

0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
22.0037	15.6992	1.2158
31.7668	3.2967	2.7610
22.0450	17.9896	9.2271
29.4254	1.7423	5.7780
23.3782	14.8846	3.3087
29.2994	3.5372	5.0688

Figure 62 Equipements mobiles

Nous récapitulons les fonctionnalités de notre algorithme de localisation. L'algorithme de positionnement estime la distance relative d'un équipement hybride (pouvant se connecter aux trois réseaux : GPS, GSM, WiFi), en utilisant le modèle de visibilité adapté d'abord avec les équipements Wifi, ensuite avec les équipements Bluetooth et enfin avec les équipements GSM. Nous avons ainsi trois vecteurs (un par technologie) regroupant les distances d'un équipement à tous les autres. Ensuite, ces trois vecteurs sont simplement regroupés en un seul (une simple concaténation) et c'est alors ce dernier qui est utilisé pour résoudre le système non linéaire :

$$d_n = \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + (z_n - z_i)^2}$$

Avec d_n la distance d'un équipement « n » à un autre « i ». Et (x_n, y_n, z_n) les coordonnées de l'équipement n à positionner et (x_i, y_i, z_i) , les coordonnées de l'équipements « i ».

Il n'y a donc pas de mécanisme de fusion mais plutôt une prise en compte de l'ensemble des mesures disponibles sans priorisation des technologies. La seule exception à ceci est le cas très spécifique du GNSS : si des coordonnées GNSS sont disponibles, alors elles sont retenues.

6.5 Conclusion

Nous avons présenté un simulateur permettant de tester notre solution. Il est écrit en Matlab et permet de simuler divers scénarios. Ce simulateur est composé de deux grandes parties : une partie de modélisation graphique 3D et une partie de traitement de l'algorithme de localisation.

Dans la suite, nous présentons les résultats que nous avons obtenus grâce à ce simulateur. Dans une première partie (chapitre 7), nous présentons des résultats de validation et dans une deuxième partie (chapitre 8) nous présentons des résultats de situations réelles.

Chapitre 7

Simulations, tests et validations

7.1 Introduction

Les chapitres précédents sont consacrés à la description et l'analyse des principes théoriques. Nous avons développé un nouveau concept de positionnement basé sur le principe de « visibilité » entre équipements.

L'objectif de cette étude est de montrer la faisabilité de la localisation sans aucune infrastructure supplémentaire, en se basant sur les réseaux sans fil, présents dans l'environnement.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la mise en œuvre de notre méthode de positionnement. Nous avons conçu un simulateur permettant de couvrir différents contextes géographiques et technologiques : variation de l'environnement de localisation, variation du nombre d'équipements sans fil, etc.

Dans un premier temps, afin de vérifier la fonctionnalité du simulateur, nous avons effectué des simulations tests. Dans un deuxième temps, nous avons établis des simulations basées sur des données très proches de la réalité, acquises pendant des travaux précédents. [Chelly 2007] [Chelly Magda & al 2007]

Nous présentons, tout au long du chapitre, les différents résultats obtenus.

7.2 La phase de test et de validation

Cette partie va décrire les résultats obtenus lors de simulations test. Les simulations test nous permettent d'analyser le fonctionnement du simulateur en faisant varier les paramètres d'entrée afin de valider notre algorithme de localisation.

Les objectifs principaux du simulateur à travers les différentes simulations s'énumèrent comme suit :

- Vérification de la continuité du système : La possibilité de calculer une position géographique lors d'un changement de type d'environnement – passage d'un environnement extérieur vers un environnement intérieur.
- Vérification de la fiabilité du système : La possibilité d'obtenir une position géographique fiable suite au lancement de l'algorithme de positionnement.
- Vérification de la précision : Obtention d'une position géographique fiable et précise avec un coût pour une fiabilité plus importante avec un coût nul.
- Vérification de la localisation tridimensionnelle : L'obtention d'une position géographique en trois dimensions.

Les étapes de notre simulateur sont présentées sur la figure 65 :

- L'initialisation : Nous définissons notre environnement géographique (Taille, extérieur, intérieur, etc) ainsi que les équipements présents (Nombre, type de technologie, etc).
- L'exécution des actions : Nous déterminons le nombre d'équipements sans information de positionnement. Un équipement dans une salle, au niveau -1 (Bâtiment A : Telecom & Management SudParis) ne peut obtenir des coordonnées géographiques, via le système GPS, par exemple.
- L'acquisition des données : Suivant les modèles de visibilité appliqués, nous déterminons la connectivité entre équipements. Les deux notions évoquées ont été décrites dans les chapitres précédents. A la suite, nous établissons la matrice d'adjacence : représentation mathématique des équipements connectés.
- Le lancement du simulateur : La matrice d'adjacence nous permet d'estimer les distances relatives entre équipements. Nous effectuons à la suite, une estimation des positions géographiques relatives et absolues de tous les équipements.
- La présentation des résultats : Le simulateur fournit des résultats sous forme numérique et graphique. Les résultats sous forme numérique sont les suivants : l'erreur moyenne pour chaque équipement, l'erreur moyenne totale, les distances relatives, la matrice d'adjacence, etc. Les résultats graphiques sont présentés sous forme d'une représentation géographique des connectivités entre équipements.

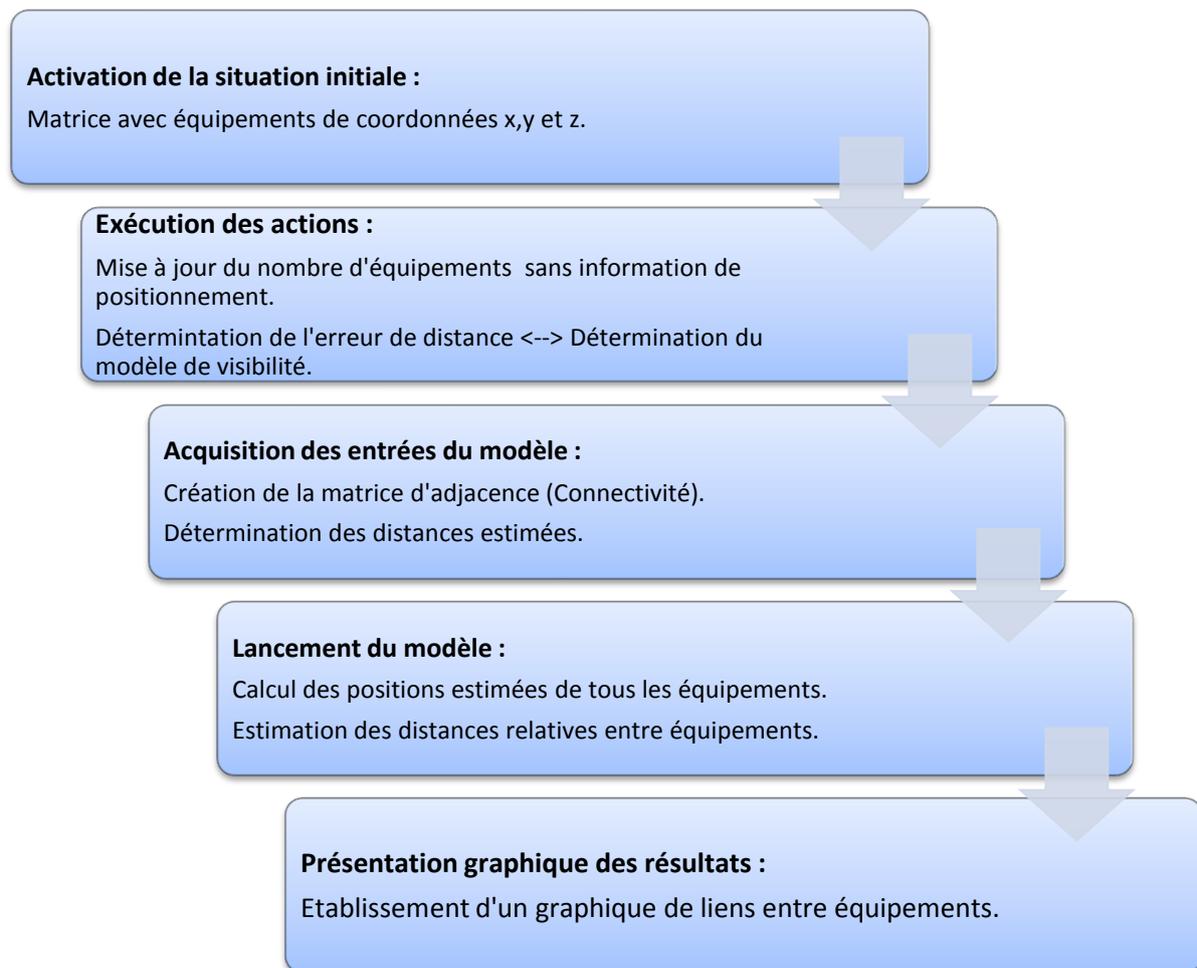


Figure 65 Grafset du simulateur

Une étude statistique des différents résultats est menée. Les résultats obtenus nous permettent également de déterminer les paramètres adéquats pour les tests suivants, présentant des

situations complexes : nombre d'équipement élevé, différentes technologies, incertitude sur les positions acquises, etc

Ces tests ont été répertoriés comme suit :

Test de performance : Mise en place d'un nombre important de simulations avec des données d'entrée variées. Les tests de performance vérifient la conformité de la solution proposée face aux exigences demandées. Ces exigences sont la variation des caractéristiques du milieu, la variation du nombre d'équipements et la variation des données de positionnement.

Test de dégradation technique : Etude des résultats de simulations avec des équipements sans aucune information de positionnement.

Test de robustesse, d'endurance, de fiabilité : Etude des résultats de simulations avec un nombre très important d'équipements. Les tests de robustesse nous permettent de qualifier la stabilité du simulateur.

Test de capacité : Etude des résultats de simulations avec un nombre croissant d'équipements : de 5 équipements à 1000 équipements, dans une zone géographique de même taille.

Pour les simulations, nous avons reproduit une situation constituée d'un environnement géographique et d'un environnement réseau.

- L'environnement géographique est supposé fixe. Il ne change pas au cours du temps (Pour un nombre de simulations prédéfini).
- L'environnement réseau est un environnement variable. Le nombre d'équipements réseau est différent au cours du temps (Lors des différentes simulations).

Nous avons fixé deux paramètres principaux lors de nos simulations :

- Le nombre total d'équipements présents dans l'environnement réseau.
- Le nombre d'équipements pouvant acquérir des informations concernant leurs positions géographiques.

Lors des simulations, nous avons fait varier ces deux paramètres, afin d'analyser leur impact sur les résultats de positionnement.

Avant d'exposer les différents tests, nous faisons le point sur les définitions utilisées :

- **Erreur moyenne d'un équipement** = différence entre sa position réelle et sa position estimée par le simulateur

$$\text{erreur}_{\text{estimée, réelle}} = \sqrt{(x_e - x_r)^2 + (y_e - y_r)^2 + (z_e - z_r)^2}$$

Avec (x_e, y_e, z_e) les coordonnées estimées par le simulateur et (x_r, y_r, z_r) les coordonnées réelles.

- **Erreur moyenne** = moyenne des erreurs de positions de tous les équipements présents dans l'environnement
-
- **Erreur de distance** = différence entre la distance réelle entre deux équipements et la distance estimée grâce au modèle de visibilité

$$\text{erreur distance}_{\text{estimée, réelle}} = |d_e - d_r|$$

Avec d_e la distance estimée et d_r la distance réelle entre deux équipements.

- **Imprécision de coordonnées** = Erreur ajoutée aux coordonnées d'un équipement qui peut acquérir sa position sans notre algorithme
- **Fiabilité** = La fiabilité dépend du pourcentage d'équipements avec des coordonnées connues. Cet indicateur peut prendre deux valeurs : système fiable et système non fiable. Le système est fiable si le pourcentage d'équipements avec positions géographiques connues est supérieur à un pourcentage décrit dans la suite des résultats.
- **Continuité** = La continuité du système définit la possibilité d'obtenir un service de localisation en changeant de type d'environnement.

7.2.1 Les tests de performance

Le simulateur utilise des données d'entrée variées : nombre d'équipements et taille de la zone géographique variables. Nous vérifions à travers ce test que les données d'entrée ne sont pas altérées par le simulateur.

Nous lançons la simulation suivante :

- En entrée, nous introduisons des équipements avec des informations de positionnement déployés dans une zone géographique de dimensions 300m*300m.
- Le résultat obtenu nous permet de vérifier que les informations de positionnement n'ont pas été affectées par le simulateur. Les positions géographiques des équipements n'ont pas été modifiées.

Nous obtenons une erreur nulle lors de simulations effectuées avec des équipements ayant des informations de positionnement. Le simulateur estime les positions des équipements sans aucune information de positionnement. A cette fin, il utilise les positions géographiques présentes dans l'environnement.

7.2.2 Les tests de dégradation technique

Les tests de dégradation considèrent des données d'entrée sans information de positionnement. Notre simulateur établit une estimation « locale » ou « relative » des coordonnées des équipements, en utilisant uniquement la connectivité.

Les simulations présentées sont obtenues avec un nombre limité d'équipements, afin d'améliorer le résultat visuel obtenu. Nous avons fixé une zone géographique de dimensions 300m*300m.

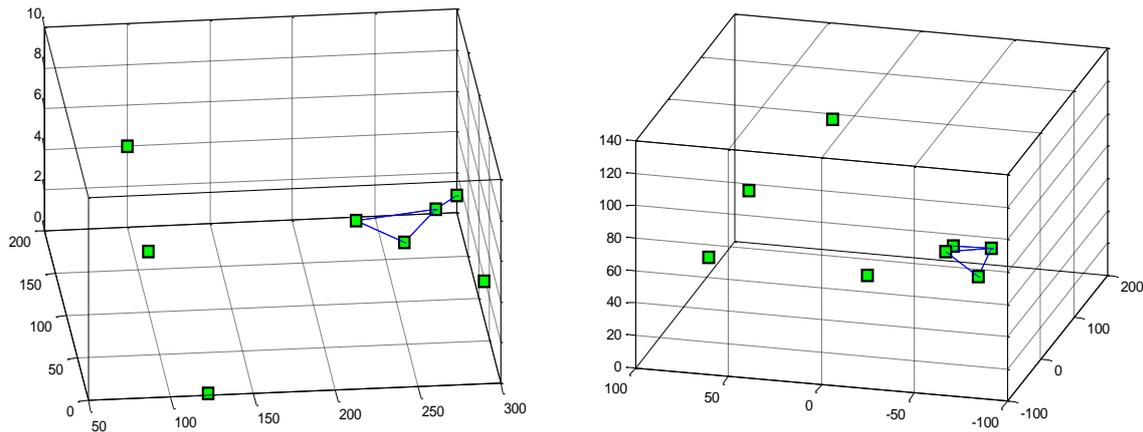


Figure 66 Représentation 3D géographique (a) Modèle réel (b) Modèle simulé

Les figures 66-a et 66-b représentent deux représentations géographiques : le premier est le modèle réel et le deuxième représente le modèle simulé. Ces deux modèles présentent un exemple de résultat graphique obtenu lors de nos simulations. Les relations spatiales (distances relatives) entre les équipements présents dans l'environnement géographique sont semblables dans les deux cas.

7.2.3 Les tests de robustesse

La robustesse est définie par la mesure de la capacité de notre simulateur à estimer les positions d'un nombre très important d'équipements déployés dans l'environnement géographique.

Le simulateur a été lancé avec 1000 équipements. Nous obtenons une estimation de la position géographique pour tous les équipements.

Le test de robustesse nous permet d'identifier le facteur opératoire, qui pourrait avoir une influence sur les résultats : le nombre total d'équipements déployés. L'augmentation du nombre d'équipements déployés augmente notablement le temps d'exécution du simulateur.

7.2.4 Les tests de capacité

Différentes simulations ont été réalisées avec un nombre d'équipements variant de 5 à 1000. Nous présentons ci contre, les résultats des simulations avec un nombre limite de 1000 équipements. Le nombre d'équipements dont la position est connue était également variable, aux environs de 50% du nombre total d'équipements.

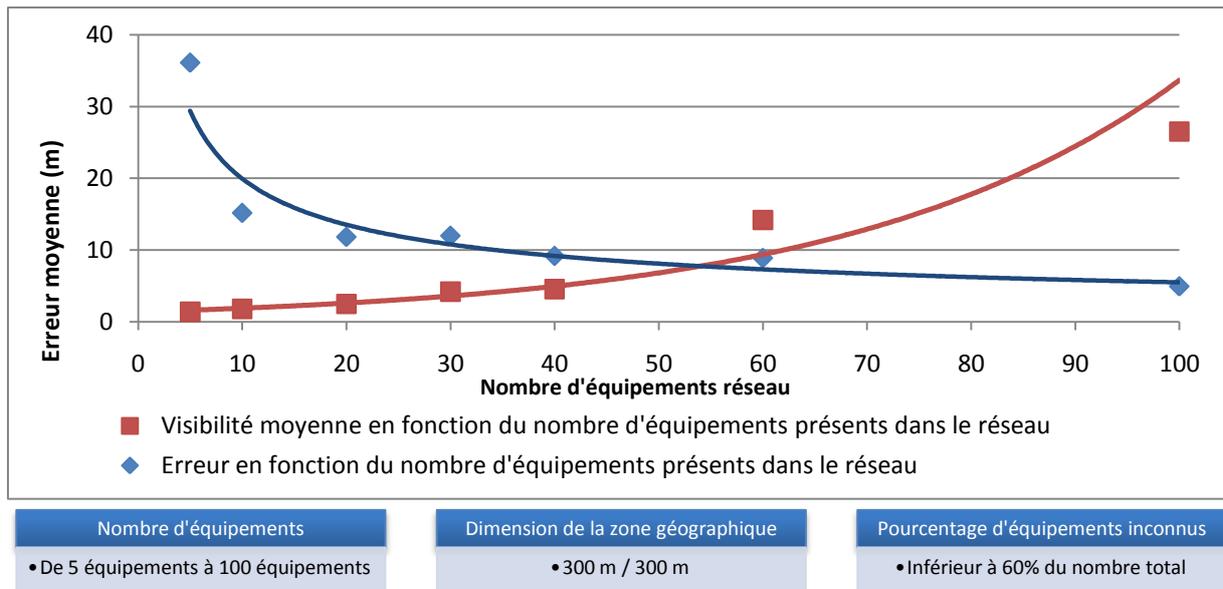


Figure 67 L'erreur en fonction du nombre d'équipements dans le réseau

La figure 67 présente l'erreur moyenne en fonction du nombre d'équipements présents dans le réseau. L'erreur moyenne est la moyenne des erreurs de positions pour tous les équipements présents dans les milieux, obtenus suite aux différentes simulations. L'erreur obtenue pour un équipement lors d'une simulation est la différence entre la position estimée et la position réelle de l'équipement. Les simulations sont lancées avec un nombre d'équipements allant de 5 à 100, dans une zone géographique de 300m sur 300m. Les simulations sont basées sur des distances estimées entre équipements avec une erreur de 5m. Les distances estimées sont calculées en utilisant les distances réelles entre équipements. Les formules utilisées sont:

$$\text{Distance estimée}(i, j) = \text{Distance réelle} + 5 \times \text{randn}(1)$$

Les résultats ci-dessus sont présentés pour 10 simulations par scénarios. Un scénario est défini par la dimension d'une zone géographique, un nombre d'équipements et des informations de positionnement.

L'erreur moyenne diminue en fonction du nombre d'équipements présents dans l'environnement. La courbe de tendance est décroissante en fonction du nombre d'équipements déployés. La figure 67 présente aussi une fonction de visibilité. Celle-ci décrit le nombre d'équipements visibles moyen en fonction du nombre d'équipements déployés. Cette fonction croît en fonction du nombre total. La courbe de l'erreur moyenne et la courbe de visibilité ont des variations opposées lors de l'évolution du nombre d'équipements.

7.3 Les résultats des simulations

Dans ce paragraphe, nous exposons les statistiques effectuées pour différents scénarios. Nous avons fait varier les deux paramètres principaux de notre simulateur : le nombre total d'équipements présents dans le réseau ainsi que le nombre d'équipements ayant une position connue.

Nous avons de plus établi le plan de simulations suivant :

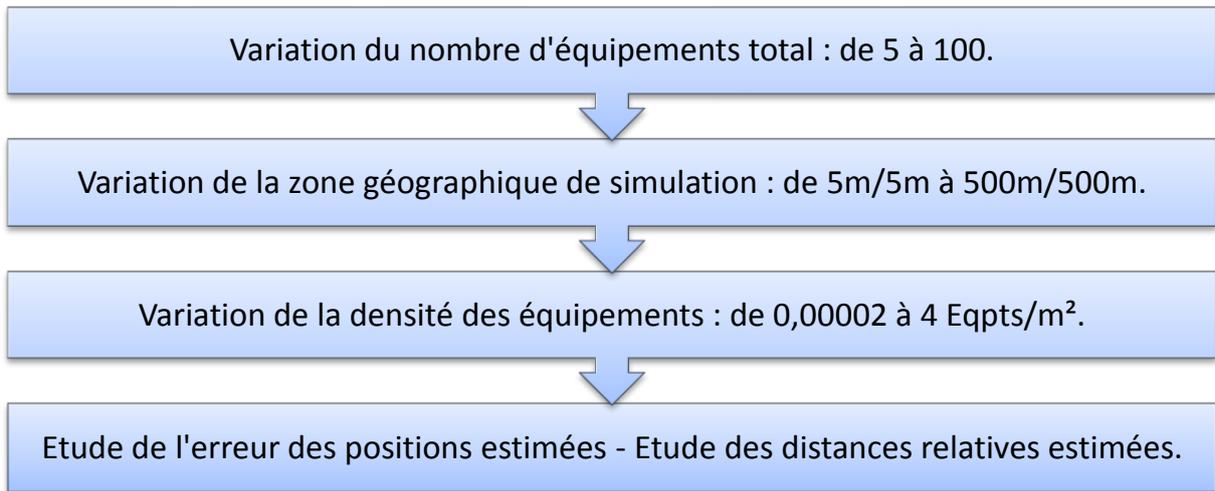
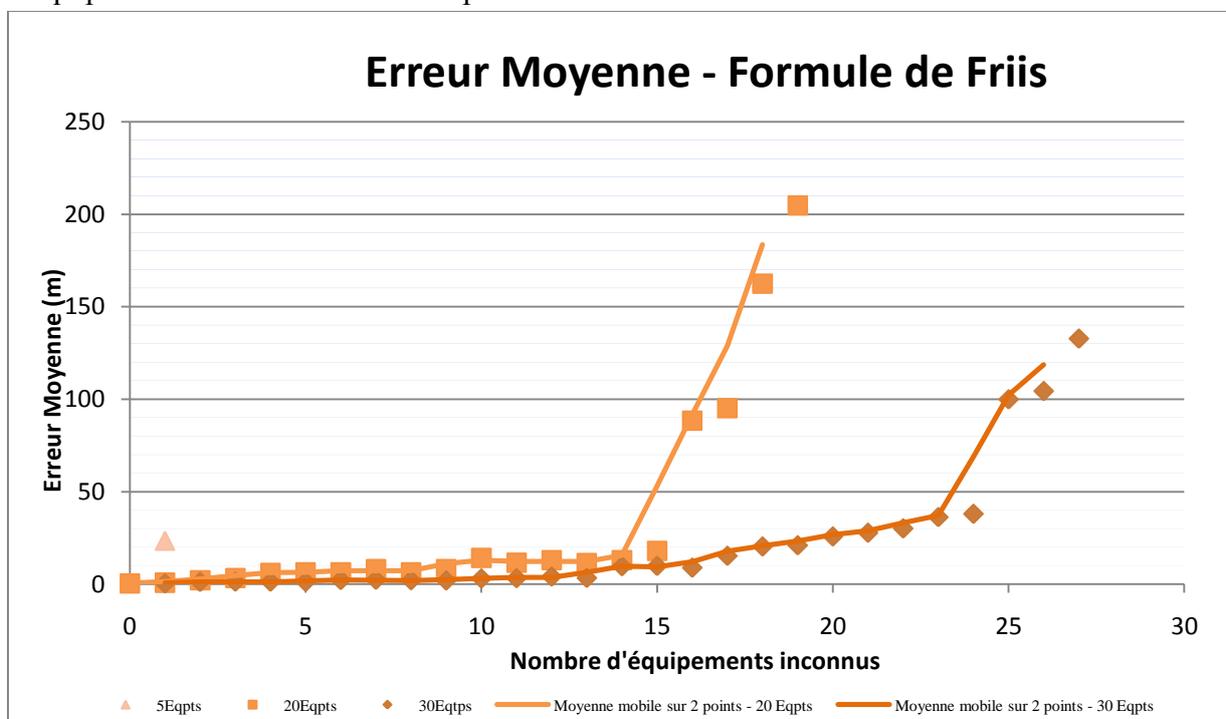


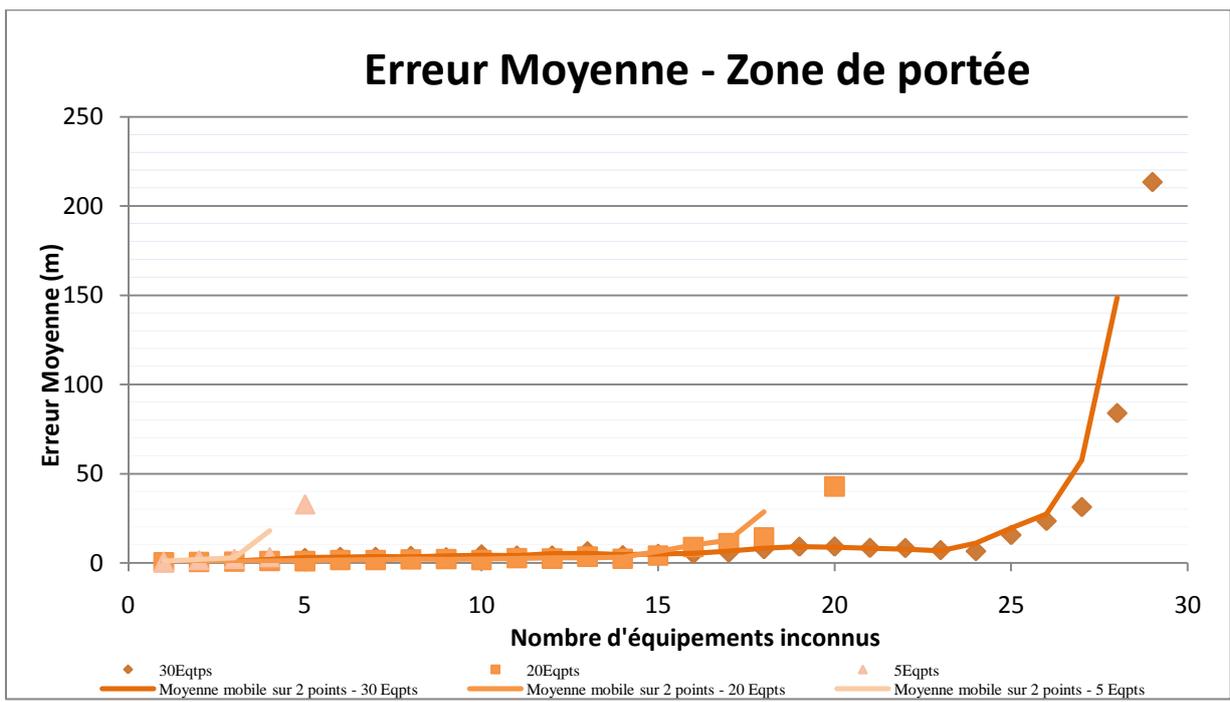
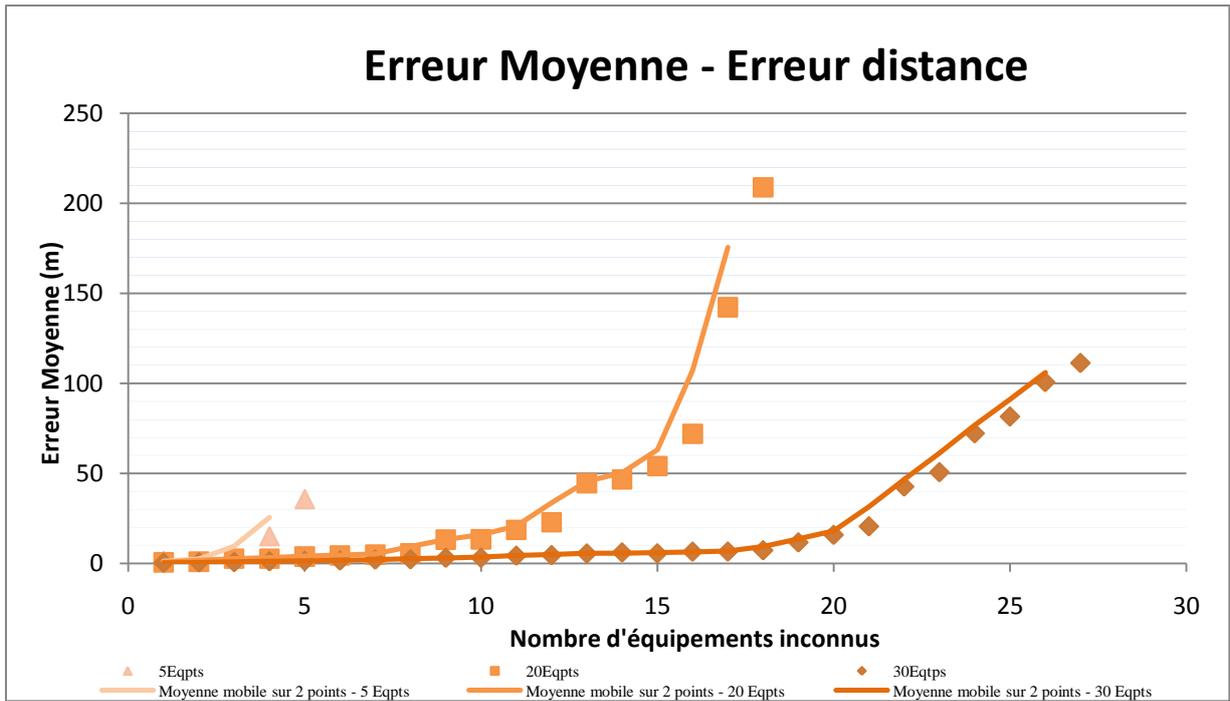
Figure 68 Variation des paramètres lors des simulations

La figure 69 présente les différentes erreurs moyennes avec les trois modèles de visibilité : le modèle se basant sur la formule de Friis, le modèle se basant sur une erreur de distance et le modèle se basant sur la zone de portée par défaut.

Les simulations sont effectuées avec un nombre d'équipements allant de 5 à 30, dans une zone géographique de 300m sur 300m. Le nombre d'équipements sans position connue est incrémenté au fur et à mesure des simulations : de 1 jusqu'au nombre d'équipement total moins un. Les simulations sont basées sur des distances estimées entre équipements avec une erreur de 5m. Les résultats ci-dessus sont issus de 10 simulations par scénarios.

Nous remarquons que l'erreur moyenne varie considérablement à partir d'un nombre précis d'équipements sans information de positionnement.





Nombre d'équipements	Dimension de la zone géographique	Pourcentage d'équipements inconnus
• 5 - 20 - 30 Equipements	• 300 m / 300 m	• Nombre incrémenté de 1

Figure 69 L'erreur en fonction du nombre d'équipements inconnus (a) Modèle de Friis (b) Distance Erreur (c) Zone de portée

Pour les trois types de visibilité utilisés, l'erreur moyenne est une fonction constante jusqu'à un seuil défini aux environs de 4 équipements/ 5 équipements, 15 équipements/ 20 équipements et 25 équipements/ 30 équipements. Ensuite, l'erreur moyenne augmente brutalement.

Les figures 69-a, 69-b et 69-c présentent des courbes de tendance de l'erreur moyenne en fonction du pourcentage d'équipements inconnus.

Ces courbes permettent de conjecturer que pour un pourcentage supérieur à 80% d'équipements n'ayant pas d'informations concernant leurs positions géographiques, l'erreur moyenne est supérieure à 10m. Pour un pourcentage d'équipements inférieur à 80%, l'erreur diminue considérablement et pour un pourcentage allant de 0% à 70%, l'erreur est inférieure à 15m, dans la majorité des cas. Une analyse plus fine suit.

Dans le cas de l'estimation de la distance entre les équipements avec la formule de Friis, nous remarquons que l'erreur augmente considérablement pour un pourcentage égal à 70% d'équipements inconnus lors de simulations avec 20 équipements.

Lors des simulations avec 30 équipements, ce seuil critique augmente et se situe aux environs de 79%. Une rupture brutale de la variation de la courbe est observée.

Dans le cas de l'estimation de la distance entre équipements avec l'erreur de distance, la rupture semble moins évidente et les courbes sont plus lisses pour toutes les simulations avec les différents nombres d'équipements. L'erreur commence à augmenter à partir d'un pourcentage égal à 60% d'équipements inconnus.

Dans le cas de l'estimation de la distance entre équipements avec la zone de portée, les courbes sont aussi lisses mais contrairement aux courbes précédentes, le seuil critique se situe au delà des 80%.

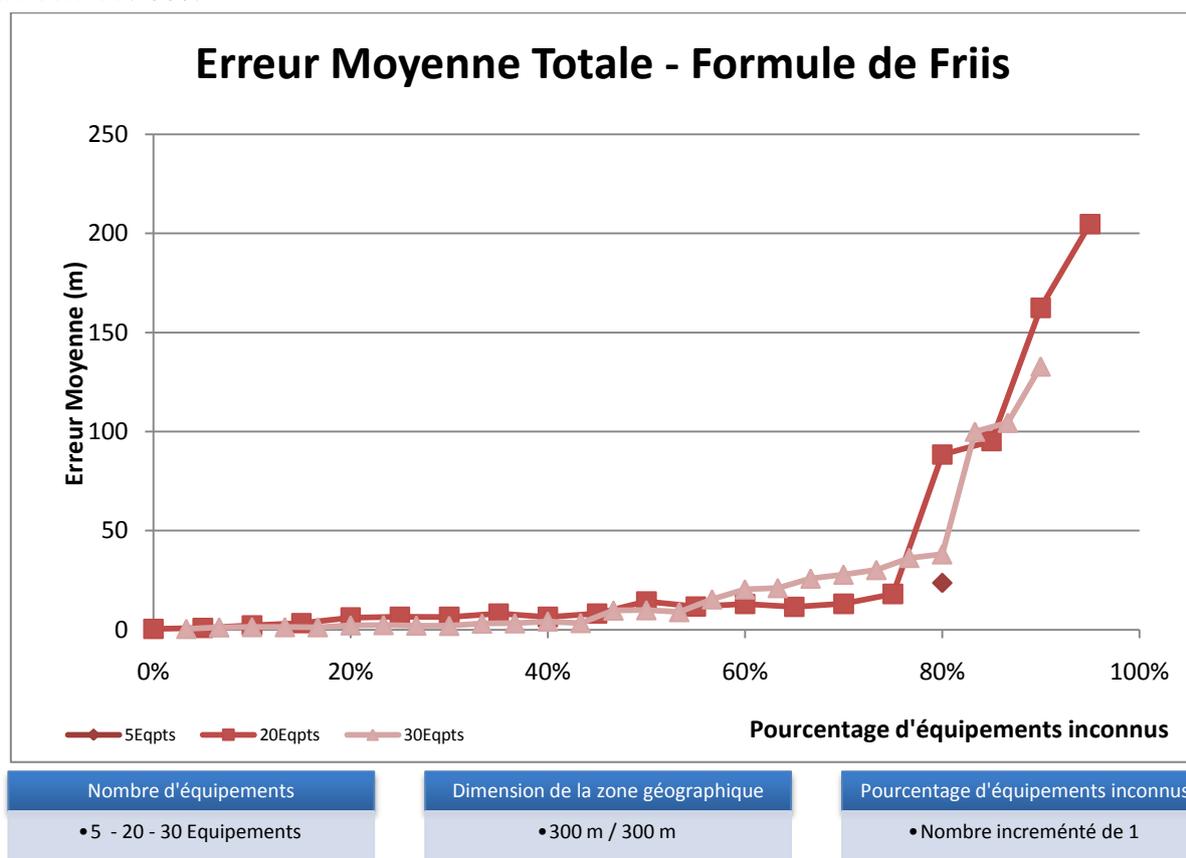


Figure 70 L'erreur en fonction du pourcentage d'équipements inconnus (a) Modèle de Friis

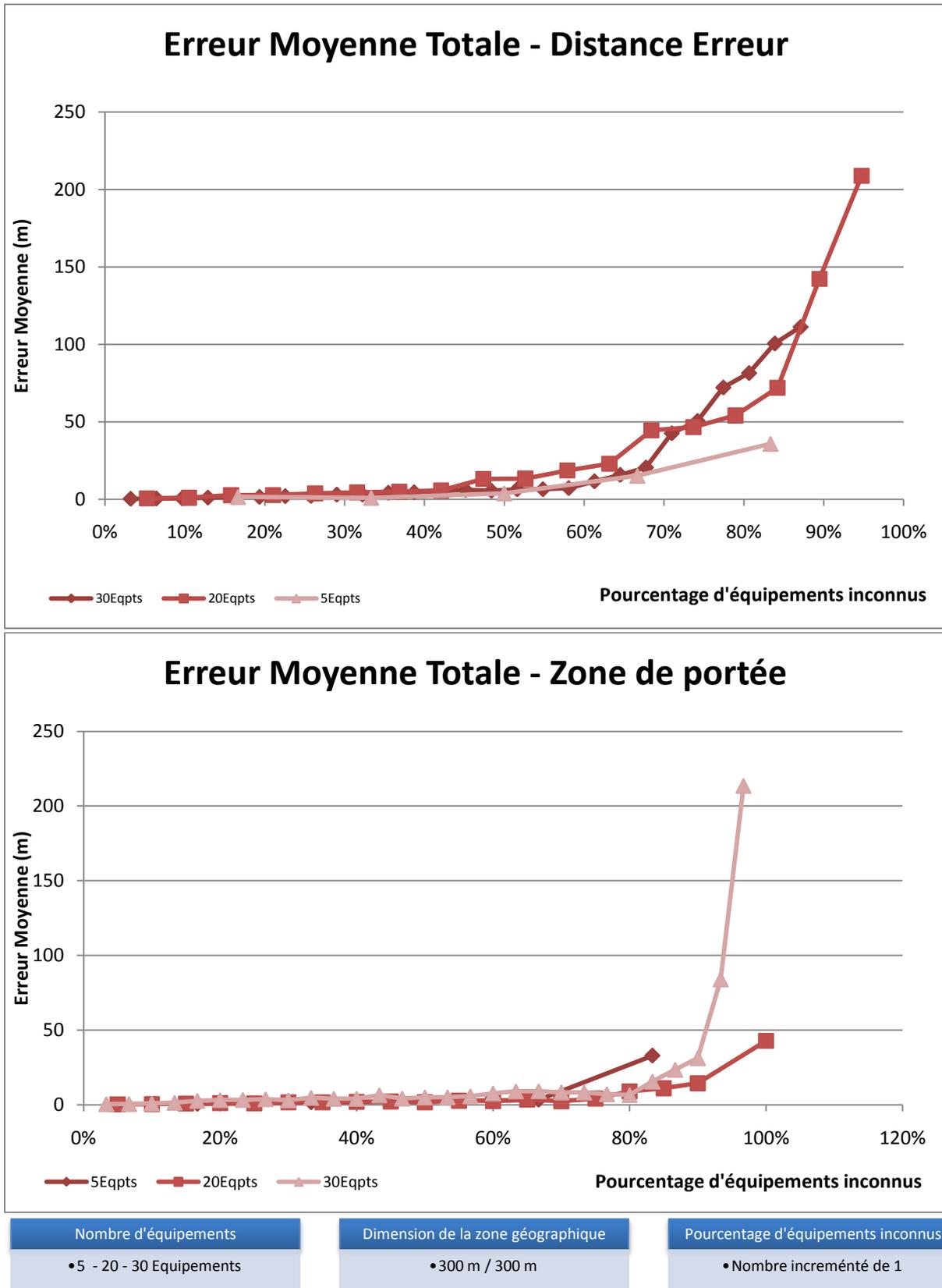


Figure 71 L'erreur en fonction du pourcentage d'équipements inconnus (b) Distance Erreur (c) Zone de portée

Les premières études effectuées conduisent à quelques tendances :

- L'erreur moyenne semble dépendre du nombre d'équipements déployés dans le milieu.

- L'erreur moyenne semble varier peu pour un pourcentage d'équipements sans information de positionnement inférieur à 80% dans les trois cas.

Afin de comprendre l'évolution de l'erreur en fonction du pourcentage d'équipements inconnus, nous avons effectués des simulations pour un pourcentage d'équipements inconnus de 45% à 80%, avec une erreur de distance estimée de 5m à 20m. Nous avons effectuée une vision plus détaillé de l'évolution de cette erreur moyenne pour un nombre d'équipements égal à 20 équipements déployés. La figure 72 présente les courbes d'évolution correspondantes.

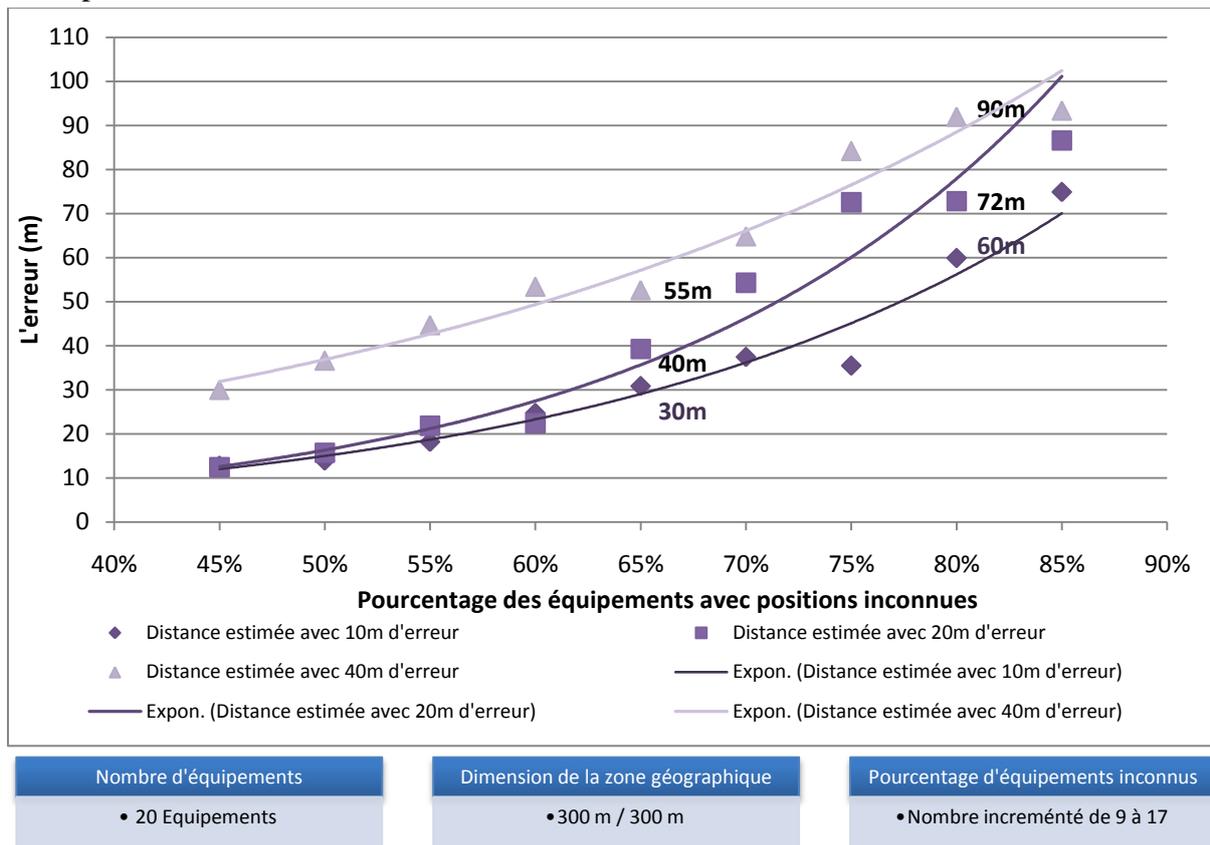
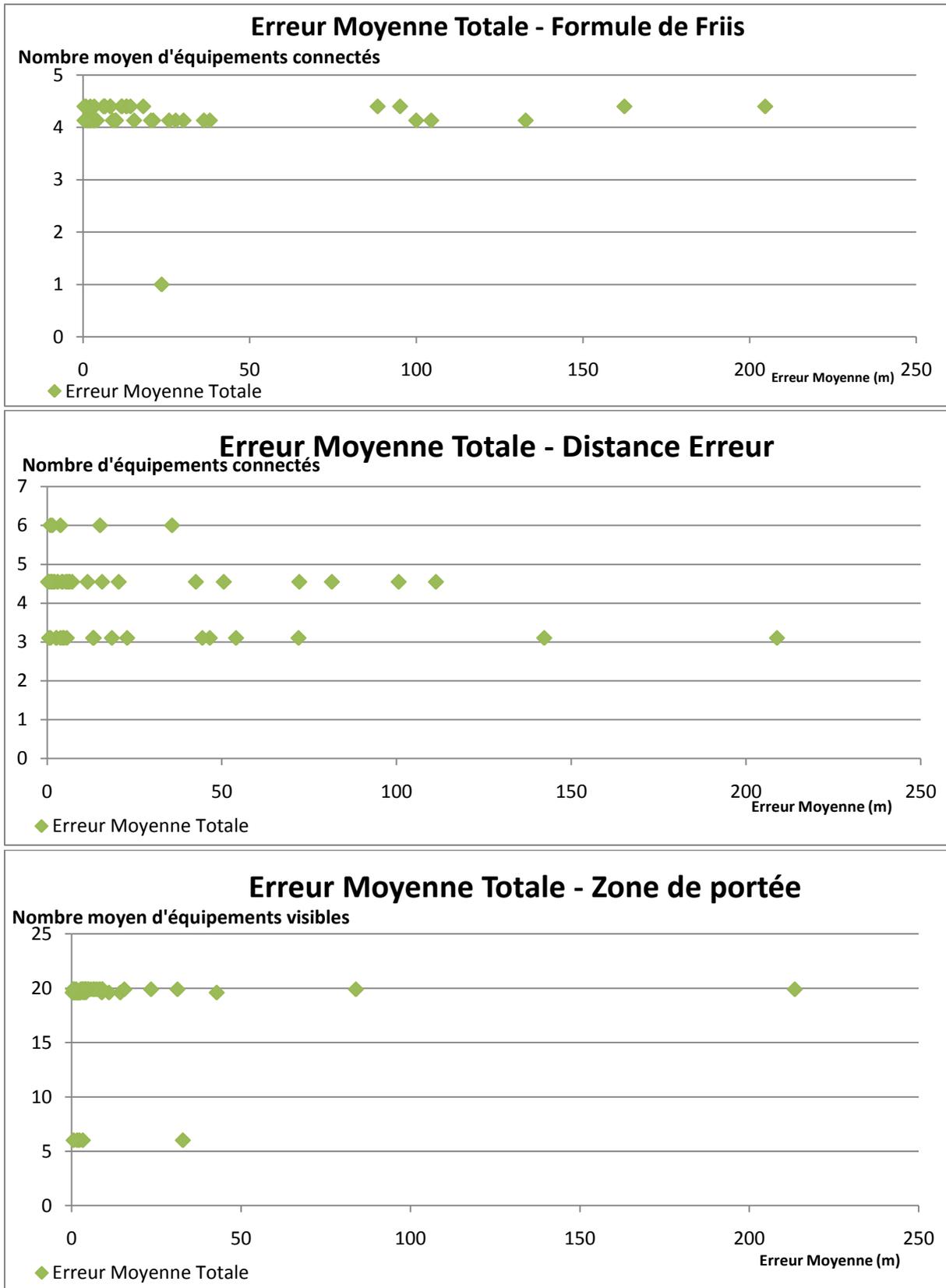


Figure 72 L'erreur en fonction du pourcentage d'équipements inconnus pour 20 équipements

La première courbe résultant des simulations avec une erreur de distance estimée de 5m, présente une augmentation de l'erreur de $60m - 30m = 30m$. La deuxième courbe résultant des simulations avec une erreur de distance estimée de 20m, présente une augmentation de l'erreur de $72m - 40m = 32m$. La dernière courbe résultant des simulations avec une erreur de distance estimée de 40m, présente une augmentation de l'erreur de $90m - 55m = 35m$.

Nous pouvons constater qu'une variation importante de l'erreur de position est visible lorsque le pourcentage d'équipements inconnus varie entre 65% à 80%, pour les différentes erreurs de distances estimées cette variation s'élève à 30m, environ.

Les résultats précédents nous ont poussés à une étude de l'impact du nombre d'équipements connectés, pour un équipement donné, sur l'erreur moyenne. La connectivité a été définie dans les chapitres précédents et correspond au nombre d'équipements connectés à un équipement donné (et dépend du modèle de visibilité utilisé)..



<p>Nombre d'équipements</p> <ul style="list-style-type: none"> • 5 - 20 - 30 Equipements 	<p>Dimension de la zone géographique</p> <ul style="list-style-type: none"> • 300 m / 300 m 	<p>Pourcentage d'équipements inconnus</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nombre incrémenté de 1
---	--	--

Figure 73 L'erreur en fonction du pourcentage d'équipements visibles (a) Modèle de Friis (b) Distance Erreur (c) Zone de portée

La figure 73 donne les différentes erreurs moyennes en fonction de la connectivité moyenne des équipements.

Les analyses effectuées à la suite de différentes simulations, ainsi que les courbes ci-dessus, nous permettent de conclure que l'erreur moyenne semble indépendante de la connectivité moyenne des équipements.

Nous remarquons, en effet, qu'en ayant un nombre d'équipements connectés constant, l'erreur moyenne peut varier considérablement, de 0.1 à 220 m, pour les trois modèles de visibilité. La connectivité moyenne, en outre pour le modèle de visibilité Formule de Friis et Distance Erreur n'excède pas 7 équipements. Lors de l'utilisation du modèle de visibilité Zone de portée, cette valeur augmente pour atteindre 20 équipements.

Analysons maintenant deux autres paramètres: la densité des équipements et la distance maximale entre équipements.

La figure 74 représente l'erreur moyenne en fonction du nombre d'équipements. Nous pouvons constater que l'erreur est proportionnelle à ce nombre. Lorsque le nombre d'équipement augmente au delà de 30 équipements, l'erreur devient inférieure ou égale à 10m. Nous prenons pour nos tests, un nombre d'équipements sans informations de positionnement inférieur à 80% du nombre total d'équipements.

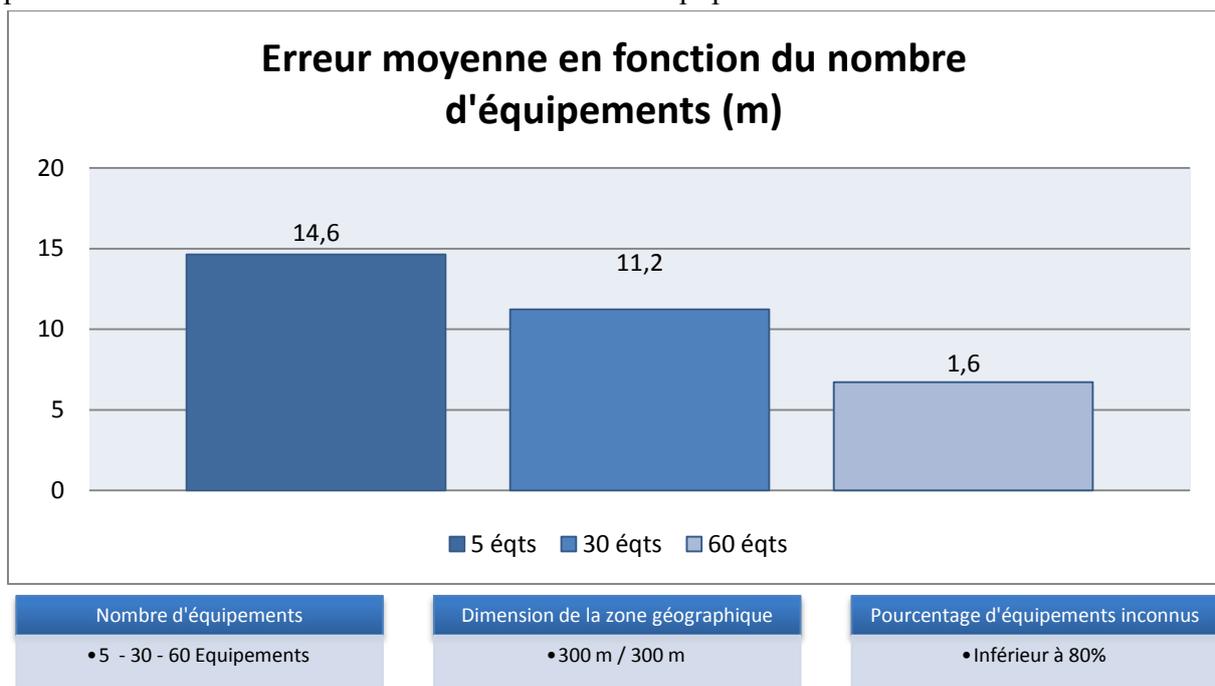


Figure 74 L'erreur moyenne en fonction du nombre d'équipements

Dans les simulations suivantes, nous comparons les résultats obtenus pour un nombre différent d'équipements dispersés dans des zones géographiques de tailles différentes. L'idée ici est de chercher un lien entre la densité des équipements et l'erreur moyenne.

Les figures 75 et 76 présentent ces différents résultats. L'erreur moyenne augmente pour une zone géographique plus importante, pour le même nombre d'équipements. Les simulations sont réalisées avec un nombre d'équipements allant de 5 à 60, dans une zone géographique allant de 5m sur 5m à 500m sur 500m. Le nombre d'équipements sans position connue est inférieur à 80% du nombre d'équipements total. Les simulations sont basées sur des distances

estimées entre équipements avec une erreur de 10m. Les résultats ci-dessous sont obtenus pour 10 simulations par scénarios.

Nous remarquons que les courbes ont une tendance très proche. Elles sont croissantes en fonction des dimensions de la zone géographique.

L'erreur moyenne est inférieure à 10m pour les trois courbes, lorsque les dimensions de la zone géographique n'excèdent pas 100m/100m.

L'erreur moyenne augmente en fonction des dimensions de la zone géographique pour le même nombre d'équipements déployés dans le milieu.

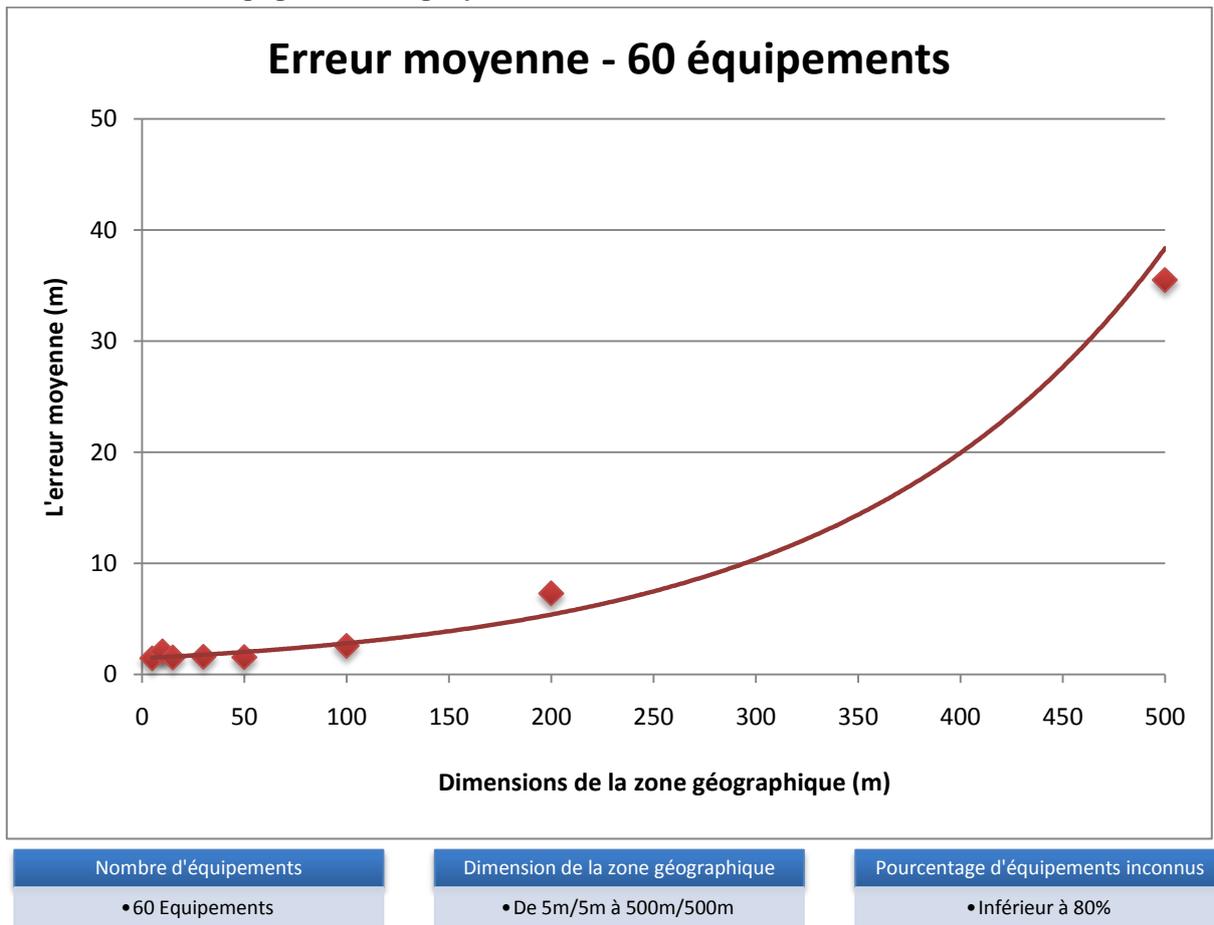
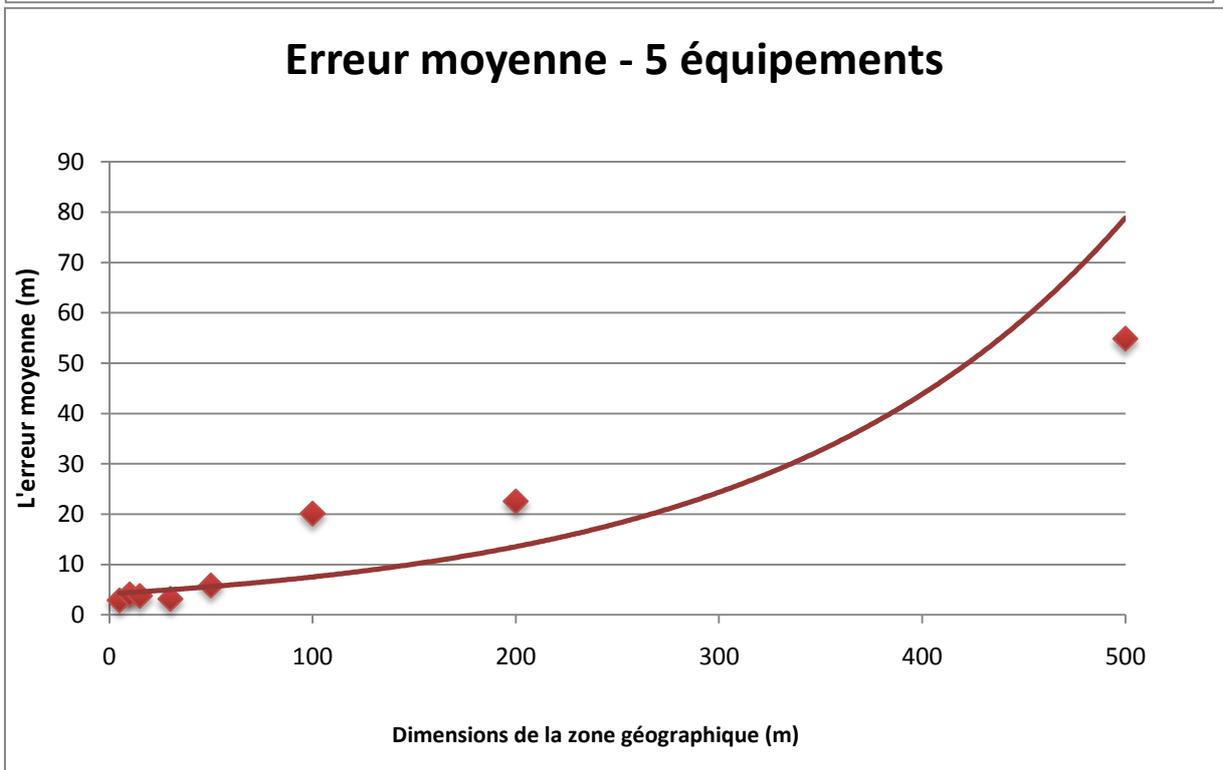
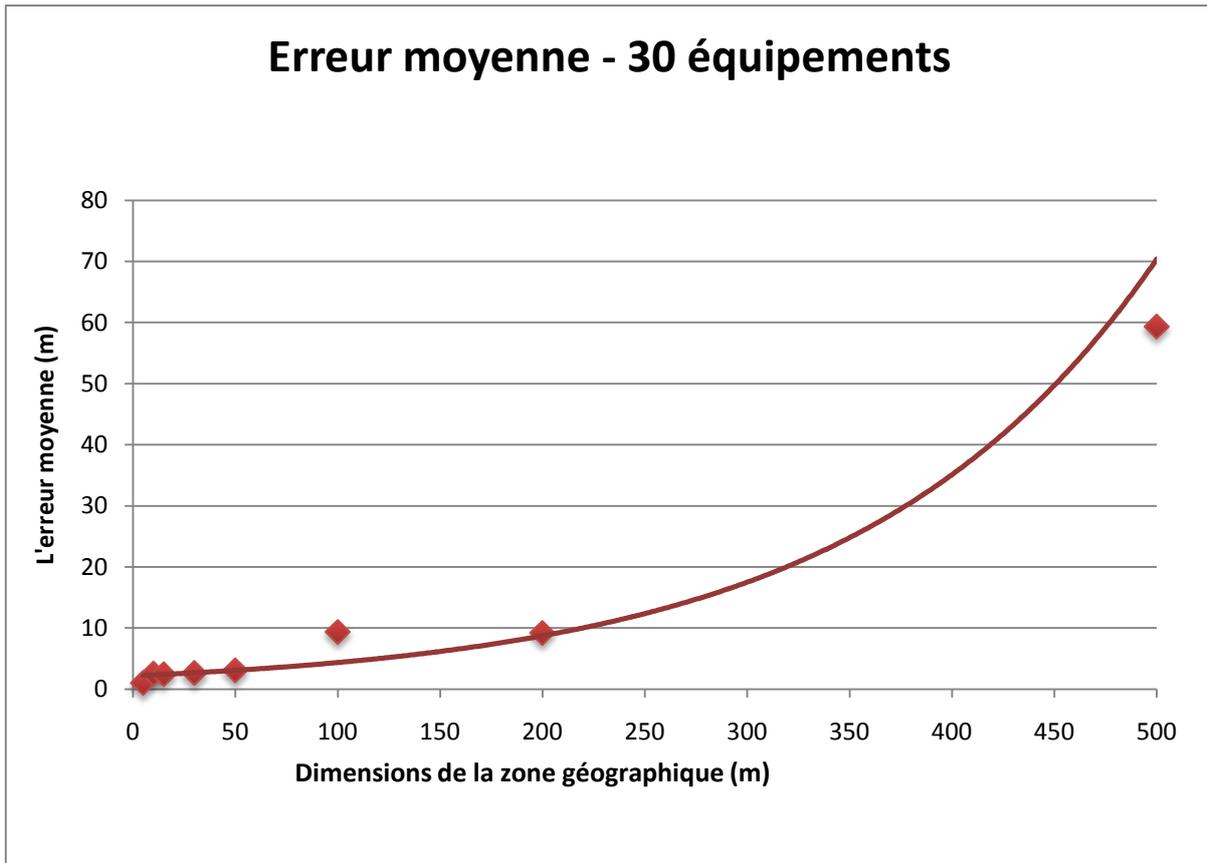


Figure 75 L'erreur moyenne pour chaque zone géographique de 5m-500m



Nombre d'équipements	Dimension de la zone géographique	Pourcentage d'équipements inconnus
• 5 - 30 Equipements	• De 5m/5m à 500m/500m	• Inférieur à 80%

Figure 76 L'erreur moyenne pour chaque zone géographique de 5m-500m

La figure 77 présente un récapitulatif de l'erreur moyenne en fonction de la dimension de la zone géographique pour les divers nombres d'équipements considérés.

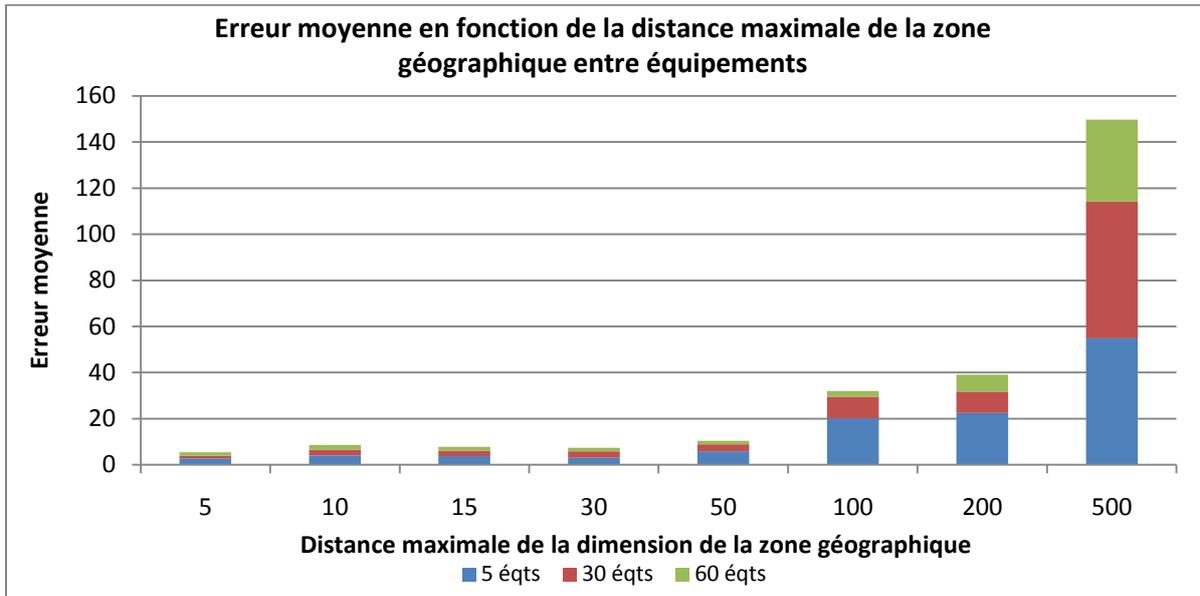


Figure 77 L'erreur moyenne en fonction de la distance maximale

Après l'étude de l'impact des dimensions de la zone géographique, nous procédons à l'étude de l'impact de la densité des équipements sur l'erreur moyenne. En effet, les courbes des figures 75 et 76 montrent une tendance identique qui semble présenter un facteur d'échelle. Comme dans le cas du nombre d'équipements ayant une position inconnue, le passage aux densités pourrait permettre de pousser l'analyse. La densité, dans nos analyses, est le rapport entre le nombre d'équipements présents dans une zone géographique et la surface de cette zone, et s'exprime ainsi en Nbr d'Eqts / m².

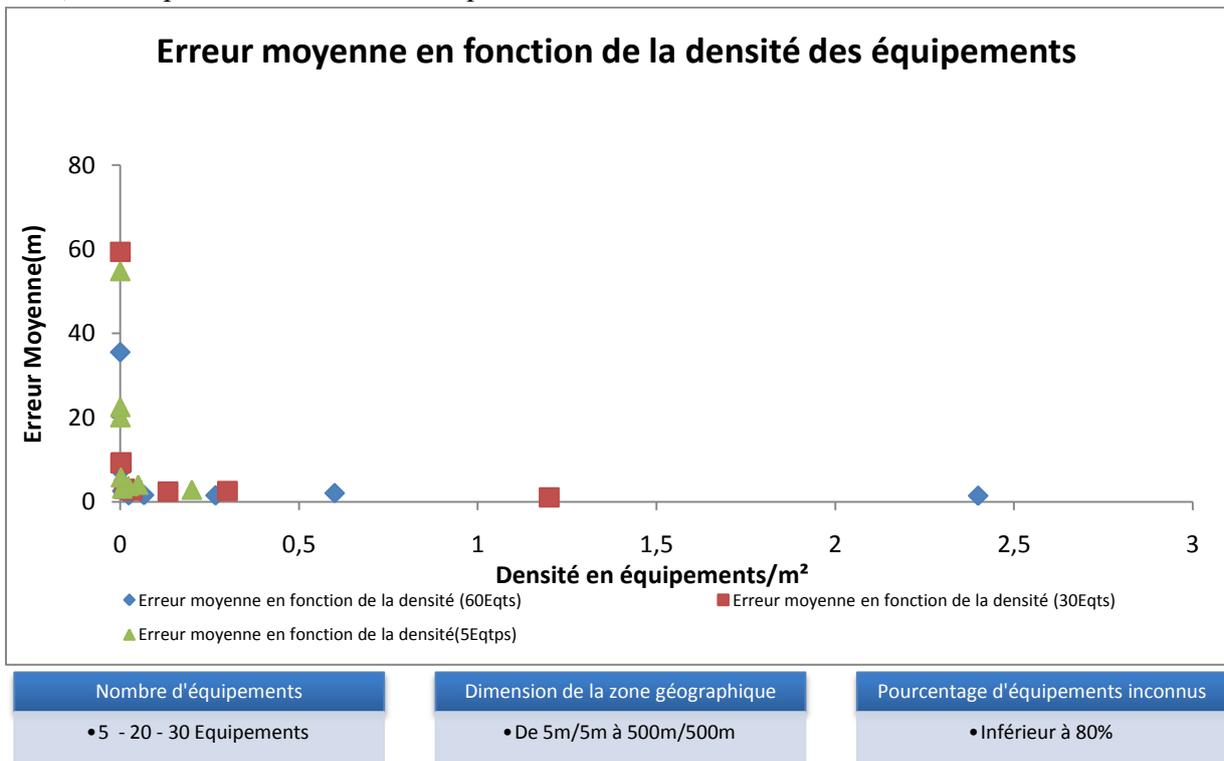


Figure 78 L'erreur moyenne en fonction de la densité des équipements

Nombre d'équipements	Dimension de la zone géographique	Pourcentage d'équipements inconnus
• 5 - 20 - 30 Equipements	• De 5m/5m à 500m/500m	• Inférieur à 80%

La figure 78 reprend une représentation des équipements en fonction de la densité. Pour une densité très faible, l'erreur moyenne est importante. Nous allons nous intéresser aux valeurs de densités comprises entre 0 et 0.05 (cette dernière valeur correspond, sur une zone urbaine par exemple de 100m*100m, à la présence de 500 équipements).

La figure 79 reprend une représentation des équipements en fonction de la densité, pour des valeurs très faibles. Les courbes sont semblables pour les différents équipements. Pour une densité inférieure à 0.01, l'erreur est supérieure à 10m. Une telle densité correspond à un équipement pour une zone géographique de 10m/10m (ou typiquement un équipement tous les 10 à 15 m). Pour une densité inférieure à 0.005, l'erreur est supérieure à 15m. Une telle densité indique un équipement dans une zone géographique de 14m/14m (ou typiquement un équipement tous les 15 à 20 m).

La courbe de l'erreur en fonction de la densité pour 5 équipements semble légèrement en dessous des autres. Cela laisse supposer que l'erreur reste moins importante pour un nombre d'équipements plus petit.

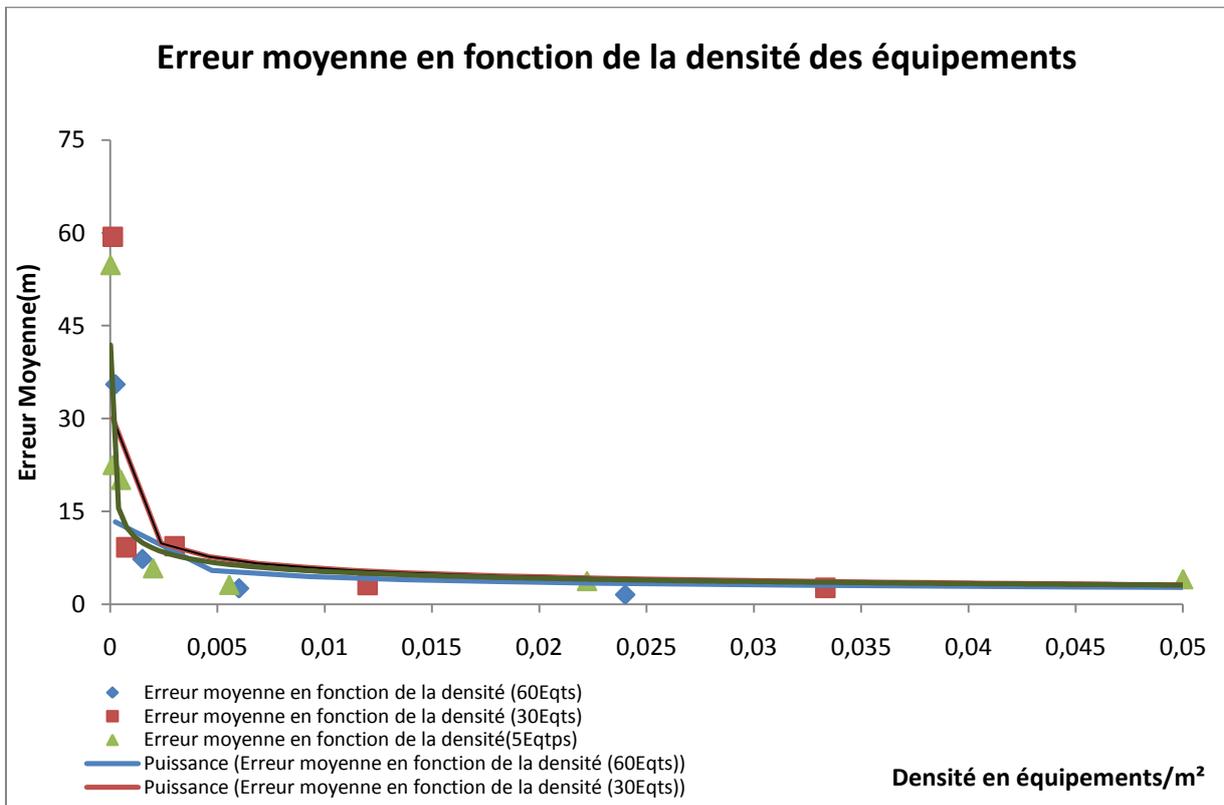


Figure 79 L'erreur moyenne en fonction de la densité des équipements

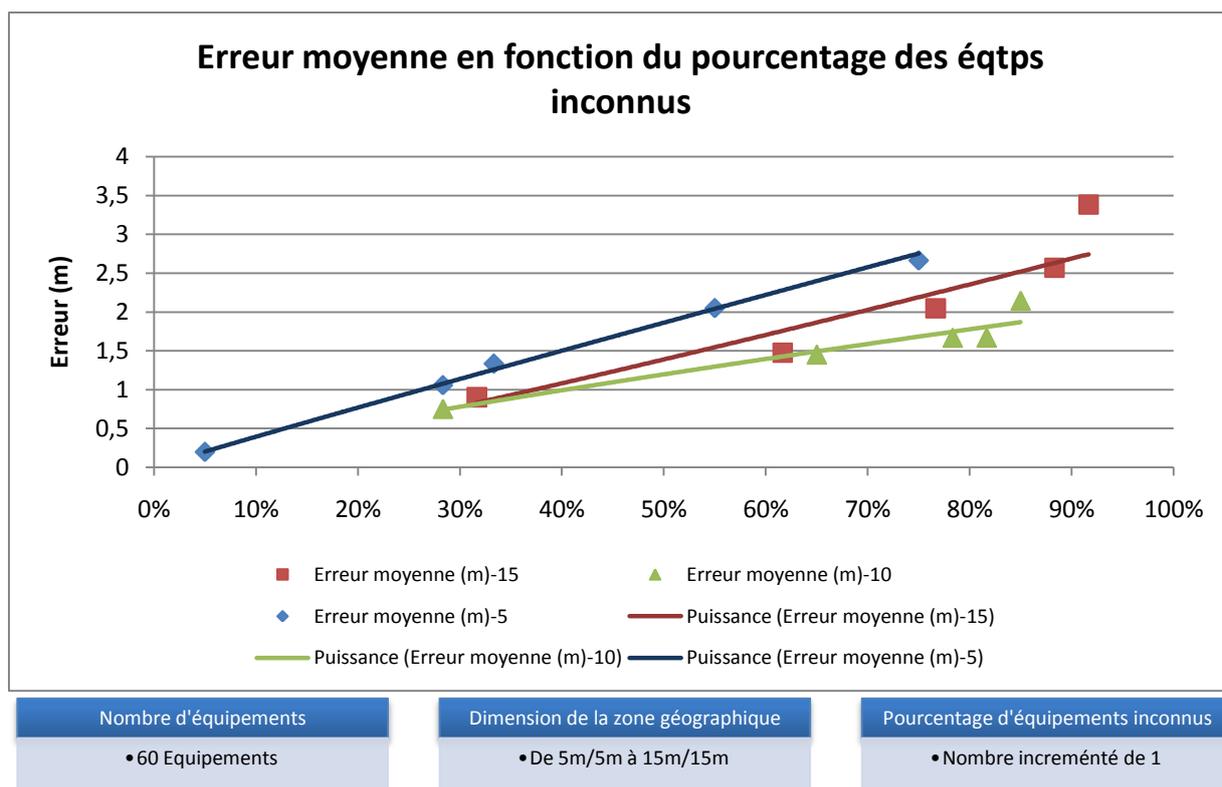


Figure 80 L'erreur moyenne en fonction des équipements inconnus – 60 équipements

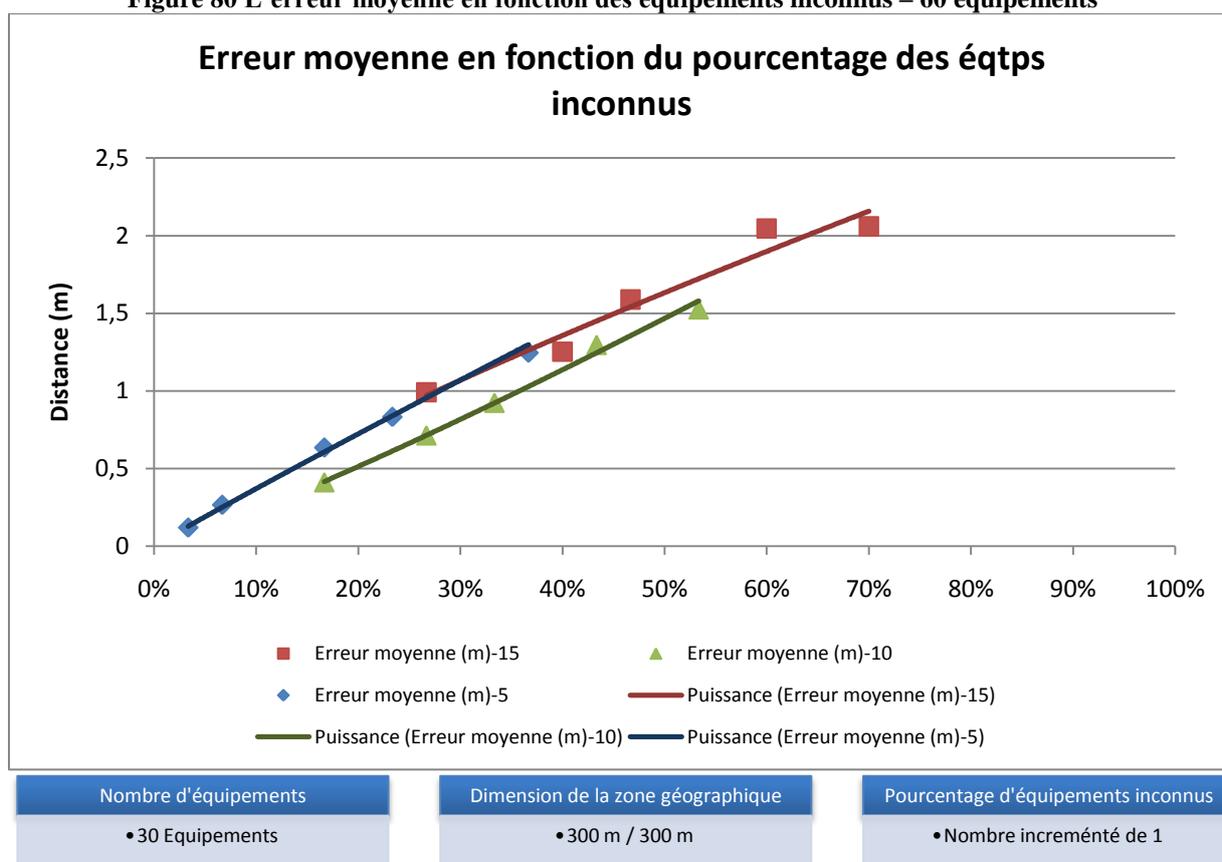


Figure 81 L'erreur moyenne en fonction des équipements inconnus – 30 équipements

Les figures 80-81 reprennent une représentation des équipements en fonction du pourcentage d'équipements inconnus, pour un nombre d'équipements allant de 30 à 60, dans une zone

géographique de 5m/5m à 15m/15m. Les simulations sont basées sur des distances estimées entre équipements avec une erreur de 10m. Les résultats ci-dessus représentent 10 simulations par scénarios.

Les figures précédentes confirment les conclusions mentionnées précédemment. L'erreur augmente avec le nombre d'équipements inconnus.

Les études précédentes ont analysés l'impact de plusieurs paramètres sur l'erreur de position absolue des équipements. Nous allons nous diriger, suite à ces statistiques, à une analyse de la variation de la position des équipements l'un par rapport à l'autre dans le milieu géographique.

La figures 82 et 83 nous permettent d'avoir une vision de cette variation pour un nombre d'équipements égal à 30 et 60 avec une erreur de distance estimée égale à 5m. L'erreur de distance relative telle que le montre la figure 83 est inférieure à 3m. Les erreurs de distance représentées sont les moyennes des erreurs de distances d'un équipement par rapport à tous les autres.

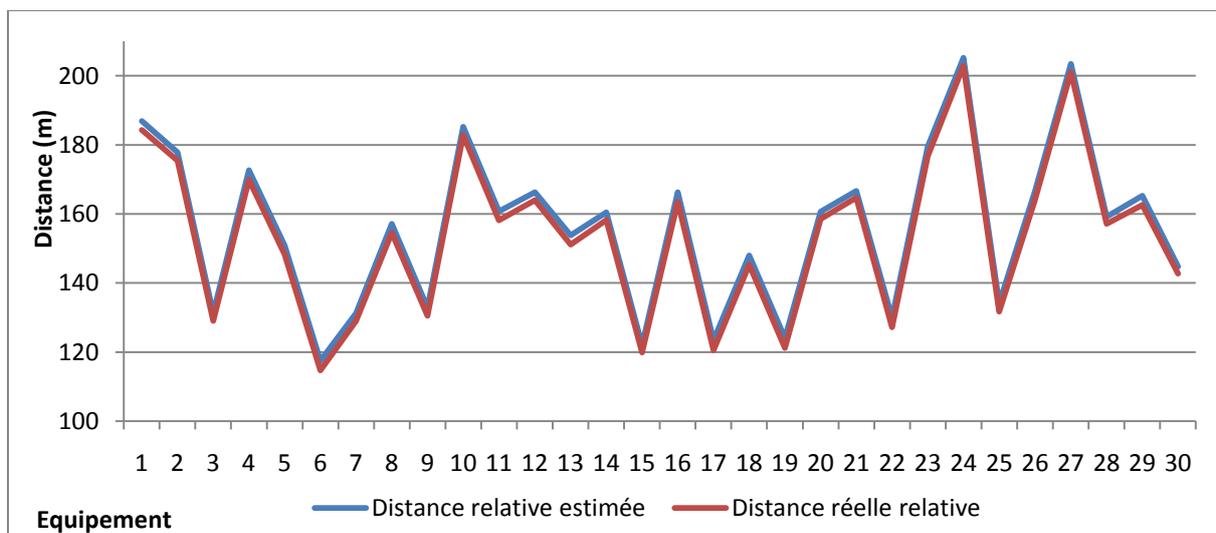
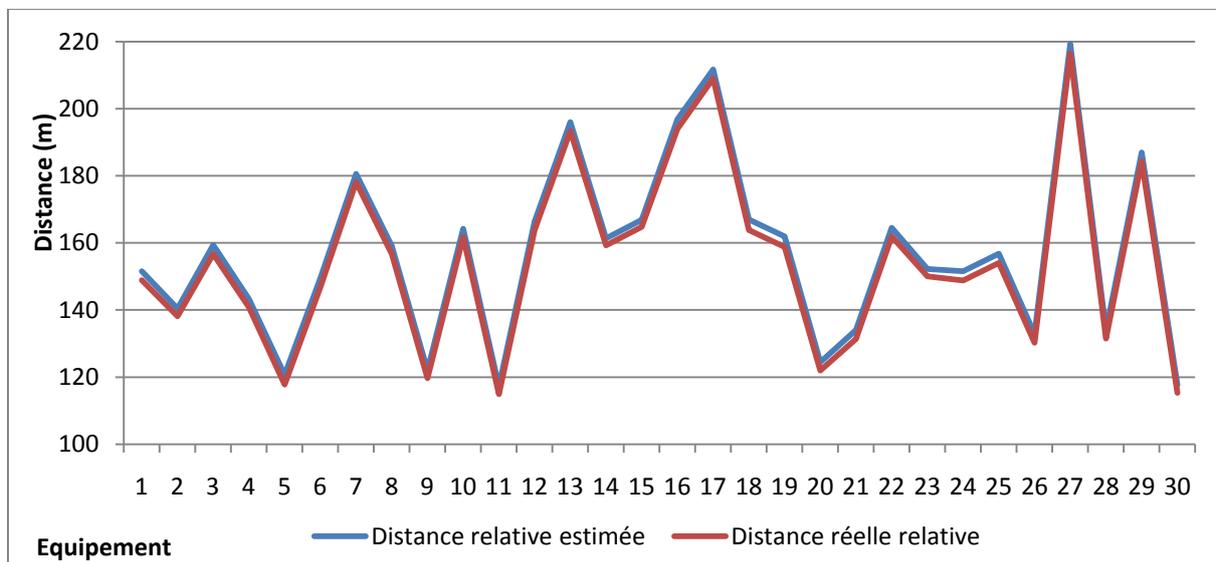
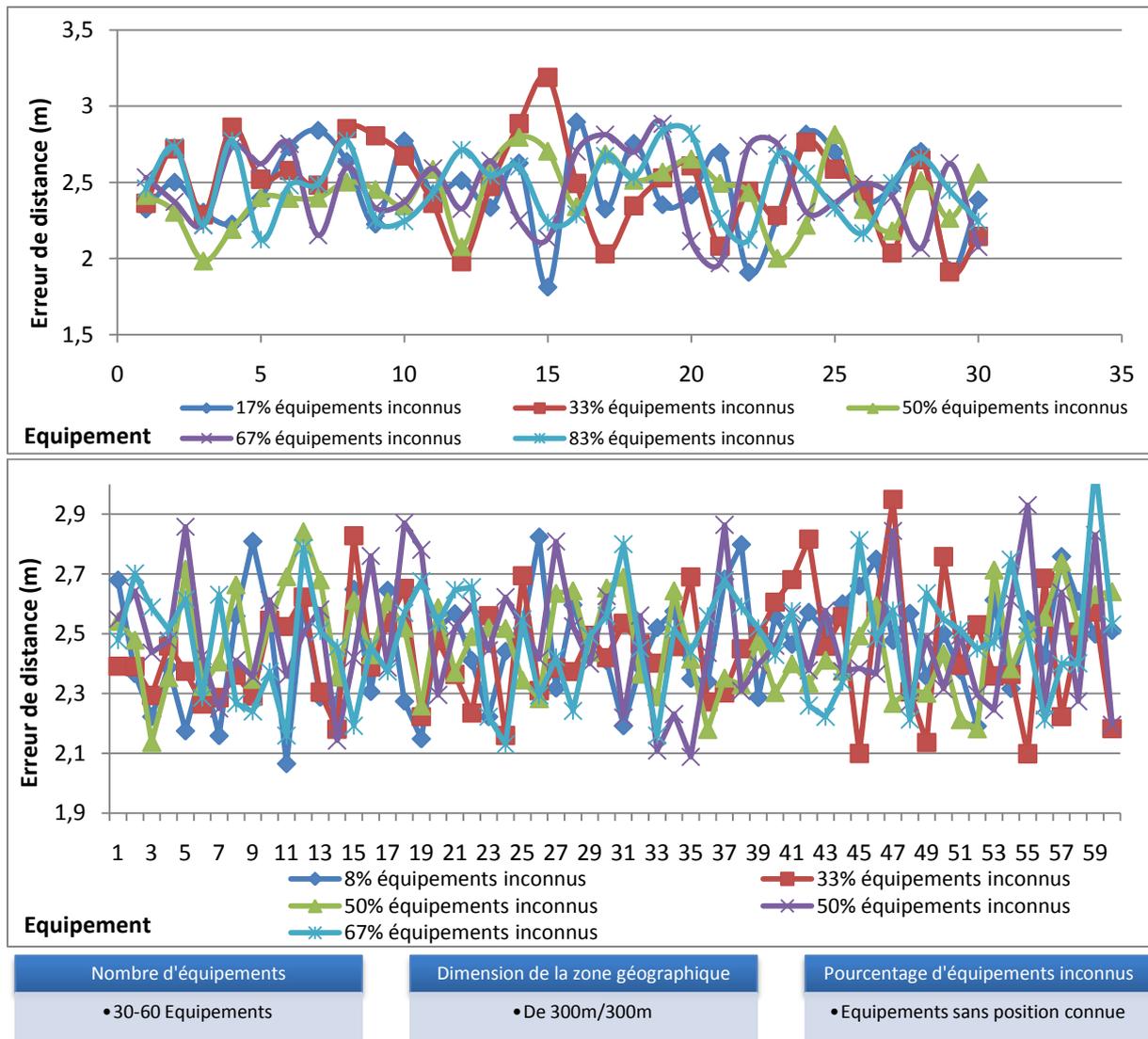


Figure 82 Les distances relatives entre équipements (a) 30 équipements (b) 60 équipements



L'information de localisation est souvent bruitée (bruit ambiant, sensibilité des équipements, interférences, etc). La précision des mesures de position dépend en partie de la visibilité des satellites, lors d'une mesure GPS, de la puissance du signal lors d'une localisation WLAN, etc. Pour prendre en considération cette erreur de position dans nos simulations, nous avons mis en place un paramètre d'incertitude. Ce paramètre est défini pour chaque coordonnées x,y et z des équipements ayant une information de positionnement.

On se propose d'utiliser des fonctions aléatoires pour exprimer l'incertitude de la position acquise par un équipement mobile.

Les valeurs de variations ont été définies comme suit :

$$\begin{aligned}
 X &= X + a \times rand() \\
 Y &= Y + a \times rand() \\
 Z &= Z + a \times rand()
 \end{aligned}$$

Avec a prenant les valeurs : 1m, 2m, 3m, 4m, 5m et 10m.

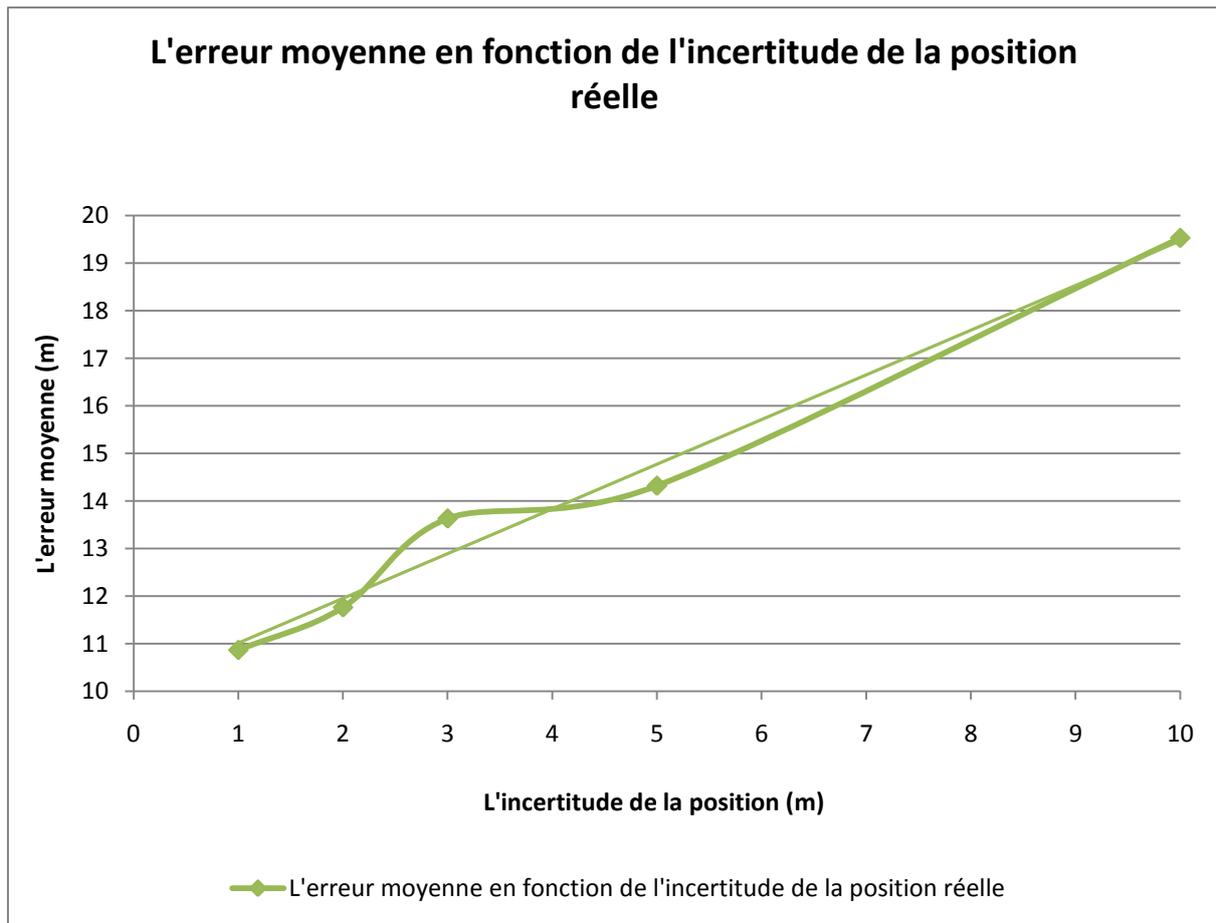


Figure 84 L'erreur moyenne en fonction de l'incertitude des positions connues

La figure 84 montre l'évolution de l'erreur en fonction de l'incertitude. L'erreur semble proportionnel au coefficient d'incertitude appliqué. Pour une incertitude de 1m sur les trois coordonnées de tous les équipements avec des positions géographiques, nous obtenons une erreur inférieure de l'ordre de 10m : le nombre d'équipements est égal à 30 équipements et le pourcentage d'équipements est supérieure à 80%.

L'élaboration de ces différentes études statistiques, nous permet d'avoir une idée sur le comportement du simulateur dans des situations diverses avec des paramètres très variés.

Afin de proposer un récapitulatif des tests précédents, nous avons établi le diagramme suivant :

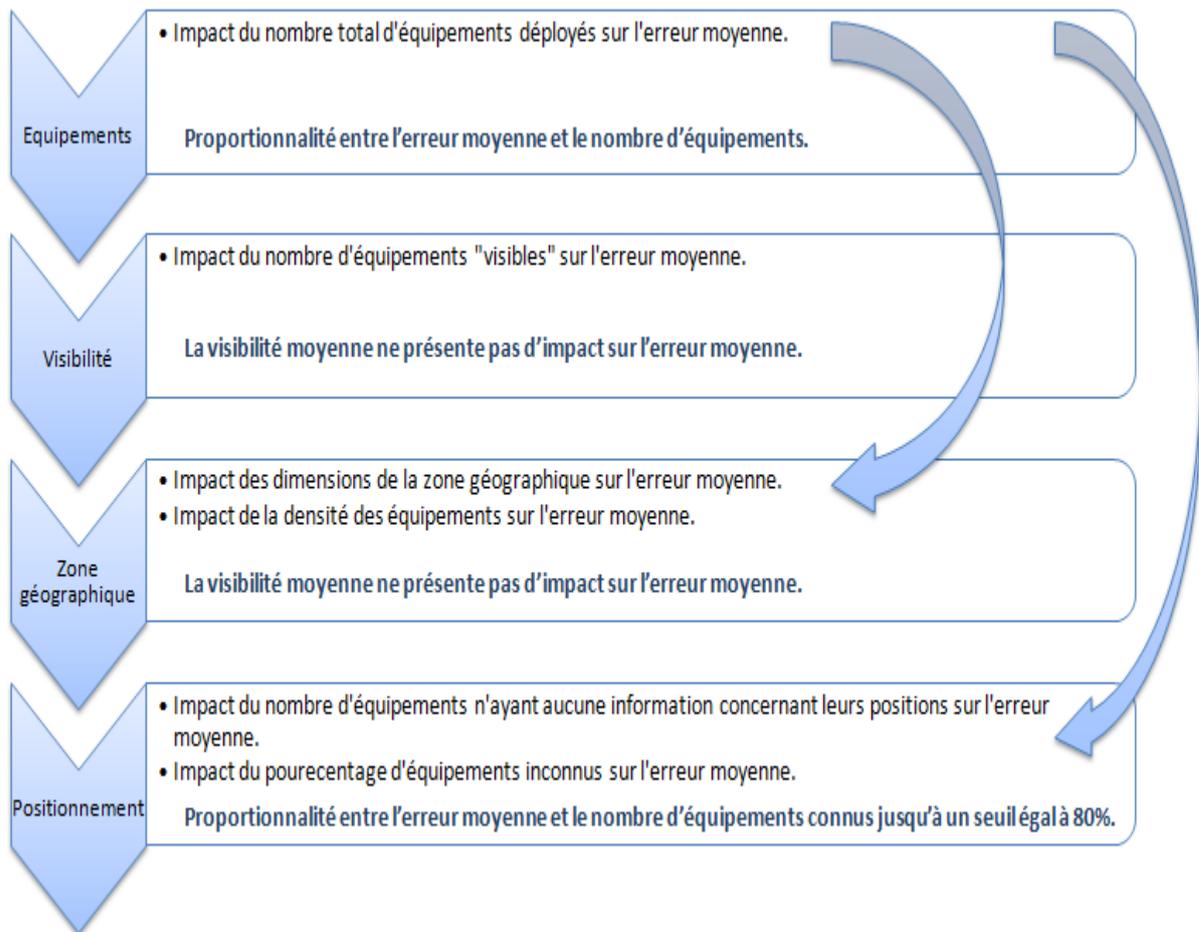


Figure 85 Diagramme récapitulatif

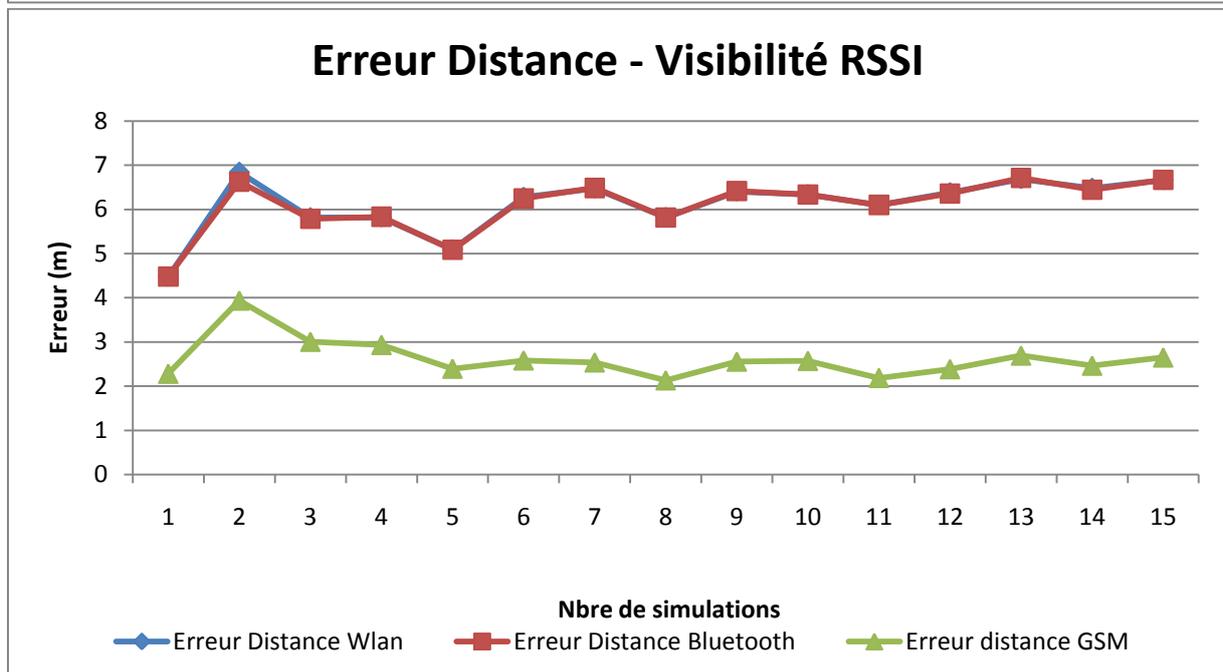
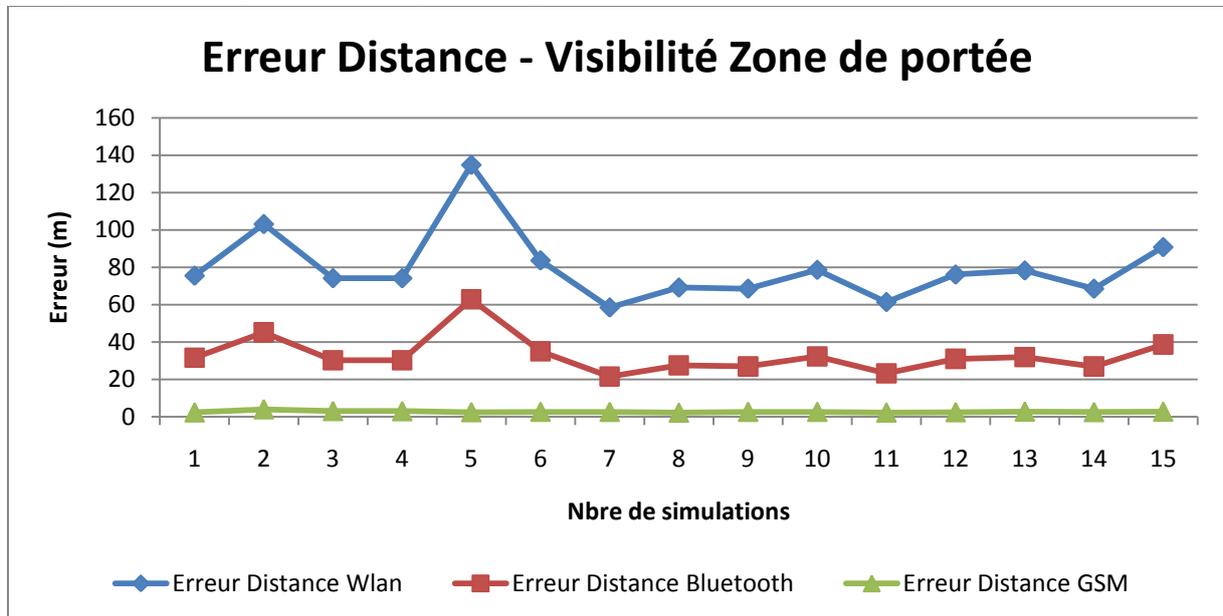
Afin de mettre en avant le lien entre notre simulateur et l'environnement réel de TelecomSudParis, nous décrivons la situations suivante : des étudiants ainsi que des enseignants présents dans le forum lors de la pause café.

- 15% des personnes se trouvent à l'extérieur des bâtiments, lors de cette pause
- 10% des personnes migrent vers la cafétéria.
- 75% des personnes restent dans le forum.

Le forum présente une base de surface 550 m². La densité 2D moyenne lors de la présence de 100 personnes dans cette zone vaut : $100/550 = 0.18$ Eqpts/m². Suivant les études et les analyses précédentes, l'erreur est faible (inférieure à 10m) pour une densité 0.4Eqpts/m². De ce fait, une densité de 0.18 Eqpts/m² semble etre adéquate pour un résultat de positionnement correct.

La présence de 15% de personnes à l'extérieur nous permet de définir le pourcentage d'équipement pouvant acquérir une position géographique grace au système GPS avec une précision de quelques mètres (l'impact de cette précision de la connaissance de la position des équipements est analysée dans la suite de ce chapitre). .

Notre simulateur est basé sur la visibilité. Si un équipement est visible pour un autre, nous effectuons une approximation de la distance entre ces deux équipements, en utilisant les techniques suivantes : la formule de Friis, la zone géographique et la zone de portée. Nous avons décrit les principes de ces méthodes dans les chapitres précédents. Nous avons donc effectué plusieurs simulations, afin d'en déduire les résultats des estimations. La figure 87 nous permet d'analyser l'impact de ces méthodes sur l'erreur de distance.



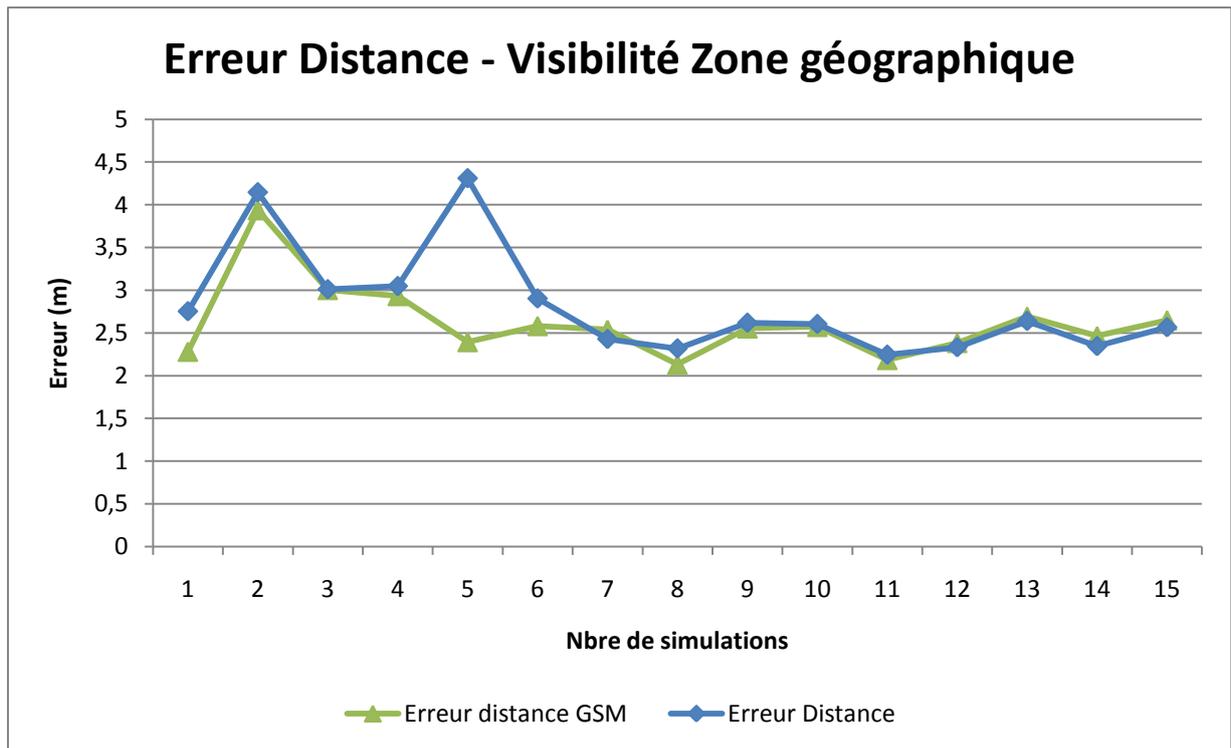
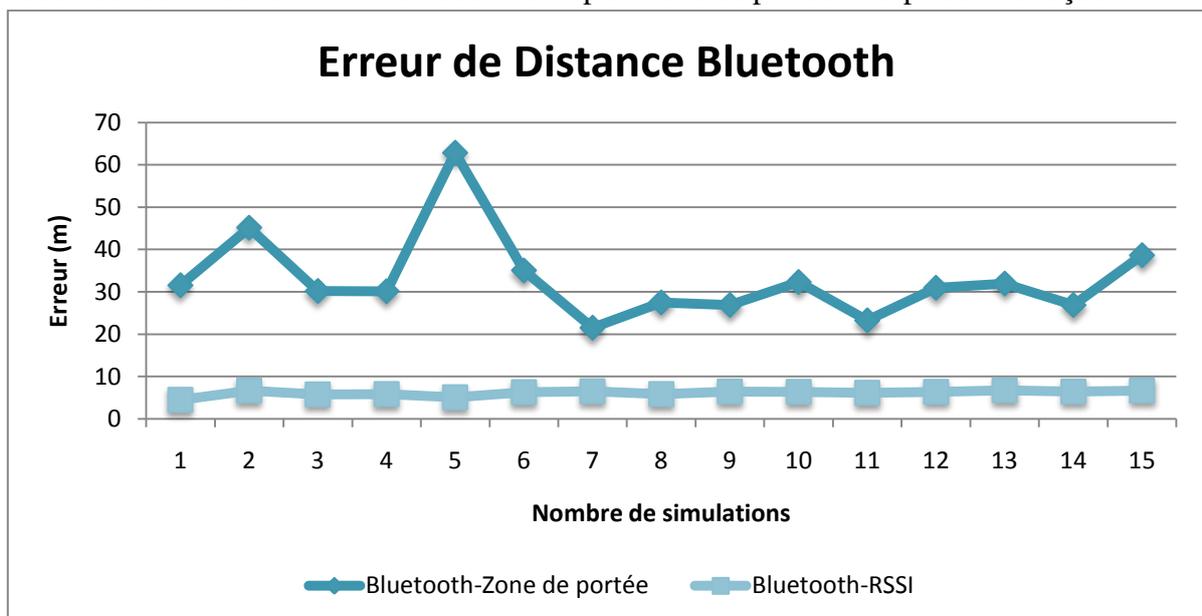


Figure 87 L'erreur moyenne de la distance estimée en fonction du modèle de visibilité

La figure 87 nous indique que l'utilisation du concept de zone de portée nous amène à des erreurs importantes d'estimation de distance supérieure à 20m.

La zone géographique ainsi que la visibilité en utilisant la puissance reçue, nous amènent à des erreurs d'estimations inférieures à 10m.

La figure 88 nous permet de comparer les modèles de visibilité pour les memes technologies. Nous nous sommes restreints aux deux concepts : zone de portée et la puissance reçue.



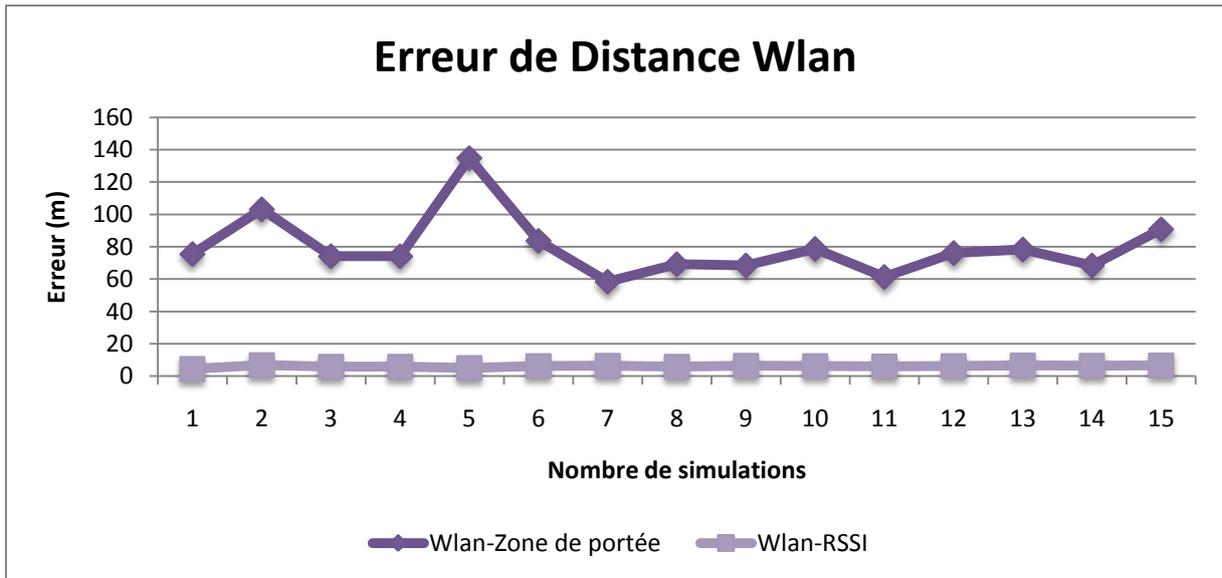


Figure 88 L'erreur moyenne de la distance estimée en fonction de la technologie utilisée

La figure 89 illustre un récapitulatif des résultats précédents.

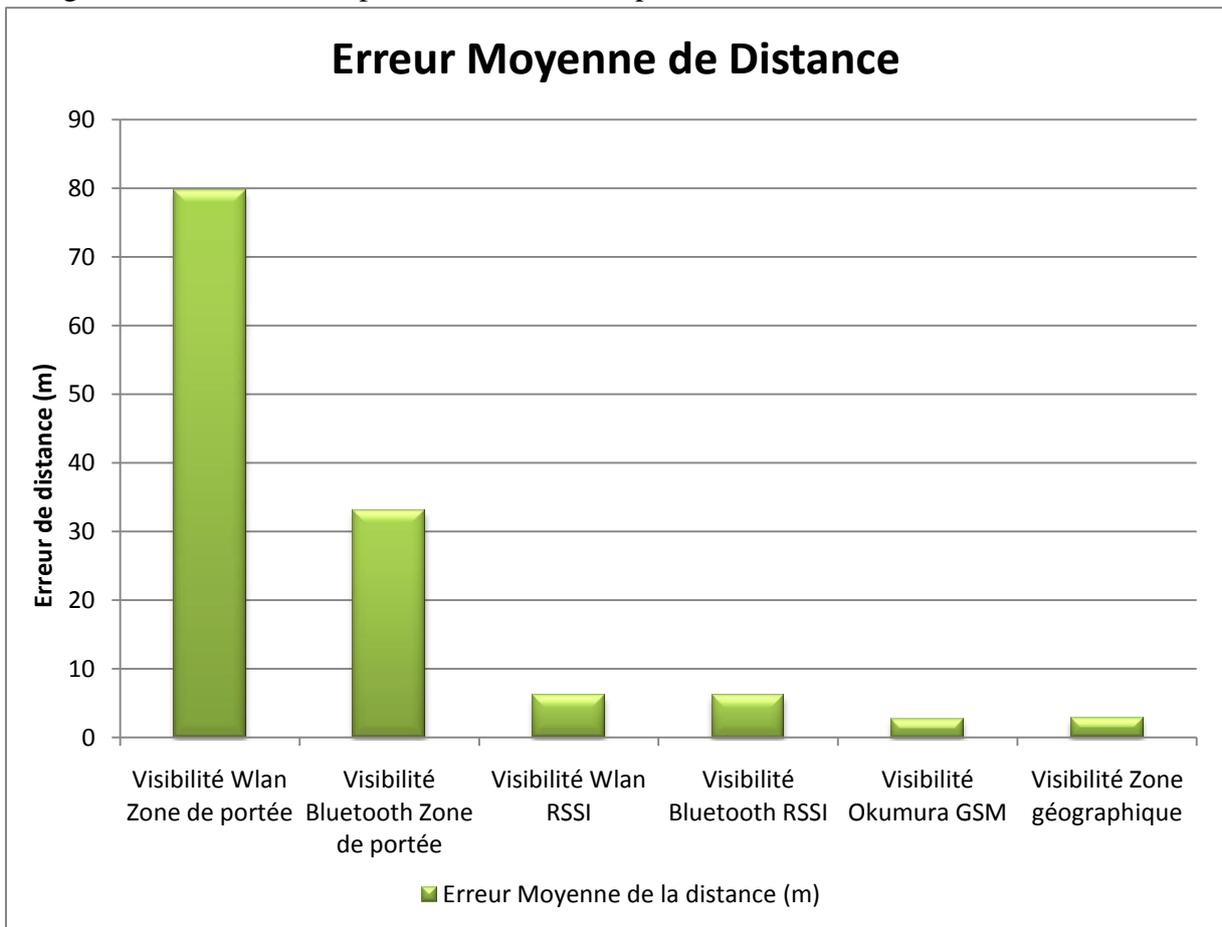


Figure 89 L'erreur moyenne : récapitulatif

7.4 Conclusion

Nous avons présenté au sein de ce chapitre les résultats de plusieurs tests. Des tests de performance, des tests de dégradations techniques, des tests de robustesse ainsi que des tests de capacité nous ont permis de valider le fonctionnement du simulateur.

Dans l'objectif d'analyser l'impact du nombre d'équipements sur les résultats de positionnement, nous avons varié le nombre d'équipements déployés dans l'environnement. L'erreur moyenne est proportionnelle au nombre d'équipements déployés. L'étude de la relation entre la densité et l'erreur s'est imposée, à la suite. Nous avons pu montrer que pour une densité inférieure à 0.01, nous obtenons une erreur supérieure à 10m. Notre système se base sur la propagation d'une position géographique au sein de l'environnement. Nous avons donc étudié l'impact du nombre des équipements avec des informations de positionnement sur le résultat final de positionnement. Les tests présentent des erreurs supérieures à 10m lorsque le pourcentage d'équipements sans information de positionnement dépasse 80% des équipements de l'environnement. Nous nous sommes aussi penchés sur l'étude de l'impact des dimensions de la zone géographique. L'erreur augmente lorsque la zone de déploiement est de dimensions importantes. En effectuant les différents tests, nous avons pu analyser l'impact et le pourcentage d'équipements visibles. Nous avons constaté que le nombre d'équipements visibles n'a pas d'influence directe sur les résultats de positionnement.

Ce chapitre a mis en évidence les critères essentiels à prendre en considération lors de nos simulations suivantes : le nombre d'équipements sans information de positionnement, les dimensions de la zone géographique de déploiement ainsi que le modèle de visibilité.

Chapitre 8

Tests et simulations de scénarios appliqués aux situations réelles

8.1 Introduction

Les simulations permettent de tester à moindre coût les algorithmes développés appliqués à des situations de la vie courante : Telecom & Management SudParis.

Dans le chapitre précédent, nous avons exploités les résultats de simulations avec des paramètres d'entrée variables. Les tests nous ont permis de déterminer les conditions optimales pour les simulations suivantes.

Dans ce présent chapitre nous allons exposer les résultats de simulations effectuées pour d'autres scénarios prédéfinis. Ces scénarios présentent des situations possibles à Telecom & Management SudParis et prennent en compte les caractéristiques réelles de cet environnement : nombre d'équipements, taille de la zone géographique, etc. Nous allons d'abord éclaircir les types de scénarios et leurs caractéristiques. Nous allons, à la suite présenter les résultats et les analyser afin d'en déduire les performances.

8.2 Caractéristiques des scénarios

Dans le paragraphe suivant, nous détaillons le choix des différentes caractéristiques de nos scénarios de simulations.

8.2.1 Caractéristique temporelle des scénarios

Dans un premier temps, nous avons classé les simulations suivant un critère temporel. Le suivi temporel joue un rôle important dans le cadre de simulations de positionnement. Ce suivi se présente sous la forme d'une position antérieure à la position actuelle de l'équipement. Nous effectuons deux types de simulations:

- Des simulations statiques au cours du temps : Ces simulations sont établies pour des scénarios qui ne varient pas au cours du temps. Les équipements sont déployés dans l'environnement géographique et le simulateur estime les positions de tous les équipements. Nous supposons que tous les équipements sont immobiles.

- Des simulations variables au cours du temps : Ces simulations sont lancées pour des scénarios avec des modèles de mobilités implémentés. Les équipements déployés peuvent être immobiles ou mobiles au cours du temps. Le simulateur estime les positions de tous les équipements présents dans l'environnement géographique, mais prend en compte la dernière position de l'équipement principal. Cet équipement principal présente notre utilisateur qui se déplace et qu'on souhaite positionner parmi les autres équipements.

La figure 90 présente ces deux types de simulations avec les critères principaux.

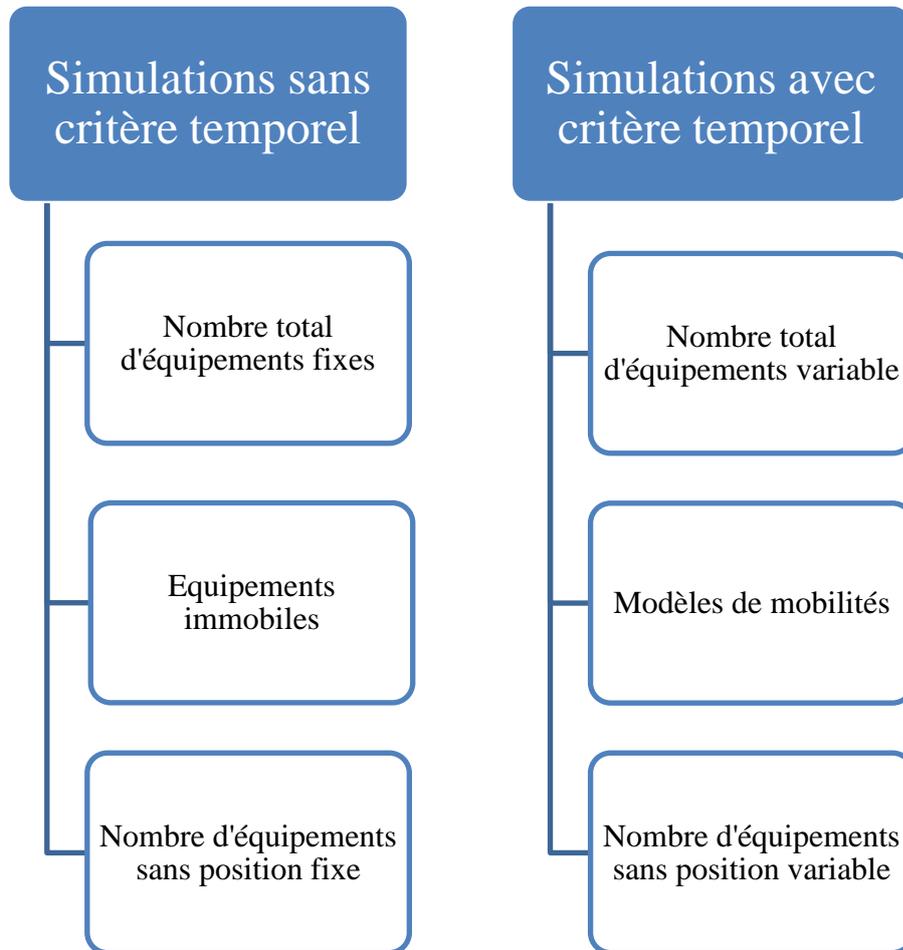


Figure 90 Critère temporel

8.2.2 Caractéristiques géographiques des scénarios

Dans ce paragraphe, nous décrivons les critères géographiques de nos simulations.

Notre environnement géographique de simulation se restreint à Telecom & Management SudParis. Les dimensions de cette zone sont de 140m*110m. 170*170

La figure 91 présente une vue satellite de notre zone géographique.

Cette zone géographique se compose d'environnements intérieurs et d'environnements extérieurs :

L'environnement intérieur se compose de : 5 bâtiments avec des salles de cours, un bâtiment administratif, un forum, un parking sous-terrain et une cantine.

L'environnement extérieur se compose de toutes les zones ouvertes, qui entourent l'environnement extérieur dans la limite des dimensions maximales dont un parking.

Nous remarquons que cette zone géographique alterne les environnements extérieurs et intérieurs. Cette caractéristique permet d'analyser la transparence de notre algorithme lors de changements de types d'environnement. D'autre part, les zones ouvertes présentent différentes caractéristiques. Nous remarquons la présence de zones ouvertes comprises entre les bâtiments. Un équipement présent dans ces zones peut acquérir des données de positionnement grâce au système GPS. Nous supposons que ces positions acquises présentent une précision variable. La précision d'une position GPS dépend de la visibilité des satellites. Dans une zone entourée de bâtiments, cette visibilité peut être réduite.

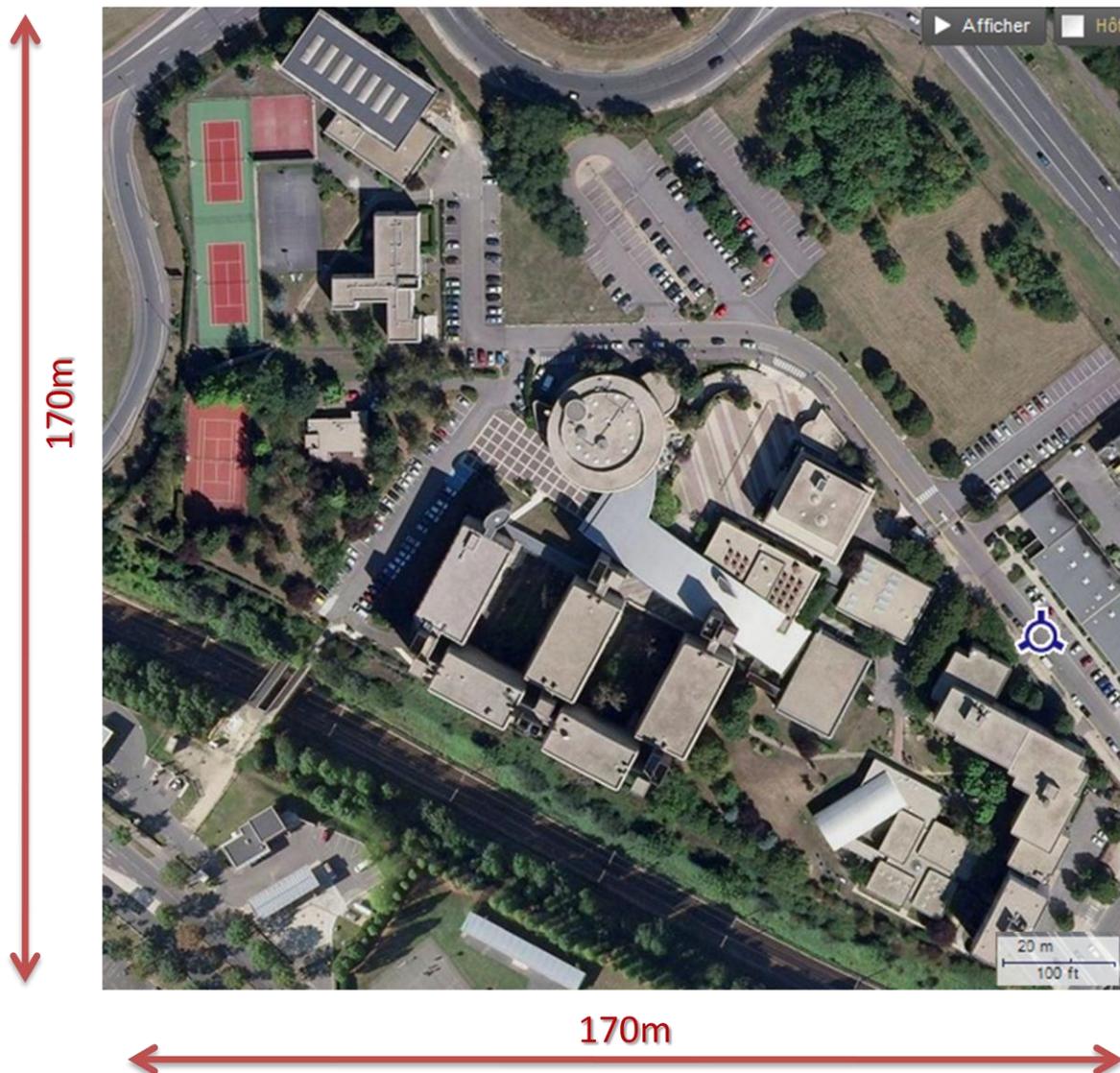


Figure 91 Vue satellite de Telecom & Management SudParis

8.2.3 Caractéristiques réseaux des scénarios

Après avoir détaillée les caractéristiques temporelles et géographiques des scénarios, nous décrivons les différents critères réseaux.

La base de notre algorithme est la présence d'équipements réseaux dans le milieu géographique. Afin de modéliser cette situation dans notre simulateur, nous déployons des équipements réseaux.

Le déploiement de ces équipements va prendre en compte des critères humains et des critères techniques. Les critères humains considèrent le nombre moyen réel de personnes présentes dans l'environnement géographique. Ce nombre va présenter aussi le nombre d'équipements déployés lors de nos simulations. Les critères techniques prennent en compte le pourcentage de chaque technologie employée par les équipements dans l'environnement géographique.

8.2.3.1 Caractéristiques quantitatives des équipements

Le nombre d'équipements déployés dans l'environnement géographique de simulation dépend directement du nombre de personnes présentes sur le campus.

Afin de déterminer ce nombre de personnes, nous avons effectué des recherches statistiques. Pour l'école Telecom SudParis (Source CGE), nous avons obtenus les détails suivants (Année scolaire 2009/2010) :

- 107 professeurs permanents
- 910 étudiants inscrits
- 140 personnels administratifs

Le nombre total de personnes présentes sur le campus est estimé à 1157 personnes. Dans nos simulations, nous prenons en compte les personnes susceptibles d'être présente sur le campus de manière permanente. De ce fait, le nombre de vacataires, de doctorants ou de visiteurs externes n'est pas mentionné dans nos statistiques.

Comme évoqué précédemment, le nombre de personnes présentes sur le campus, reflètent le nombre d'équipements réseaux déployés. Afin de se rapprocher d'une situation réelle, le nombre d'équipements pris en compte s'élève aux environs de 50% du nombre total de personnes. Cette différence entre le nombre de personnes et le nombre d'équipements est due aux différents critères sociaux dont ne peut faire abstraction : les congés, les arrêts maladie, les absences, les stages, etc. Le nombre d'équipements déployés est d'environ 550 équipements.

8.2.3.2 Caractéristiques technologiques des équipements

L'objectif de ce paragraphe est l'étude de la répartition des fonctionnalités parmi les différents équipements mobiles. Dans le contexte de nos travaux, le critère essentiel pour nos simulations reste le type de réseaux accessibles pour les utilisateurs, via leurs équipements. La fonctionnalité d'un équipement mobile nous indique la technologie accessible. Parmi les 550 équipements mobiles, nous avons des téléphones mobiles, des Smartphones, des Iphones, etc. Ces équipements peuvent avoir différentes fonctionnalités WiFi, Bluetooth, Infrarouge, GSM ou GPS.

Nous nous sommes intéressés à une étude, qui porte sur les divers usages liés aux équipements mobiles. Cette étude est une étude statistique de la consommation du média mobile réalisée en 2010, par SFR en partenariat avec GroupM. Outre les résultats classiques concernant l'évolution des équipements mobiles, cette étude décrit la répartition des différentes fonctionnalités des équipements au sein de la société française, pour 899 individus âgés de 16 à 65 ans.

Comme mentionné précédemment, les équipements mobiles peuvent être classés comme suit : des Smartphones, des téléphones, des GPS, etc. Selon le type d'équipement mobile utilisé, nous pouvons estimer les fonctionnalités accessibles pour l'utilisateur. Un Smartphone possède des fonctionnalités WiFi, GSM et Bluetooth or un téléphone mobile ne possède pas ces possibilités. Ce dernier n'est pas en mesure d'accéder à la fonctionnalité WiFi. Un Smartphone peut se connecter à un réseau WiFi et transmettre des données via cette connexion à un autre équipement du réseau.

Dans l'objectif d'effectuer des simulations représentatives des situations réelles, nous prenons en compte les résultats de ces études pour déterminer le pourcentage de chaque type d'équipements présents dans notre environnement de simulation. Le type d'équipement est lié à la fonctionnalité de celui-ci.

Suivant l'étude décrite ci-dessus, 95% des français possède un téléphone mobile dont l'usage est quotidien. La figure 92 présente les pourcentages des fonctionnalités des téléphones mobiles. Elle met en évidence un pourcentage important d'équipement possédant la fonctionnalité Bluetooth et Internet Mobile. Autre constat, la fonctionnalité WiFi atteint 26% et la fonctionnalité GPS atteint 18%.

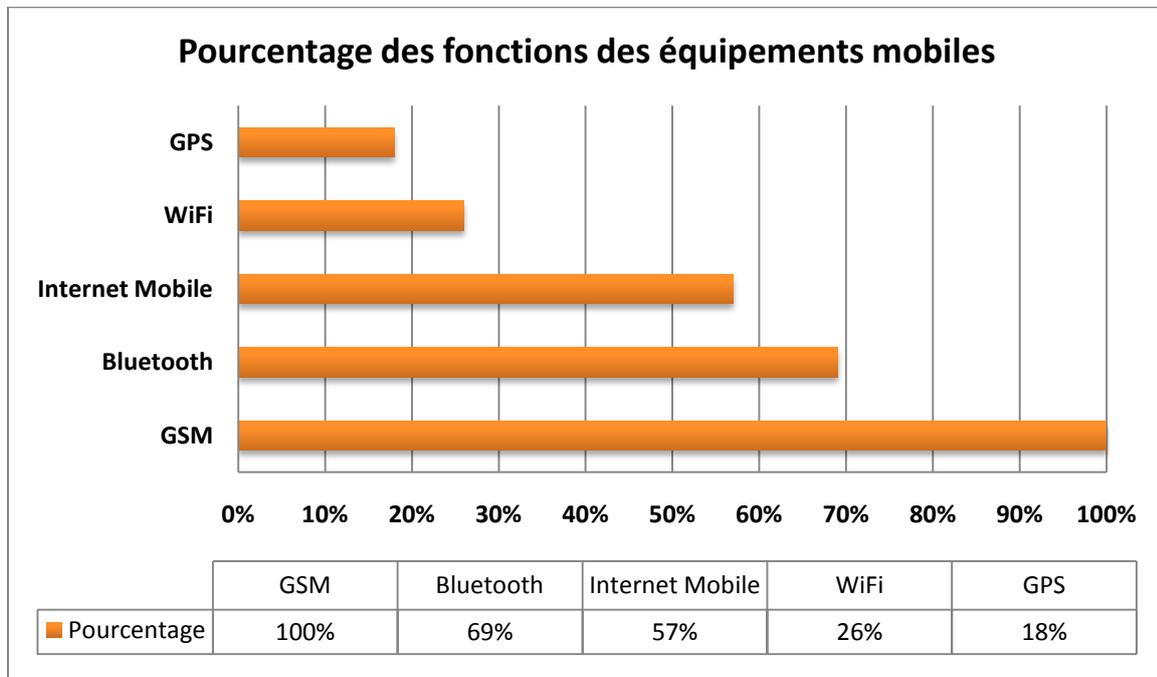


Figure 92 Pourcentage des fonctions des équipements mobiles

Les données indiquées ci-dessus démontrent l'évolution des fonctionnalités des équipements en 2010. Les équipements deviennent de plus en plus apte à jongler entre les différentes technologies (fonctionnalités) afin d'obtenir l'information recherchée par l'individu. Un équipement mobile possédant la fonctionnalité WiFi et la fonctionnalité Bluetooth permet à son utilisateur d'avoir un libre choix de la fonctionnalité la plus performante et la moins coûteuse à l'instant de sa connexion.

Au-delà de l'étude des fonctionnalités, le type d'équipement utilisé présente une information supplémentaire. La figure 93 illustre les pourcentages des différents équipements mobiles. Nous observons un pourcentage égal à 10% de Smartphones ainsi qu'un pourcentage égal à 90% d'équipements mobiles autres.

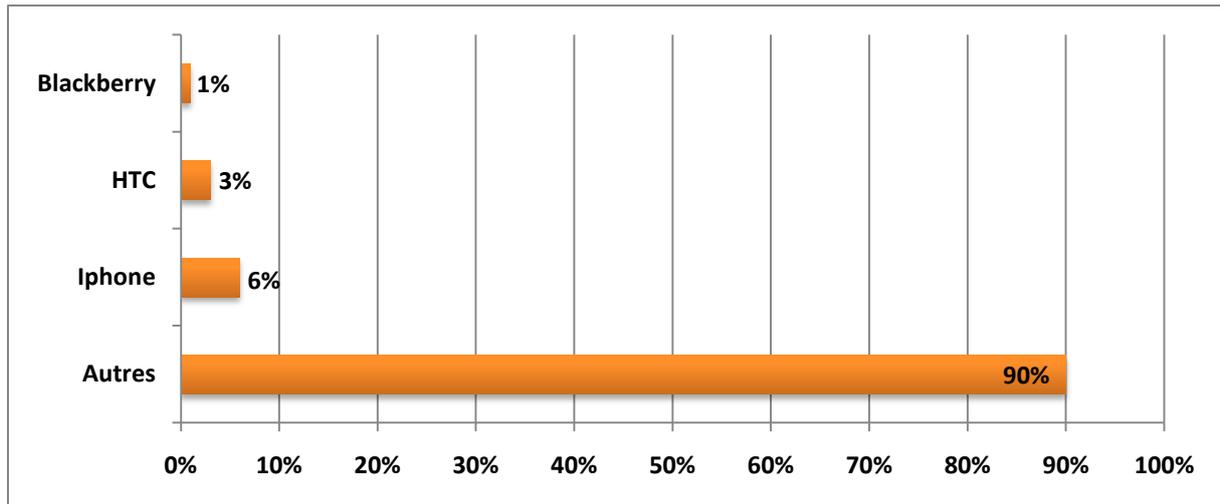


Figure 93 Pourcentage des types d'équipements mobiles

Les Smartphones possèdent les fonctionnalités les plus complètes. Nous pouvons considérer que ces derniers peuvent accéder à toutes les fonctionnalités citées ci-dessus : WiFi, Bluetooth, GSM et GPS. Parmi les 90% d'autres équipements mobiles, nous devons prendre en considération les équipements mobiles avec au moins une fonctionnalité différente du GSM. Nous estimons le pourcentage d'équipements possédant au moins une fonctionnalité autre que le GSM à 70%.

Dans le cadre de notre environnement de simulation, nous avons plusieurs équipements mobiles avec différentes fonctionnalités. Les équipements présentant différentes fonctionnalités simultanément sont considérés comme des équipements relais, comme nous pouvons l'apercevoir sur la figure 94.

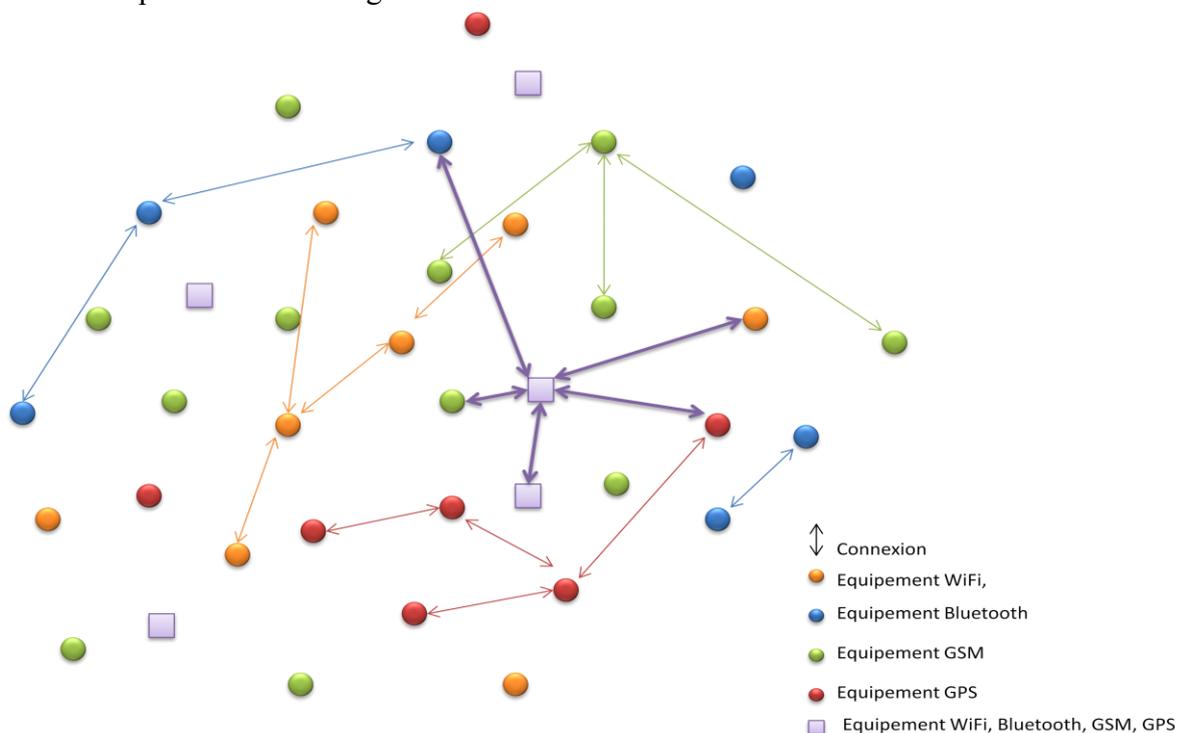


Figure 94 Equipements, fonctionnalités et connexions

Cette figure schématise simplement le lien entre les fonctionnalités et les échanges possibles ou connexions entre les équipements. Des équipements avec une même fonctionnalité peuvent

effectuer des échanges entre eux. Les Smartphones avec les fonctionnalités WiFi, GSM, Bluetooth et GPS peuvent échanger avec tous les autres équipements, via les différentes technologies. Cette caractéristique nous permet de les définir comme équipement relais. Les échanges entre équipements peuvent se manifester sous différentes formes. Dans la suite, nous nous intéressons aux formes d'échanges possibles, présentés sur la figure 95.

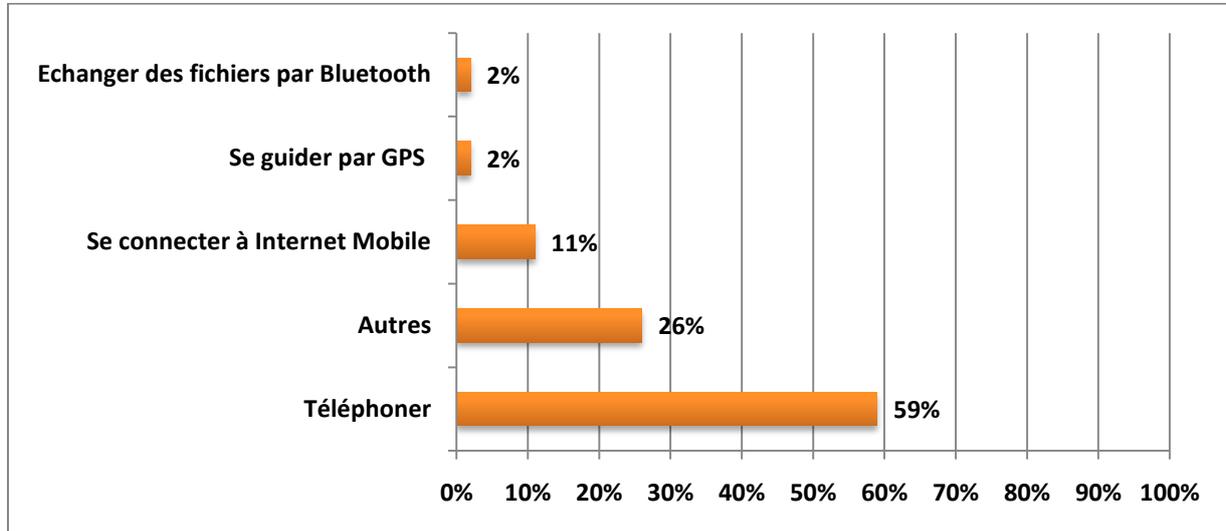


Figure 95 Utilisation quotidienne

La figure 96 illustre les utilisations quotidiennes d'un équipement mobile telles que le guidage par GPS ou l'échange de fichier par Bluetooth. L'utilisation la plus importante reste l'échange téléphonique.

Après avoir analysé les fonctionnalités, les types d'équipements ainsi que les utilisations quotidiennes, nous faisons un récapitulatif.

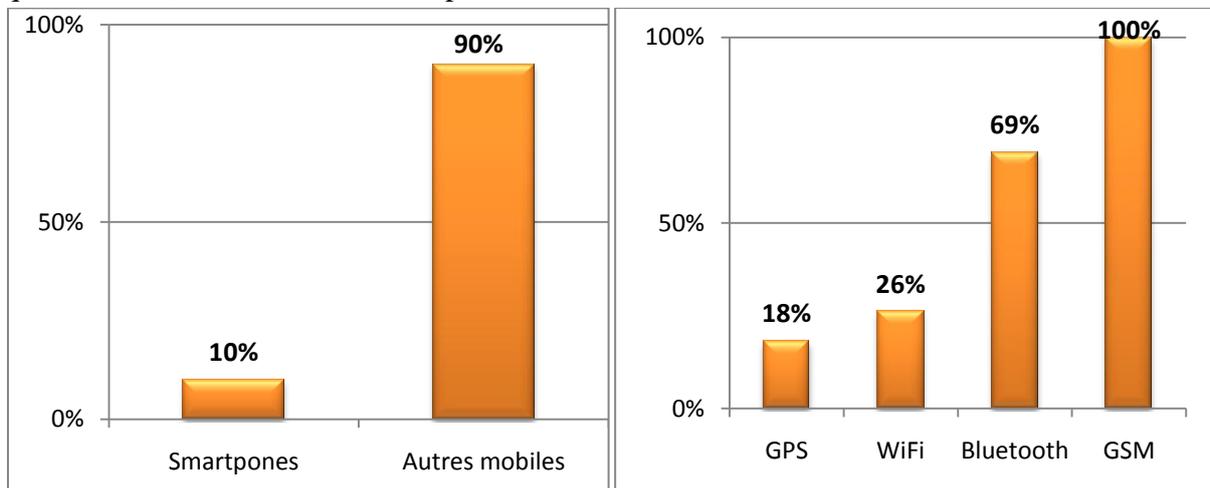


Figure 96 Données récapitulatives

Comme nous l'avons mentionné au début de ce paragraphe, les études statistiques ci-dessus sont effectuées afin de déterminer le nombre d'équipements déployés dans notre environnement pour chaque technologie. Les pourcentages présentés dans la figure 96, nous permettent d'obtenir les résultats suivants pour un nombre total d'équipements égal à 550 équipements :

- Equipements déployés : 550

Suivant cette étude, 24% des jeunes âgées de moins de 24 ans possède des Smartphones. Telecom SudParis est une école d'ingénieurs dans laquelle la moyenne d'âge est aux alentours de 23 ans. De ce fait, le pourcentage de possesseurs de Smartphones est ajusté à nos besoins et s'élève à 20% d'équipements. Les calculs effectués sont détaillés dans le tableau ci dessous :

	Pourcentage	Pondération
Pourcentage de possesseurs de Smartphones	10%	0,3
Pourcentage de possesseurs de Smartphones (< 24 ans)	24%	0,7
Total		20%

Les pondérations sont appliquées suivant le pourcentage d'individus âgés de moins de 24 ans. Nous exposons les résultats obtenus, dans le tableau ci-dessous.

Non étudiants : âge > 24 ans	21% ~ 0.3
Etudiants : âge < 24 ans	79% ~ 0.7

Nous reprenons, donc les pourcentages des différents équipements déployés à travers les deux tableaux suivants :

Type d'équipements	Pourcentage	Nombre représentatif
Smartphones	20%	110
Autres mobiles	80%	440

Fonctionnalité	Pourcentage total	Pourcentage de fonctionnalité unique	Nombre représentatif
GPS	18%	14%	60
WiFi	26%	22%	95
Bluetooth	69%	64%	285

Les simulations effectuées par la suite considèrent les nombres suivants :

- Equipements avec les fonctionnalités GPS, WiFi, GSM et Bluetooth (Smartphones) : 110
- Equipements avec uniquement la fonctionnalité GPS : 60
- Equipements avec uniquement la fonctionnalité WiFi : 95
- Equipements avec uniquement la fonctionnalité Bluetooth : 285

Suite aux études concernant l'utilisation d'équipements mobiles, nous devons prendre en considération la présence d'équipements réseaux fixes présents dans l'établissement, tels que les points d'accès Wifi. Nous avons constaté la présence de points d'accès au sein de Telecom SudParis dans différents bâtiments. Ces équipements sont fixes. Ils ne peuvent évoluer au cours du temps. Afin de retranscrire cette situation réelle, nous nous sommes fixés, pour nos simulations, un nombre d'équipements immobiles égal à 5.

8.3 Type de scénarios

Suite à l'étude des différentes caractéristiques temporelles, techniques et quantitatives, nous décrivons ci-dessous, les types de scénarios dont nous allons exposer les résultats dans les paragraphes suivants.

8.3.1 Scénarios statiques

Dans ce paragraphe, nous décrivons les scénarios sans information temporelle.

8.3.1.1 Pause café

Le scénario « pause café » prend en compte la sortie des étudiants et des permanents pour une pause café aux environs de 10h du matin. Ce scénario suppose la présence d'un nombre important de personnes dans une zone géographique restreinte : le forum. Le nombre de personnes présente le nombre d'équipements.

Nous avons établi de ce fait, les statistiques suivantes :

- Equipements dans le forum : 60% - 330 équipements

Fonctionnalité	Pourcentage de fonctionnalité unique	Nombre représentatif
GPS	14%	36
WiFi	22%	59
Bluetooth	64%	169
Smartphones	20%	66

- Equipements dans la cafétéria : 10% - 55 équipements

Fonctionnalité	Pourcentage de fonctionnalité unique	Nombre représentatif
GPS	14%	6
WiFi	22%	9
Bluetooth	64%	29
Smartphones	20%	11

- Equipements dans les autres bâtiments : 15% - 138 équipements

Fonctionnalité	Pourcentage de fonctionnalité unique	Nombre représentatif
GPS	14%	15
WiFi	22%	24
Bluetooth	64%	71
Smartphones	20%	28

- Equipements aux alentours des bâtiments : 5% - 27 équipements

Fonctionnalité	Pourcentage de fonctionnalité unique	Nombre représentatif
GPS	14%	3

WiFi	22%	4
Bluetooth	64%	14
Smartphones	20%	6

- Nombre total d'équipements : 550 équipements.

Dans un premier temps, nous supposons que les équipements qui peuvent acquérir une position géographique, possèdent une erreur de position de 0m. Dans un second temps, nous prenons en compte une erreur de précision qui est appliquée aux coordonnées acquises par les différents équipements. Lorsque l'équipement est situé dans un environnement extérieur, nous appliquons une erreur de position de 1m. Lorsque l'équipement est situé dans un environnement intérieur et peut acquérir des informations de positionnement, nous appliquons une erreur de position de 2m.

8.3.1.2 Journée habituelle vers 11h

Le scénario « journée habituelle » prend en compte la présence des étudiants et des permanents dans des salles de cours aux environs de 11h du matin. Ce scénario suppose la présence d'un nombre de personnes réparties dans des zones géographiques différentes. Le nombre de personnes présente le nombre d'équipements.

Nous avons établi de ce fait, les statistiques suivantes :

- Equipements dans le forum : 10% - 55 équipements

Fonctionnalité	Pourcentage de fonctionnalité unique	Nombre représentatif
GPS	14%	6
WiFi	22%	9
Bluetooth	64%	29
Smartphones	20%	11

- Equipements dans la cafétéria : 5% - 28 équipements

Fonctionnalité	Pourcentage de fonctionnalité unique	Nombre représentatif
GPS	14%	3
WiFi	22%	4
Bluetooth	64%	15
Smartphones	20%	6

- Equipements dans les autres bâtiments : 70% - 385 équipements

Fonctionnalité	Pourcentage de fonctionnalité unique	Nombre représentatif
GPS	14%	43
WiFi	22%	67
Bluetooth	64%	198
Smartphones	20%	77

- Equipements aux alentours des bâtiments : 15% - 82 équipements

Fonctionnalité	Pourcentage de fonctionnalité unique	Nombre représentatif
GPS	14%	9
WiFi	22%	14
Bluetooth	64%	42
Smartphones	20%	17

- Nombre total d'équipements : 550 équipements.

Comme pour le premier type de scénario, dans un premier temps, nous supposons que les équipements qui peuvent acquérir une position géographique, possèdent une erreur de position de 0m. Dans un second temps, nous prenons en compte une erreur de précision qui est appliquée aux coordonnées acquises par les différents équipements. Lorsque l'équipement est situé dans un environnement extérieur, nous appliquons une erreur de position de 1m. Lorsque l'équipement est situé dans un environnement intérieur et peut acquérir des informations de positionnement, nous appliquons une erreur de position de 2m.

Nous prenons en compte, aussi dans une première phase que tous les équipements ne sont pas éteints. Dans une deuxième phase, nous prenons en compte, l'extinction des équipements mobiles lorsque les étudiantes ou les permanentes sont en cours ou en réunions. Nous estimons ce pourcentage à 50% du nombre total d'équipements dans les bâtiments. Ce pourcentage présente donc 225 équipements.

8.3.2 Scénarios variables

Dans ce paragraphe, nous décrivons les scénarios avec information temporelle.

8.3.2.1 Arrivée d'un professeur sur le campus

Le scénario « Arrivée d'un professeur sur le campus » prend en compte l'arrivée d'un professeur sur le campus vers 08h du matin avec son véhicule. Ce scénario suppose que le professeur parvienne au parking, pour ensuite descendre de son véhicule et se déplacer vers le forum. Après le passage dans le forum, le professeur se déplace afin de rejoindre l'amphithéâtre pour donner un cours aux étudiants. Le nombre de personnes présente le nombre d'équipements.

Nous avons établis de ce fait, les statistiques suivantes :

- Equipements dans le forum : 60% - 330 équipements
- Equipements dans la cafétéria : 10% - 55 équipements
- Equipements dans les autres bâtiments : 25% - 138 équipements
- Equipements aux alentours des bâtiments : 5% - 27 équipements
- Nombre total d'équipements : 550 équipements.

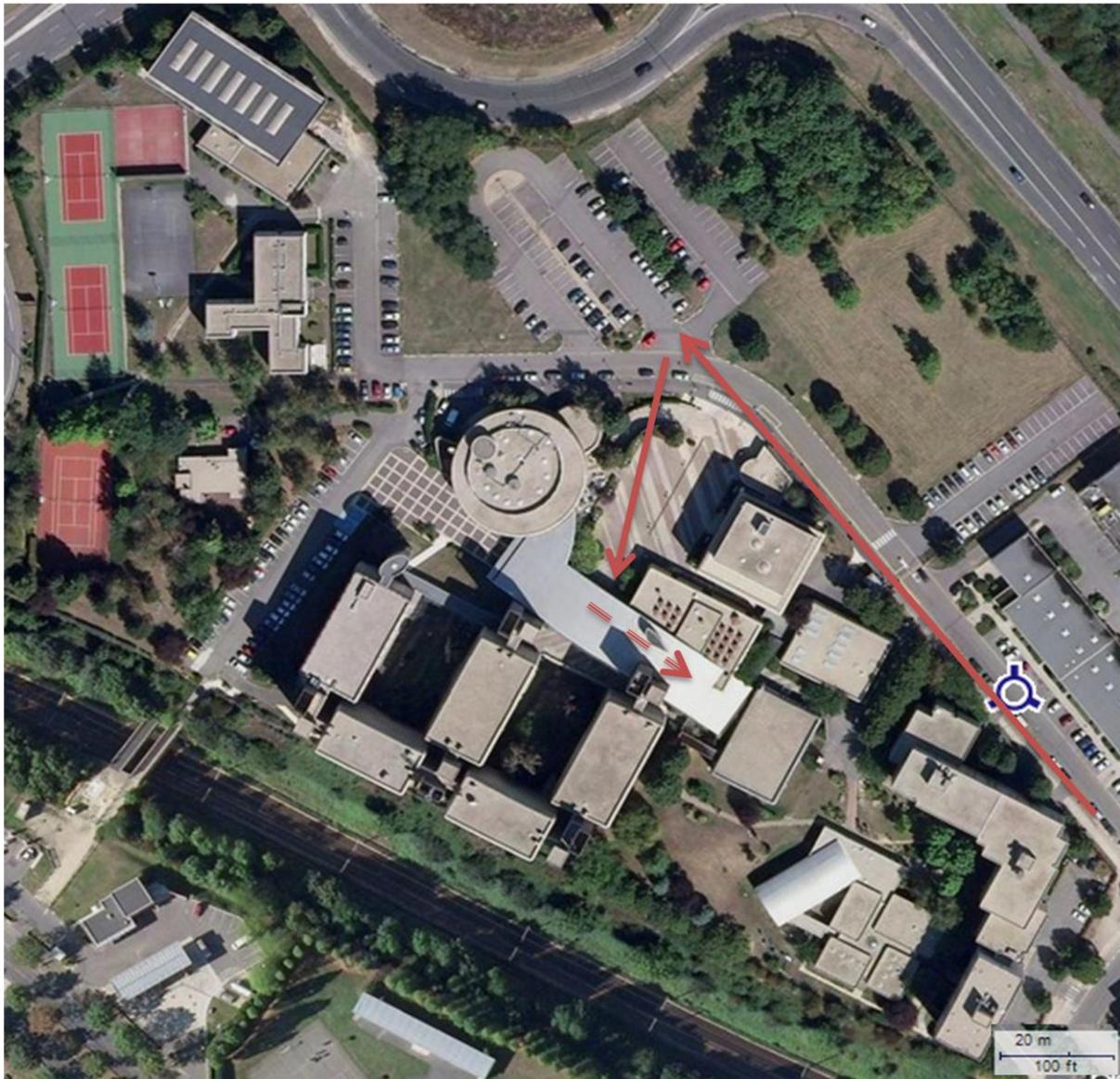


Figure 97 Trajectoire du professeur

8.3.2.2 Arrivée d'un étudiant en cours

Le scénario « Arrivée d'un étudiant en cours » prend en compte l'arrivée d'un étudiant sur le campus vers 07h45 du matin à pieds. Ce scénario suppose que l'étudiant effectue sa trajectoire à pieds de la Maisel (Maison des élèves) au forum, pour ensuite rentrer dans le forum et se diriger vers la salle de TP. Après le passage dans le forum, l'étudiant se déplace afin de rejoindre la salle de TP, située dans le bâtiment A au troisième étage. Pour y parvenir, l'étudiant emprunte des escaliers et monte trois étages.

Le nombre de personnes présente le nombre d'équipements.

Nous avons établis de ce fait, les statistiques suivantes :

- Equipements dans le forum : 60% - 330 équipements
- Equipements dans la cafétéria : 10% - 55 équipements
- Equipements dans les autres bâtiments : 25% - 138 équipements
- Equipements aux alentours des bâtiments : 5% - 27 équipements

- Nombre total d'équipements : 550 équipements.

Nous remarquons que les pourcentages pris en compte dans ce scénario sont les mêmes que dans le cas précédent. En effet, la différence se situe au niveau de la trajectoire effectuée par les deux personnages.

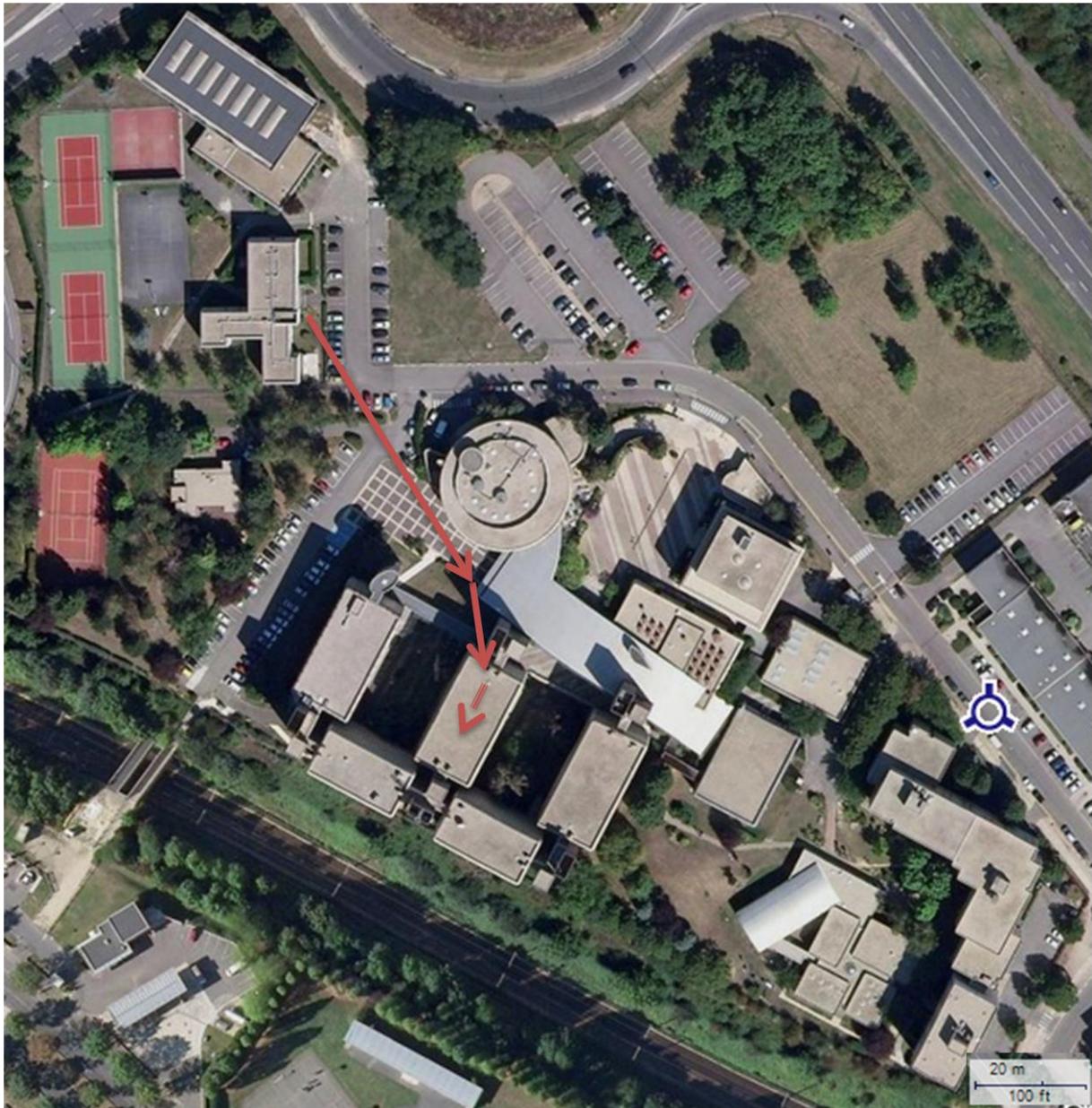


Figure 98 Trajectoire de l'étudiant

8.4 Résultats de simulations

Dans un premier temps, nous avons développé un environnement géographique et un environnement réseau sous VRML.

Le milieu géographique représente Télécom SudParis et ses environs (bâtiments et routes).

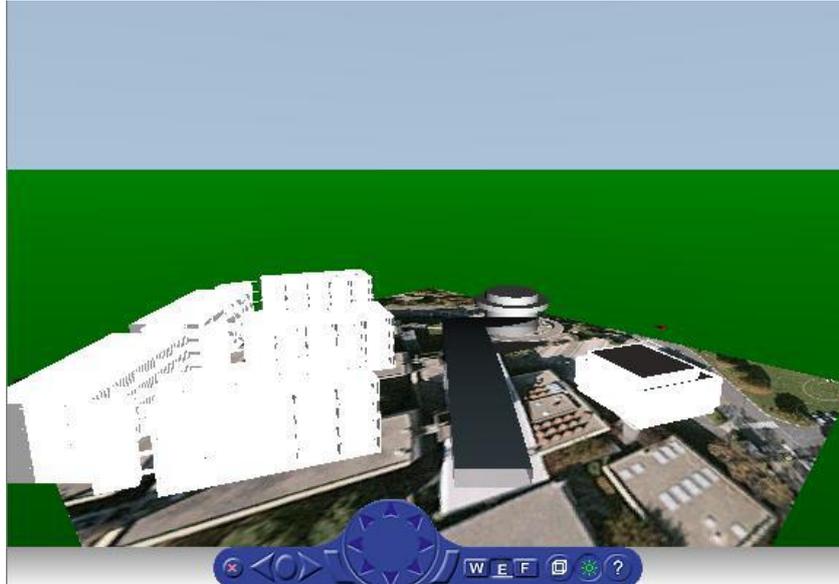


Figure 99 Représentation géographique

La figure 99 représente le milieu géographique.

L'environnement réseau représente un ensemble d'équipements présents dans un milieu hétérogène. La figure 100 montre un déploiement aléatoire des équipements. Chaque couleur représente une technologie bien précise. (Vert = GSM, Jaune = WIFI, Rouge = Bluetooth).

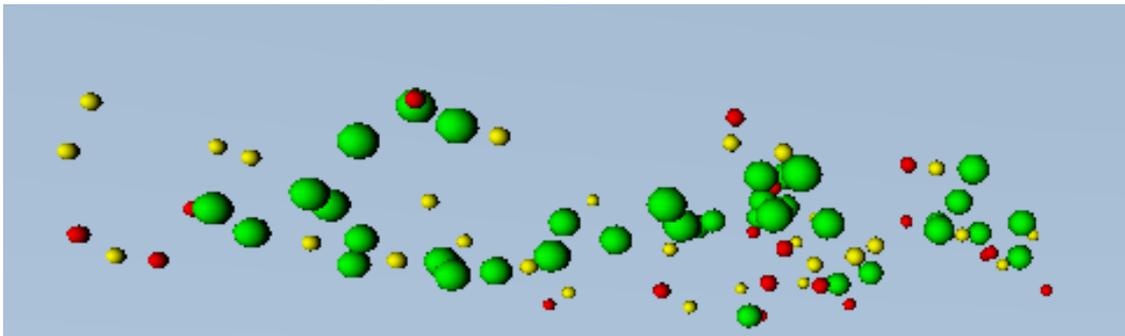


Figure 100 Equipements mobiles

La figure 101 présente le résultat de l'association de ces deux environnements.



Figure 101 Modélisation Telecom et Management SudParis

Le déplacement d'un utilisateur est modélisé par un robot, qui change position en adéquation avec le modèle de mobilité appliqué. Lors du lancement du simulateur, plusieurs fenêtres s'ouvrent simultanément. Nous exposons les différentes vues dans ce qui suit.

La figure 102 schématise le robot devant la cafétéria.

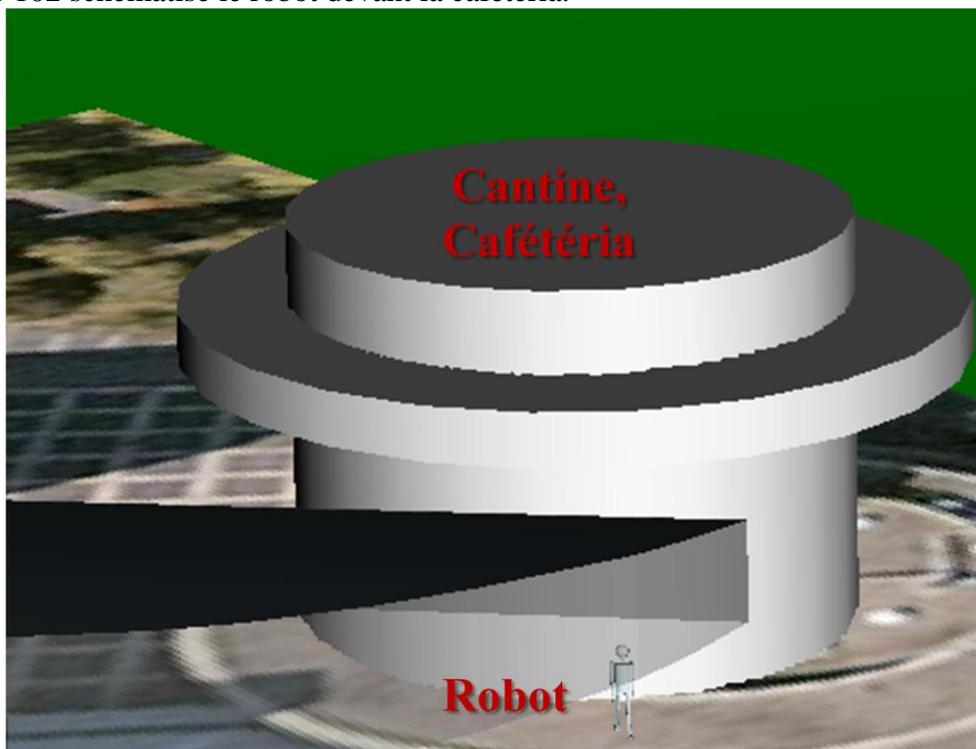


Figure 102 Modélisation de la cafétéria

Le simulateur nous permet de disposer d'une première vue globale de l'environnement, telle qu'on peut l'apercevoir sur la figure 103.

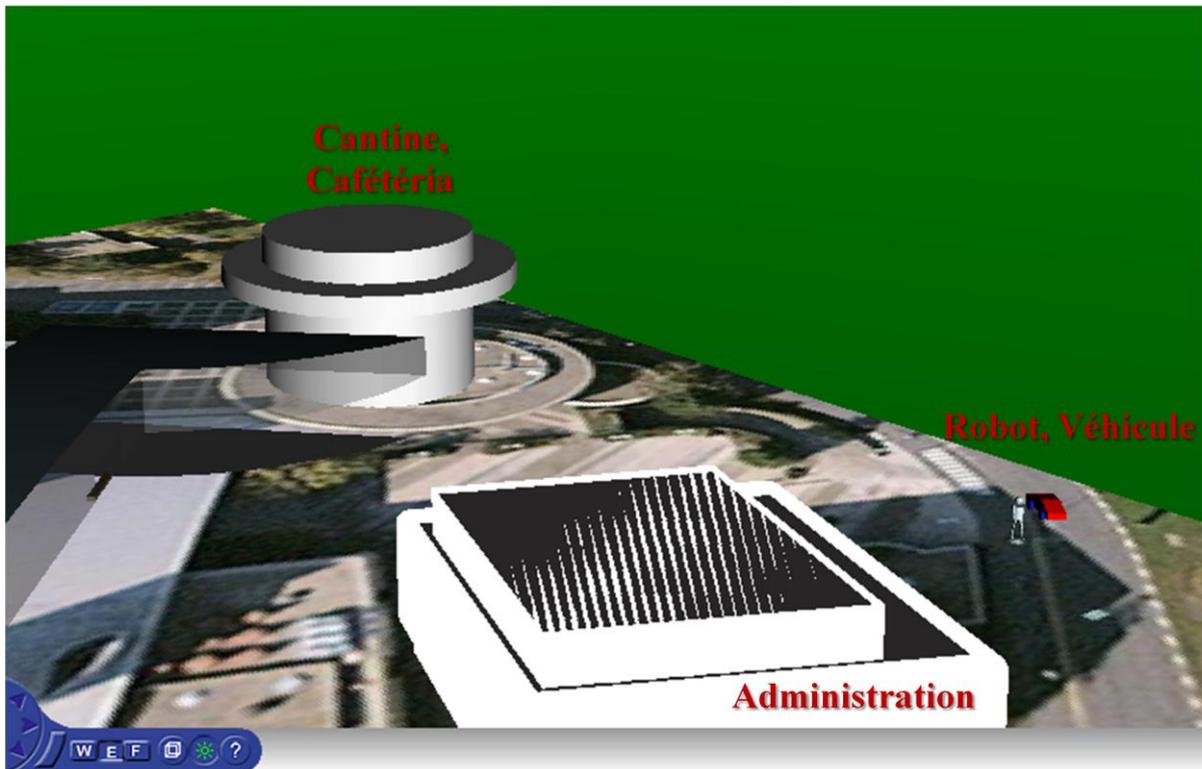


Figure 103 Modélisation de l'entrée d'un robot avec un véhicule dans le campus
Une deuxième fenêtre nous montre les statistiques acquises lors du déplacement de l'utilisateur (Figure 104).



Figure 104 Statistiques des équipements

Cette fenêtre illustrée par la figure 104 est appuyée par une troisième fenêtre, qui visualise une vue détaillée du déplacement de l'utilisateur : angle de vue rattaché au robot.

La simulation graphique de l'environnement géographique et de l'environnement réseau est accompagnée de résultats numériques et de modèles géographiques. Nous détaillons les résultats obtenus dans la suite du chapitre.

8.4.1 Scénarios statiques

Dans ce paragraphe, nous exposons les résultats pour les scénarios statiques. Les résultats sont présentés par zone géographique restreinte.

8.4.1.1 Pause café

Dans un premier temps, nous nous déplaçons dans le forum de dimensions 40m*10m. Nous rappelons les équipements déployés dans l'environnement :

Fonctionnalité	Nombre représentatif
GPS	36
WiFi	59
Bluetooth	169
Smartphones	66

Tableau 18 Nombre d'équipements

Le nombre total d'équipements s'élève à 330 équipements. Les équipements GPS ainsi que les équipements Smartphones sont considérés dans un premier temps comme des équipements pouvant acquérir des informations de positionnement.

Le pourcentage d'équipement sans aucune information de positionnement est égal à 69% des équipements déployés, lors de nos simulations.

La figure 105 nous montre le modèle géographique obtenu avec les positions géographiques réelles des équipements.

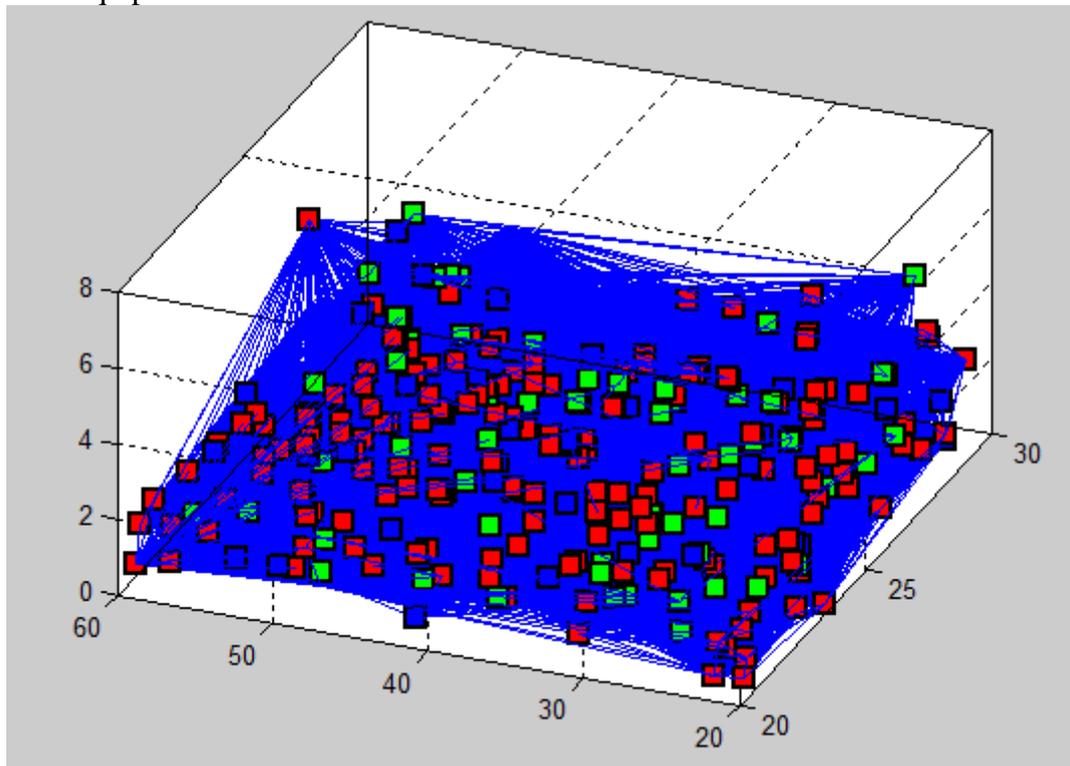


Figure 105 Modélisation réelle des liens géographiques

Les équipements de chaque technologie sont caractérisés par des couleurs comme suit :

Fonctionnalité	Couleur
GPS	Bleu

WiFi	Vert
Bluetooth	Rouge

Tableau 19 Couleur des équipements

La figure 106 présente l'erreur moyenne obtenue pour chaque équipement. Notre simulateur calcul la position géographique de chaque équipement du réseau. Les erreurs moyennes sont inférieures à 30m pour tous les équipements. Nous pouvons constater aussi des erreurs moyennes nulles. Celles-ci correspondent aux équipements avec des informations de positionnement initiales.

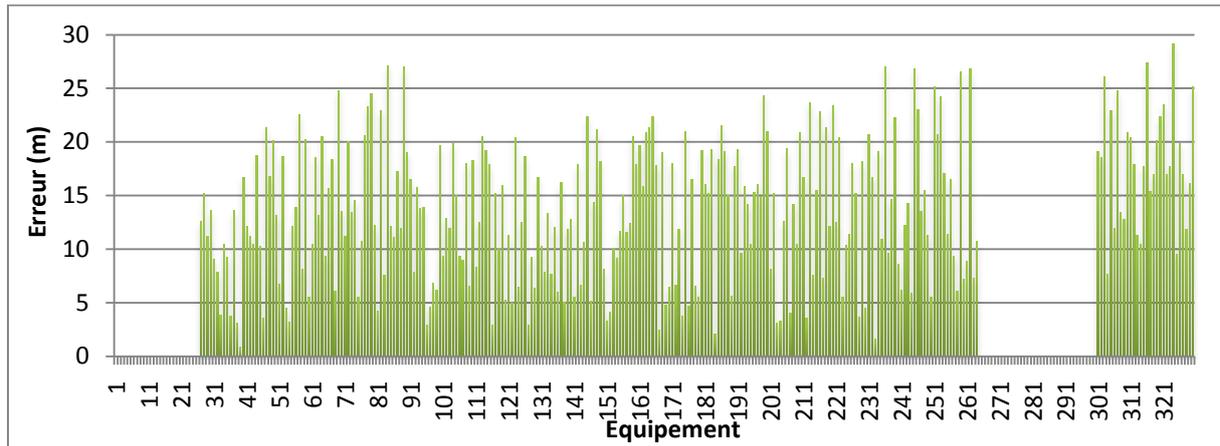


Figure 106 L'erreur moyenne

La figure 107 permet d'avoir une vision plus détaillée de l'erreur moyenne en fonction du pourcentage des équipements déployés.

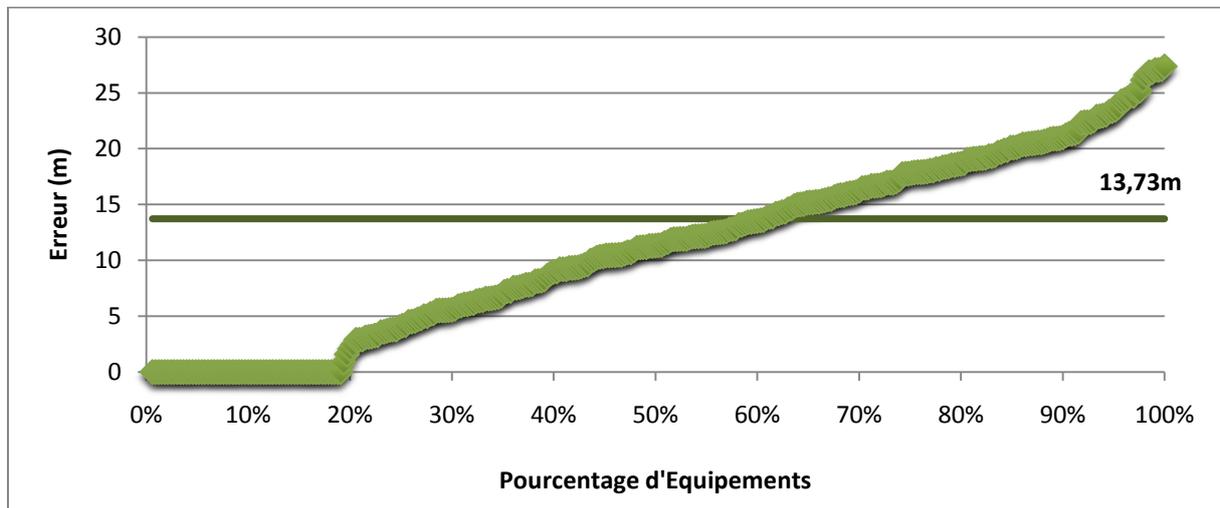


Figure 107 L'erreur en fonction du pourcentage des équipements

L'erreur moyenne s'élève à 13,73m. La figure 107 nous montre que plus de 60% des équipements sont positionnés avec une erreur inférieure à la moyenne. Nous pouvons aussi vérifier que 50% des équipements sont positionnés avec une erreur inférieure à 10m.

Nous nous intéressons dans la suite aux erreurs des distances relatives entre équipements. La figure 108 présente ces distances relatives. Les distances relatives estimées entre équipements sont différentes des distances relatives réelles. Les distances relatives estimées peuvent

atteindre des valeurs allant jusqu'à 0m. Les distances relatives réelles sont comprises entre 10m et 20m environ. Pour 50 équipements, ces distances relatives varient entre 5m et 10m. Pour environ 160 équipements, ces distances varient entre 10m et 20m L'erreur d'estimation des distances relatives est très faible dans ce dernier cas. Dans les autres cas, les distances relatives sont nulles.

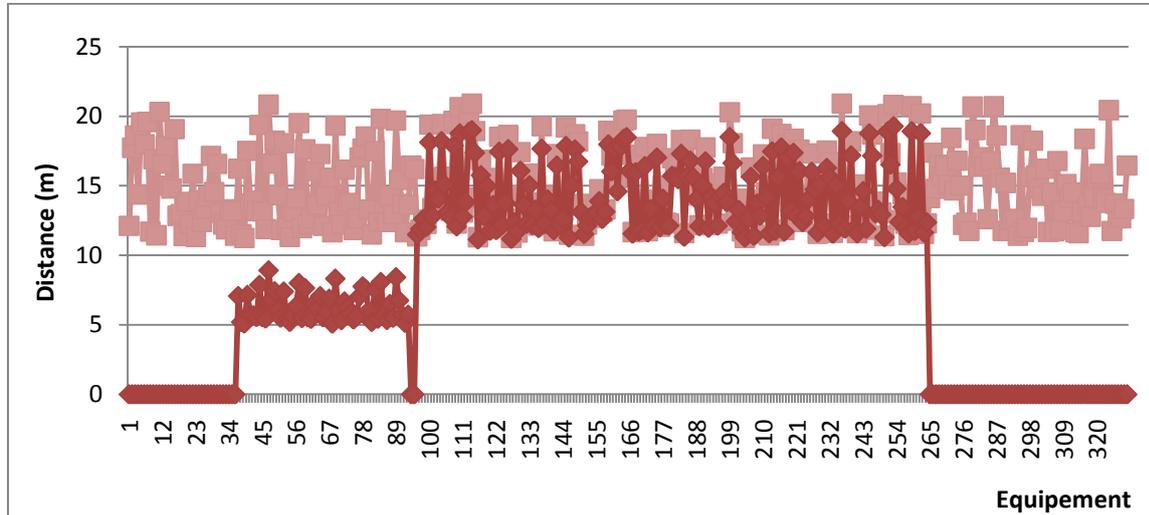
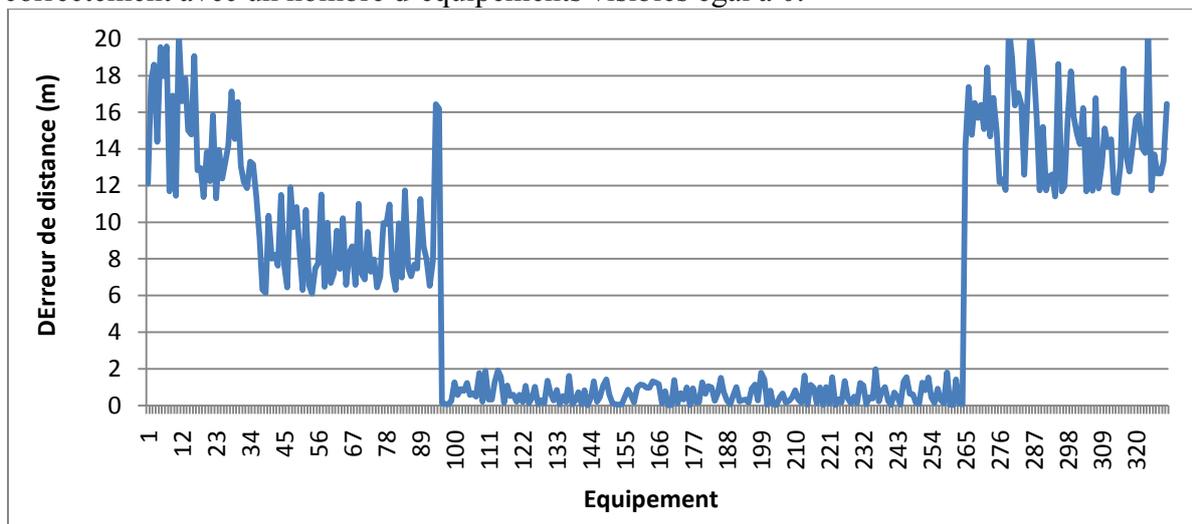


Figure 108 Les distances relatives entre équipements

Analysons dans la suite l'erreur de distances relatives. La figure 109 présente ces résultats. Nous remarquons que pour un nombre important d'équipements (165 équipements), l'erreur de distances relatives est inférieure 2m. Pour 100% des équipements, l'erreur de distances relatives est inférieure à 20m.

Cette figure rejoint la figure précédente. En effet, l'erreur de distances relatives est inférieure à 2m pour 50% des équipements. Pour les équipements n'ayant pas d'équipements visibles, l'erreur de distances relatives est importante. Cela est dû au fait qu'elle ne peut être estimée correctement avec un nombre d'équipements visibles égal à 0.



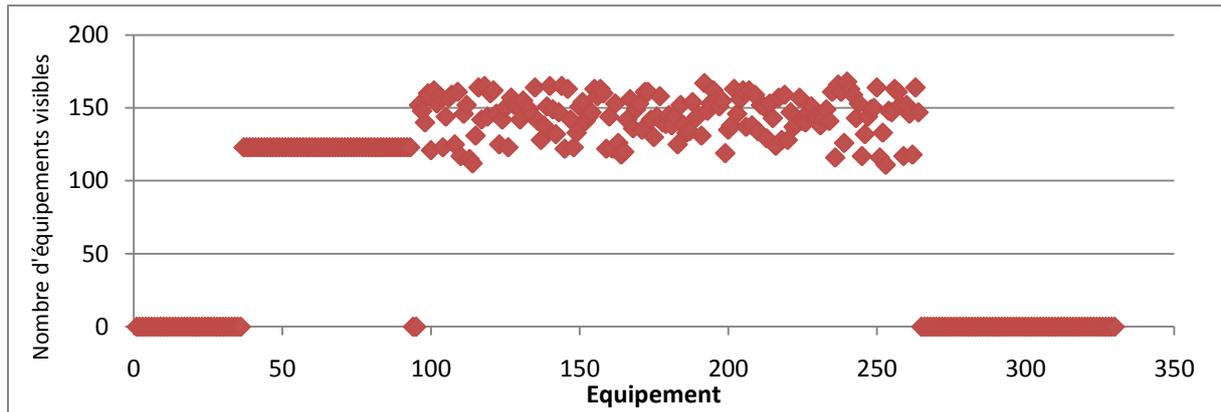


Figure 109 (a) L'erreur de distances relatives (b) Le nombre d'équipements visibles

Voyons plus en détail grâce à la figure 110, maintenant l'erreur de distances relatives en fonction des pourcentages des équipements. L'erreur moyenne de distances relatives est égale à 6,5m. Pour un pourcentage d'équipements inférieur à 60%, l'erreur de distances relatives reste inférieure à l'erreur moyenne.

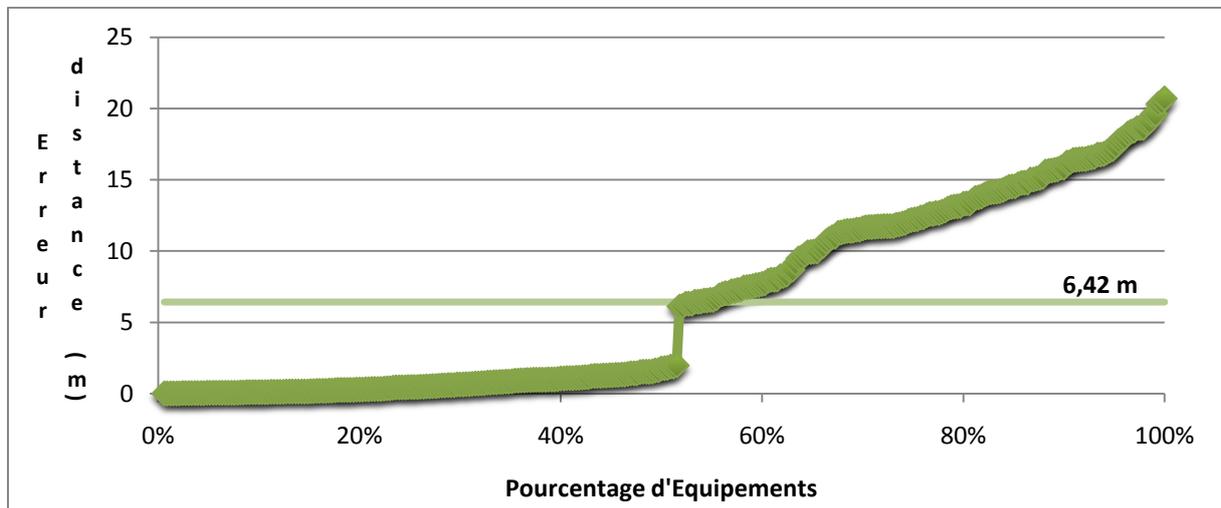


Figure 110 L'erreur de distance en fonction des pourcentages des équipements

Pour une zone géographique de dimensions 40m*10m avec 330 équipements dont 69% sans informations de positionnement, nous obtenons une erreur maximale inférieure à 30m. L'erreur moyenne reste inférieure à 14m.

Nous allons nous intéresser maintenant à la cafétéria de dimensions : 18m*18m, lors d'une pause café. Pour rappel, le nombre d'équipements déployés est :

Fonctionnalité	Nombre représentatif
GPS	6
WiFi	9
Bluetooth	29
Smartphones	11

Tableau 20 Nombre d'équipements déployés

Les équipements sont déployés aléatoirement dans la zone géographique pour un nombre total de 55 équipements avec 69% d'équipements sans information de positionnement. La figure 111 présente le modèle géographique réel.

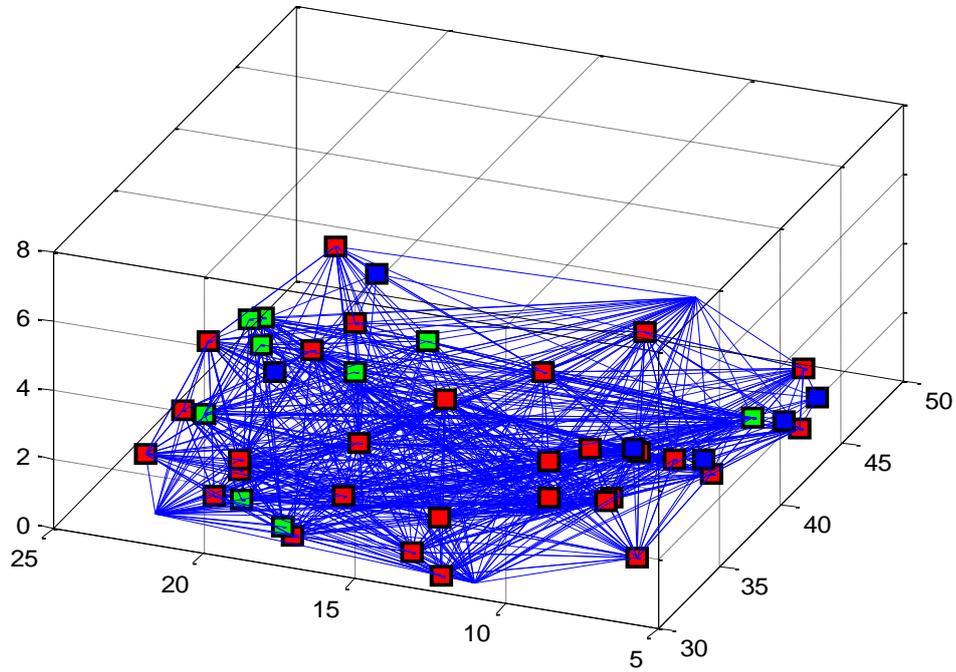


Figure 111 Modèle géographique réel des équipements

La figure 112 présente le modèle simulé.

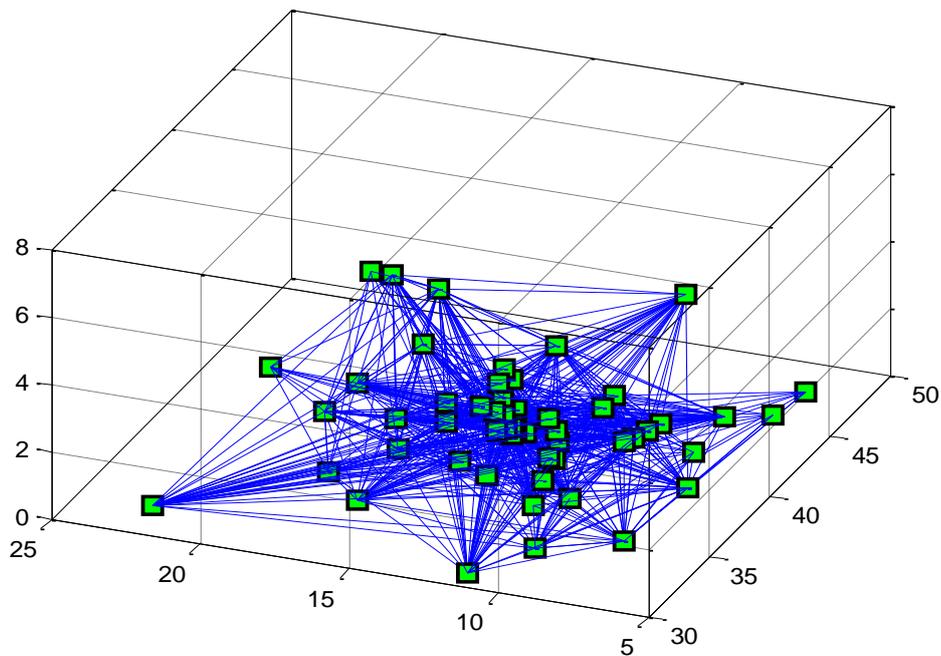


Figure 112 Modèle géographique simulé des équipements

La figure 113 nous présente les erreurs de positions obtenues pour chaque équipement. L'erreur est inférieure à 16m pour l'ensemble des équipements.

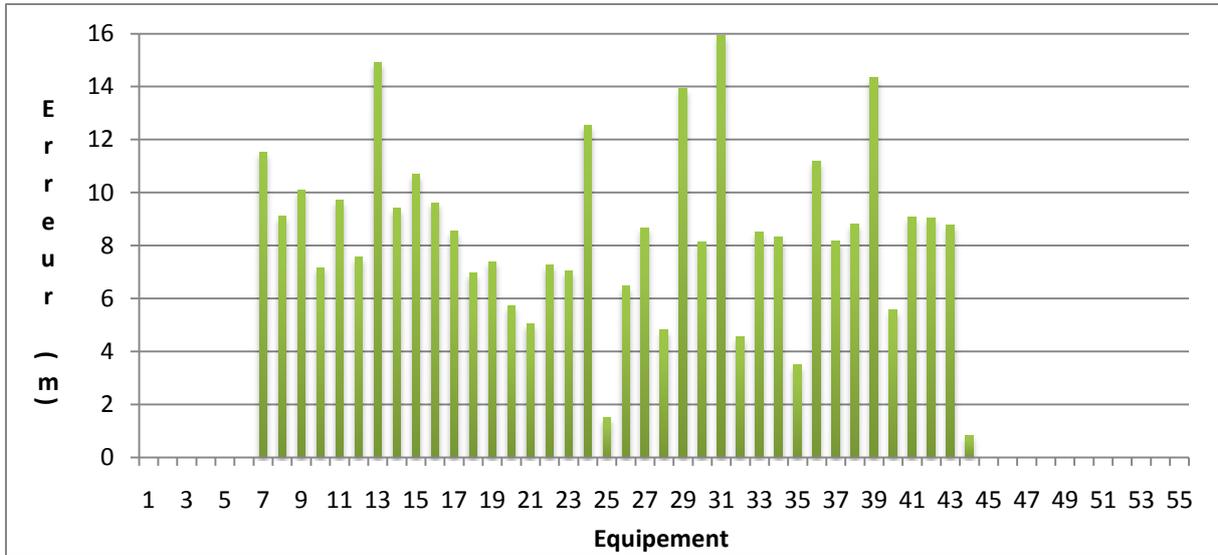


Figure 113 L'erreur en fonction des équipements

L'erreur en fonction du pourcentage des équipements est illustrée avec la figure 114. La figure nous permet de vérifier que 65% des équipements sont positionnés avec une erreur inférieure à l'erreur moyenne. L'erreur moyenne s'élève à 8,5m.

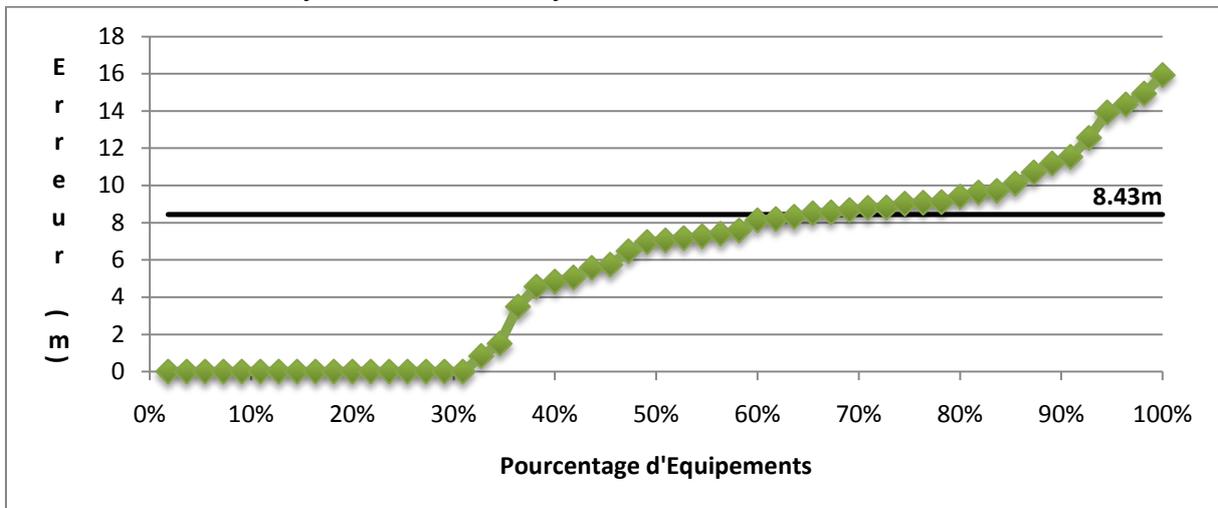


Figure 114 L'erreur en fonction du pourcentage des équipements

Nous remarquons que l'erreur moyenne obtenue dans la cafétéria est inférieure à celle obtenue dans le forum.

Déplaçons-nous maintenant dans un bâtiment : le bâtiment A. Les équipements déployés sont rappelés ci contre :

Fonctionnalité	Nombre représentatif
GPS	15
WiFi	24
Bluetooth	71
Smartphones	28

Tableau 21 Nombre d'équipements déployés

Nous déployons 138 équipements dans le bâtiment de façon aléatoire avec 68% d'équipements sans aucune information de positionnement.

La figure 115 nous présente le modèle géographique réel obtenu.

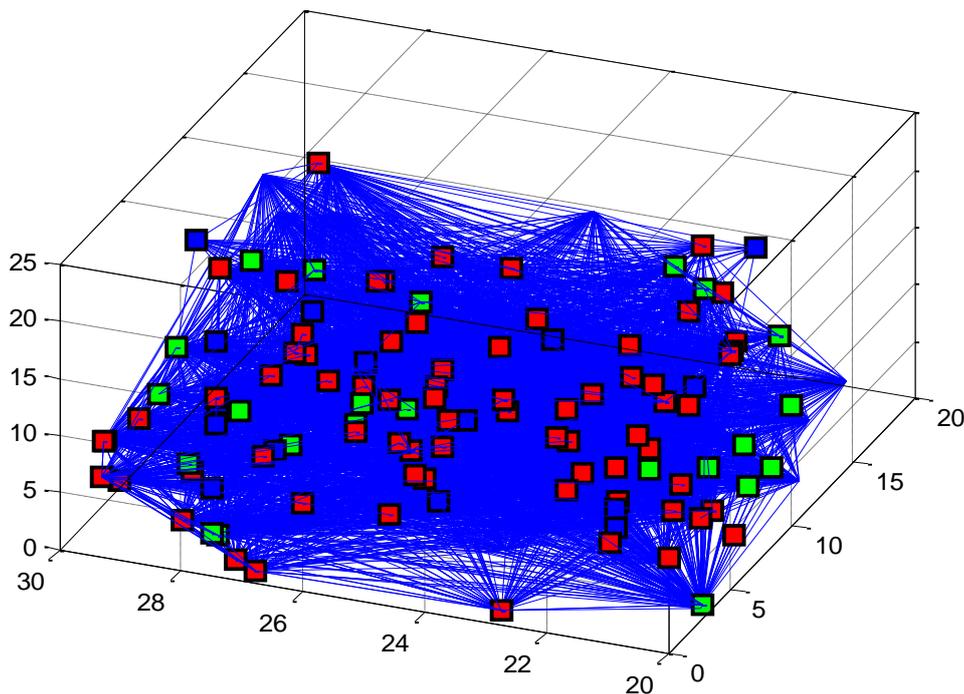


Figure 115 Modèle géographique réel

La figure 116 présente l'erreur moyenne obtenue pour chaque équipement. Les erreurs moyennes sont inférieures à 18m pour tous les équipements.

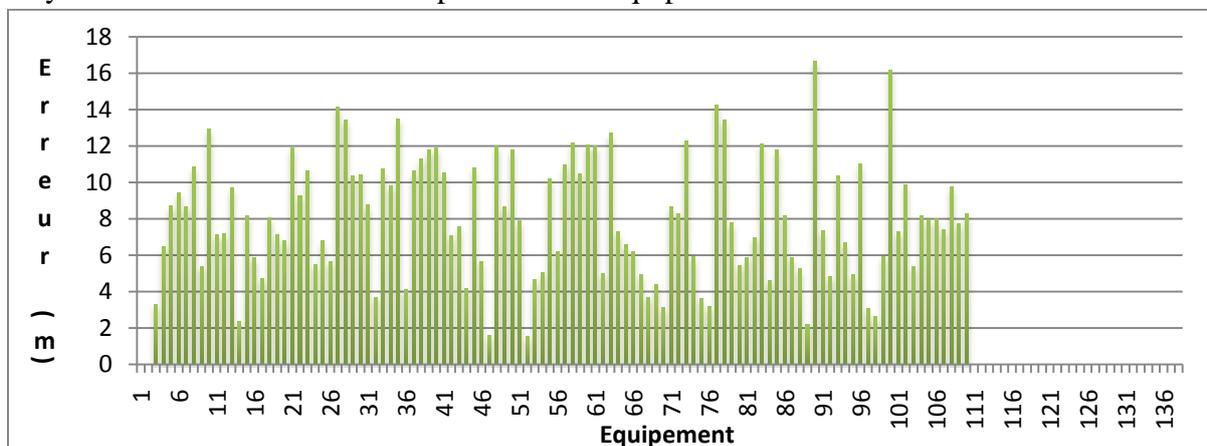


Figure 116 L'erreur moyenne

D'après la figure 117, 65% des équipements sont positionnés avec une erreur inférieure à l'erreur moyenne, qui est égale à 8m.

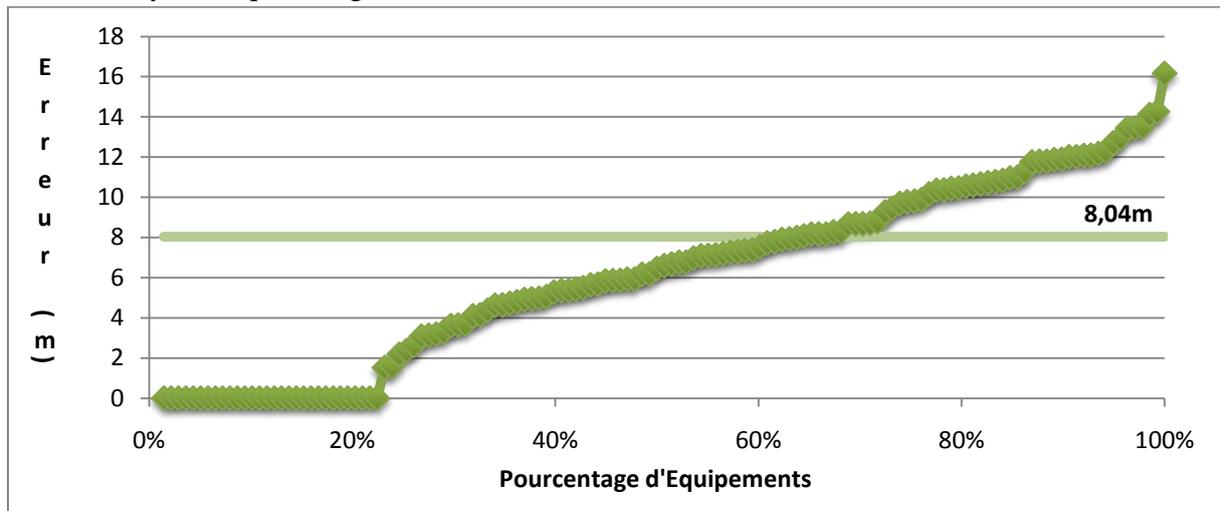


Figure 117 L'erreur en fonction des pourcentages des équipements

Contrairement aux simulations précédentes dans la cafétéria et dans le forum, le bâtiment A est composé de plusieurs étages. Nous nous intéressons à l'impact de l'altitude sur l'erreur moyenne. Nous déployons ci-dessous des équipements dans le même environnement. Le nombre d'équipement a été réduit à 48 équipements. Les dimensions du bâtiment sont les suivantes : 18m*10m. Dans un premier temps, nous prenons en compte l'altitude lors de nos simulations, représentée par la coordonnée z. Dans un deuxième temps, nous comparons les résultats, sans prendre en considération l'altitude.

La figure 118 présente l'erreur pour les équipements avec trois coordonnées : x, y et z. L'erreur moyenne est inférieure à 10m pour tous les équipements.

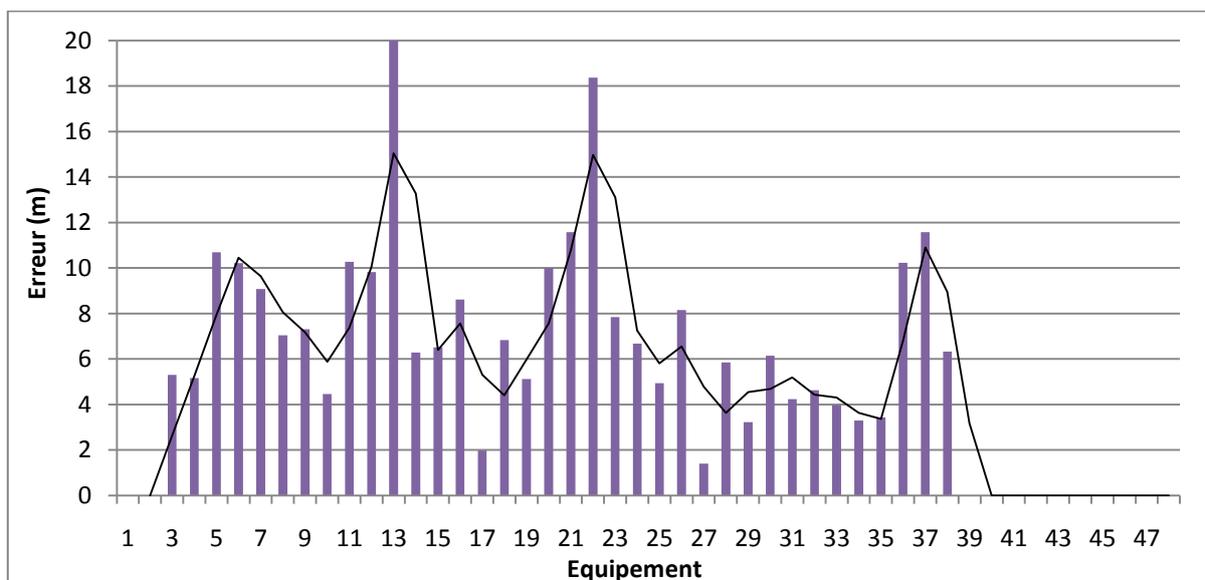


Figure 118 L'erreur pour chaque équipement

L'erreur moyenne s'élève à 7m environ. Nous pouvons aussi constater que 70% des équipements sont positionnés avec une erreur inférieure à l'erreur moyenne.

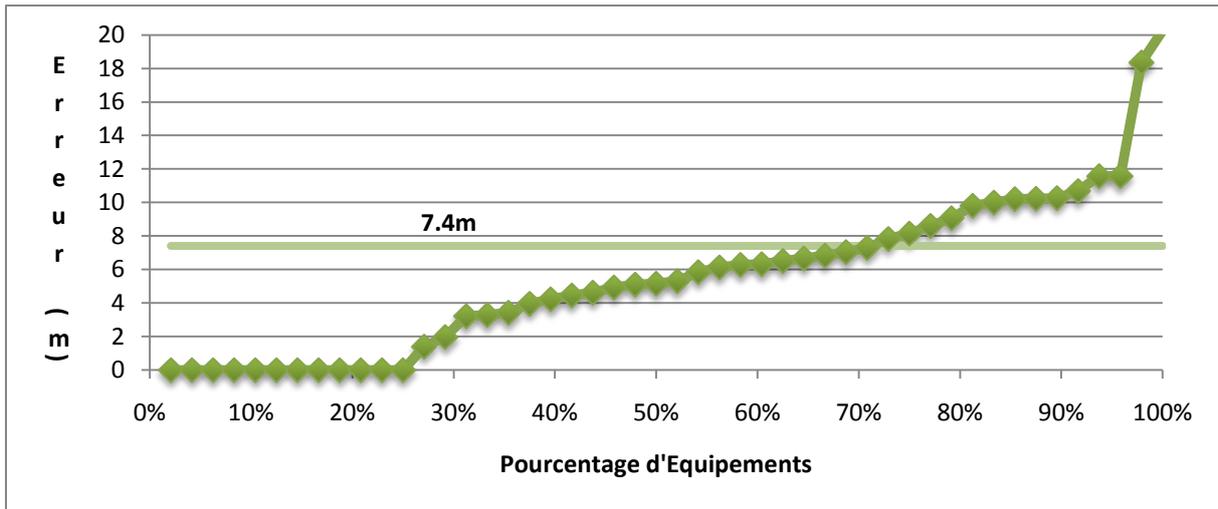


Figure 119 L'erreur moyenne en fonction des pourcentages des équipements

Dirigeons nous maintenant vers une simulation sans prendre en considération l'altitude ou la coordonnée z. La figure 120 illustre les résultats. L'erreur moyenne reste inférieure à 8m pour tous les équipements.

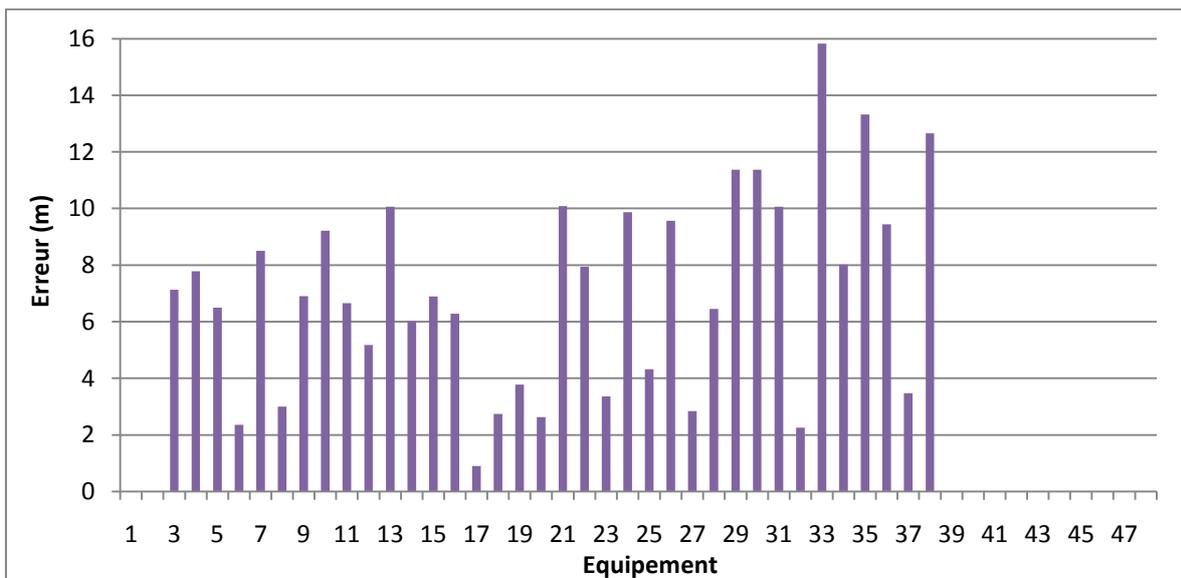


Figure 120 L'erreur en fonction des équipements - XY

L'évolution de l'erreur pour les équipements semble suivre la même tendance lors d'un environnement bidimensionnel et tridimensionnel.

Nous souhaitons vérifier cela en détail. La figure 120 schématise l'erreur en fonction des pourcentages des équipements. L'erreur moyenne est égale à 7m. Cette erreur est inférieure à l'erreur obtenue dans un environnement tridimensionnel. Environ 68% des équipements sont positionnés avec une erreur inférieure à l'erreur moyenne.

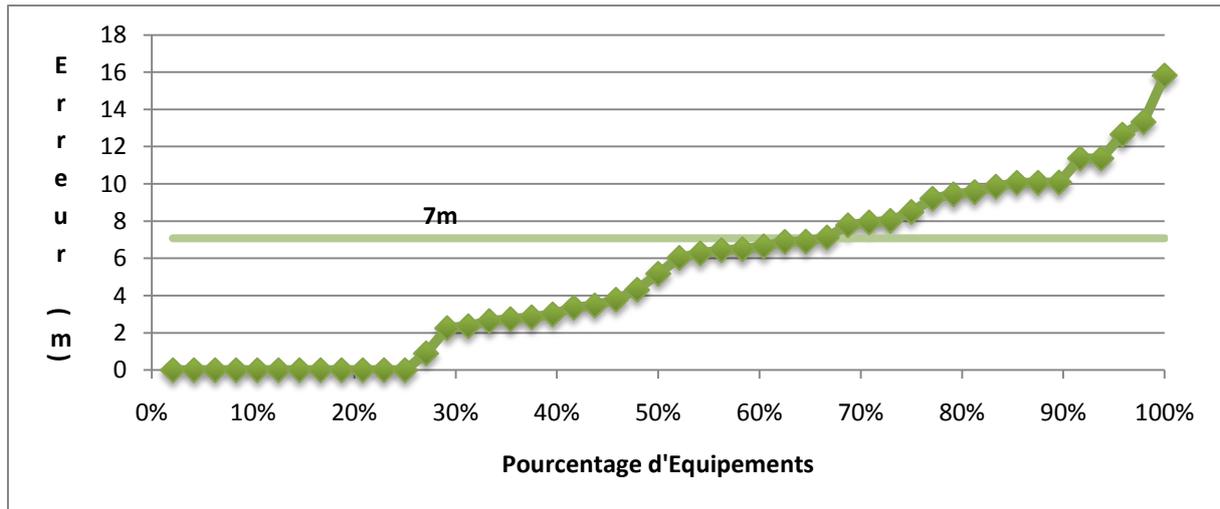


Figure 121 L'erreur en fonction du pourcentage équipements – XY

Lors d'une simulation bidimensionnelle, l'erreur moyenne (7m) est légèrement inférieure à l'erreur obtenue lors d'une simulation dans un environnement tridimensionnel (7,4m). En ce qui concerne l'erreur maximale, celle-ci peut atteindre 20m dans le cas d'un environnement tridimensionnel et seulement 16m dans un environnement bidimensionnel. Notre approche nous permet d'obtenir des positions estimées avec une erreur inférieure à 7m, mais ne permet pas d'améliorer la précision pour un environnement bidimensionnel. Evaluons dans la suite, les résultats obtenus lors du deuxième scénario.

8.4.1.2 Journée habituelle vers 11h

Nous allons nous intéresser tout d'abord à la cafétéria de dimensions : 18m*18m. Pour rappel, le nombre d'équipements déployés est :

Fonctionnalité	Nombre représentatif
GPS	3
WiFi	4
Bluetooth	15
Smartphones	6

Tableau 22 Nombre d'équipements déployés

Les équipements sont déployés aléatoirement dans la zone géographique. Il s'élève à 28 équipements dont 67% sans information de positionnement.

La figure 122 présente le modèle géographique des équipements déployés dans la cafétéria.

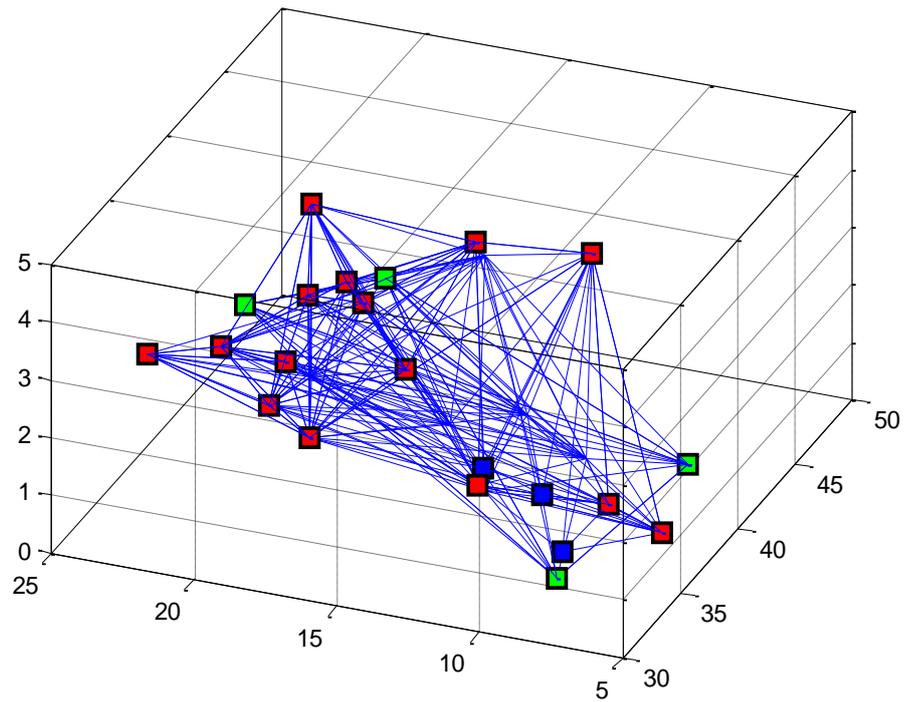


Figure 122 Modélisation graphique des équipements avec les positions géographiques réelles

La figure 123 présente le modèle géographique obtenu avec le simulateur.

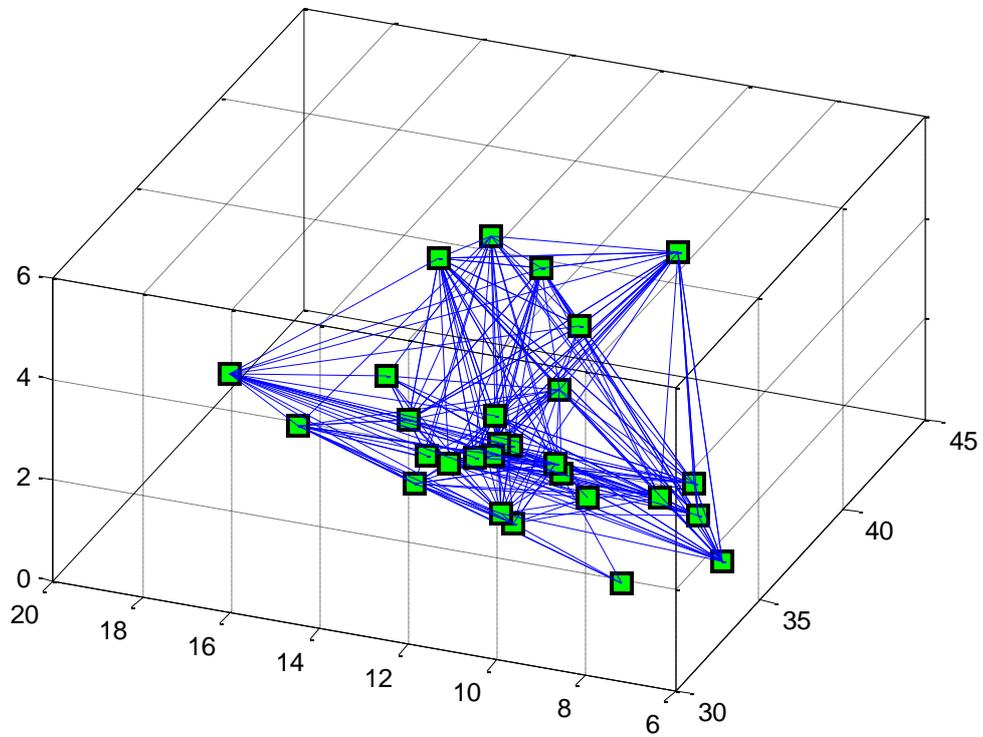


Figure 123 Modélisation graphique des équipements avec les positions géographiques estimées

Nous remarquons des points similaires entre les deux graphes. Néanmoins, afin d'avoir une opinion plus précise, nous exposons dans ce qui une analyse des résultats pour chaque équipement de l'environnement.

La figure 124 présente les différentes erreurs obtenues pour chaque équipement. Les équipements avec des positions connues sont considérés comme certains et fiables. Le simulateur utilise les données de positionnement sans altérer leurs positions pour les résultats finaux.

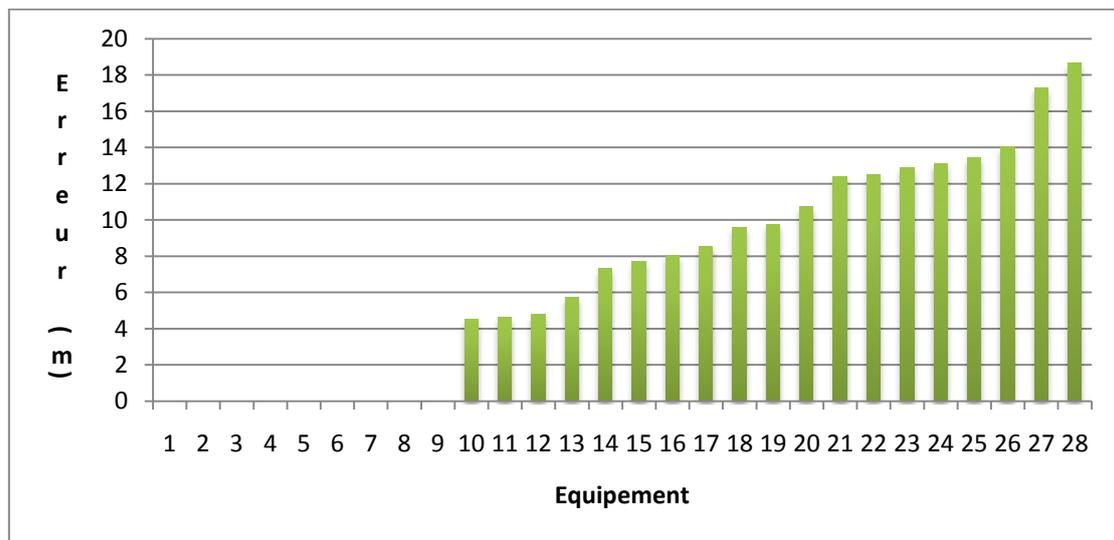


Figure 124 L'erreur en fonction des équipements

La figure 124 met en évidence que l'erreur reste inférieure à 18 m pour tous les équipements. Nous allons détailler cette analyse à travers l'exposition de l'erreur moyenne obtenue en fonction des pourcentages des équipements.

La figure 125 montre que pour 65% des équipements l'erreur est au dessous de 10m. Nous pouvons aussi constater que 30% seulement des équipements ont une information de positionnement que nous avons considérée comme précise et fiable.

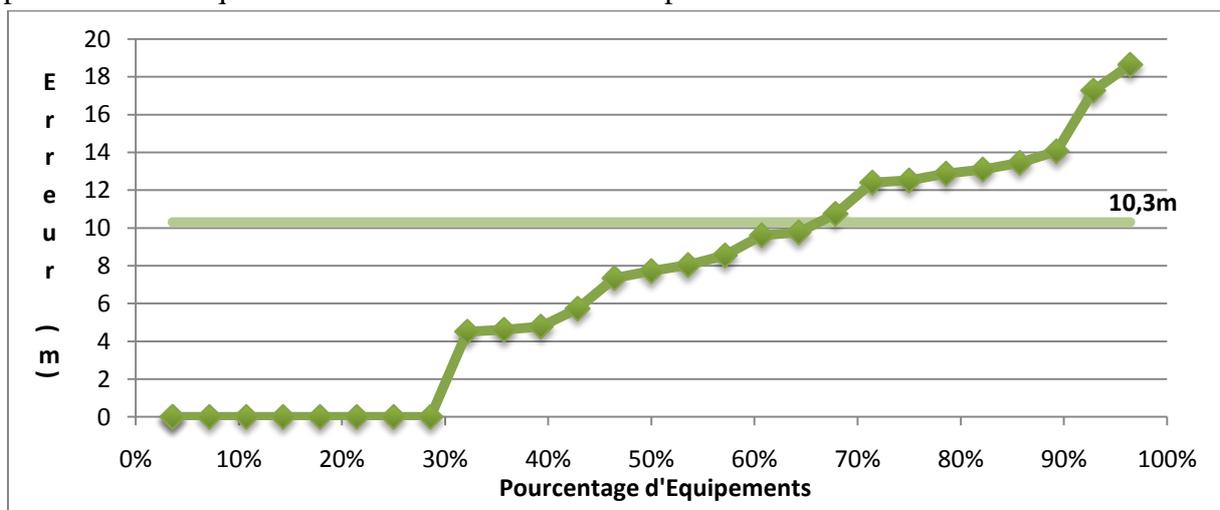


Figure 125 L'erreur en fonction du pourcentage des équipements

La figure 125 présente le nombre d'équipements visibles. Nous pouvons constater que les résultats sont obtenus avec 60% d'équipements avec une visibilité inférieure à 9 équipements.

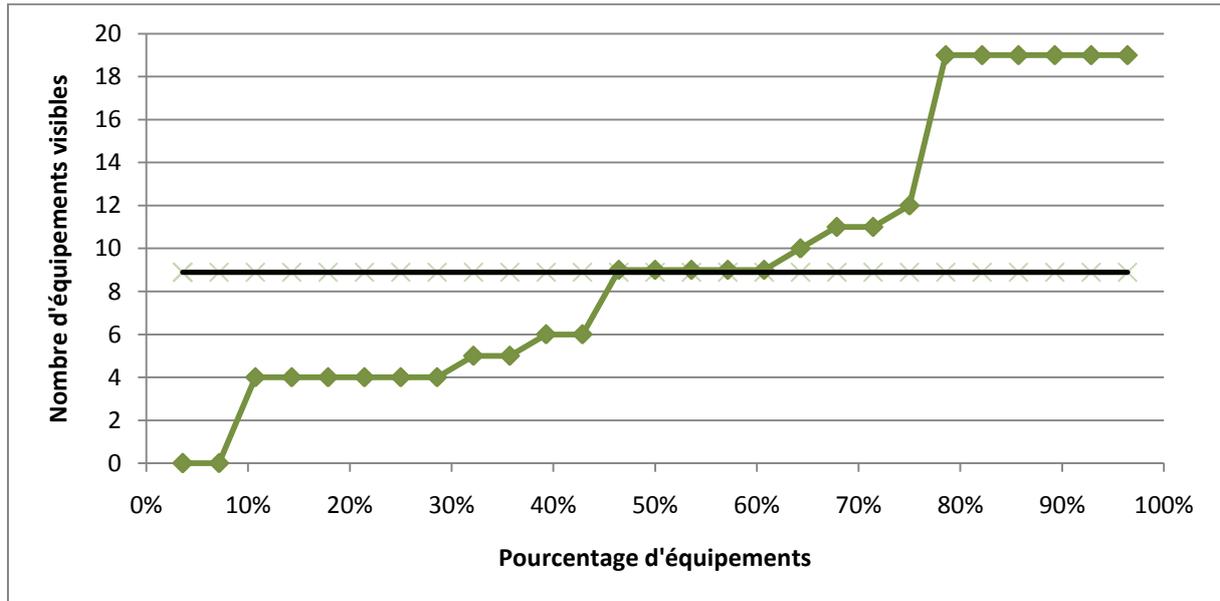


Figure 126 Le nombre d'équipements visibles

Déplaçons-nous maintenant dans le forum. Cet espace de dimensions 40m*10m, présente un espace ouvert. Les équipements déployés sont rappelés ci contre :

Fonctionnalité	Nombre représentatif
GPS	6
WiFi	9
Bluetooth	29
Smartphones	11

Tableau 23 Nombre équipements

La figure 127 présente le modèle géographique obtenu pour le forum. Nous avons déployés 55 équipements avec 63% d'équipements sans information de positionnement. Les couleurs représentatives sont les mêmes que précédemment.

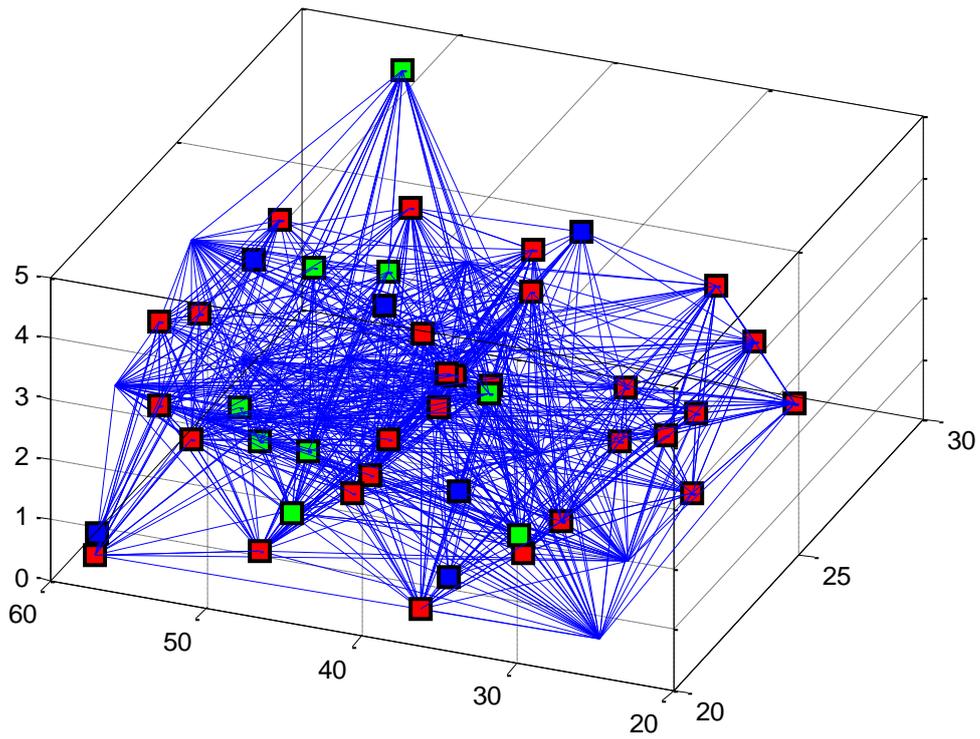


Figure 127 Modélisation graphique des équipements avec les positions géographiques réelles

La figure 128 présente le modèle obtenu avec le simulateur.

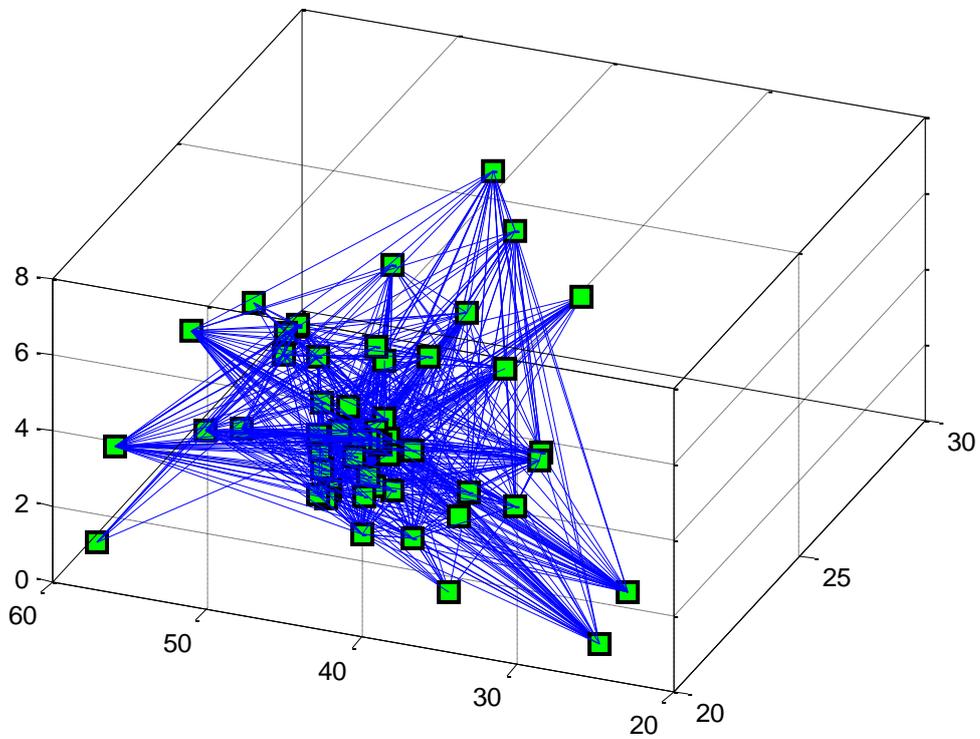


Figure 128 Modélisation graphique des équipements avec les positions géographiques estimée

La figure 129 confirme les résultats précédents avec une erreur inférieure à 20m, pour tous les équipements. Nous pouvons aussi constater que quelques équipements avec des erreurs plus importantes que la moyenne : 6 équipements.

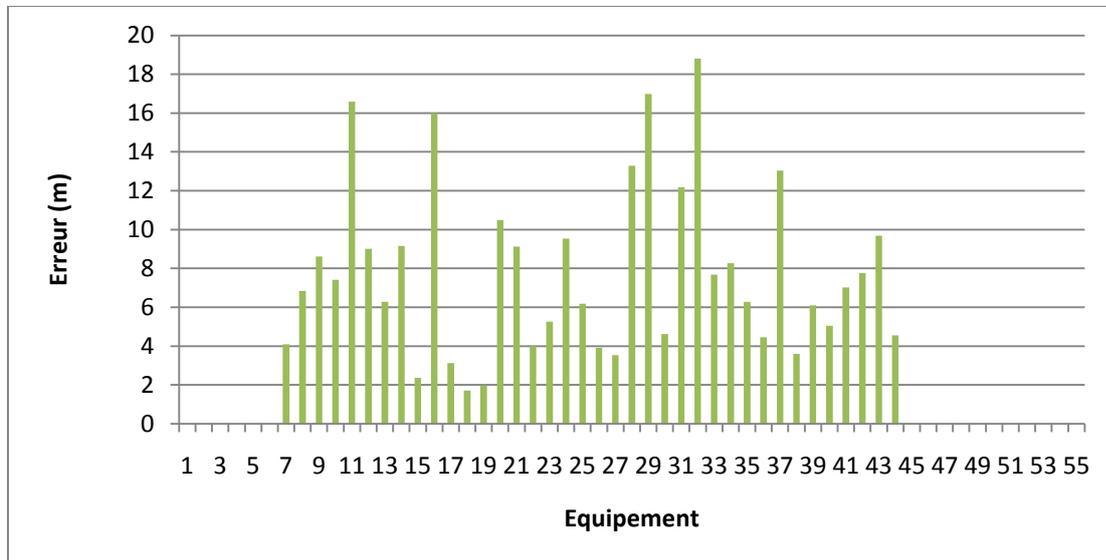


Figure 129 L'erreur obtenue en fonction de l'équipement

Essayons, donc de détailler aussi ces résultats. La figure 130 présente l'erreur en fonction du pourcentage d'équipements. Nous remarquons que pour 80% des équipements l'erreur est inférieure à 10m.

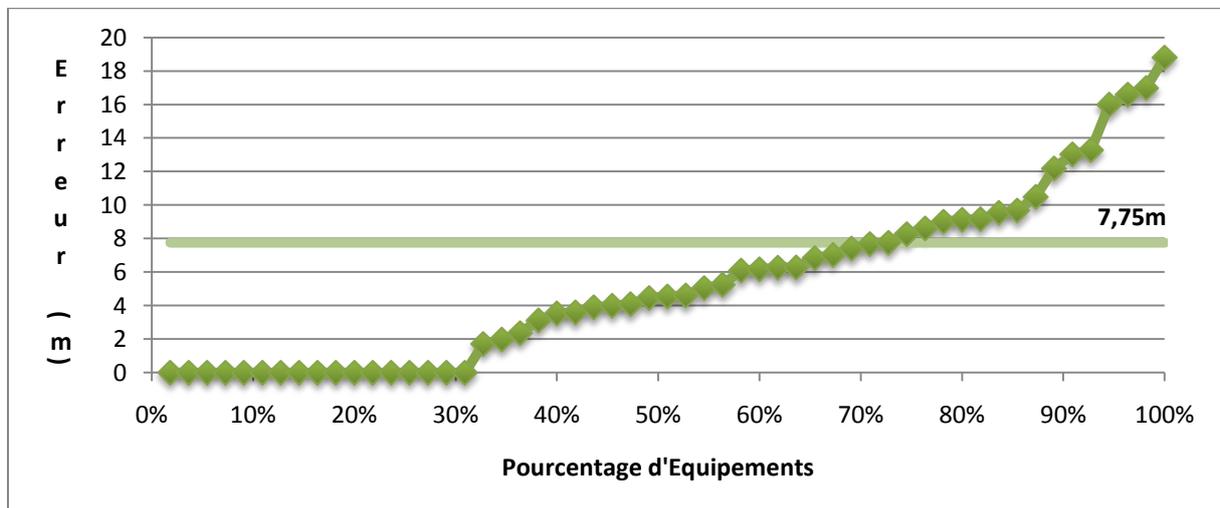


Figure 130 L'erreur obtenue en fonction du pourcentage des équipements

Nous nous intéressons maintenant aux résultats fournis pour un bâtiment : le bâtiment A. Les équipements déployés sont restreints à 100 équipements. Le nombre total des équipements dans tous les bâtiments est égal à 385 équipements. Nous rappelons le nombre d'équipements par technologie :

Fonctionnalité	Nombre représentatif
GPS	11
WiFi	17
Bluetooth	51
Smartphones	21

Tableau 24 Nombre d'équipements

L'étude de ces résultats permet d'analyser l'impact de la variation de l'altitude sur l'erreur de positionnement avec 68% d'équipements sans information de positionnement. Nous avons déployés les équipements dans le bâtiment à différents étages, aléatoirement. 50% des équipements sont positionnés avec une erreur inférieure à l'erreur moyenne égale à 6.02m, comme le présente la figure 131.

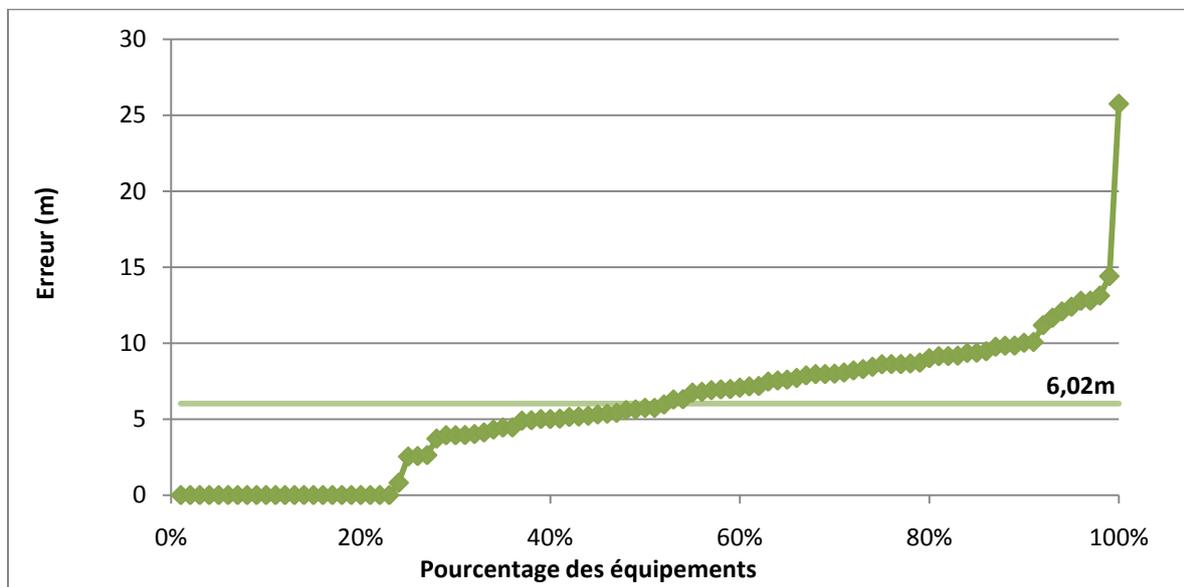


Figure 131 L'erreur obtenue en fonction de l'équipement

8.4.1.3 Comparaisons de résultats Bâtiment et Forum avec des erreurs de précisions

Mentionné dans les chapitres précédents, la précision d'une position géographique acquise par un système de positionnement n'est pas toujours très fiable. De ce fait, nous avons mis en place une incertitude au niveau des positions géographiques des équipements avec des coordonnées connues.

Nous avons lancé des simulations dans le forum et dans le bâtiment A.

La figure 131 présente les équipements déployés dans le forum.

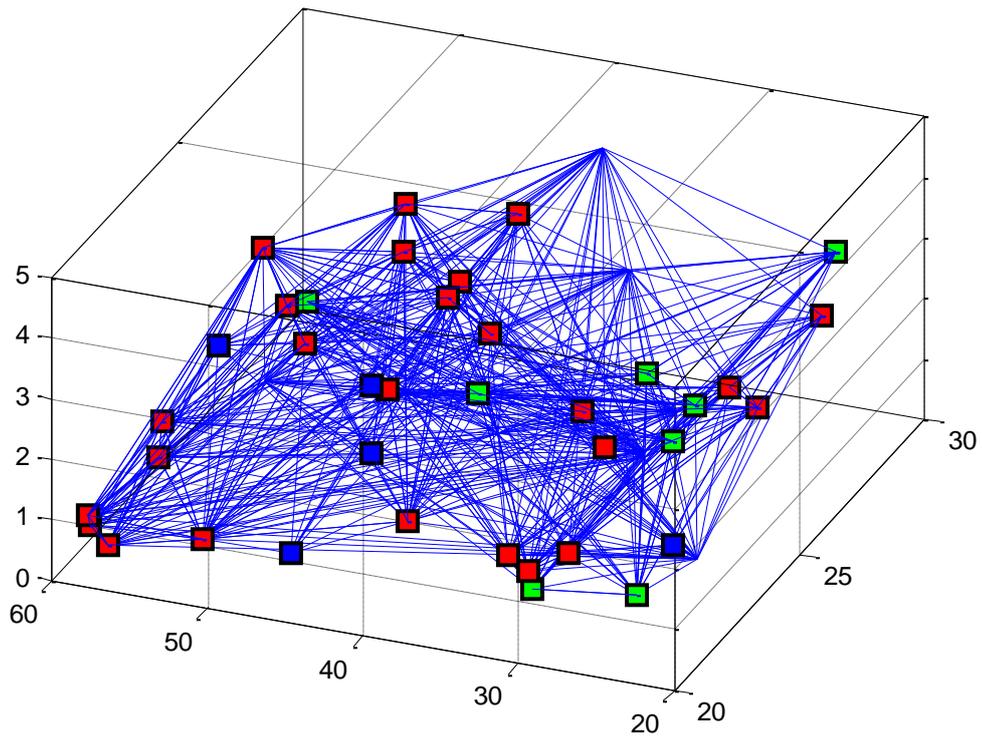


Figure 132 Les liens géographiques entre les équipements réels

Nous avons déployés 55 équipements dans le forum avec les mêmes proportions. Nous avons obtenus le graphe de lien géographique présenté figure 133.

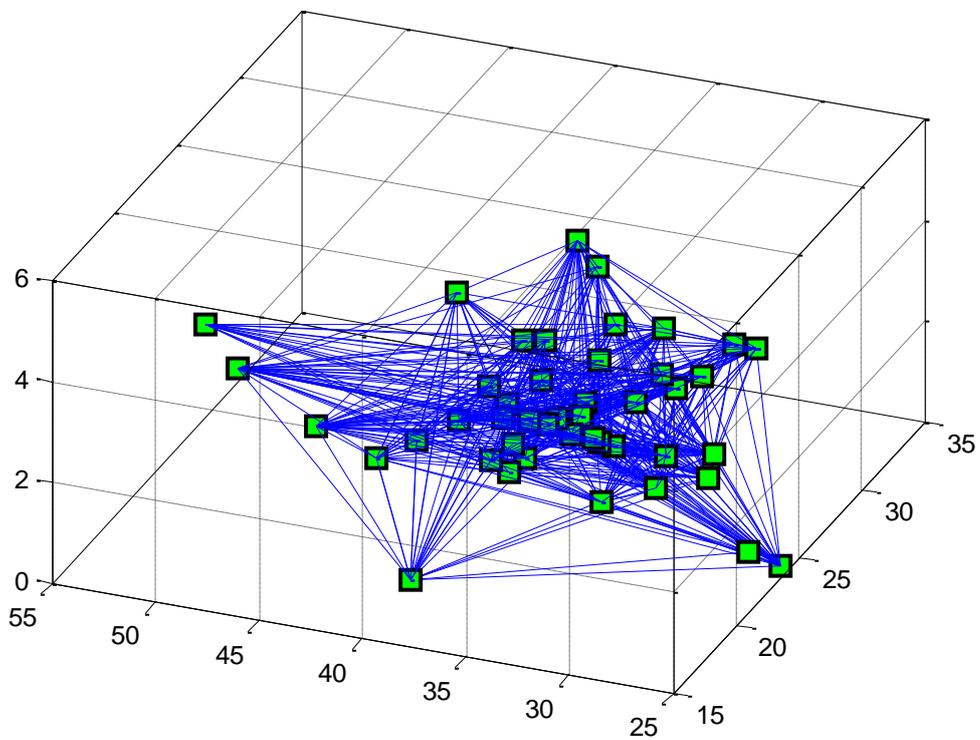


Figure 133 Les liens géographiques entre les équipements estimés

Nous avons à la suite fait varier la précision des positions des équipements avec des coordonnées géographiques connues.

Les résultats obtenus sont détaillées et comparées dans les figures ci-dessous : figure 134, figure 135 et figure 136.

Pour toutes les trois simulations, nous obtenons une erreur inférieure à 30m. L'erreur moyenne passe de 15m pour une imprécision de 0m à 10m pour une imprécision de 1m pour finalement atteindre 8m pour une imprécision de 2m

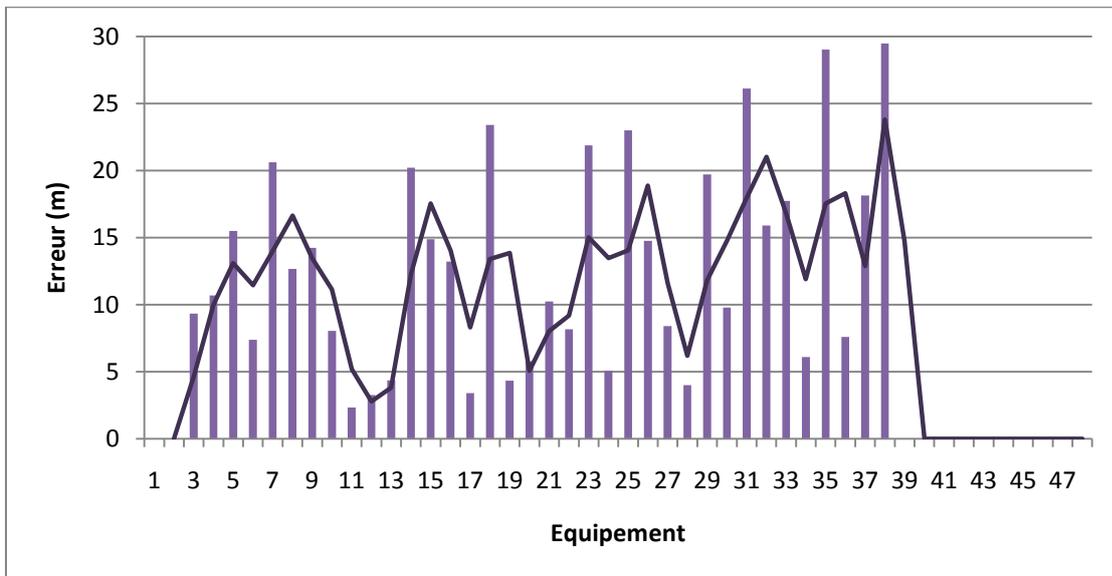


Figure 134 L'erreur en fonction des équipements

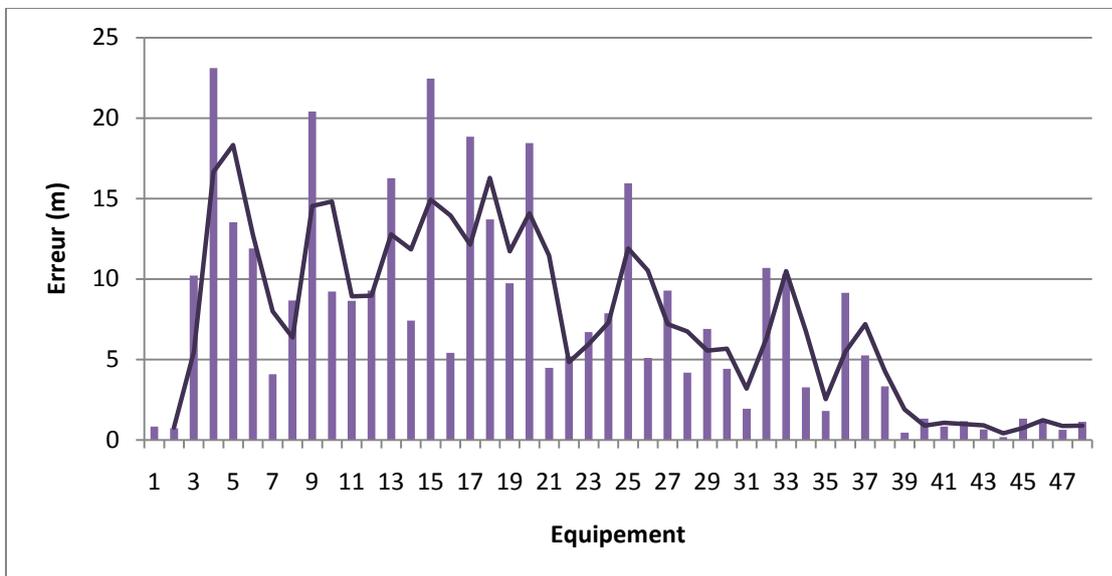


Figure 135 L'erreur en fonction des équipements avec une imprécision de 1m

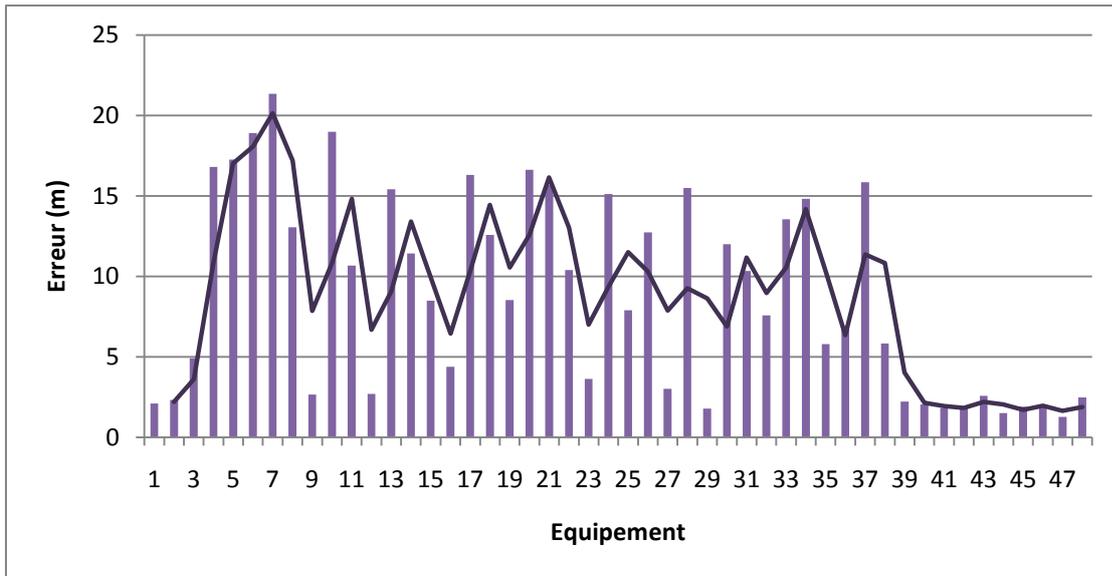


Figure 136 L'erreur en fonction des équipements avec une imprécision de 2m

L'erreur diminue avec l'imprécision. Nous effectuons les mêmes simulations au niveau du bâtiment A. Les figures 135 et 136 présentent les résultats.

Comme pour les autres modèles, les graphes de lien géographiques sont semblables et nous permettent de nous diriger vers une étude plus approfondie.

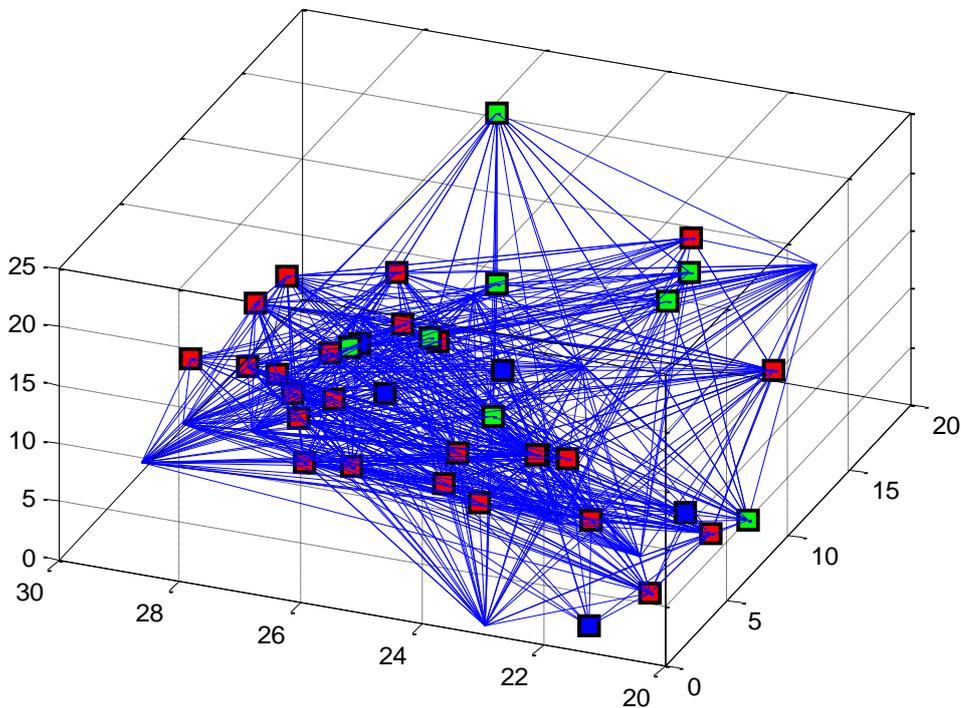


Figure 137 Modélisation des liens géographiques entre les équipements réels

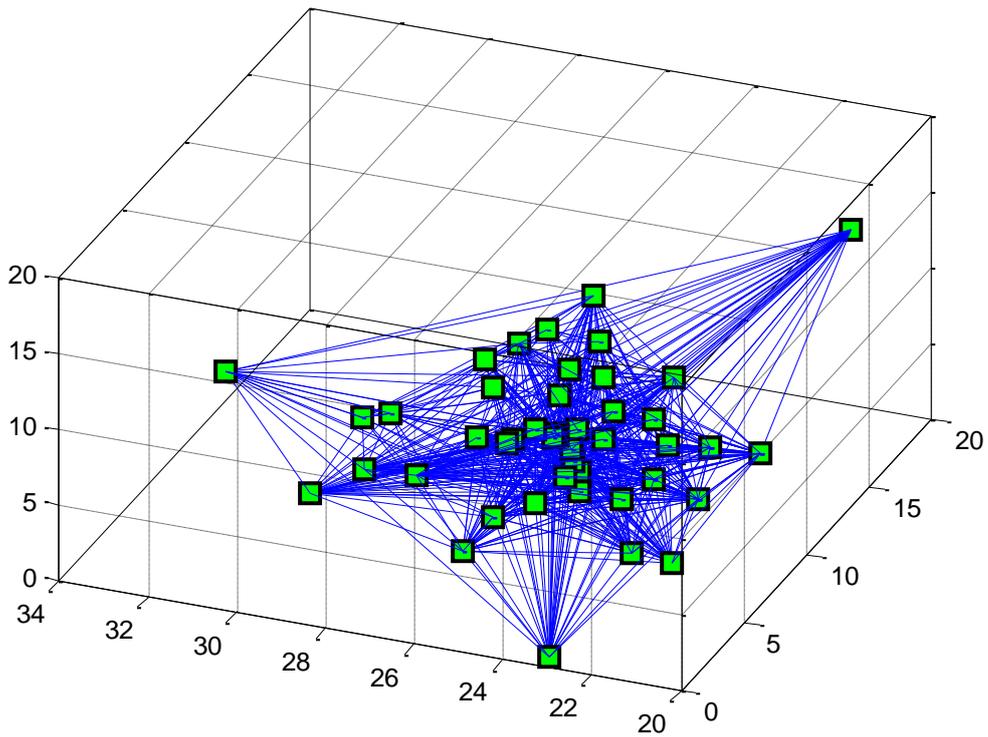


Figure 138 Modélisation des liens géographiques entre les équipements estimés

Les figures 139, 140 et 141 présentent les résultats de simulations. Tous les résultats donnent une erreur inférieure à 25m.

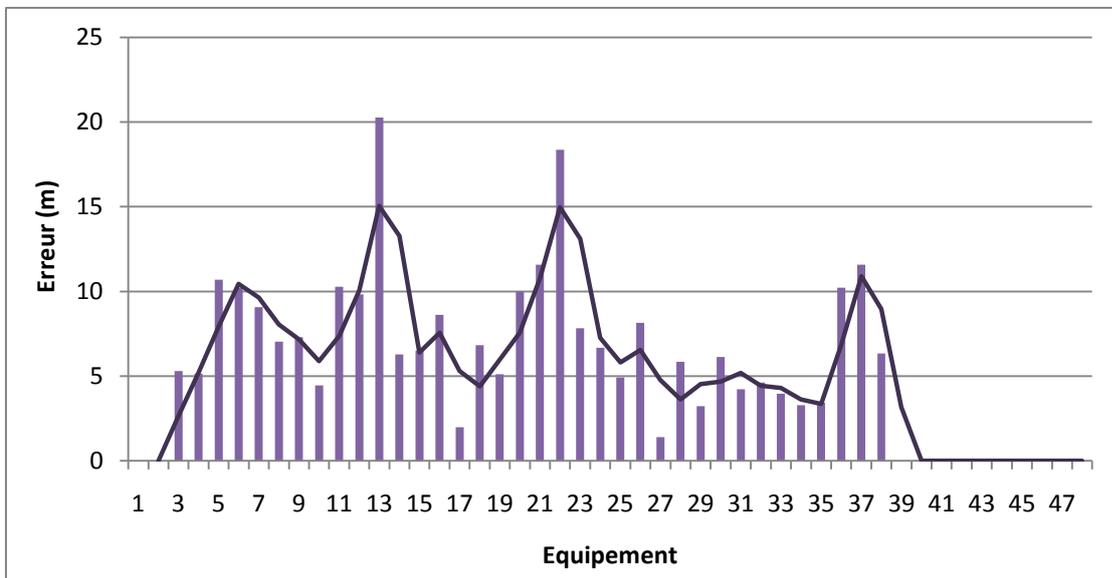


Figure 139 L'erreur en fonction des équipements

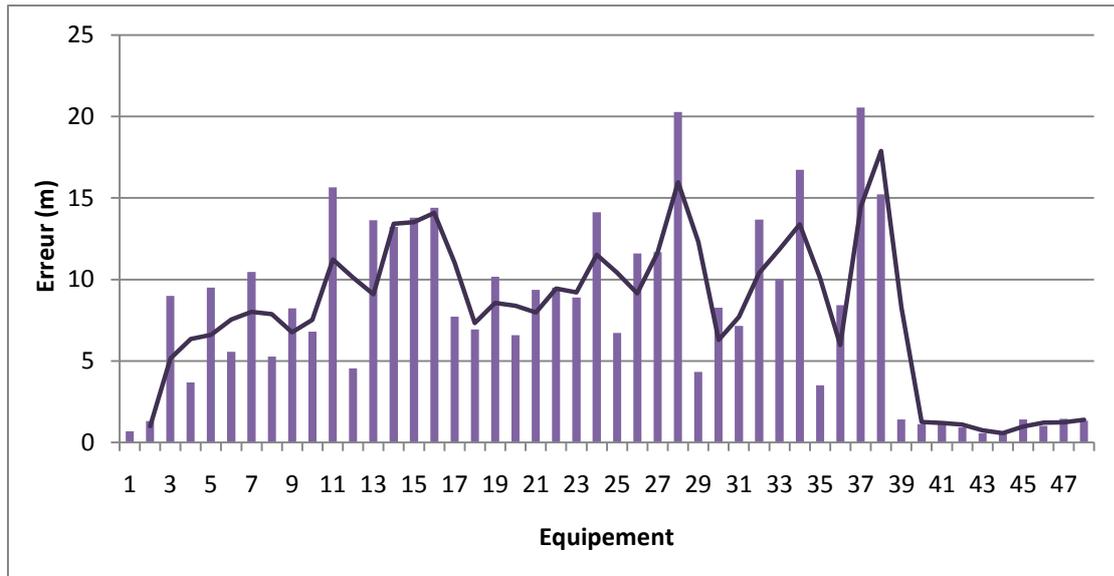


Figure 140 L'erreur en fonction des équipements avec une imprécision de 1m

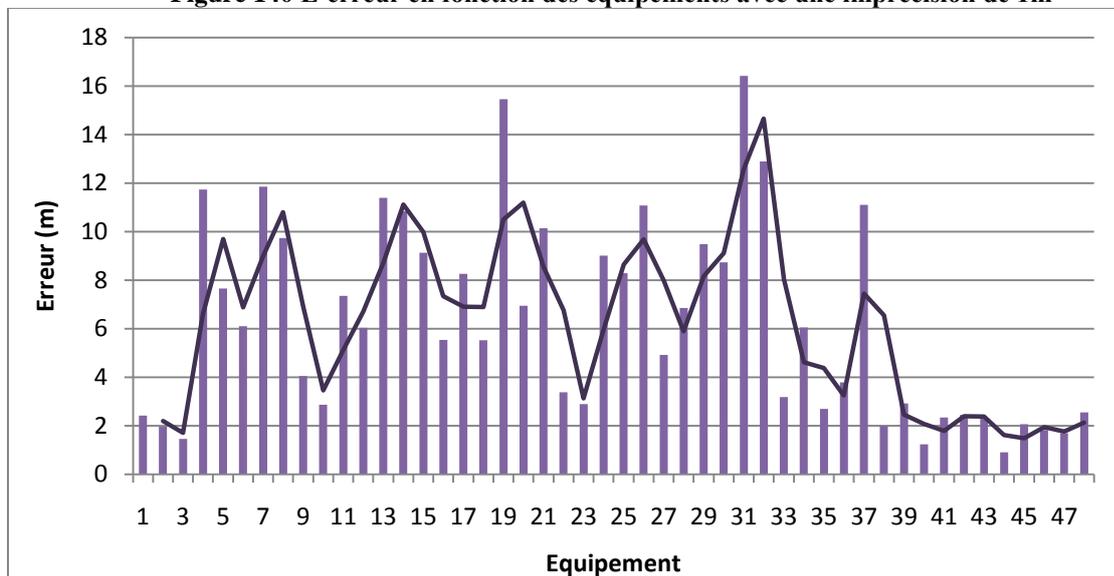


Figure 141 L'erreur en fonction des équipements avec une imprécision de 2m

L'erreur moyenne passe de 10m pour une imprécision de 0m à 8m pour une imprécision de 1m pour finalement atteindre 4m pour une imprécision de 2m

Cette partie nous a permis de vérifier l'impact de l'imprécision des positions sur les résultats finaux. Suite aux figures décrites, nous pouvons conclure que des imprécisions allant de 1m à 2m, l'erreur moyenne diminue. Ce fait est intéressant. Nous diminuons l'imprécision des modèles de visibilité, en appliquant une imprécision sur les coordonnées des équipements ayant des informations de positionnement.

8.4.2 Scénarios dynamiques

8.4.2.1 Trajectoire du professeur

Nous avons modélisé le déplacement d'un professeur et nous exposons les résultats obtenus dans la suite.

Nous avons appliqué un modèle linéaire de mobilité avec une imprécision allant jusqu'à 2m.

La figure 142 schématise la trajectoire du professeur. Ce dernier arrive à Telecom SudParis et se déplace dans le forum afin d’atteindre l’amphithéâtre. Nous nous intéressons donc à son déplacement effectué au sein du bâtiment.

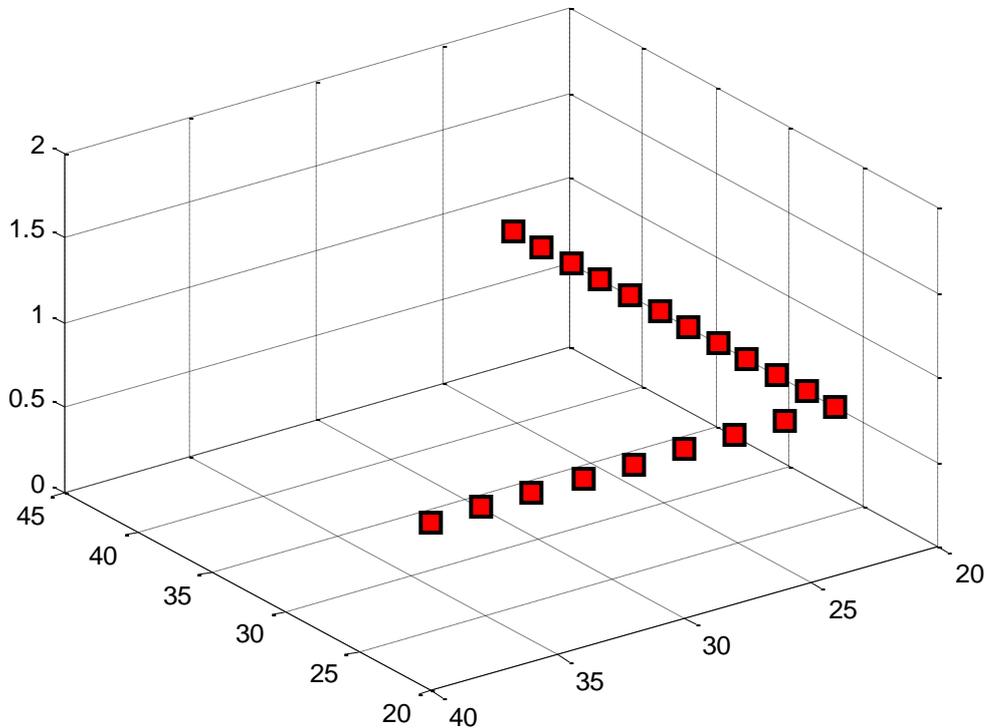


Figure 142 Trajectoire du professeur

Le déplacement est représenté par 20 points distincts. La figure 143 présente les erreurs pour chaque point. Nous remarquons que l’erreur moyenne est d’environ 2m. Nous avons seulement 3 points qui ont une erreur supérieure à 2.5m.

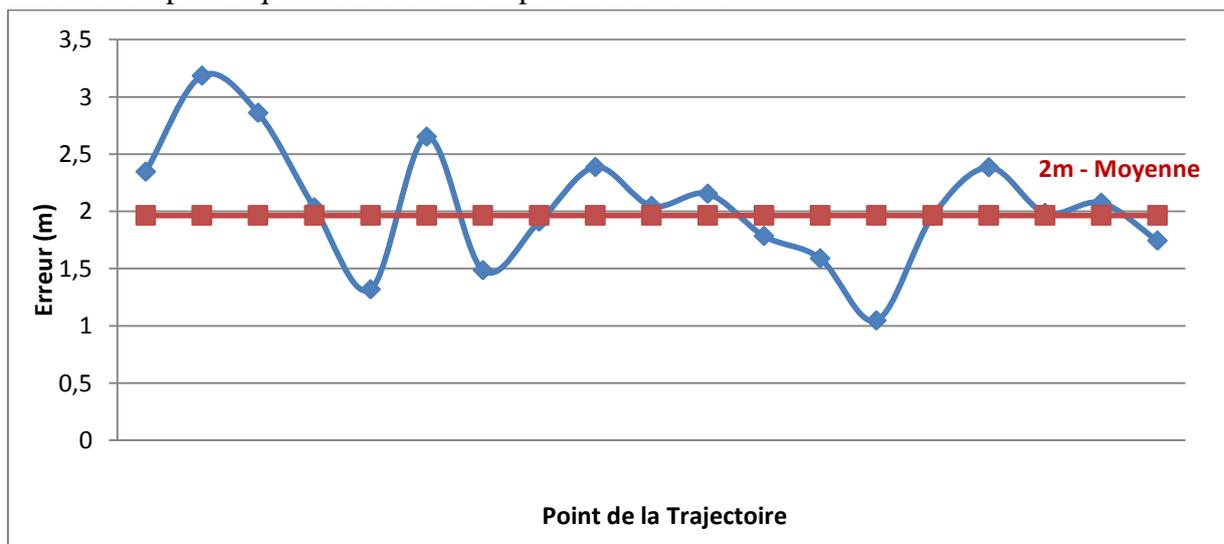


Figure 143 L’erreur en fonction du point de déplacement

La figure 144 montre la variation du nombre d’équipements visibles lors du déplacement.

Nous constatons que le nombre d'équipements visibles est inférieur à 14 équipements dans la majorité des cas. Cela représente environ 30% des équipements totaux.

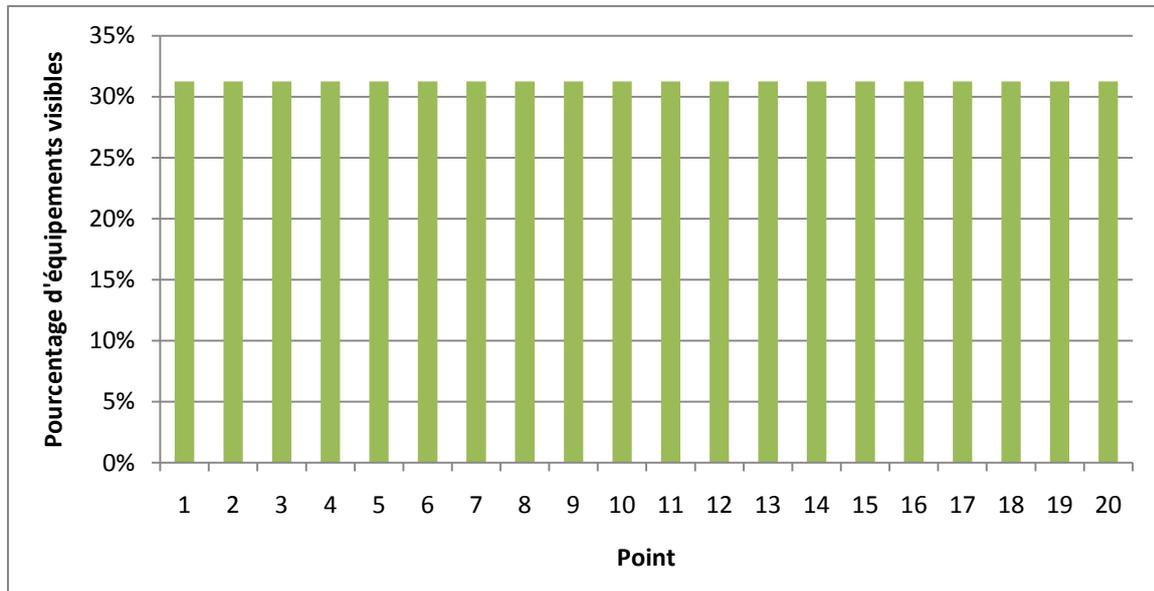


Figure 144 Le nombre d'équipements visibles lors du déplacement

La figure 145 présente l'erreur en fonction du pourcentage des points de déplacement. Pour 60% des points de déplacement, l'erreur est inférieure à 2m.

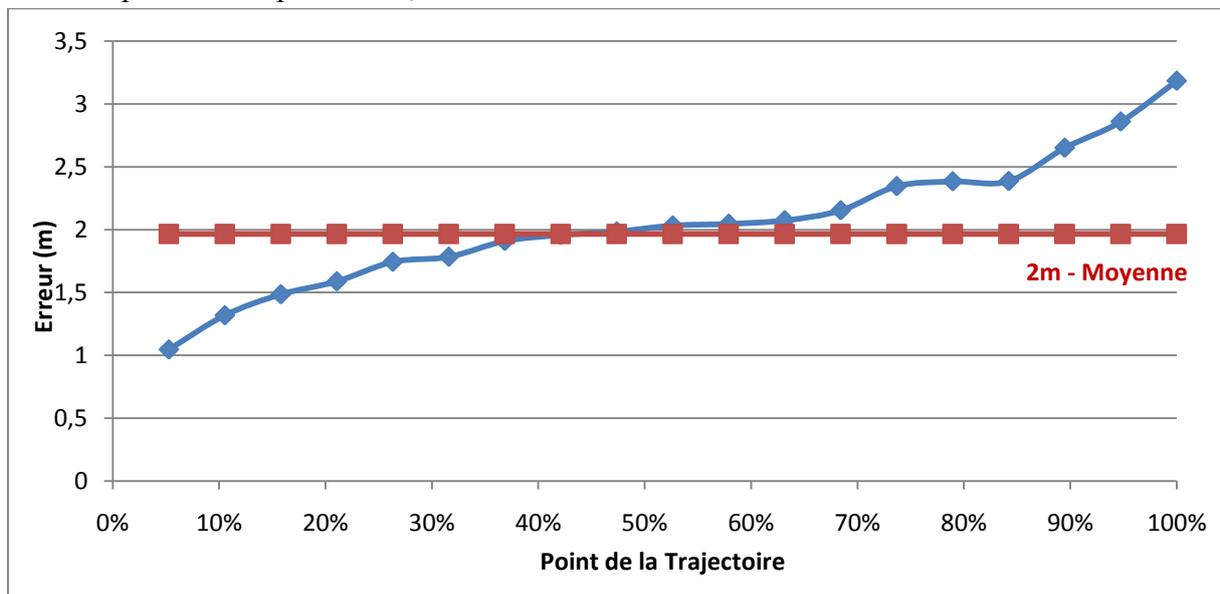


Figure 145 L'erreur en fonction du pourcentage des points de déplacement

8.4.2.2 Trajectoire de l'étudiant

Nous nous intéressons maintenant à la trajectoire d'un étudiant qui va se déplacer dans le forum ainsi que dans le bâtiment A.

La figure 146 présente la trajectoire d'un étudiant.

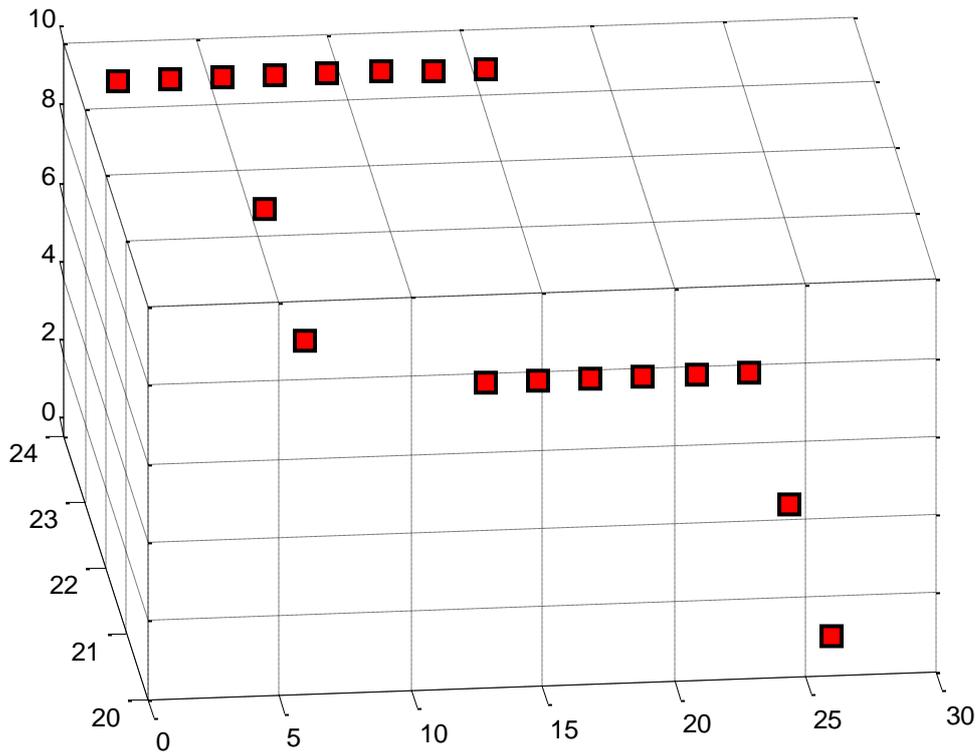


Figure 146 Trajectoire de l'étudiant

La figure 147 montre que pour 50% des points, l'erreur est inférieure à 2m.

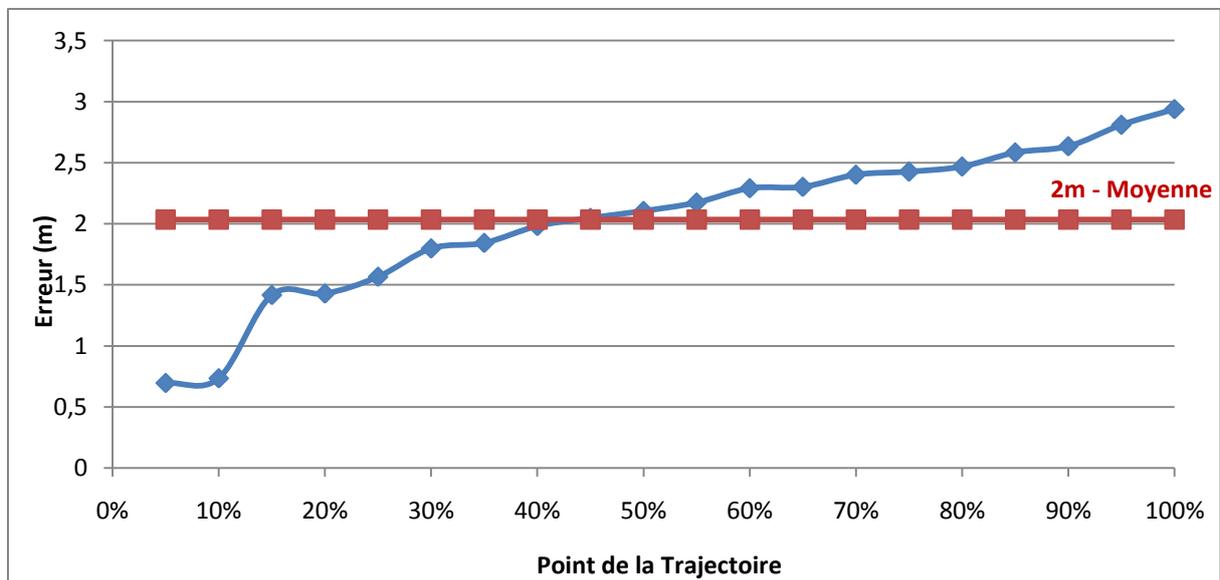


Figure 147 L'erreur en fonction du pourcentage des points

La figure 147 présente l'erreur en fonction du point de déplacement. Nous remarquons une variation importante au delà de la 9^{ème} position. Cette variation correspond au changement d'étage. En effet, nous avons supposé que l'étudiant passe du forum au 3^{ème} étage en prenant l'ascenseur.

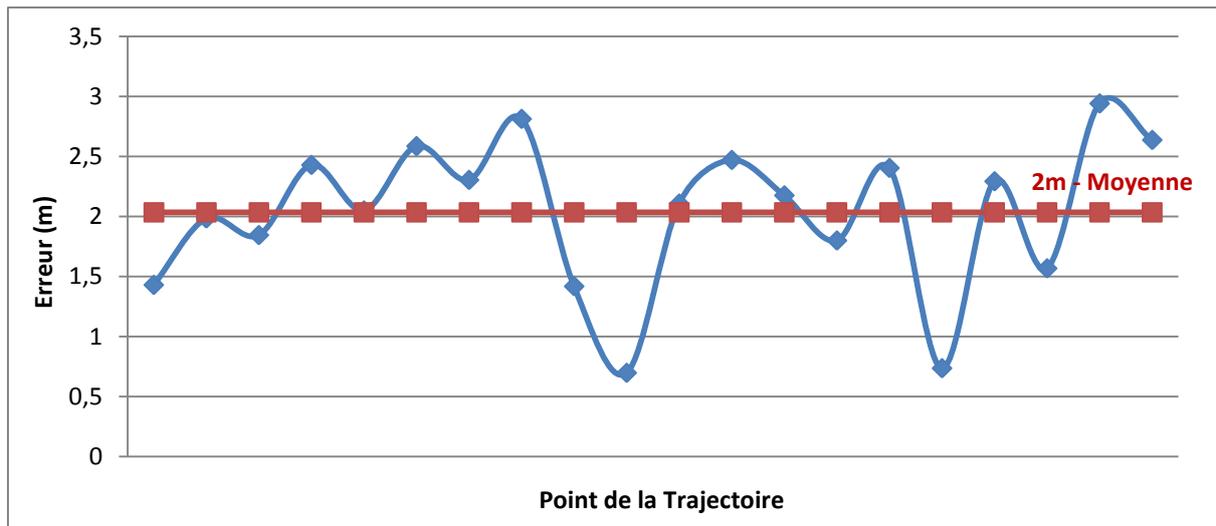


Figure 148 L'erreur en fonction du point

Les courbes précédentes permettent de mettre en évidence une approche complexe lors du changement d'altitude au niveau du déplacement.

Pour tous les points du déplacement, nous avons moins de 18 équipements visibles, comme le montre la figure 149. Cette valeur correspond à 37% des équipements présents dans l'environnement.

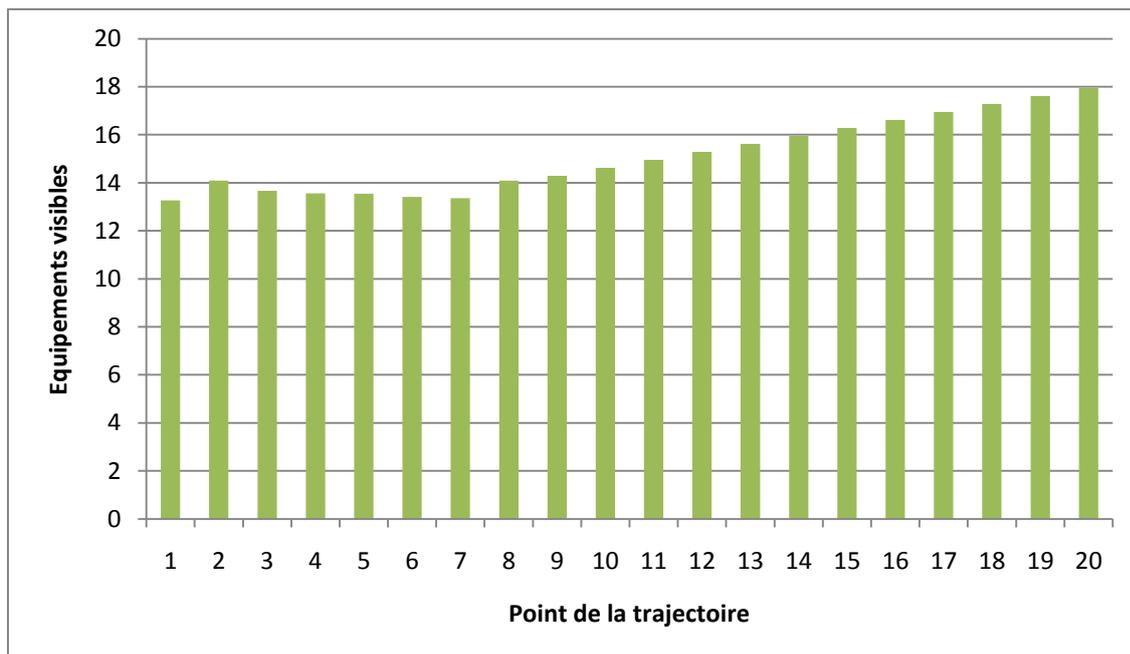


Figure 149 Le nombre d'équipements visibles en fonction du point de déplacement

8.4 Récapitulatif des résultats

Nous allons présenter dans ce paragraphe un récapitulatif des résultats obtenus. Nous avons simulé les situations les plus courantes à Telecom SudParis suite à des études statistiques effectuées précédemment.

Dans un premier temps, nous comparons les scénarios statiques.

Zone géographique	Pause Café		Journée habituelle	
	Erreur moyenne	Pourcentage d'inconnus	Erreur moyenne	Pourcentage d'inconnus
Cafétéria	8m50	69%	10m50	67%
Forum	13m75	69%	7m75	63%
Bâtiment	8m00	68%	6m00	69%

Tableau 25 Tableau récapitulatif des scénarios statiques

L'erreur reste inférieure à 15m pour tous les scénarios ainsi que pour toutes les zones géographiques. Nous allons vérifier l'impact de la densité des équipements sur l'erreur moyenne.

Zone géographique	Pause Café		Journée habituelle	
	Erreur moyenne	Nombre d'équipements/m ²	Erreur moyenne	Nombre d'équipements/m ²
Cafétéria	8m50	0.169	10m50	0.08
Forum	13m75	0.825	7m75	0.137
Bâtiment	8m00	0.766	6m00	0.555

Tableau 26 Tableau récapitulatif des scénarios statiques - densité

Une variation faible du nombre d'équipements/m² ne semble pas affecter l'erreur moyenne. Le nombre d'équipements/m² doit néanmoins être supérieur à 0.01 équipements/m², suivant nos résultats dans le chapitre précédent.

Regardons maintenant l'erreur moyenne lors de simulations en 2D et 3D.

Zone géographique	2D		3D	
	Erreur moyenne	Pourcentage	Erreur moyenne	Pourcentage
Bâtiment A	7m	70%	7m50	70%

Tableau 27 Tableau récapitulatif des scénarios statiques – 2D et 3D

70% des équipements sont positionnés dans les deux cas avec une erreur inférieure à l'erreur moyenne. Une baisse minimale de l'erreur moyenne est obtenue lors d'un scénario 2D. Nous n'observons pas une variation importante dans les deux types d'environnements. Dans un environnement 2D l'erreur s'élève à 7m et dans un environ 3D, elle s'élève à 7m50. Nous ne pouvons donc pas affirmer que dans un environnement 3D, l'approche est plus précise que dans un environnement 2D. Comme mentionné précédemment, les positions géographiques acquises par les équipements par d'autres moyens tels que le GPS peuvent être imprécises. Nous avons appliqué de ce fait, un facteur d'imprécision allant de 1m à 2m. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Zone géographique	Imprécision 0m	Imprécision 1m	Imprécision 2m
	Erreur moyenne	Erreur moyenne	Erreur moyenne
Forum	13m03	7m44	8m81
Bâtiment A	5m50	7m88	6m24

Tableau 28 Tableau récapitulatif des scénarios statiques – 1m, 2m

L'erreur semble varier indépendamment de l'imprécision. En effet, pour une imprécision allant jusqu'à 2m par coordonnées, les résultats de positionnement sont plus précis.

En ce qui concerne les scénarios variables, l'erreur de position dans les deux cas est inférieure à 3m.

Trajectoire	Erreur moyenne	Nombre de points
Professeur	< 3m	20 points
Etudiant	< 3m	20 points

Tableau 29 Tableau récapitulatif des scénarios variables

Lors d'un déplacement, nous pouvons supposer que l'utilisateur change d'environnement. Ce dernier passe d'un environnement extérieur à un environnement intérieur. Notre simulateur peut à cet effet, utiliser la dernière position acquise par le Smartphone dans l'environnement extérieur pour effectuer les calculs.

Notre approche permet d'obtenir dans tous les cas illustrés une erreur moyenne inférieure à 15m. Cette erreur est obtenue avec des équipements déployés aléatoirement dans l'environnement ainsi qu'un pourcentage d'équipements sans information de positionnement supérieur à 60% du nombre total.

8.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux résultats de simulations appliquées aux situations réelles présentes à Telecom SudParis. Nous avons exposé les résultats de différentes simulations et analyser les résultats. Dans un premier temps, nous avons analysé des scénarios statiques : lors d'une pause café et lors d'une journée habituelle vers 11h. Nous avons étudié aussi lors de ces simulations l'impact de l'altitude sur notre approche de positionnement. Nous avons remarqué une légère hausse au niveau de l'erreur obtenue lors d'une simulation dans un environnement tridimensionnel. L'erreur obtenue pour les scénarios statiques reste inférieure à 10m. Dans un deuxième temps, nous avons analysé des scénarios variables au cours du temps. Nous avons modélisé des déplacements. Le premier scénario variable schématise le déplacement d'un professeur qui arrive sur le campus et se dirige vers le forum. Le deuxième scénario modélise le déplacement d'un étudiant qui se dirige vers sa salle de cours. Dans les deux cas, une erreur inférieure à 3m est obtenue.

A ce stade, une étude applicative dans des conditions réelles pourrait confirmer nos résultats.

Chapitre 9

Conclusion

Le besoin de se positionner chez l'homme est depuis toujours un besoin essentiel. Pendant les dernières années, ce besoin a été matérialisé à travers le développement de systèmes de positionnement. Avec ce progrès, les exigences de l'individu en termes de continuité de service, de précision ou de disponibilité sont devenues très grandes. De ce fait, les recherches dans ce domaine, se sont accrues, en essayant de pallier les différents problèmes rencontrés jusqu'à présent. Parmi les techniques utilisées (décrites dans le chapitre 2) nous pouvons citer les techniques basées sur la trilatération, essentiellement utilisée par les systèmes GNSS, les techniques à base de « fingerprinting », les techniques symboliques ou encore les techniques hétérogènes utilisant plusieurs technologies (Bluetooth et Wifi, par exemple). Chaque technique ou système apporte une nouvelle approche de positionnement et permet d'obtenir un positionnement de l'individu. Néanmoins, après une étude détaillée, toutes ces techniques ont un point crucial en commun : une intervention humaine préalable est nécessaire. Cette intervention humaine peut se manifester sous la forme de la mise en place d'une infrastructure supplémentaire, une calibration, une construction de carte de niveaux.

Afin de réduire tous ces critères de mise en œuvre, nous avons proposé au chapitre 3 de travailler sur un système de positionnement basé sur la propagation de la position géographique dans les réseaux de télécommunications, déjà déployés dans l'environnement. Nous avons utilisé les techniques de communication entre les équipements afin de construire des graphes de relations géographiques, nous permettant de calculer la position géographique de l'équipement recherché. L'approche a permis de développer un système de positionnement totalement autonome. Aucune intervention humaine, ni calibration, ni historique ne sont nécessaires.

Au cours de ces dernières années, plusieurs approches ont été développées avec l'objectif une précision proche des systèmes GNSS, dans un environnement intérieur : les systèmes à base de UWB, les systèmes à bases de points d'accès Wifi, etc. Ces approches ont permis d'atteindre une précision importante ainsi qu'une certaine continuité de service entre l'environnement extérieur et intérieur. Cependant, elles se limitent à un environnement bien déterminé (hôpital, laboratoire, entreprise, etc.) ou à des technologies bien précises (Wifi, Bluetooth, GPS, etc.). Elles restent donc peu efficaces suite à leur déploiement très restreint. Par conséquent, elles sont peu adaptées pour une garantie de qualité, une continuité ou une disponibilité de services absolus. Dans l'objectif d'obtenir un système de positionnement universel, nous avons développé une nouvelle approche de positionnement. Notre système de positionnement présente une nouvelle méthode de calcul de la position géographique. Nous prenons en compte tous les équipements réseaux présents dans

l'environnement, dont certains ayant des informations de positionnement et nous étudions les différents liens existants entre ceux-ci. Nous utilisons les informations de positionnement fournies par un nombre limité d'équipements afin d'obtenir les positions géographiques de tous les équipements du réseau.

Deux étapes sont nécessaires : l'étude de visibilité et l'élaboration de liens géographiques. La visibilité, définie dans le chapitre 4, précise les critères de visibilité d'un équipement pour un autre : la distance, la portée, etc. Afin de déterminer si un équipement est visible par un autre, nous avons mis en œuvre plusieurs méthodes de visibilité : zone de portée, puissance estimée, distance estimée, voisins les plus proches et nombre de sauts. Après une comparaison des distances estimées entre équipements à travers ces méthodes, nous avons opté pour la méthode de puissance reçue pour nos simulations. En effet, cette méthode nous permet d'obtenir une erreur de distance plus faible que les autres méthodes.

L'élaboration des liens géographiques (décrite chapitre 5) s'effectue via deux théories : la théorie des graphes ou le raisonnement spatial. La théorie des graphes se base sur l'élaboration de graphes constitués de sommets et d'arcs. Les sommets représentent les équipements du réseau et les arcs les liens géographiques entre ces équipements. Un équipement visible est visible par un autre équipement s'ils sont reliés par un arc. Le raisonnement spatial est fondé sur les relations spatiales entre les équipements, déterminées à travers des opérateurs directionnels. Lors des simulations, nous avons choisi la première théorie, moins coûteuse en termes de temps de traitement.

Le chapitre 7 propose différentes simulations avec différents scénarios, dans le but de vérifier le fonctionnement du simulateur. Nous avons mené des tests de performance, de dégradation technique, de robustesse et de capacité. Les tests de performance ont permis de vérifier la performance du simulateur en effectuant une vérification des résultats lorsque tous les équipements présents dans l'environnement possèdent des positions géographiques connues, au préalable. Les tests de dégradation technique ont vérifié le fonctionnement du simulateur avec des équipements sans aucune information de positionnement. Nous obtenons dans ce cas, un positionnement relatif. Des simulations avec 1000 équipements ont été lancées pour confirmer la robustesse du simulateur. Les tests de capacité permettent de vérifier la fiabilité du simulateur en variant le nombre d'équipements total de 5 équipements à 1000 équipements. Lors de ces tests, nous avons pu évaluer les paramètres importants pour notre simulateur : le nombre d'équipement total, le nombre d'équipements sans coordonnées géographiques, la technique de visibilité utilisée. Nous avons pu constater que le nombre d'équipements visibles avait une influence moindre par rapport au nombre d'équipements sans information géographique sur les résultats de positionnement. De plus, la densité des équipements dans l'environnement reste un facteur indéniable pour un résultat favorable.

Après avoir présenté les résultats des différents tests de simulations, nous avons appliqué les simulations dans un environnement familier : Telecom SudParis, exposées dans le chapitre 8. Ayant effectué des statistiques sur le nombre d'équipements réseaux présents dans les bâtiments à différents moments de la journée, nous avons pu modéliser plusieurs scénarios. La simulation de différentes scènes de la vie courante donne une idée sur le fonctionnement d'un tel système de positionnement. Des résultats ont été présentés dans les cas suivants : une pause café, une journée habituelle vers 11h (scénarios statiques), un professeur arrivant dans le campus et un étudiant allant dans un cours (scénarios variables). Nous avons évalué les résultats suite à une variation du nombre d'équipements déployés sans information de positionnement, de la zone géographique, de la densité ou de l'altitude. Les résultats obtenus lors de ces simulations confirment les résultats lors de différents tests (chapitre 7). Nous pouvons aussi constater que l'erreur moyenne obtenue lors des simulations reste inférieure à 10m. Dans des conditions favorables (nombre important d'équipements et zone restreinte), l'erreur devient inférieure à 4m.

L'approche de positionnement élaborée a permis de mettre en œuvre un système de positionnement hétérogène et universel. L'utilisation des réseaux existants ainsi que les communications entre les équipements permettent une propagation d'informations dont l'utilisation peut s'avérer très favorable aux besoins de positionnement.

Cette thèse peut donner suite à des travaux complémentaires. Les communications réseaux entre les équipements via différentes technologies (handover vertical) permettent d'échanger différents types d'informations, notamment des informations de positionnement. Le handover vertical est une technique de décision, basée sur des critères tels que la puissance reçue, la qualité du canal, etc. Cette technique suppose qu'une migration ou changement de technologie de communication est tout à fait possible et complètement transparente pour l'utilisateur. L'alliance de notre système de positionnement et les techniques de handover présente une première perspective.

Notre système de positionnement est fondé sur des calculs matriciels importants. L'élaboration d'application client/serveur pour les opérations de calcul constitue une deuxième perspective. Avec l'essor des équipements mobiles à accès Internet, cet échange avec un serveur distant peut s'avérer intéressante en termes de temps de traitement.

Une troisième perspective réside dans le fait d'implémenter l'approche au niveau pratique. Le développement d'une application pour un équipement mobile de type Smartphone est donc nécessaire pour évaluer les résultats obtenus.

Références

- [Teemu 2007] [Teemu Toroi](#), "[Location Technologies & Services : Mapping the Future](#)", Growing Galileo Event, 14-15 November 2007, Bruxelles. ([http://www.gsa.europa.eu/go/communications/ events/growing-galileo/programme/day-1/day-1-wednesday-14-november-2007](http://www.gsa.europa.eu/go/communications/events/growing-galileo/programme/day-1/day-1-wednesday-14-november-2007)).
- [Carver & al 2005] C. Carver, "Myths and realities of anywhere GPS – High sensitivity versus assisted techniques", GPS World, September 2005.
- [Eissfeller 2004] B. Eissfeller, "In-Door Positioning with GNSS – Dream or Reality in Europe," International Symposium European Radio Navigation Systems and Services, Munich, Germany, 2004.
- [Sun & al 2005] G. Sun, J. Chen, W. Guo and K.J. Ray Liu, "Signal Processing Techniques in Network-Aided Positioning – A survey of state-of-the-art positioning designs," IEEE Signal Processing Magazine, July 2005.
- [Syrjarinne & al 2006] J. Syrjarinne and L. Wirola, "Setting a New Standard – Assisted GNSS Receivers That Use Wireless Networks," InsideGNSS, Vol. 1, No. 7, 2006, pp. 26-31.
- [Van der Haegen 2007] Van der Haegen Mathieu, "Réseaux de senseurs sans fil: problèmes de localisation", Mémoire de licence, Université Libre de Bruxelles, 2007.
- [Kubrak 2007] Kubrak, Damien (2007) Etude de l'hybridation d'un récepteur GPS avec des capteurs bas-coûts pour la navigation personnelle en milieu urbain. Doctorat Electronique et Communications, ENST - COMELEC Communication et Electronique, ENST p.227.
- [Lymberopoulos 2005] D. Lymberopoulos, Q. Lindsey, and A. Savvides. An Empirical Analysis of Radio Signal Strength Variability in IEEE 802.15. 4 Networks using Monopole Antennas. Proceedings of IEEE Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems, 2005.
- [Priyantha 2003] N.B. Priyantha, H. Balakrishnan, E. Demaine, and S. Teller. Anchorfree distributed localization in sensor networks. Proc. 1st Inter. Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), pages 340_341, 2003.
- [Capkun & al 2002] S. Capkun, M. Hamdi, and J.P. Hubaux. GPS-free Positioning in Mobile Ad Hoc Networks. Cluster Computing, 5(2) :157_167, 2002.
- [Bulusu & al 2000] N. Bulusu, J. Heidemann, and D. Estrin. GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices. Personal Communications, IEEE, 7(5) :28_34, 2000.
- [Simic & al 2003] S. Simic and S. Sastry. A distributed algorithm for localization in random wireless networks. Discrete Applied Mathematics, 2003.
- [He & al 2003] T. He, C. Huang, B.M. Blum, J.A. Stankovic, and T. Abdelzaher. Range free localization schemes for large scale sensor networks. ACM Press New York, NY, USA, 2003.
- [Moore & al 2004] D. Moore, J. Leonard, D. Rus, and S. Teller. Robust distributed network localization with noisy range measurements. Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, pages 50_61, 2004.

- [Pugh & al 2008] J. Pugh. Local Range and Bearing Sensing Using Infrared Transceivers in Mobile Robotics. 2004.
- [Chelly & al 2008] Magda Chelly, Adel Ghazel, Riadh Tebourbi, Nel Samama, "WiFi Hybridisation with Pseudolites and Repeaters for Indoor Positioning Purposes", ENC-GNSS 2008, Toulouse, Mai 2008, France.
- [Costa & al 2006] J.A. Costa, N. Patwari, and A.O. Hero III. Distributed weighted multidimensional scaling for node localization in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 2(1):39_64, 2006.
- [Eren & al 2004] T. Eren, D.K. Goldenberg, W. Whiteley, Y.R. Yang, A.S. Morse, B.D.O. Anderson, and P.N. Belhumeur. Rigidity, computation, and randomization in network localization. *IEEE Infocom*, 2004.
- [Haza & al 2004] M. Hazas, J. Scott, and J. Krumm. Location-aware computing comes of age. *IEEE Computer Magazine*, 37(2) :95, 2004.
- [Kushwaha & al 2005] M. Kushwaha, K. Molnar, J. Sallai, P. Volgyesi, M. Maroti, and A. Ledeczi. Sensor Node Localization Using Mobile Acoustic Beacons. PhD thesis, Vanderbilt University, 2005.
- [Langendoen & al 2003] K. Langendoen and N. Reijers. Distributed localization in wireless sensor networks : a quantitative comparison. *Computer Networks*, 43(4) :499_518, 2003.
- [Niculescu & al 2003] D. Niculescu and B. Nath. DV Based Positioning in Ad Hoc Networks. *Telecommunication Systems*, 22(1) :267_280, 2003.
- [Polastre & al 2005] J. Polastre, J. Hui, P. Levis, J. Zhao, D. Culler, S. Shenker, and I. Stoica. A unifying link abstraction for wireless sensor networks. ACM Press New York, NY, USA, 2005.
- [Priyantha 2000] N.B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Balakrishnan. The Cricket location-support system. *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 32_43, 2000.
- [Stoleru & al 2004] R. Stoleru and J.A. Stankovic. Probability grid : A location estimation scheme for wireless sensor networks. *Proceedings of SECON*, 2004.
- [Whitehouse & al 2006] K. Whitehouse and D. Culler. A robustness analysis of multi-hop ranging based localization approximations. *Proceedings of the fifth international conference on Information processing in sensor networks*, pages 317_325, 2006.
- [Whitehouse & al 2005] K. Whitehouse, C. Karlof, A. Woo, F. Jiang, and D. Culler. The effects of ranging noise on multihop localisation: an empirical study. *Proceedings of the fifth international conference on Information processing in sensor networks*, 2005.
- [Zetik & al 2004] R. Zetik, J. Sachs, and R. Thoma. UWB localization_active and passive approach. *Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2:1005_1009, 2004.
- [Samama & al 2005] Nel Samama, Alexandre Vervisch-Picois, "Current Status of GNSS Indoor Positioning Using GNSS Repeaters ", ENC-GNSS 2005, Munich, July 2005, Germany.
- [Jardak & al 2007] Nabil Jardak, Nel Samama, " Future GNSS signals and indoor positioning : multi-constellation and multi-frequency approaches", GNSS 2007, Genève, Mai 2007, Suisse.
- [Kaplan & al 2006] E. D. Kaplan and C. Hegarty, *Understanding GPS: Principles and applications*, Artech House, 2nd ed., 2006.

- [Parkinson & al 1996] B. W. Parkinson and J. J. Spilker Jr., Global positioning system: theory and applications, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.
- [Bahl & al 2000] Bahl, P. Padmanabhan, V.N, RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system, Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, INFOCOM 2000.
- [Aitenbichler & al 2003] Aitenbichler, E. Muhlhauser, M., An IR local positioning system for smart items and devices, Distributed Computing Systems Workshops, 2003.
- [Castano 2004] Castano, J.G.; Svensson, M.; Ekstrom, M., Local positioning for wireless sensors based on Bluetooth™, Radio and Wireless Conference, 2004 IEEE
- [Chai-Yen 2010] Chia-Yen Shih; Marrón, P.J., COLA: Complexity-Reduced Trilateration Approach for 3D Localization in Wireless Sensor Networks, Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM), 2010
- [Caruso 2000] Caruso, M.J., Applications of magnetic sensors for low cost compass systems, Position Location and Navigation Symposium, IEEE 2000
- [Chelly 2007] Chelly Magda, Système de localisation en intérieur – Wlan Symbolique, Rapport de stage de fin d'études, 2007
- [Yiyang 2007] Yiyang Zhao; Yunhao Liu; Ni, L.M, VIRE: Active RFID-based Localization Using Virtual Reference Elimination, International Conference on Parallel Processing, 2007. ICPP 2007
- [Tingting 2010] Tingting Yi; Zhiyi Fang; Ruixue Li, RMADV-Hop: An Improved DV-Hop Localization Algorithm, Seventh International Conference on Information Technology: New Generations (ITNG), 2010
- [Pujol & al 2000] Pujol, A.; Lumbreras, F.; Varona, X.; Villanueva, J.J., Locating people in indoor scenes for real applications, 15th International Conference on Pattern Recognition, 2000
- [Bing & al 2001] Bing Hwa Cheng, Lieven Vandenberghe, Kung Yao, Distributed algorithm for node localization in wireless ad-hoc networks, University of California, Los Angeles, CA, 2001
- [Drago & al 2003] DRAGO,S NICULESCU BADRI, DV Based Positioning in Ad Hoc Networks, Division of Computer and Information Sciences, Rutgers, The State University of New Jersey, Telecommunication Systems 22:1-4, 267-280, 2003
- [Thompson & al 2010] S.; Thompson, D.; Di, J, Fingerprinting RFID Tags, Chinnappa Gounder Periaswamy, IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, Volume: PP , Issue: 99, 2010
- [Birch & al 2000] Birch, M.C.; Quinn, R.D.; Hahm, G.; Phillips, S.M.; Drennan, B.; Fife, A.; Verma, H.; Beer, R.D, Design of a cricket microrobot, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000
- [Zaid & al 2010] Zaid, Farid; Costantini, Diego; Parag, S. Mogre; Reinhardt, Andreas; Schmitt, Johannes; Steinmetz, Ralf, WBroximity: Mobile participatory sensing for WLAN- and Bluetooth-based positioning, IEEE 35th Conference on Local Computer Networks (LCN), 2010
- [Pesche & al 2009] Peschke, S.; Bevermeier, M.; Haeb-Umbach, R., A GPS positioning approach exploiting GSM velocity estimates, 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, 2009. WPNC 2009
- [Chelly Magda & al 2007] Magda Chelly, Nel Samama, WiFi Indoor Symbolic Positioning System Implemented On a PDA, GNSS 2007, Genève, Mai 2007, Suisse.

- [Chelly M & al 2007] Magda Chelly, Adel Ghazel, Riadh Tebourbi, Nel Samama, Multi Storey Indoor Symbolic Positioning System Implementation and Performances with WiFi, Nav07, London, UK, November 2007.
- [Chelly & al 2009] Magda Chelly, Samama Nel, Automatic 3D Localisation System Using Propagation of Positions in a Connected Network, ENC-GNSS2009, Naples, Mai 2009, Italie.
- [Chelly Magda & al 2009] Magda Chelly, Samama Nel, New techniques for indoor positioning, combining deterministic and estimation methods, ENC-GNSS2009, Naples, Mai 2009, Italie.
- [Chelly & al 2010] Magda Chelly, Samama Nel, Detecting Visibility in Heterogeneous Simulated Environments for Positioning Purposes, IPIN Zurich 2010, Septembre 2010, Suisse.
- [Rajappa & al 2008] Rajappa, V.; Biradar, A.; Panda, S.; Efficient Software Test Case Generation Using Genetic Algorithm Based Graph Theory, Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, 2008. ICETET '08. First International, 2008
- [Cederbaum 1984] Cederbaum, I. Some applications of graph theory to network analysis and synthesis, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Volume: 31, Issue: 1 1984
- [Wang & al 2010] Wang Jinmei; Zhuang Kejia; Study of Facility Location and Allocation Problem Based on Fuzzy Graph Theory, International Conference on Management and Service Science (MASS), 2010 , 2010
- [Nakayama & al 2010] Nakayama, K.; Shinomiya, N, Distributed control based on tie-set graph theory for smart grid networks, International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2010
- [Lelin & al 2007] Lelin Zhang; Hongkai Xiong; Kai Zhang; Xiaobo Zhou Graph Theory Application in Cell Nucleus Segmentation, Tracking and Identification, International Conference on Bioinformatics and Bioengineering, 2007
- [Bin & al 2002] Bin, S.; Huang, G.Q.; Mak, K.L. Web-based product platform development using graph theory, IEEE International Engineering Management Conference, 2002. IEMC '02. 2002
- [Chitcharoen & al 2008] Chitcharoen, D.; Pattaraintakorn, P, Towards theories of fuzzy set and rough set to flowgraphs, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2008. FUZZ-IEEE 2008
- [Shea 2000] Shea, J.J. Graph theory and its applications [Book Review], IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume: 16 , Issue: 2, 2000
- [Abdelmoty & al 2006] Abdelmoty, A.I.; Smart, P.; El-geresy, B.A. Towards the Practical Use of Qualitative Spatial Reasoning in Geographic Information Retrieval, 3rd International IEEE Conference on Intelligent Systems, 2006
- [Morales & al 2006] Morales, A.; Sciavicco, G. Using Temporal Logic for Spatial Reasoning: Spatial Propositional Neighborhood Logic, Thirteenth International Symposium on Temporal Representation and Reasoning, 2006. TIME 2006.

- [Alboody & al 2008] Alboody, A.; Sedes, F.; Inglada, J. Post-classification and spatial reasoning: new approach to change detection for updating GIS database, 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Application.
- [El-Geresy & al 1997] El-Geresy, B.A., The space algebra: spatial reasoning without composition tables, Ninth IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, 1997.
- [El-Geresy & al 1996] El-Geresy, B.A.; Abdelmoty, A.I. Eighth IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, 1996
- [Canlin & al 2009] Canlin Li; Jiajie Lu; Chao Yin; Lizhuang Ma, Qualitative Spatial Representation and Reasoning in 3D Space, Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2009.
- [Holt & al 1995] Holt, A.; Benwell, G.L Case-based reasoning with spatial data, Conference on Artificial Neural Networks, 1995
- [Han-Young & al 2006] Han-Young Jang; Moradi, H.; Suyeon Hong; Sukhan Lee; JungHyun Han, Spatial Reasoning for Real-time Robotic Manipulation, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006
- [Pham& al 1999] Pham, D.T.; Shankir, Y.M.A, FSR-ARTMAP: a modified fuzzy ARTMAP with fuzzy signals and rules, 6th International Conference on Neural Information Processing, 1999. Proceedings. ICONIP '99. Volume: 1, 1999
- [Au & al 2010] Au, T.S.; Rong Duan; Heeyoung Kim; Guang-Qin Ma, Spatiotemporal Event Detection in Mobility Network, IEEE 10th International Conference on Data Mining (ICDM), 2010
- [Bo & al 2009] Bo Hu; Shanzhi Chen; Qinxue Sun; Yong Jiang, Performance analysis of network mobility protocols in IP networks, 9th International Symposium on Communications and Information Technology, 2009. ISCIT 2009
- [Ariyakhajorn, & al 2006] Ariyakhajorn, Jinthana; Wannawilai, Pattana; Sathitwiriya Wong, Chanboon, A Comparative Study of Random Waypoint and Gauss-Markov Mobility Models in the Performance Evaluation of MANET, International Symposium on Communications and Information Technologies, 2006. ISCIT '06
- [Gowrishankar & al 2009] Gowrishankar, S.; Sarkar, S.; Basavaraju, T.G., Simulation Based Performance Comparison of Community Model, GFMM, RPGM, Manhattan Model and RWP-SS Mobility Models in MANET, First International Conference on Networks and Communications, 2009. NETCOM '09
- [Lassabe 2005] Lassabe, F.; Canalda, P.; Chatonnay, P.; Spies, F, A Friis-based calibrated model for WiFi terminals positioning, Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, 2005. WoWMoM 2005
- [Hogg & al 1993] Hogg, D.C., Fun with the Friis free-space transmission formula, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Volume: 35 , Issue: 4, 1993

- [Chu & al 1965] Chu, T.S, An approximate generalization of the Friis transmission formula Proceedings of the IEEE, Volume: 53 , Issue: 3, 1965
- [Umm-e-Habiba & al 2009] Umm-e-Habiba; Asghar, S., A survey on multi-criteria decision making approaches, International Conference on Emerging Technologies, 2009. ICET 2009
- [Chowdhury & al 1993] Chowdhury, F.N., Decision making with neural networks, Southeastcon '93, 1993
- [Matsuda & al 2006] Matsuda, S, A Neural Network Model for the Decision-Making Process Based on ANP, International Joint Conference on Neural Networks, 2006. IJCNN '06. 2006
- [Ogasawara & al 1996] Ogasawara, G.; Ju, T.; Kota, S, Experiments with tactical network simulation, routing and management, Conference Proceedings, IEEE Military Communications Conference, 1996. MILCOM '96, Volume: 2, 1996
- [Song Liu & al 2008] Song Liu; Fevens, T.; Abdallah, A.E, Hybrid Position-Based Routing Algorithms for 3D Mobile Ad Hoc Networks, The 4th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 2008. MSN 2008. 2008
- [Abdallah & al 2006] Abdallah, A.E.; Fevens, T.; Opatrny, J., Randomized 3D Position-based Routing Algorithms for Ad-hoc Networks, 3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems - Workshops, 2006
- [Gowrishankar & al 2000] Gowrishankar, S.; Sarkar, S.; Basavaraju, T.G, Simulation Based Performance Comparison of Community Model, GFMM, RPGM, Manhattan Model and RWP-SS Mobility Models in MANET, First International Conference on Networks and Communications, 2009. NETCOM '09, 2009
- [Prabhakaran & al 2006] Prabhakaran, P.; Sankar, R, Impact of Realistic Mobility Models on Wireless Networks Performance, IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2006
- [Towsley 2008] Towsley, D, Mobility Models for Wireless Networks: Challenges, Pitfalls, and Successes, PADS '08. 22nd Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation, 2008
- [Liu & al 2009] Liu Tie-yuan; Chang Liang; Gu Tian-long, Analyzing the Impact of Entity Mobility Models on the Performance of Routing Protocols in the MANET, WGEC 3rd International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, 2009
- [Blazevic & al 2005] Blazevic, L.; Le Boudec, J.-Y.; Giordano, S, A location-based routing method for mobile ad hoc networks, IEEE Transactions on Mobile Computing, Volume: 4 , Issue: 2, 2005