



HAL
open science

Contribution à la modélisation, à la simulation et à l'évaluation d'applications nomades à intelligence répartie : application à l'assistance aux voyageurs aveugles dans les transports publics et les pôles d'échanges

Jihane El Sayah

► **To cite this version:**

Jihane El Sayah. Contribution à la modélisation, à la simulation et à l'évaluation d'applications nomades à intelligence répartie : application à l'assistance aux voyageurs aveugles dans les transports publics et les pôles d'échanges. Autre. Université Paris-Est, 2009. Français. NNT : 2009PEST1032 . tel-00533999

HAL Id: tel-00533999

<https://theses.hal.science/tel-00533999v1>

Submitted on 8 Nov 2010

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

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

UNIVERSITÉ PARIS-EST

ÉCOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUE ET STIC

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Electronique, Optronique et Systèmes
Laboratoire ESYCOM Electronique, Système de Communications et Microsystèmes

Présentée et soutenue publiquement par

Jinane SAYAH

Le 18 décembre 2009

Contribution à la modélisation, à la simulation et à l'évaluation d'applications nomades à intelligence répartie – Application à l'assistance aux voyageurs aveugles dans les transports publics et les pôles d'échanges

Directeur de thèse : Geneviève Baudoin
Co-encadrants : Olivier Venard et Bachar El Hassan

Jury

Rapporteurs : Jaime Lopez Krahe, Professeur à l'université Paris 8
Mounir Mokhtari HDR, Maître de conférences à Télécom SudParis, HDR

Examineurs : Geneviève Baudoin, Professeur ESIEE Paris, HDR
Bachar El Hassan, Maître de conférences Université libanaise
Venard Olivier, Maître de conférences ESIEE Paris
Martine Villegas, Professeur ESIEE Paris, HDR
Ahmed Seffah, Professeur EHL Lausanne, HDR

Remerciements

Je voudrais remercier tous ceux qui ont collaboré à la réussite de ce travail.

Ma profonde reconnaissance à ma directrice de thèse, Geneviève Baudoin, pour sa patience, son appui et son soutien durant ces quatre années.

Mes remerciements sincères à mon encadrant Olivier Venard et à mon co-encadrant Bachar El Hassan pour leurs idées constructives et leurs commentaires pertinents.

Mes sentiments dévoués à mes deux rapporteurs, Jaime Lopez Krahe et Mounir Mokhtari pour avoir accepté de juger mon travail et à Martine Villegas et Ahmed Seffah pour l'honneur qu'ils m'avaient donné d'être examinateurs de ce mémoire.

Un grand merci au personnel de l'université Paris-Est et de l'ESIEE pour leur accueil chaleureux et les moments agréables que j'ai passés avec eux malgré mes séjours un peu courts mais qui vont sûrement me manquer.

Mes remerciements profonds et chaleureux à ma famille et à mon mari pour leurs encouragements et leur aide inestimables.

Finalement un merci du fond du cœur à mon petit ange qui a changé mon monde et a été une source d'espoir et de motivation précieuse qui m'a permis de mener cette thèse jusqu'au bout.

*Sincèrement,
Jinane.*

RÉSUMÉ

Les développements récents dans le domaine des systèmes de communication mobiles (GSM/GPRS, UMTS, WIFI, WIMAX, ZigBee, Bluetooth, ULB), d'aide à la localisation (GPS, WPS, DRM), des nouveaux dispositifs mobiles intelligents comme les PDA et les téléphones intelligents, de l'accès aux données rendent possible le développement de nouvelles applications et services facilitant la vie quotidienne par un accès simple et généralisé à des informations temps réel. En particulier, de nouveaux services sont mis en œuvre, permettant d'améliorer l'intégration des personnes handicapées notamment les personnes aveugles. Le sixième programme cadre de recherche de l'union européenne a introduit à ce propos la notion d'«Ambient Intelligence».

De nombreuses technologies existent mais il faut pouvoir les intégrer d'une manière fiable et efficace en plaçant l'utilisateur final au centre des préoccupations. Un point important est le fonctionnement sans discontinuité perceptible par l'utilisateur dans différents environnements comme la maison, les transports publics, les espaces publics. Les applications et services développés doivent être contrôlables simplement par l'utilisateur, ceci est d'autant plus vrai si l'utilisateur est handicapé.

Dans ce contexte, la thèse a contribué au développement d'un système d'information et de guidage destiné aux personnes aveugles dans les transports publics. Les travaux s'appuient sur les acquis des projets RAMPE et INFOMOVILLE menés au sein d'un partenariat entre l'ESIEE, l'université Paris 8, le cabinet Ergonomos et la société LUMIPLAN. Le système RAMPE est formé d'une infrastructure réseau éventuellement hétérogène et de dispositifs intelligents portés par l'utilisateur. Chaque composant du système (stations de base ou bornes, dispositifs mobiles, serveurs de base de données) constitue un nœud producteur et consommateur d'informations et de services. Ce système a pour vocation de faciliter les déplacements dans les pôles d'échanges (bus, tramways, métros ...) qui sont des environnements particulièrement complexes pour un usager non familier qui doit découvrir les possibilités liées à son parcours. Cette situation est aggravée pour un voyageur aveugle. INFOMOVILLE s'inscrit dans le prolongement de RAMPE et a pour objectif de fournir des informations temps-réel, d'aider à l'orientation et à la sécurité des voyageurs à handicap sensoriel (visuel ou auditif) dans les transports publics.

La thèse a porté sur deux aspects critiques de ce type de systèmes : la fiabilité de la transmission de données et la capacité à localiser et à guider l'utilisateur de manière robuste. Elle a d'autre part développé un environnement de simulation utilisant le logiciel OMNeT++ pour le prototypage et l'analyse du fonctionnement de l'application nomade ainsi que l'étude des aspects réseaux de communication mobile.

Des limitations existent dans la version actuelle du système RAMPE/INFOMOVILLE notamment en ce qui concerne les protocoles de communication entre les bornes (équipant les stations de bus) et les PDA (dispositif porté par l'aveugle). Le présent travail a conduit à proposer un protocole plus performant et plus adéquat au type de trafic qu'on rencontre dans l'application RAMPE/INFOMOVILLE.

La technologie de communication WiFi adoptée dans RAMPE/INFOMOVILLE peut aussi servir à des services supplémentaires notamment des services de localisation et de guidage.

Cette technologie, bien qu'elle soit disponible et largement implémentée, est toutefois sujette aux erreurs et affectée par divers facteurs. Elle peut donc manquer de la fiabilité requise pour des systèmes comme RAMPE/INFOMOVILLE. Pour pallier à cette situation, on propose un protocole, inspiré d'un protocole existant qui ajoute, d'une part, une certaine fiabilité et sûreté à la communication, et d'autre part, permet de fabriquer un indicateur de qualité de la transmission réseau. Cet indicateur peut être traduit en un message compréhensible par les utilisateurs du système pour leur donner un degré de confiance en l'application et en leurs dispositifs. Cette qualité de liaison peut être évaluée et estimée selon plusieurs critères ; on a choisi un critère, le taux d'erreurs paquet (PER), bien adapté à l'application et à la technologie utilisées. Pour montrer l'efficacité du protocole proposé et le comparer aux protocoles actuels utilisés dans RAMPE/INFOMOVILLE, on le simule sur deux types de canaux : un canal réel pouvant être perturbé par plusieurs facteurs et interférences, et un canal modélisé par un modèle de Gilbert-Elliott en utilisant dans les deux cas le simulateur OMNeT++. Afin de minimiser le temps de simulation, le modèle de canal introduit simule les erreurs au niveau paquet. On déduit de l'identification des paramètres du modèle de canal, l'indicateur de qualité de transmission permettant d'élaborer un niveau de confiance pour l'utilisateur.

Le système RAMPE/INFOMOVILLE dans sa version actuelle ne propose pas de réel service de guidage ou de localisation pour les voyageurs aveugles à l'exception d'un guidage sonore à l'approche des bornes. Pourtant l'infrastructure et la technologie WiFi utilisée pour la communication peut être utilisée en localisation et guidage afin d'aider l'utilisateur à atteindre sa destination qui peut être un arrêt de bus au sein d'un pôle d'échanges ; Cette technologie peut être utilisée aussi bien dans les zones extérieures que dans les zones intérieures. Les systèmes de localisation existants utilisant la technologie WiFi avec une méthode d'empreinte radio permettent d'obtenir une précision suffisante pour ce type d'application mais présentent comme inconvénient important le temps nécessaire pour calibrer un site avec la précision voulue pour guider des personnes aveugles ou malvoyantes. Dans cette thèse, on propose une approche de la localisation et du guidage permettant de répondre aux besoins des utilisateurs tout en minimisant les contraintes pour les exploitants des réseaux de transport. Cette approche repose sur la notion de chemins privilégiés correspondant aux parcours possibles dans un pôle d'échanges. Ces chemins privilégiés sont calibrés avec une précision supérieure à celle des autres zones. Cette approche permet de réduire de manière importante le temps de calibration d'un site tout en conservant les performances requises. D'autres facteurs doivent aussi être considérés comme l'influence du déplacement ou de la panne éventuelle des points d'accès WiFi utilisés pour la localisation. Ces différents aspects et les solutions proposées ont été testés et validés par des expérimentations sur site.

Mots clés

Applications nomades, systèmes d'information, aveugles et malvoyants, transports en commun, localisation, guidage, WiFi, WiFi Positioning System (WPS), protocoles réseau, PDA.

ABSTRACT

The recent developments of mobile communication systems (GSM/GPRS, UMTS, WIFI, WIMAX, ZigBee, Bluetooth, UWB), location systems (GPS, WPS, DRM), new intelligent mobile devices (Personal Digital Assistant (PDA), smartphones), structuring and data access, have made possible the development of new services and applications making daily life easier by a simple and generalized access to real time information. In particular, new services are elaborated to improve the integration of handicapped people precisely the visually impaired or blind people. The sixth research program of the European Union has introduced in this context the notion of “Ambient Intelligence”.

Many technologies exist but it is necessary to integrate them in a reliable and effective way while giving intensive care to the end user. An important point is to guarantee the end user a continuous service in various environments like the house, public transports and public spaces. The developed applications and services must be simply controllable by the user especially if the user is handicapped.

In this context, this thesis contributed in the development of an information and guidance system for the blind people in the poles of transport interactions; it will be based on the assets of the RAMPE/INFOMOVILLE project carried out in partnership between ESIEE, Paris 8 university, the Ergonomos cabinet and LUMIPLAN company. The RAMPE system (in french-Référentiel d'assistance aux personnes Aveugles pour leur Mobilité dans les transports publics et les Pôles d'Echanges), is composed of an eventually heterogeneous network infrastructure and smart devices carried by the blind user. Each component of the system (base stations, mobile devices, databases) is a producer and consumer of information and services. The objective of this system is to increase the mobility and autonomy in the poles of transport interactions (bus, trams, trains...) which are particularly complex environments for a nonfamiliar user who has to discover the paths and possibilities related to his transport; this is worsen for a blind traveler. INFOMOVILLE is on the extension of RAMPE; its objective is to provide real time information, orientation and security assistance for handicapped travellers (blinds and deafs) in public transports and cities.

The thesis has focused on two critical aspects of this type of systems: the reliability of data transmission and the capacity to locate and guide the user in a robust way. In addition, a simulation environment using the OMNeT++ was developed for the prototyping and the analysis of the application's operation.

Limitations exist in the current version of RAMPE/INFOMOVILLE particularly in the communication protocols used between the terminals (installed in bus station) and the PDA (device carried by the blind). This work contributed in proposing a more powerful and adequate protocol to the type of traffic found in RAMPE/INFOMOVILLE.

The WiFi technology adopted in RAMPE/INFOMOVILLE can also be used in additional services in particular in localization and guidance. Although this technology is available and largely implemented, it is prone to many errors and affected by various factors. It can thus miss the reliability required by systems like RAMPE/INFOMOVILLE.

To remedy this situation, a new protocol was proposed which adds a certain reliability and safety to the communication; on the other hand, it allows elaborating a quality indicator of the network. This indicator can be translated into a comprehensible message which can offer the users a confidence degree in their application and device. This quality of connection can be evaluated and estimated according to several criterias; we have chosen the Packet Error Rate (PER) criteria, well adapted to the application and technology used. To show the effectiveness of the suggested protocol and to compare it with the current protocols used in RAMPE/INFOMOVILLE, we simulated it over two types of channels: a real channel being able to be disturbed by several factors and interferences, and a modeled Gilbert-Elliot channel, using in both cases the OMNeT++ simulator. In order to minimize the simulation time, the introduced channel model simulates the errors on the packet level. We deduce from the identification of the modeled channel parameters, the transmission quality indicator allowing elaborating a confidence degree for the user.

The RAMPE/INFOMOVILLE system, in its current version, does not propose a real localization and guidance service for the blind travellers except an auditive sound emitted by the base station of the bus stop allowing the blind to be guided towards it. However WiFi can be also adopted in localization and guidance services, allowing helping the blind to reach his/her destination which can be a bus station or a pole of transport interactions. WiFi could be used in both indoor and outdoor areas. The existing WiFi localization systems use the radio fingerprinting technique allowing a sufficient precision for this type of application but present a major drawback which is the time needed to calibrate a site for a required precision. We proposed in this thesis a new localization and guidance approach allowing meeting the users' needs while minimizing the constraints related to the system maintenance and implementation. This approach is based on the concept of "privileged paths" which correspond to the possible routes in a pole of transport interactions. These paths are calibrated with a higher precision than the remaining zones of the site which reduce the calibration time while preserving the necessary performance. Other factors are to be considered as well like the displacement or the possible breakdown of the access points which will influence the localization precision; these various aspects and the suggested solutions were tested and validated by experiments done on site.

Keywords

Mobile applications, information system, blind and visually impaired, public transports, localization, guidance, WiFi, WiFi Positioning System (WPS), network protocols, PDA.

LISTE DES PUBLICATIONS RÉALISÉES AU COURS DE LA THÈSE

- (1) J. Sayah, G. Baudoin, O.Venard, B. El Hassan. “Simulation using OMNeT++ of the RAMPE system - an Interactive Auditive Machine helping blinds in Public Transport”. *Proc. of 3rd IEEE Region 8 International Conference on Computer as a Tool, EUROCON 2005, Volume 2, p. 1028 - 1031*. Serbia & Montenegro, Belgrade. November 2005.
- (2) J. Sayah, G. Baudoin, O.Venard, B. El Hassan. “Architecture and Protocols of the RAMPE system- An Interactive Auditive Machine Helping Blinds in Public Transport”. *Proc. of the 2nd IEEE International Conference on Information & Communication Technologies: from Theory to Applications, ICTTA’06, Volume 1, p. 843 - 848*. Umayyad Palace, Damascus, Syria. April 2006.
- (3) J. Sayah, G. Baudoin, O.Venard, B. El Hassan. “RAMPE/INFOMOVILLE Application Protocol- Protocole Point à Multipoint adapté au système RAMPE/INFOMOVILLE- Assistance aux Personnes à Handicap Sensoriel pour leur Mobilité dans les Transports Publics et en Ville”. *5th International Conference on Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, SETIT 2009*. Hammamat, Tunisia. March 2009.
- (4) J. Sayah, G. Baudoin, O.Venard, B. El Hassan. “Localization and Guidance in RAMPE/INFOMOVILLE- an Interactive System of Assistance for Blind Travelers”. *2nd International Conference on the Applications of Digital Information and Web Technologies, ICADIWT 2009*. August 4-6 2009, London Metropolitan University, UK.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	i
Abstract.....	iii
Liste des publications réalisées au cours de la thèse	v
Liste des abréviations	ix
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures	xii
Introduction	1
Motivations et objet de la thèse	1
Principales contributions	2
Organisation du manuscrit	3
Chapitre 1	5
Les systèmes RAMPE et INFOMOVILLE	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Systèmes d'assistance aux personnes déficientes de la vision.....	6
1.3 Présentation et historique de RAMPE/INFOMOVILLE	13
1.3.1 Constituants et Architecture.....	14
1.3.2 Principe et fonctionnement	15
1.4 Simulation de RAMPE/INFOMOVILLE dans l'environnement OMNeT++	19
1.4.1 Introduction sur OMNeT++	19
1.4.2 Simulation de RAMPE/INFOMOVILLE	22
1.5 Limitations du système RAMPE testé à Lyon.....	23
1.6 Proposition d'amélioration du guidage auditif par le carillon des bornes.....	24
Chapitre 2.....	26
Technologies sans fil de communication et de localisation	26
2.1 Motivations	26
2.2 Technologies de communication sans fil courte distance	26
2.2.1 Zigbee.....	27
2.2.1.1 Norme IEEE 802.15.4	27
2.2.1.2 ZigBee et les couches IEEE.....	27
2.2.2 Bluetooth.....	29
2.2.2.1 Norme IEEE 802.15.1	29
2.2.2.2 Bluetooth et les couches IEEE	30
2.2.3 Wi-Fi (Wireless Fidelity)	31
2.2.3.1 Norme IEEE 802.11	32
2.2.3.2 WiFi et les couches OSI- Couche Physique	33
2.2.3.3 Les modes d'opération de 802.11	34
2.2.3.4 La couche Liaison de Données.....	38
2.2.3.5 Itinérance et réassociation	41
2.2.3.6 Débit réel et débit théorique	43
2.3 Géolocalisation - Techniques et systèmes	45
2.3.1 Généralités.....	45
2.3.2 Méthodes et Techniques de Géolocalisation	45
2.3.2.1 Méthodes géométriques	46
2.3.2.2 Méthodes Statistiques.....	47

2.3.2.3	Méthodes Hybrides.....	48
2.3.3	Techniques de mesure	48
2.3.4	Systèmes de localisation	49
2.3.4.1	Localisation par Satellite	49
2.3.4.2	WiFi Positioning System (WPS)	51
2.3.4.3	Systèmes de localisation par ondes radiofréquences ou infrarouges.....	53
2.3.4.4	Systèmes de localisation utilisant la diffusion des signaux de télévision	54
2.3.4.5	Systèmes de localisation utilisant les systèmes de communications cellulaires	54
2.4	Conclusion	55
Chapitre 3		57
RAMPE/INFOMOVILLE Application Protocol.....		57
3.1	Introduction et objectifs.....	57
3.2	Indicateur de qualité d'un lien WiFi.....	58
3.3	Modélisation d'un canal radio 802.11	59
3.4	Protocoles utilisés dans RAMPE/INFOMOVILLE	60
3.5	Transmission point-à-multipoint.....	61
3.6	Protocole RAP.....	62
3.6.1	Mécanisme de fonctionnement de RAP.....	62
3.6.2	RAP- protocole de la couche Session	63
3.6.3	Format de la trame de Service RAP	64
3.6.4	Trame de Bourrage.....	65
3.6.5	Trame de Statistique	65
3.6.6	Autres problèmes et remèdes.....	66
3.7	Simulation et évaluation de RAP.....	66
3.7.1	Simulation sur un canal réel.....	66
3.7.1.1	Expérimentation	67
3.7.1.2	Éléments de l'expérimentation	68
3.7.1.3	Simulation des protocoles RAP et UDP.....	74
3.7.1.4	Tableau récapitulatif comparatif (UDP vs. RAP sur un canal réel).....	78
3.7.1.5	Interprétations et observations	81
3.7.2	Identification des paramètres du canal WiFi	83
3.7.3	Simulation sur un modèle de canal de Gilbert-Elliot	86
3.7.3.1	Description de la simulation.....	86
3.7.3.2	Tableau comparatif (UDP vs. RAP sur un canal de Gilbert-Elliot).....	87
3.7.3.3	Histogrammes du canal de mauvaise qualité de Gilbert-Elliot.....	88
3.7.4	Comparaison UDP - RAP	89
3.7.5	Analyse	89
Chapitre 4		90
Positionnement et guidage dans RAMPE/INFOMOVILLE		90
4.1	Introduction	90
4.2	Principes d'un système de localisation radio et infrastructure nécessaire	91
4.2.1	Calibrage	91
4.2.2	Positionnement	92
4.2.2.1	Algorithmes de positionnement	93
4.2.3	Système Ekahau	97
4.3	Besoins utilisateurs et contraintes d'exploitation.....	98
4.3.1	Besoins utilisateurs.....	98
4.3.2	Contraintes d'exploitation	102
4.4	Proposition d'une méthodologie de calibrage avec chemins privilégiés	104
4.5	Expérimentation	105
4.5.1	Description du site et de l'infrastructure de l'expérimentation	105
4.5.2	Éléments de l'expérimentation	107
4.5.3	Scénario de base (scénario 1)- Calibrage uniforme du site.....	108

4.5.3.1	Méthodologie de calibration	108
4.5.3.2	Positionnement et résultats de précision.....	109
4.5.3.3	Impact de la mobilité sur la précision.....	110
4.5.4	Scénario proposé (scénario 2) - RAMPE/INFOMOVILLE RWPS.....	112
4.5.4.1	Méthodologie de calibration	112
4.5.4.2	Résultats de précision.....	113
4.5.4.3	Réflexions	114
4.5.4.4	Impact de la mobilité sur la précision.....	114
4.5.5	Scénarios de modifications et de perturbations	115
4.5.5.1	Scénario 3 - Elimination de quelques APs avant le calibrage	116
4.5.5.2	Scénario 4 – Suppression d’APs pendant le positionnement	117
4.5.5.3	Scénario 5 - Déplacement des APs.....	119
4.6	Guidage dans les différents scénarios	123
4.6.1	Guidage dans le scénario de calibrage uniforme (scénario 1)	123
4.6.2	Guidage dans le scénario de RWPS (scénario 2).....	126
4.6.3	Guidage dans le scénario d’élimination d’APs avant le calibrage	128
4.6.4	Guidage dans le scénario de suppression d’APs pendant le positionnement 130	
4.6.5	Guidage dans le scénario de déplacement des APs	131
4.6.6	RSSI durant le guidage	134
4.6.7	Analyse	137
4.7	Intégration dans RAMPE/INFOMOVILLE	138
	Conclusions et perspectives	141
	Principales contributions	141
	Perspectives et travaux futurs.....	142
	Bibliographie	146
	Annexe A	161
	Ekahau Real time Location System (RTLS)	161
	Annexe B	167
	Installation d’OMNeT+ +	167
	Annexe C	169
	Codes de simulation	169

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

ACK	Acknowledgment (Acquittement)
AP	Access Point
AoA	Angle of Arrival
BER	Bit Error Rate
BSA	Basic Service Area
BSS	Basic Service Set
BSSID	Basic Service Set Identification
CAP	Contention Access Period
CCK	Complementary Code Keying
CFP	Contention Free Period
CP	Contention Period
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CTS	Clear To Send
CW	Contention Window
DCF	Distributed Coordination Function
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DIFS	Distributed Coordination Function Inter-Frame Space
DS	Distribution System
DSAP	Destination Service Access Point
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EIFS	Extended Inter-Frame Space
ESA	Extended Service Area
ESS	Extended Service Set
FCS	Frame Check Sequence
FH	Frequency Hopping
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum
GNED	Graphical NETWORK Descriptor
GPS	Global Positioning System
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IBSS	Independent Basic Service Set
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFS	Interframe Space
INFOMOVILLE	Environnement temps-réel pour l'INFORMATION, l'orientation et la sécurité des voyageurs à handicap sensoriel (visuel ou auditive) au cours de leurs déplacements dans les transports collectifs, les pôles d'échanges et de façon plus générale pour la MOBILITÉ en VILLE
IP	Internet Protocol
IR	Infra rouge (Infrared)

ISM	Industrial, Scientific, and Medical
LAN	Local Area Network
LLC	Logical Link Control
MAC	Medium Access Control
MMI	Man Machine Interface
MTU	Maximum Transmission Unit
NED	NETwork Descriptor
OMNeT++	Objective Modular Network Testbed in C++
OSI	Open Systems Interconnection
PAM	Personne Aveugle ou Malvoyante
PCF	Point Coordination Function
PDA	Personal Digital Assistant
PDR	Packet-Delivery Ratio
PER	Packet Error Rate
PIFS	Point Coordination Function Inter- Frame Space
PP	Preferred Path
PR	Point de Référence
QoS	Quality of Service
RAMPE	Référentiel d'Assistance aux personnes aveugles pour leur Mobilité dans les transports publics et les Pôles d'Echange
RAP	RAMPE/INFOMOVILLE Application Protocol
R&D	Recherche et Développement
RF	Radio-Fréquence (RadioFrequency)
RSB	Rapport Signal sur Bruit
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SIFS	Short Inter-Frame Space
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
STA	Station Mobile
TCP	Transmission Control Protocol
TDoA	Time Difference of Arrival
ToA	Time of Arrival
UDP	User Datagram Protocol
UM	Utilisateur Mobile
UNII	Universal Networking Information Infrastructure band
WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
WEP	Wired Equivalent Privacy
WLAN	Wireless Local Area Network
WiFi	Wireless Fidelity
WPA	Wi-Fi Protected Access
WPS	WiFi Positioning System
XML	Extensible Markup Language

LISTE DES TABLEAUX

Table 1- Technologies de communication sans fil	27
Table 2- Les trios classes de modules radio Bluetooth	31
Table 3- Les différentes normes WiFi	33
Table 4- Découpage de la bande dans 802.11b/g.....	33
Table 5- Découpage de la bande dans 802.11a (zone intérieure)	34
Table 6- Découpage de la bande dans 802.11a (zone extérieure).....	34
Table 7- Les trames RAMPE/INFOMOVILLE	61
Table 8- Les catégories des trames RAP	63
Table 9- Spécifications du matériel de la manipulation.....	68
Table 10- Comparaison UDP et RAP (canal réel)	81
Table 11- UDP vs. RAP (canal Gilbert-Elliot optimisé et de mauvaise qualité)	87
Table 12- Canal de mauvaise, moyenne et bonne qualité.....	88
Table 13- RAP vs. UDP (canal réel et canal simulé)	89
Table 14- Composants du système Ekahau	97
Table 15- Longueur des différents PPs.....	108
Table 16- Résultats de précision moyenne pour le scénario de base	110
Table 17- Impact de la mobilité sur la précision dans le scénario 1	112
Table 18- Performances en précision de RWPS	114
Table 19- Impact de la mobilité sur la précision dans le scénario 2	115
Table 20- Elimination d'APs pendant le calibrage	117
Table 21- APs en panne pendant le positionnement	118
Table 22- Déplacement d'un AP pendant le positionnement.....	120
Table 23- Déplacement de 2 APs pendant le positionnement	121
Table 24- Déplacement de 3 APs de 10 mètres.....	122
Table 25- Temps de guidage dans le scénario de calibrage uniforme	126
Table 26- Temps de guidage dans RWPS	128
Table 27- Temps de guidage dans le scénario d'élimination d'APs avant le calibrage	130
Table 28- Temps de guidage dans le scénario de suppression d'APs pendant le positionnement.....	131
Table 29- Temps de guidage dans le scénario de déplacement d'un AP (de 20 mètres) ..	133
Table 30- Temps de guidage dans le scénario de déplacement de 2 APs.....	134

LISTE DES FIGURES

Figure 1- Motivations et contributions de la thèse	4
Figure 2- Architecture générale du système RAMPE/INFOMOVILLE	14
Figure 3- Structure de l'application sur PDA	15
Figure 4- Les boutons et les deux modes de fonctionnement du PDA	16
Figure 5- Association du PDA au point d'accès	17
Figure 6- Sonnerie de la borne et téléchargement de la base de données	17
Figure 7- Les trois niveaux de navigation dans la base de données	18
Figure 8- Les quatre phases d'utilisation de RAMPE/INFOMOVILLE [2]	18
Figure 9- Tkenv avec OMNeT++	21
Figure 10- Les composants de RAMPE/INFOMOVILLE dans un fichier NED d'OMNeT++	22
Figure 11- Réseau Scatternet Bluetooth	30
Figure 12- Les deux couches de 802.11	33
Figure 13- Mode Infrastructure de 802.11	35
Figure 14- Opérations effectuées dans 802.11 en mode infrastructure.....	37
Figure 15- Mode Ad-Hoc de 802.11	38
Figure 16- Fonctionnement du CSMA/CA	39
Figure 17- Protocole Request To Send/Clear To Send (RTS/CTS)	40
Figure 18- Itinérance entre les points d'accès	41
Figure 19- Itinérance et réassociation.....	42
Figure 20- Handover avec un seul AP	42
Figure 21- Chevauchement des rayons d'action des APs	43
Figure 22- Principe de localisation GPS.....	50
Figure 23- Les deux états du modèle de canal de Gilbert-Elliot	59
Figure 24- Format du trafic dans le protocole RAP proposé	63
Figure 25- Format de la trame de Service RAP	64
Figure 26- Format de la trame de Statistique RAP.....	66
Figure 27- Modèle NED Client- Serveur de simulation sur un canal réel	67
Figure 28- Infrastructure de l'expérimentation	69
Figure 29- Histogrammes des bons et mauvais états de la simulation d'UDP et de RAP sur un canal réel	85
Figure 30- Identification des paramètres du canal WiFi	86
Figure 31- Histogrammes des bons et mauvais états de la simulation d'UDP et de RAP sur un canal de Gilbert-Elliot.....	88
Figure 32- Phase de calibrage de la méthode d'empreinte digitale.....	92
Figure 33- Phase de localisation de la méthode d'empreinte radio	93
Figure 34- Vue Google satellite du site de l'expérimentation.....	105
Figure 35- Photos du site d'expérimentation	106
Figure 36- Infrastructure de la manipulation	107
Figure 37- Banc de test de la manipulation de localisation.....	108
Figure 38- Scénario de base: calibrage uniforme	109
Figure 39- Trajet effectué pour l'étude de l'impact de la mobilité sur la précision de localisation.....	111
Figure 40- RWPS : calibrage fin sur les PPs.....	113
Figure 41- Trajets effectués pour l'étude de l'impact de la mobilité sur la précision de localisation.....	115
Figure 42- Calibrage avec moins d'APs	116
Figure 43- APs en panne pendant le positionnement	118
Figure 44- Déplacement d'un seul AP pendant la phase de positionnement.....	119
Figure 45- Déplacement de 2 APs pendant la phase de positionnement.....	121
Figure 46- Déplacement de 3 APs pendant la phase de positionnement.....	122
Figure 47- Guidage dans le scénario de calibrage uniforme	125

Figure 48- Guidage utilisant RWPS	127
Figure 49- Guidage dans le scénario de suppression d'APs avant le calibrage	129
Figure 50- Guidage dans le scénario de suppression d'APs pendant le positionnement....	131
Figure 51- Guidage dans le scénario de déplacement d'un AP (de 20 mètres)	132
Figure 52- Guidage dans le scénario de déplacement de 2 APs (de 20 mètres).....	134
Figure 53- UM1 et UM2 durant le guidage du scénario de base (scénario n°1).....	135
Figure 54- UM1 et UM2 durant le guidage du scénario 2 (RWPS).....	135
Figure 55- RSSI des 8 APs pour les différents UM	137
Figure 56- Intégration de RWPS	139
Figure 57- Insérer l'échelle exacte de la carte du site	161
Figure 58- Puissance des signaux des APs visualisés sur Ekahau Manager	162
Figure 59- Les rails de cheminement	163
Figure 60- Plan du site de l'expérimentation	163
Figure 61- Enregistrement des PR	164
Figure 62- Carte du site calibrée	165
Figure 63- Positionnement des clients agents	165
Figure 64- Spécifications du client à localiser	166

Introduction

Motivations et objet de la thèse

L'intégration des personnes handicapées constitue l'un des enjeux de nos sociétés ; en France, la loi du 11 février 2005 pour l'égalité des droits et des chances affirme le principe d'accessibilité pour tous, en particulier dans les transports [92, 94]. Dans le cadre de cette thèse, on s'est intéressé aux personnes aveugles ou malvoyantes (PAM). La complexité et la grande diversité des infrastructures urbaines rendent difficile l'autonomie de déplacement des PAM. Les transports en particulier se caractérisent pour les voyageurs à handicap visuel par un fort niveau d'incertitude.

De nombreuses technologies sont disponibles mais il faut pouvoir les intégrer d'une manière fiable et efficace en plaçant l'utilisateur final au centre des préoccupations. Un point important est le fonctionnement sans discontinuité perceptible par l'utilisateur dans différents environnements comme la maison, les transports en commun, les espaces publics. Les applications et services développés doivent être contrôlables simplement par l'utilisateur, ceci est d'autant plus vrai si l'utilisateur est handicapé.

Dans ce contexte, la thèse a contribué au développement d'un système d'information et de guidage destiné aux personnes aveugles dans les transports publics. Les travaux se sont appuyés sur les acquis des projets RAMPE et INFOMOVILLE [1, 2, 61, 62, 113] menés au sein d'un partenariat entre l'ESIEE, l'université Paris 8, le cabinet Ergonomos et la société LUMIPLAN. Le système RAMPE est formé d'une infrastructure réseau éventuellement hétérogène et de dispositifs intelligents portés par l'utilisateur. Chaque composant du système (stations de base ou bornes, dispositifs mobiles, serveurs de base de données) constitue un nœud producteur et consommateur d'informations et de services. Ce système a pour vocation de faciliter les déplacements dans les pôles d'échanges (bus, tramways, métros ...) qui sont des environnements particulièrement complexes pour un usager non familier qui doit découvrir les possibilités liées à son parcours. Cette situation est aggravée pour un voyageur aveugle. INFOMOVILLE s'inscrit dans le prolongement de RAMPE et a pour objectif de fournir des informations temps-réel, d'aider à l'orientation et à la sécurité des voyageurs à handicap sensoriel (visuel ou auditif) dans les transports publics. .

La thèse a porté sur deux aspects critiques de ce type de systèmes : la fiabilité de la transmission de données et la capacité à localiser et à guider l'utilisateur de manière robuste. Elle a d'autre part développé un environnement de simulation utilisant le logiciel OMNeT++ [21] pour le prototypage et l'analyse du fonctionnement de l'application nomade ainsi que l'étude des aspects réseaux de communication mobile.

Concevoir un système d'assistance aux déplacements des PAM dans les transports collectifs nécessite une analyse approfondie des besoins et des stratégies de déplacement de ces personnes. L'analyse ergonomique intervient à différents niveaux dans le projet : analyse de l'activité réelle des personnes, diagnostic pour les besoins futurs, conception des interfaces homme-machine (IHM) des nouveaux systèmes d'aide, test du ou des systèmes dans un environnement naturel. Le projet s'appuie pour cela sur les compétences des équipes d'ergonomes partenaires du projet.

Principales contributions

Des limitations existent dans la version actuelle du système RAMPE/INFOMOVILLE notamment en ce qui concerne les protocoles de communication entre les bornes (équipant les stations de bus) et les PDA (dispositif porté par l'aveugle). Le présent travail a proposé des protocoles plus performants et mieux adaptés au type de trafic qu'on rencontre dans l'application RAMPE/INFOMOVILLE. La technologie de communication WiFi adoptée dans RAMPE/INFOMOVILLE, bien qu'elle soit disponible et largement implémentée, est toutefois sujette aux erreurs et affectée par divers facteurs [41]. Elle peut donc manquer de la fiabilité requise pour des systèmes comme RAMPE/INFOMOVILLE. Pour pallier à cette situation, une contribution de la thèse a été de proposer un protocole, inspiré d'un protocole existant [20], qui ajoute, d'une part, une certaine fiabilité et sûreté à la communication, et d'autre part, permet de fabriquer un indicateur de qualité de la transmission réseau. Cet indicateur peut être traduit en un message compréhensible par les utilisateurs du système pour leur donner un degré de confiance en l'application et en leurs dispositifs. Cette qualité de liaison peut être évaluée et estimée selon plusieurs critères [44] ; on a choisi un critère, le taux d'erreurs paquet (PER), bien adapté à l'application et à la technologie utilisées. Le protocole de communication proposé peut être utilisé en mode broadcast et sert à fiabiliser le protocole UDP en introduisant une certaine redondance ; il est appliqué à la diffusion des messages urgents, depuis la borne installée dans la station de bus vers les dispositifs des utilisateurs. Pour montrer l'efficacité du protocole proposé et le comparer aux protocoles actuels utilisés dans RAMPE/INFOMOVILLE, on le simule sur deux types de canaux: un canal réel pouvant être perturbé par plusieurs facteurs et interférences, et un canal modélisé par un modèle de Gilbert-Elliot en utilisant dans les deux cas le simulateur OMNeT++. Afin de minimiser le temps de simulation, le modèle de canal introduit simule les erreurs au niveau paquet [23]. On déduit de l'identification des paramètres du modèle de canal, l'indicateur de qualité de transmission permettant d'élaborer un niveau de confiance pour l'utilisateur.

Le système RAMPE/INFOMOVILLE dans sa version actuelle ne propose pas de réel service de guidage ou de localisation pour les voyageurs aveugles [1, 2, 61, 62] à l'exception d'un guidage sonore à l'approche des bornes. Plusieurs systèmes et techniques de localisation existent actuellement, mais on a choisi d'utiliser une approche exploitant l'infrastructure radio utilisée pour les communications WIFI ce qui permet son intégration dans l'application sans nécessiter d'équipements supplémentaires. De plus, cette technologie peut être utilisée aussi bien dans les zones extérieures que dans les zones intérieures et offre ainsi une continuité de service difficile avec d'autres systèmes. La géolocalisation par ondes WIFI peut utiliser différents principes, le plus simple s'appuyant sur une triangulation entre des bornes WIFI. L'un des plus performants en termes de précision utilise la méthode de cartographie ou d'empreinte radio. Cette méthode nécessite une phase de calibrage du site de façon à générer une empreinte ou carte radio du site où on veut la mettre en place. Cette calibration consiste en une collecte et une sauvegarde de mesures qui sont ensuite utilisées pour entraîner un modèle statistique « empreinte radio » du site. Cette empreinte radio est ensuite exploitée par le système de calcul de position. La phase de calibration est d'autant plus longue que la précision finale souhaitée est grande. Ceci constitue une contrainte pour les opérateurs de transport souhaitant utiliser cette approche. Une des contributions de la thèse a été de proposer une méthodologie de calibration adaptée à des applications du type de RAMPE/INFOMOVILLE avec un objectif de répondre aux besoins des utilisateurs en terme de précision tout en minimisant les contraintes pour les exploitants des réseaux de transport. La méthodologie proposée effectue une calibration plus fine dans certaines zones que dans d'autres, pour renforcer la précision de localisation dans

celles-ci. Les zones d'intérêt dans la méthode proposée sont les chemins qui peuvent être empruntés par la PAM pour aboutir à sa destination (cheminement entre deux arrêts de bus sur une place par exemple). L'idée est d'orienter les personnes vers ces chemins privilégiés sur laquelle le cheminement est plus facile et où la précision de localisation est meilleure. Cette approche permet de réduire de manière importante le temps de calibration d'un site tout en conservant les performances de précision requises. D'autres facteurs doivent aussi être considérés comme l'influence du déplacement ou de la panne éventuelle des points d'accès WiFi utilisés pour la localisation. Ces différents aspects et les solutions proposées ont été testés et validés par des expérimentations sur site.

Organisation du manuscrit

Le document comprend 4 chapitres principaux, une introduction, une conclusion et trois annexes.

L'introduction résume les motivations de la thèse, ses principales contributions, et présente l'organisation du manuscrit.

Le chapitre 1 décrit le système RAMPE/INFOMOVILLE : son historique, ses composants, son fonctionnement et dresse un état de l'art succinct des systèmes d'aide aux déplacements des PAM en cours de développement ou déjà implémentés. Il présente par ailleurs la simulation du fonctionnement de RAMPE/INFOMOVILLE dans l'environnement du simulateur OMNeT++ [21]. Le chapitre se termine par quelques considérations de nature ergonomique.

Dans le chapitre 2, on effectue un état de l'art comparatif des technologies de communication sans fil à courte distance ainsi que des systèmes de géopositionnement et des techniques de localisation. Le choix de WiFi pour l'application RAMPE/INFOMOVILLE est justifié pour une utilisation à la fois pour la communication et la localisation.

Le chapitre 3 est dédié au travail effectué sur les protocoles de communication. Il détaille les protocoles utilisés dans l'application RAMPE/INFOMOVILLE et explique le manque de fiabilité des protocoles utilisés en mode de diffusion (broadcast) sur une liaison radio. Il présente ensuite le protocole proposé dans la thèse conçu pour s'adapter au type de trafic rencontré dans l'application RAMPE/INFOMOVILLE, protocole que nous avons appelé RAP pour « RAMPE/INFOMOVILLE Application Protocol » ; le chapitre expose aussi les méthodes et le banc de test développés pour la simulation et l'évaluation de RAP sur un canal WiFi réel et sur un canal simulé de Gilbert-Elliot. La simulation s'appuie sur le simulateur d'événements discrets OMNeT++. Les performances obtenues sont comparées à celles des protocoles classiques.

Le chapitre 4 est consacré au travail effectué sur les aspects localisation et guidage. Il commence par une courte analyse des besoins des personnes aveugles au cours de leurs déplacements en termes de localisation et d'orientation ainsi que des contraintes d'exploitation d'un service de localisation. Il propose ensuite une nouvelle méthodologie de calibration pour une technique de positionnement par ondes radio WiFi, permettant de renforcer la précision de localisation sur certains chemins appelés « chemins préférés » ; cette méthode est baptisée RWPS (RAMPE/INFOMOVILLE WiFi Positioning System) ; le chapitre décrit les expérimentations sur site et les différents scénarios testés pour évaluer et valider la méthode

proposée. Le chapitre se termine par des propositions d'intégration de RWPS dans RAMPE/INFOMOVILLE.

La conclusion récapitule les contributions de cette thèse et propose des perspectives pour de futurs travaux.

La figure 1 est un synoptique graphique qui présente le contexte et résume les contributions de la thèse.

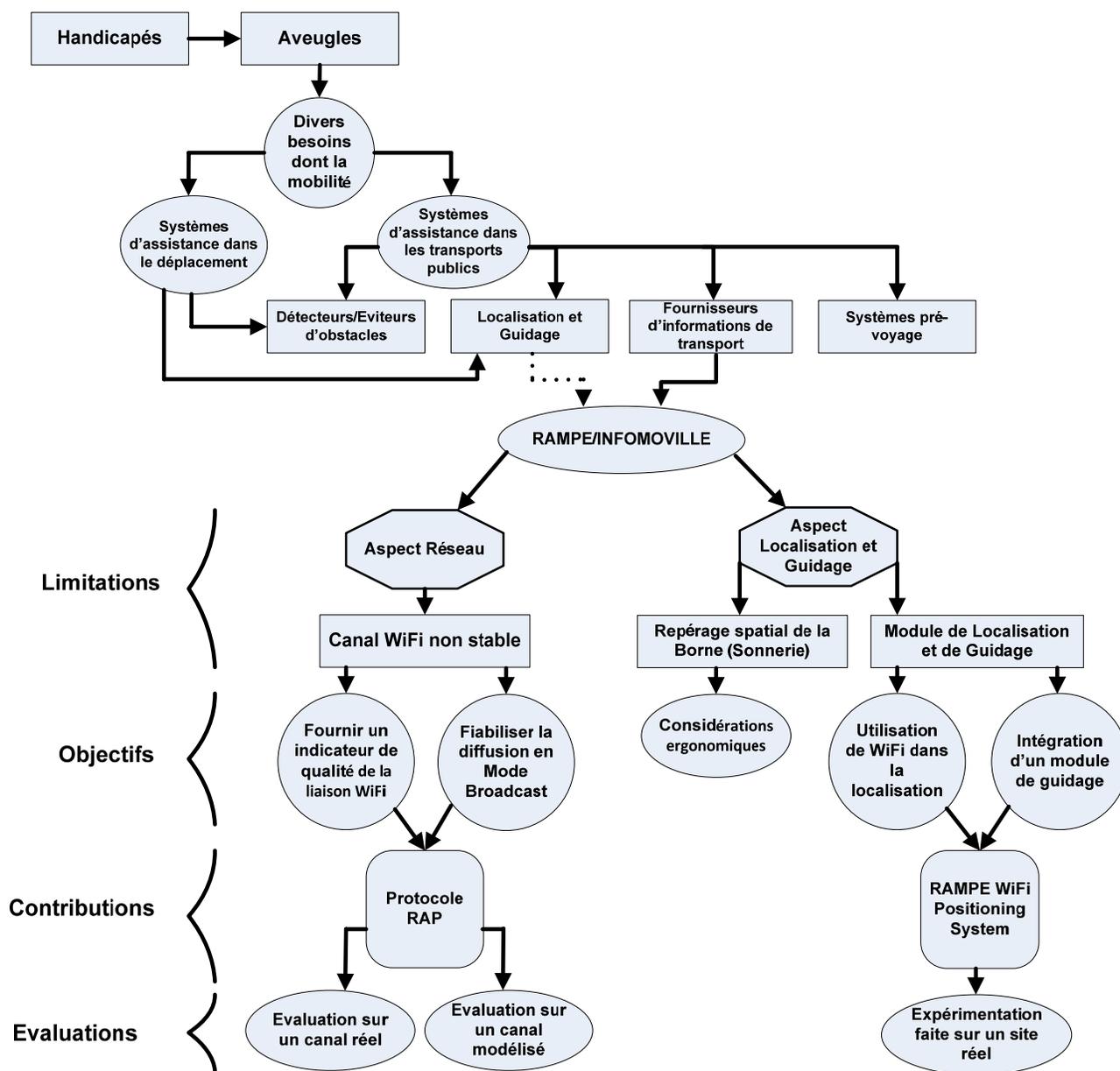


Figure 1- Motivations et contributions de la thèse

Chapitre 1

Les systèmes RAMPE et INFOMOVILLE

1.1 Introduction

L'amélioration des conditions de vie, l'accroissement de l'intégration socio-professionnelle et la promotion dans tous les domaines des personnes handicapées constituent, depuis plusieurs années, l'objet de plusieurs recherches, études et inventions, ainsi que l'objet de nouvelles législations et obligations pour les états en général et les opérateurs de transports en particulier [58] et ce, au niveau mondial.

On s'intéresse dans le cadre de cette thèse aux personnes à déficience visuelle, aveugles ou malvoyantes (on utilisera l'acronyme PAM pour désigner les personnes aveugles et malvoyantes).

Les études et expérimentations présentées dans la littérature sur les déplacements urbains intermodaux (métro/bus/tramway) des personnes déficientes de la vision [56, 88, 89, 93, 96, 103, 110] permettent de faire émerger leurs stratégies de préparation et surtout de déplacement. Ces études mettent en évidence les principales préoccupations et besoins qui peuvent se décrire en termes de :

- Sécurité : éviter les risques de chutes et de collision, en particulier lors de situations perturbées.
- Localisations : localisation de la personne elle-même dans son parcours, localisation des équipements qui jalonnent ce parcours.
- Orientation vers une destination : représentation mentale d'une trajectoire, fiabilité de la représentation mentale de la situation par rapport à la situation réelle dans le parcours.
- Accès à l'information : d'une part les informations spécifiques aux transports telles que la position des arrêts, les horaires, les lignes passant à un arrêt, les arrêts constituant une ligne, les informations de perturbation et d'autre part les informations non dédiées aux transports et portant sur l'environnement immédiat telles que les activités disponibles.
- L'assistance à l'activité : on se déplace dans un but particulier tel qu'aller au travail, aller faire des achats dans un centre commercial et ce but, cette activité peuvent nécessiter des informations spécifiques.

L'une des principales préoccupations des PAM est l'amélioration de l'accessibilité et de l'aménagement de l'espace urbain. La notion d'« ambient intelligence » introduite par l'union européenne et les différentes études, propositions et systèmes utilisant des technologies de communication et de l'information dans le contexte de « smart environment », essayent de répondre à ces préoccupations et d'assurer une continuité de service [132, 133, 134, 135, 160, 161, 162, 163]. On s'intéresse particulièrement à l'amélioration de l'autonomie des PAM au cours de leurs déplacements.

L'utilisation des transports collectifs et les déplacements dans les pôles d'échanges constituent une tâche très complexe génératrice de stress en particulier dans le cas de déplacements non familiers et dans les situations imprévues liées aux perturbations des transports ou aux aléas de l'environnement urbain pour les transports de surface [5, 8, 48]. Les

transports de surface (bus, tramway) sont particulièrement difficiles à utiliser par les PAM en raison de la multiplicité et la diversité des causes d'incertitude dues entre autres à la grande diversité des configurations d'infrastructures possibles et au fait que ces transports sont implantés dans des zones ouvertes non dédiées au transport. En Europe, de nouvelles réglementations, comme la loi de février 2005 en France sur l'égalité des droits et des chances, imposent aux opérateurs de transport de prendre en compte les besoins spécifiques de ces personnes et d'améliorer l'accessibilité des moyens de transport. Des études ont montré que ces personnes sont «exposées à un sur-risque d'accidents dans les enceintes de transport collectif : plus de la moitié des accidents se produisent avec des obstacles suspendus et sur des trottoirs encombrés d'obstacles ou mal entretenus [48]».

Plusieurs systèmes et outils ont été développés pour assister les PAM et faciliter leur mobilité et leur autonomie dans les transports collectifs : des dispositifs destinés à la détection d'obstacles ainsi que des systèmes d'information et d'orientation utilisant différentes technologies (ondes infrarouges, radiofréquences, signaux sonores, interfaces haptiques et tactiles, systèmes de communication et de géo-localisation) et disposant de capacité d'interaction plus ou moins élaborées. Ces systèmes se différencient en termes de technologie utilisée, mais aussi d'interactivité, de facilité d'utilisation, de type d'informations fournies, de disponibilité, de fiabilité, Cependant, il n'existe toujours pas de système d'information temps réel interactif et personnalisé déployé dans les réseaux de transports collectifs.

Dans ce contexte, le projet RAMPE/INFOMOVILLE a réalisé et expérimenté un système interactif d'assistance et d'information auditive destiné aux personnes à déficience visuelle, favorisant leur mobilité et autonomie dans les transports collectifs [1, 2, 61, 62]. Son principe, son fonctionnement et ses différents constituants sont détaillés dans ce chapitre. On dresse auparavant un état de l'art rapide des systèmes d'assistance à la mobilité des PAM.

1.2 Systèmes d'assistance aux personnes déficientes de la vision

Plusieurs systèmes ont été développés et quelques uns implémentés pour aider et assister les PAM au cours de leurs déplacements en ville. Les répéteurs sonores de feux de circulation en sont un exemple en France. On pourrait aussi citer de nombreux systèmes d'assistance aux PAM mais on se consacre dans le cadre de cette thèse et de cet état de l'art plus particulièrement aux systèmes d'assistance aux voyageurs déficients visuels dans leurs déplacements dans les transports collectifs.

L'état de l'art suivant récapitule ces systèmes d'assistance qui peuvent être divisés en quatre catégories :

- Systèmes de détection ou d'évitement d'obstacles (utilisés dans le déplacement d'une façon générale)
- Systèmes d'aide au cheminement et à l'orientation, ou en d'autres termes d'aide à la localisation et au guidage (utilisés dans le déplacement d'une façon générale)
- Systèmes fournisseurs d'informations : délivrant des informations liées au transport : lignes, directions et arrêts desservies, parcours, horaires, itinéraires, ...etc, c'est-à-dire

tout ce qui est disponible par affichage visuel pour les voyageurs sans déficience visuelle (écran-page, afficheurs dédiés, plaquettes, mini-plan de réseau, pancartes, ...etc)

- Systèmes de préparation au voyage (utilisés avant le voyage).

En pratique plusieurs systèmes remplissent plusieurs de ces fonctions et il est difficile de les classer dans une seule catégorie.

On peut citer en premier les systèmes les plus utilisés la canne blanche et le chien guide qui constituent une aide à l'évitement d'obstacles et au cheminement ainsi qu'un moyen d'identification qui peut s'avérer utile à la descente d'un métro par exemple pour inciter le conducteur à maintenir les portes ouvertes plus longtemps. La canne blanche permet de repérer les obstacles au sol tels que les escaliers, les quais, mais reste insuffisante en ce qui concerne les obstacles en hauteur [136] ; elle permet de se guider en suivant le bord d'un trottoir par exemple.

Dans la première catégorie, les systèmes vont du plus simple aux innovations technologiques utilisant les ondes radiofréquences ou infrarouges. Citons :

- ✚ **Bandes d'éveil de vigilance** : ce sont généralement des bandes de polyuréthane collées et déposées le long des quais de transport (à 50 cm du bord des quais de métro par exemple) ou dans les zones dangereuses. Elles sont constituées de plots en relief détectables au pied et à la canne blanche. Elles servent à avertir d'un danger tel que la proximité de la voie de métro.
- ✚ **Mowat Sensor** : Il s'agit d'un système de détection d'obstacles constitué d'un émetteur-récepteur à ultra-sons et qui se met à vibrer lorsque l'onde ultra-sonore est réfléchi par un obstacle. La fréquence des vibrations augmente quand la distance de l'obstacle diminue. Le dispositif fonctionne sur des distances allant de 1 à 4 mètres [4, 137].
- ✚ **Sonic guide** : est lui aussi un dispositif utilisant un principe de sonar pour détecter les obstacles mais le système est intégré dans des paires de lunettes ce qui présente un intérêt pour la détection des obstacles en hauteur (détection difficile pour la canne blanche). Les caractéristiques de fréquence et d'amplitude des ondes réfléchies dépendent de la distance et des propriétés physiques de l'obstacle qui réfléchit les ultra-sons. Le système fonctionne sur des distances allant jusqu'à 6 mètres [4].
- ✚ **Télé tact** : Télémètre laser qui transforme les distances en notes musicales ou vibrations et a une portée de 15 mètres [66, 67].

Parmi les projets et systèmes d'aide au cheminement et à l'orientation on peut citer:

- ✚ **Bandes de guidage podotactiles** : un revêtement en relief est placé sur le sol pour former un chemin que la personne aveugle peut suivre avec une canne. La surface est constituée de cannelures parallèles espacées à intervalles réguliers (environ tous les 5 cm) dans le sens de la marche. La couleur et le contraste du revêtement peuvent aussi être utiles pour une personne malvoyante.
- ✚ **Cartes tactiles [87]**: ce sont des cartes en relief destinées aux aveugles. Plusieurs villes ont expérimenté le concept (Genève, Paris ...). Elles représentent généralement les rues, les arrêts de transports et les plus importants éléments topographiques. Elles peuvent être accompagnées de fascicule braille avec les noms des arrêts, des lignes qui les desservent et les lieux intéressants accessibles par ces lignes. le projet ABAPlans (Association pour

le Bien des Aveugles et malvoyants) consiste en des plans urbains tactiles et interactifs basés sur des données géographiques et accessibles par les aveugles [102].

♠ **RIAS (Remote Infrared Audible Signage) "Talking Signs"** : Des émetteurs infra-rouge (IR) sont installés dans différents endroits (bâtiments publics, arrêts de bus) et transmettent périodiquement des messages d'information vocale. Les utilisateurs balayent l'environnement avec leur récepteur et à l'interception d'une émission infrarouge, le message vocal est restitué sur le haut-parleur du récepteur. L'utilisateur peut ainsi découvrir son environnement proche et être guidé vers l'émetteur [5, 6, 14, 59, 60, 111]. Dans la même lignée de systèmes on peut citer les projets OPEN (Orientation by Personal Electronic Navigation) [69, 70], Pathfinder [69], BOS (Blind Orientation System) [109], EW (Easy Walker) [109], BILOS (Blind Information Localisation and Orientation System) [8, 57].

♠ **BlueEyes [7]**: ce système a pour objectif de "faciliter les déplacements dans le métro et le RER". Le nom «BlueEyes» est inspiré du mot « Bluetooth » désignant une norme de communication sans fil fonctionnant à faible distance (10 mètres). Les composants du système BlueEyes sont :

- Un réseau de balises Bluetooth couvrant l'ensemble d'une station métro/RER
- Un serveur de base de données sur lequel sont définis les positions des balises, les messages vocaux, les plans de stations
- Une application sur téléphone portable Bluetooth

Le principe est le suivant :

- L'utilisateur sélectionne l'application BlueEyes sur son téléphone portable
- Il choisit le chemin désiré (stations de départ et d'arrivée) via le clavier du téléphone ou oralement
- L'application BlueEyes balaie l'environnement à la recherche des balises. Une fois qu'une balise est repérée, un accès à la base de données BlueEyes a lieu ce qui permet de calculer le trajet choisi, de récupérer les références de la balise et de calculer la position de l'utilisateur et son orientation.
- Le guidage commence dès que l'utilisateur arrive à la station de départ et consiste en une succession de messages vocaux et/ou graphiques indiquant les directions à prendre, des confirmations de bon chemin et des annonces d'erreurs.

♠ **NAVWORKS** : La société CECIAA a développé le système NAVWORKS, un système portatif d'assistance à la navigation des aveugles. Le système utilise un module Bluetooth GPS et permet de se guider dans la rue [11]. Une expérimentation a été réalisée à Paris dans laquelle les données cartographiques de la RATP pour les arrêts des lignes de bus 92 et 37 et des bouches de métro sur le trajet ont été enregistrées dans le système. Le but est de guider la personne depuis un arrêt de de départ vers l'arrêt d'arrivée choisi. Un moteur de calcul d'itinéraires cherche la route la mieux adaptée présentant un minimum de carrefours ou d'obstacles à franchir. Cette route choisie est énoncée auditivement à l'utilisateur.

♠ **Projets RFID UCODE à Tokyo et projet SESAMONET en Italie** : Le projet « IT barrier free project » lancé à Tokyo en 2003 et piloté par le professeur Sakamura avait pour but de développer un dispositif permettant aux aveugles de s'auto-guider à l'aide d'étiquettes RFID. Il s'agit de carrelages intégrant des étiquettes d'identification sans contact (RFID) (baptisées UCODE) et destinées à être lues par la canne d'un aveugle reliée à un

dispositif de lecture "Communicator". Ces étiquettes RFID sont déposées sur le sol pour marquer les quais du métro, les allées des supermarchés, etc. Le lecteur RFID porté par l'utilisateur sur une canne blanche lit les informations contenues dans les étiquettes et les énonce vocalement à son porteur (détection de carrefour, d'une marche, ...etc) [138, 139, 140]. Ce mode de guidage a été déployé sur le campus de l'Université de Tokyo.

Le projet SESAMONET (SEcure and SAfe MObility NETwork : a navigation aid for blind people) en Italie a un objectif assez proche [72]. SESAMONET utilise une grille d'étiquettes RFID sous la chaussée pour guider les personnes. Il fournit de l'information sur les sites à proximité. Le système comprend 4 éléments : une grille d'étiquettes RFID sous la chaussée (enterrées à environ 4 cm), un dispositif (type PDA) porté par l'utilisateur avec des oreillettes Bluetooth, une canne qui sert de lecteur RFID (le lecteur lit le numéro d'identification des étiquettes et envoie l'information par Bluetooth au PDA), un serveur central de navigation. Le PDA reçoit et traite la suite de numéros des étiquettes et des données de navigation. Il envoie ensuite des messages audio de navigation à l'utilisateur en les transmettant aux oreillettes bluetooth. Les données de navigation sont téléchargées périodiquement à partir du serveur central par une connexion radio WiFi ou GPRS. Le serveur stocke les informations : numéros et positions des étiquettes, informations sur l'environnement. Les données sont organisées en cellules. Quand l'utilisateur atteint la frontière d'une cellule, les nouvelles données sont transmises automatiquement. Dans la même type de projet, on peut citer le projet Drishti de l'université de Floride [141].

- ✶ **RNIB REACT (Royal National Institute for the Blind- Rapid Emergency Alert Coordination and Targeting)** : des arrêts de bus parlants (en anglais « talking bus stops ») ont été introduits dans les villes de Brighton et Hove en Angleterre en 2007 [107, 108, 142]. Ces arrêts sont équipés des systèmes RNIB REACT [120, 129] qui annoncent les informations temps réel liées aux trajets des bus, permettant aux PAM de savoir à quel arrêt de bus ils sont, quels sont les bus à l'approche, leur temps d'arrivée, ... Les bornes REACT sont activées par des dispositifs portés par les PAM et qui utilisent une méthode de synthèse de voix pour écouter les informations transmises.
- ✶ **DANAM (Dispositif d'Assistance à la Navigation pour personnes Aveugles dans les couloirs du Métro)[94]** : il s'agit d'un projet financé par l'agence nationale de la recherche dans le cadre du programme PREDIT en partenariat avec la RATP, le laboratoire THIM (Technologies, Handicaps, Interfaces, Multimodalités) de l'université Paris 8, la société Robosoft PGES (Perception and Guidance Embedded Systems) et le laboratoire LIST (Laboratoire d'Intégration des Systèmes et des Technologies) du CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique). L'objectif de ce projet est de guider les PAM dans les couloirs et stations de métro du réseau RATP tout en dispensant de tout autre dispositif complémentaire placé dans l'infrastructure (bornes, tirages de câbles, énergie). Il est basé sur un système de localisation tirant partie à la fois de capteurs d'orientation portés par la personne, d'un algorithme de navigation à l'estime intégré sur un microprocesseur, d'une cartographie de lieux et des facultés de perception de l'utilisateur.
- ✶ **ANGEO** : le projet de recherche Binaur est devenu le projet industriel "Angéo" de la société Angeo Technology essaimage de l'entreprise Navocap à Toulouse [97]. Angéo est une plateforme d'assistance et d'aide à l'orientation destinée aux malvoyants et aux aveugles. Il comprend un équipement embarqué utilisant les signaux GPS et EGNOS

(ceci assure une précision de 5 mètres), d'une interface homme-machine basée sur la reconnaissance et la synthèse vocale, d'une plate-forme de services et d'assistance multilingues accessible grâce à la liaison GSM/GPRS intégrée et qui permet à l'abonné de disposer d'une assistance personnelle ou technique (calcul d'itinéraire, problème d'utilisation), d'un logiciel de planification d'itinéraires multimodal intégrant des portions pédestres et en transports en commun, d'un portail Internet communautaire ouvert aux associations et aux particuliers et d'une fondation gérée par les abonnés et qui permettra aux plus démunis d'avoir accès aux services d'ANGEOS [97].

- ♣ **PAVIP (*Personal Assistant for Visually Impaired People*) [105]:** produit de la société suisse Bones développé spécifiquement pour les PAM, en collaboration avec l'Union Centrale Suisse pour le bien des aveugles (UCBA). Il est constitué de récepteurs de la taille d'une carte de crédit qui comprennent cinq touches et de petits émetteurs placés dans les bâtiments et dans les transports publics. Les émetteurs indiquent aux PAM la direction de leur destination et la distance qui les en sépare via une méthode de synthèse vocale du récepteur PAVIP. Si cette destination est un moyen de transport public, PAVIP indique l'heure d'arrivée d'un tram, la prochaine station, l'ouverture de la porte et d'autres informations.
- ♣ **SWAN (*System for Wearable Audio Navigation*) [98, 143] :** ce système américain dont le but est d'aider les PAM à naviguer dans des environnements non familiers, consiste en un ordinateur portable, un récepteur GPS, des caméras et plusieurs capteurs; les composants principaux sont les écouteurs permettant la perception des balises radio 3D ; les objets qui entourent la PAM (bâtiment, parc, banc, ...etc) sont représentés par des sons uniques. La position et l'orientation de la PAM sont déterminées, et des balises de guidage sont présentes sur le trajet jusqu'à la destination.
- ♣ ***Personal Guidance System (PGS)* :** ce système a été développé dans les années 1990 par les professeurs Loomis, Glatzky, Golledge, Speigle et Tietz [49, 90, 104]; il consiste en un récepteur GPS précisant la position et l'orientation de la PAM, une base de données spatiale (GIS-Geographic Information System) et d'une interface homme-machine. Les informations sur la position de la PAM lui sont énoncées via une oreillette, puis il est guidé en lui énonçant des informations utiles sur son parcours (les endroits, les milieux et les objets qui l'entourent ...etc). Des études sur l'intérêt de la spatialisation sonore pour le guidage ont été réalisées.
- ♣ **Système *Trekker GPS*** de la société VisuAide qui est un GPS parlant sur un ordinateur de poche iPAQ de Hewlett-Packard [100], Maestro [101] qui a fait suite au système *Trekker GPS* et qui utilise un système de synthèse de voix et une membrane tactile de clavier installée au-dessus de l'écran du PDA HP, *Trekker Breeze* de HumanWare [50], *StreetTalk* de Freedom Scientific [148, 149], le système basé sur les dispositifs Symbian [153].
- ♣ **Le projet *BIOVAM***- Besoin en Information et en Orientation des Voyageurs Aveugles ou Malvoyants dont le but était d'identifier les besoins des aveugles dans le domaine de détection d'obstacles, de l'orientation et de prise d'information, de l'utilisation des moyens de transport [8], a évalué les deux types de systèmes développés à l'époque du projet *BIOVAM* pour l'assistance des aveugles s'appuyant respectivement sur des balises infra-rouge (IR) et radiofréquences (RF). Les systèmes IR ont été considérés

difficiles à utiliser dans les milieux encombrés [1, 8]. Quant aux systèmes RF, ils sont plus simples mais pas assez efficaces en termes de guidage.

- ✚ D. Eddowes et J. Lopez Krahe ont travaillé sur un projet de reconnaissance des feux piétons en environnement urbain avec un assistant personnel [130, 159]; l'application est implémentée sur un ordinateur de poche de type PDA avec une caméra vidéo incorporée. L'interprétation est basée sur l'analyse des scènes prises par la caméra. D'autres fonctionnalités adaptées aux personnes aveugles sont aussi intégrées dans le système (répertoire, gestion de rendez-vous), par reconnaissance des empreintes vocales.

Les systèmes fournisseurs d'informations comportent les systèmes qui, à un point d'arrêt, fournissent des informations liées au transport : nom de la station, direction, lignes, parcours, destinations desservies, horaires, événements, éventuelles modifications et perturbations... Généralement, la synthèse vocale de ces informations constitue une méthode perceptive substitutive à une vision déficiente ou réduite (énonciation des informations généralement perçues par les personnes bien voyantes sur des panneaux d'affichage papier ou électronique via un haut-parleur ou par le biais d'un dispositif individuel porté par la personne aveugle). On liste ici quelques uns des projets en cours et des systèmes existants.

- ✚ **Système sonore de la République Tchèque (système Tyfloset et projet NEVI) :** En République Tchèque, la compagnie Apex LTD a développé le système Tyfloset facilitant l'accès des malvoyants aux transports publics. Les tramways et les bus sont équipés par des récepteurs RF. Un passager malvoyant qui est à un arrêt de transport public dispose soit d'un transmetteur à 3 boutons intégré dans sa canne soit d'un transmetteur indépendant dans un boîtier à 6 boutons. Le dispositif lui permet d'activer le haut-parleur extérieur du véhicule qui lui énonce sa route et sa destination [84]. Le projet NEVI est une extension de Tyfloset. Les développements de ce projet se sont déroulés de janvier 2005 à mai 2007. Ils ont été financés par le ministère des transports tchèques. Les partenaires de ce projet étaient les sociétés APEX, déjà acteur du système Tyfloset, la société « electronics for transportation » (e4t) et le centre de recherche sur les transports. L'objectif du projet était de mettre en place un système audio de référencement géographique. Ce système doit permettre de se connecter à diverses sources d'information telles que tableaux horaires, point d'arrêts, plans, ... et de fournir de l'information et des consignes de guidage sous forme vocale à partir de choix de parcours fait par l'utilisateur. La conversion audio des informations de guidage et d'orientation a posé des problèmes de méthodologie important.

- ✚ **NOPPA (VTT en Finlande) :** le projet NOPPA- système de navigation personnel (Personal Navigation and Information System for Users of Public Transport) est supporté par le programme HEILI d'information aux voyageurs du ministère des transports et des communications en Finlande a pour but d'aider les malvoyants dans les réseaux de transport public. Noppa s'appuie sur des composants et services disponibles de navigation personnelle. L'utilisation des bases de données de services publics sur internet assure une information à jour. L'association d'informations voyageurs provenant de différentes sources et le développement d'interfaces d'usage général sont des caractéristiques du projet. Noppa offre pour le moment un service de planification de trajets et de navigation à Helsinki, Espoo, Vantaa, Kauniainen and Tampere. NOPPA a pour objectif d'offrir des services d'informations locales et d'informations sur les transports, des services de navigation à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments, de

communication avec des serveurs vocaux et éventuellement d'intégrer des dispositifs de détection d'obstacles par caméra vidéo. Le principe consiste à utiliser un serveur d'information auquel le téléphone portable de la PAM est connecté via GPRS. Le serveur d'information effectue les recherches internet et transmet l'information nécessaire vers le téléphone sous forme vocale. L'utilisateur peut être aussi guidé en utilisant le GPS [13].

- ✚ **Systèmes *EO-guidage* [10] et *ESIUM* [73]** : Ce sont deux systèmes assez proches qui ont commencé comme des systèmes répéteurs de feux de circulation. Le système EO-guidage de la société EO-EDPS (Etudes Développements Produits Services) utilise des télécommandes RF. La télécommande permet de faire sonner une borne située à un arrêt de bus et éventuellement de recevoir un message d'information vocal indiquant le nom de l'arrêt et les lignes associées. La société ESIUM développe un système assez similaire. En comparaison avec d'autres systèmes existants pour la même fonction, l'intérêt annoncé du système réside dans le fait que l'appareil se déclenche en fonction de l'orientation de la personne et lui délivre un message personnalisé adapté à sa situation et à sa demande. Il devrait permettre à l'utilisateur de limiter l'activation sonore à la traversée envisagée et ainsi de minimiser les confusions liées au déclenchement simultané de plusieurs feux.
- ✚ ***Ubibus***: Projet développé à l'INRIA - Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique. Il a pour but d'aider les malvoyants à prendre le bus et utilise un simple assistant personnel [68]. Il comporte trois entités : l'utilisateur, l'abribus, et le bus. L'arrêt de bus est équipé d'une « bulle d'information » Bluetooth ou WiFi. L'utilisateur donne oralement une information à son PDA et à partir de ce moment, le PDA se met à chercher les ondes Bluetooth ou WiFi Ubibus à proximité. Lorsque l'utilisateur s'approche de l'ubibus, les deux équipements s'interconnectent : le PDA indique quel bus l'utilisateur souhaite prendre tandis que l'abribus indique le temps d'attente que le PDA annonce vocalement. Ensuite, il se passe la même chose entre l'abribus et le bus. Lorsque le bus s'approche de l'abribus, les deux s'interconnectent : l'abribus envoie un signal d'arrêt, exactement comme si quelqu'un à l'intérieur du véhicule demandait l'arrêt. Cette information est répercutée à l'utilisateur, via son PDA, lui indiquant que le bus souhaité est arrivé.
- ✚ ***ACTITAM*** : solutions développées par la société Phitech pour l'information et le guidage des personnes déficientes visuelles dans les établissements recevant du public (hôtels, restaurants, centres commerciaux, réseaux de transport [95]. L'ActiTam-afficheur par exemple rend accessible, aux PAM disposant du boîtier ActiTam, les informations présentes sur un afficheur. Les informations écrites sont traduites et transmises par radio au boîtier porté par l'utilisateur. L'ActiTam-Réseau-Hôtel consiste en la mise en place dans un hôtel, d'une ou plusieurs balises Phitech permettant à la PAM muni d'un boîtier ActiTam, de se repérer, de pouvoir disposer de façon discrète d'informations de guidage et de trouver la réception, le bar, les toilettes, l'ascenseur, la chambre, etc.
- ✚ ***AudioTransantiago* [99]**: logiciel développé à l'université du Chili à Santiago. Les informations contextuelles à chaque arrêt de bus des routes de Transantiago sont sauvegardées dans des fichiers XML sur le PDA de la PAM et celui-ci pourra y naviguer par le biais du PDA avec un logiciel de synthèse vocale.

Pour les systèmes d'aide à la préparation du voyage, on peut citer les outils de consultation de sites web sur les transports et le tourisme [56], les interfaces logicielles de lecture d'écran qui fournissent les informations de la page web par une transcription sonore ou braille (Braillesurf, MozBraille...etc). Des solutions concernant la billetterie ont aussi été proposées comme le projet européen Esprit – MASK développant une borne de réservation et de transaction de billets à interface vocale utilisable par les PAM.

1.3 Présentation et historique de RAMPE/INFOMOVILLE

RAMPE [1, 2, 3, 19, 61, 62] ou « Référentiel d'assistance aux personnes Aveugles pour leur Mobilité dans les transports publics et les Pôles d'Echanges », est un projet qui a débuté en Janvier 2004 et s'est achevé en 2007. L'objectif était de concevoir et de développer, grâce aux nouvelles technologies de communication et d'information, un équipement interactif pour assister les personnes malvoyantes dans les transports publics, en particulier les réseaux de bus. Le choix des réseaux de bus se justifie par le fait qu'il s'agit d'un mode de transport particulièrement difficile à utiliser pour une PAM à cause de la multiplicité et diversité des causes d'incertitude (présence et localisation des stations, informations liées au transport, configuration du réseau, trafic, ...) [1, 112]. Il a été supporté par le ministère des transports dans le cadre du programme PREDIT - Programme français de Recherche, d'Expérimentation et d'Innovation dans le domaine des Transports terrestres, sous le thème général des services de mobilité et d'accessibilité pour les personnes à mobilité réduite.

Il a associé trois partenaires complémentaires : ESIEE-Paris, la société Lumiplan et Gérard Uzan du LEI. ESIEE Paris, école Supérieure d'Ingénieurs dans le domaine des sciences et technologies de l'Information et de la Communication, qui a piloté le projet, a contribué aux spécifications techniques de l'application et du système d'information et a développé l'application sur le dispositif porté par la PAM (le PDA) ; LUMIPLAN, société spécialiste des produits et services d'information dans les transports, a développé l'application sur la borne et a contribué à l'implantation aux arrêts dans la dernière phase du projet. Le LEI, Laboratoire d'Ergonomie Informatique de l'Université Paris 5, a effectué l'analyse des besoins et contribué aux spécifications principalement sur l'interface Homme-Machine (MMI pour Man Machine Interface).

Le système RAMPE fournit les informations suivantes:

- Inventaire des stations à proximité de la personne non-voyante
- Repérage de la position spatiale des stations par la personne non-voyante
- Inventaire des lignes desservies par ces stations, itinéraire de chaque ligne
- Horaires et perturbations éventuelles,

On peut classer ces informations en trois catégories : des informations structurelles (identification des arrêts, lignes, horaires, etc.), des informations temporaires (changement d'horaires, détournement, etc) et des informations d'urgence (arrivée d'un bus).

Le projet INFOMOVILLE, « Environnement temps-réel pour l'INFORMATION, l'orientation et la sécurité des voyageurs à handicap sensoriel (visuel ou auditif) au cours de leurs déplacements dans les transports collectifs, les pôles d'échanges et de façon plus générale pour la MOBILITÉ en VILLE », fait suite au projet RAMPE [113]. Tandis que le projet RAMPE était focalisé sur l'approche d'un point d'arrêt et sur l'information utile avant l'entrée dans un véhicule, INFOMOVILLE élargit le champ de RAMPE en termes de services rendus,

d'utilisateurs potentiels, d'intégration de nouvelles informations, d'ergonomie et d'interface homme-machine, de technologie de communication et de localisation. INFOMOVILLE est supporté par l'agence nationale de la recherche (ANR) dans le cadre du programme PREDIT. INFOMOVILLE a débuté en mai 2007 et devrait se terminer en mai 2010 par une expérimentation dans le réseau de transport lyonnais.

1.3.1 Constituants et Architecture

Les constituants de RAMPE/INFOMOVILLE, son architecture et ses différentes connexions sont représentés sur la figure 2 suivante [1] :

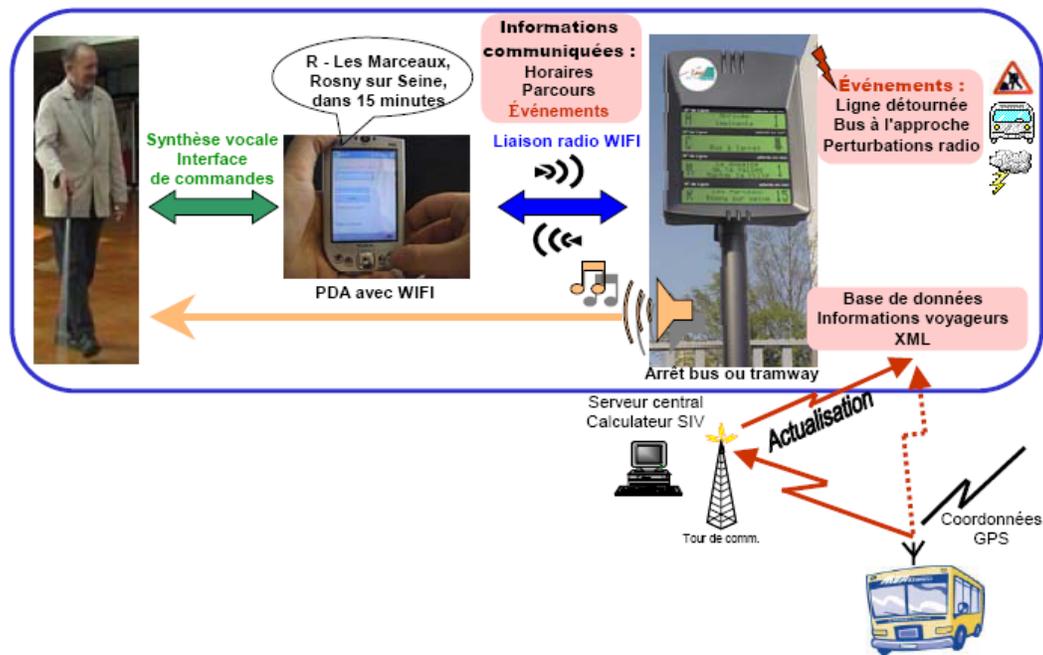


Figure 2- Architecture générale du système RAMPE/INFOMOVILLE

Les constituants de RAMPE/INFOMOVILLE sont les suivants :

- Un dispositif de type ordinateur de poche (PDA) porté par la PAM ; ce PDA avec l'application RAMPE/INFOMOVILLE dispose d'une interface de communication sans fil WiFi, d'une interface homme-machine utilisant une synthèse vocale et des commandes par boutons. L'application sur PDA gère trois acteurs : l'utilisateur à travers l'interface homme-machine, le réseau à travers la carte réseau WiFi et la base de données d'informations liées aux transports (cette base de données est disponible au niveau de la borne et est consultée par la PAM). Les interactions entre ces acteurs se font par une machine d'états finie (FSM pour Finite State Machine) qui comprend un état initial (état d'identification des arrêts à proximité) et trois autres états (état de choix d'un arrêt, état de repérage de la position de l'arrêt et état de navigation dans la base de données). Ces états sont détaillés dans le paragraphe 1.3.2 sur le principe et fonctionnement de RAMPE/INFOMOVILLE.

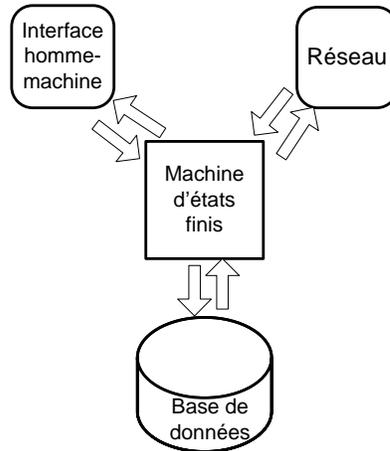


Figure 3- Structure de l'application sur PDA

- Des bornes installées aux arrêts de bus. Ces bornes sont équipées de points d'accès WiFi leur permettant de communiquer avec le PDA et d'un processeur avec un système client/serveur d'informations connecté au point d'accès. Elles constituent les nœuds d'information : elles reçoivent ces informations d'un système central et les distribuent aux PDAs. Elles intègrent aussi un haut-parleur qui carillonne afin de permettre à la PAM de repérer auditivement la position de la borne
- Le réseau de transport avec son système d'exploitation et d'information voyageurs (SAEIV : Système d'aide à l'exploitation et à l'information voyageurs). Il comprend un système central qui est connecté aux bornes installées dans les points d'arrêt et aux véhicules (bus, tramway) par différents moyens de communication. Il envoie l'information aux bornes les informations sur les horaires, les lignes desservies, les parcours, ... ainsi que les informations immédiates temps réel (accidents, changement d'horaires, véhicule à l'approche, etc) [1]. L'information peut être théorique ou temps-réel (horaires théoriques, avances/retards). La position des véhicules peut être suivie par différents systèmes de positionnement comme le GPS.

1.3.2 Principe et fonctionnement

La borne installée dans la station de bus récupère, du système central du réseau de transport, les informations disponibles concernant l'arrêt de bus : lignes, itinéraires, horaires... Ces informations spécifiques de la station sont stockées dans une base de données.

Le point d'accès WiFi embarqué dans la borne envoie périodiquement son identifiant - son SSID (cf. chapitre 2) dont la syntaxe est spécifique au réseau RAMPE/INFOMOVILLE ; elle est de la forme « RAMPEnom_du_point_d'arrêt/direction ».

Sur le PDA tourne l'application RAMPE/INFOMOVILLE. Un soin particulier a été porté à la conception de l'interface homme-machine. Elle est réalisée par une interface de commandes utilisant les touches du PDA et par une synthèse vocale pour l'information du PDA vers l'utilisateur. Les fonctions des touches de commande se reconfigurent automatiquement selon l'état de l'application avec un souci de rendre la manipulation la plus intuitive possible. On

distingue deux modes de fonctionnement des touches du PDA : le mode normal et le mode urgent pour lesquels la figure 4 illustre les fonctions des touches. Le premier modèle de PDA utilisé pour l'implantation de l'application RAMPE/INFOMOVILLE était l'organiseur iPAQ 4150 de Hewlett-Packard. La figure 4 présente la disposition des touches de ce PDA ; ultérieurement l'application a été implantée sur d'autres types de PDA, mais les commandes par boutons et les modes de fonctionnement sont restés identiques dans le principe, même si la forme et la position des touches a pu changer d'un dispositif à l'autre.

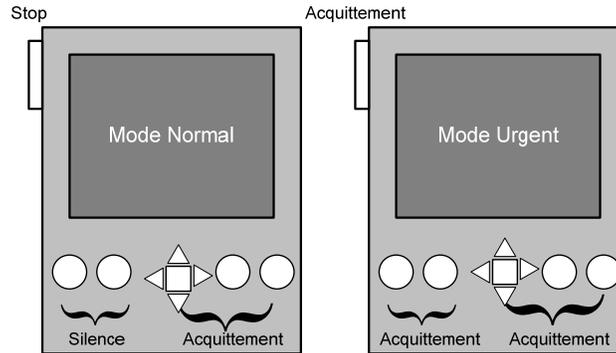


Figure 4- Les boutons et les deux modes de fonctionnement du PDA

Dans le mode normal, Le bouton « Stop » sert à terminer l'application RAMPE/INFOMOVILLE ; les boutons « Silence » mettent l'application en mode silence (la synthèse vocale est interrompue mais le programme continue à tourner ; l'attention de l'utilisateur n'est attirée qu'en cas de messages urgents pour lesquels le PDA sort du mode silence). Les boutons « Acquittement » (ACK pour Acknowledge) permettent d'acquitter ou d'effectuer une sélection à la volée dans une liste de propositions énoncées vocalement : l'association à un borne, la demander qu'un carillon soit émis depuis cette borne (pour pouvoir repérer sa position), la navigation dans la base de données. L'appui sur les touches ACK permet donc ainsi de façon intuitive de passer d'un état à l'autre de la machine d'états.

Dans le mode urgent, tous les boutons se transforment en « Acquittement » ; Le mode urgent correspond à une situation dans laquelle la borne diffuse un message urgent à tous les utilisateurs (arrivée d'un bus par exemple). Ce message est répété jusqu'à son acquittement par l'utilisateur et pour simplifier sa tâche et éviter de le perturber, tous les boutons se transforment en boutons ACK [3] avant de revenir à leur fonctionnement en mode normal après l'acquiescement.

L'utilisation des touches du PDA en mode acquiescement permet de synchroniser l'état de l'application avec la situation de l'utilisateur.

L'application RAMPE/INFOMOVILLE du PDA surveille la présence des points d'accès ; dès qu'elle détecte un arrêt, elle en informe l'utilisateur en produisant un petit bip. L'utilisateur peut demander à s'informer sur les noms et les directions des arrêts détectés (informations contenues dans le SSID diffusé) en appuyant sur un bouton ACK de son PDA ; les différents arrêts sont énoncés l'un à la suite de l'autre. La PAM peut choisir de se connecter à l'un de ses arrêts par un appui sur une touche du PAD au moment de l'énonciation vocale du nom de l'arrêt choisi.

Cette demande de connexion se traduit d'un point de vue informatique par une requête d'association (requête envoyée pour se connecter à un réseau WiFi) (cf. chapitre 2) qui est

envoyée par le PDA vers le point d'accès, la borne fournit au PDA une adresse IP lui permettant de se connecter au réseau et par la suite d'être capable d'envoyer et de recevoir des trames de données pour interagir avec la borne [3, 9].

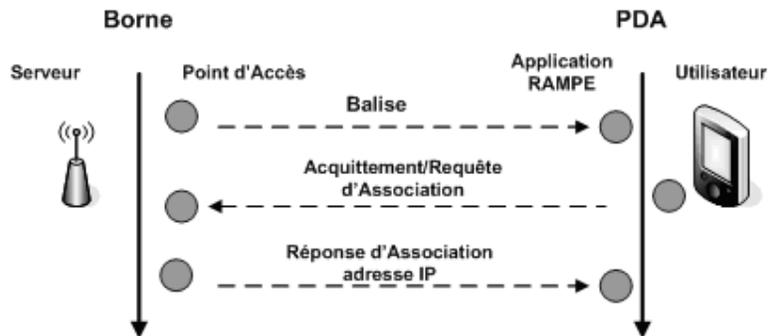


Figure 5- Association du PDA au point d'accès

La borne commence alors à émettre des carillons sonores permettant à la PAM de repérer sa position ; la PAM peut actionner les touches ACK du PDA pour refaire carillonner la borne.

La base de données est ensuite téléchargée sur le PDA afin de permettre à la PAM d'y naviguer et de consulter les informations disponibles liées à son parcours ; ces informations sont énoncées par le système de synthèse de la voix intégré dans le PDA.

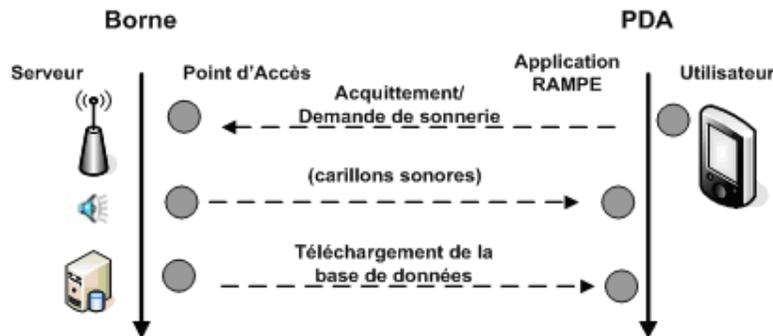


Figure 6- Sonnerie de la borne et téléchargement de la base de données

La navigation dans la base de données comporte trois niveaux:

- Niveau 1 : liste des lignes disponibles passant à l'arrêt et nombre de minutes avant le prochain passage.
- Niveau 2 : pour une ligne donnée : ensemble des arrêts appelés squelettes sur cette ligne. La notion d'arrêt squelette est une notion arbitraire définie a priori et correspond à des arrêts jugés importants (correspondances par exemple).
- Niveau 3: liste de tous les arrêts disponibles depuis la station squelette précédemment choisie.

Le passage d'un niveau à un autre se fera en appuyant sur les boutons ACK du PDA comme montré sur la figure 7. Il est possible de revenir en arrière dans les niveaux à l'aide d'un appui long sur les touches de commande ACK.

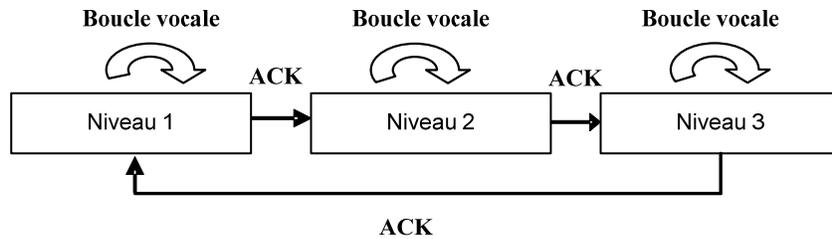


Figure 7- Les trois niveaux de navigation dans la base de données

Il arrive que les informations présentes dans la borne changent (mises à jour par le SAEIV) ou qu'un événement urgent (accident, retard, arrivée de bus) survienne. Pour en avertir l'ensemble des utilisateurs associés à la borne, la borne envoie des trames spécifiques de notification d'informations urgentes. Pour un message urgent, le PDA reçoit la trame correspondante, l'application interrompt la navigation dans l'interface utilisateur et informe immédiatement l'utilisateur du message urgent par synthèse vocale. S'il s'agit d'un rafraîchissement des informations présentes dans la base de données, le PDA reçoit la trame correspondante, télécharge de nouveau la base de données, et informe l'utilisateur des nouvelles informations disponibles. Les messages urgents doivent être acquittés par l'utilisateur, sinon ils sont répétés en boucle en attendant qu'ils soient acquittés.

Récapitulons les quatre états correspondants aux quatre phases d'utilisation de l'application RAMPE/INFOMOVILLE par le schéma de la figure 8. Il est possible de revenir en arrière vers l'état précédent à l'aide d'un appui long sur les touches de commande ACK.

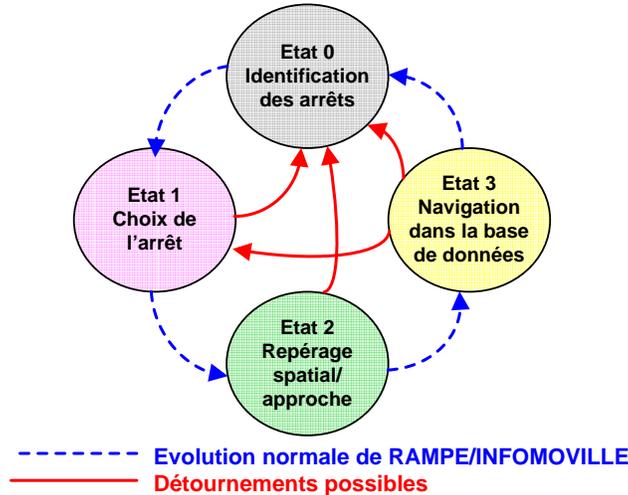


Figure 8- Les quatre phases d'utilisation de RAMPE/INFOMOVILLE [2]

Expérimentation de RAMPE/INFOMOVILLE sur le réseau de Transport en Commun Lyonnais (TCL) :

Une expérimentation du système RAMPE [106, 144, 145] a été menée en partenariat avec le SYTRAL (SYndicat mixte des Transports pour le Rhône et l'Agglomération Lyonnaise-

autorité organisatrice de transports (AOT) de Lyon) et Keolis (société française de transports publics de voyageurs qui appartient au groupe SNCF) sur le réseau TCL en Avril 2007 pour une durée de deux semaines. Deux types de dispositifs utilisateurs ont été expérimentés et comparés : un PDA et une télécommande permettant de déclencher la sonnerie de la borne installée dans la station de bus et disposant d'un haut-parleur intégré. Les scénarios de l'expérimentation ont été élaborés de façon à comprendre une correspondance et de permettre de tester deux parcours symétriques avec le PDA et la télécommande. Le parcours choisi avait la forme d'une huit et comprenait 4 lignes de bus et une correspondance centrale située dans un pôle d'échanges. Des observations ergonomiques, des mesures des niveaux sonores, d'occupation spectrale et de charge du réseau WiFi ainsi que des enregistrements vidéo ont été réalisés. À la fin de chaque test des questionnaires ont été recueillis. Les tests ont été effectués avec 23 sujets aveugles et 8 sujets voyants. L'objectif était d'évaluer l'utilisabilité et la pertinence des deux dispositifs (PDA et télécommande) en prenant comme indicateurs les durées, le nombre d'interrogations pour l'identification des arrêts, la localisation et l'orientation des sujets vers les bornes, Les expérimentations ont montré que les deux dispositifs permettent aux personnes d'acquérir une bonne représentation mentale du parcours. Le PDA permet une meilleure efficacité dans la plupart des situations et n'a pas posé de problème d'utilisation même aux personnes peu technophiles. Par ailleurs, la dispersion des résultats entre sujets est plus faible pour le PDA. Enfin, l'écart de performances entre les résultats des sujets aveugles et ceux des sujets voyants se réduit et converge fortement lorsque l'on passe d'une situation simple (simple arrêt) à celle d'un pôle d'échanges.

1.4 Simulation de RAMPE/INFOMOVILLE dans l'environnement OMNeT++

Dans ce paragraphe, on présente le travail effectué pour développer une simulation de haut niveau du fonctionnement de l'application RAMPE/INFOMOVILLE en utilisant le simulateur OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) (l'installation de ce simulateur est décrite dans l'annexe B).

1.4.1 Introduction sur OMNeT++

OMNeT++ est un logiciel libre destiné à la simulation d'événements discrets écrit en langage objet C++. Il a été développée par Andras Varga, chercheur à l'université de Budapest [21]. Il a été conçu pour la simulation des réseaux informatiques, des systèmes multiprocesseurs et d'autres systèmes répartis. Il est utilisé par de nombreux groupes de recherche pour l'évaluation et l'estimation des performances d'un réseau de télécommunication. Il est utile pour l'illustration, la correction, l'évaluation et l'amélioration des performances. Il fournit un ensemble d'outils qui aident à modifier ou à mettre en application de nouvelles caractéristiques d'une manière simple. Plusieurs exemples de modèles peuvent être simulés avec OMNeT++ [22] ; on peut citer :

- Protocoles de transmission : Protocoles de la couche Physique/Liaison de Données : Ethernet, token ring, FDDI, etc ; Protocoles de couches plus élevées : IP, TCP, X.25 L2/L3, etc ; Types d'application de réseau: E-mail, NFS, ...
- Algorithmes de routage
- Réseaux informatiques et Modèles de trafic : files d'attente etc...
- Multiprocesseur et systèmes répartis

- Systèmes administratifs

...

Les composants d'OMNeT++

- Librairie de simulation (noyau ou kernel)
- Compilateur pour le langage de description de topologie (NED pour Network DEscription)
- Editeur graphique de réseau (GNED pour Graphical NETwork DEscription)
- Interface Graphique (GUI pour Graphical User Interface) pour l'exécution de simulation (appelée Tkenv)
- Interface ligne de commande pour l'exécution de simulation (appelée Cmdenv)
- Outil de traçage de vecteur graphique (Plove)
- Divers outils (outil de génération de nombres aléatoires, outil de création de fichier makefile, etc...)

Langage de description de réseau (Network DEscription (NED)) et ses composants

Un réseau est formé de "noeuds" reliés par des "liens". Les noeuds représentent les blocs (modules simples ou composés), tandis que les liens représentent les canaux, raccordements, etc. La façon dont des éléments fixes (c.-à-d. noeuds) dans un réseau sont reliés ensemble s'appelle la topologie.

OMNeT++ utilise le langage NED qui facilite la création, l'édition, et la représentation graphique d'un certain réseau à simuler. Il suit une structure hiérarchique tenant compte de différents niveaux d'organisation. Un nœud par exemple peut être structuré selon les différentes couches OSI dont il se compose : couche physique, liaison de données, réseau, transport, application... De même, chaque couche peut être structurée selon les applications ou protocoles qui tournent au niveau de cette couche.

Les fichiers de description de réseau ont un suffixe «.ned». Le compilateur NEDC traduit les descriptions de réseau en code C++. Puis, ces descriptions seront compilées par le compilateur C++ et incorporées dans la simulation exécutable. Donc une description NED peut contenir les composants suivants, d'une façon et en nombre arbitraires:

- Les déclarations d'Importation
- Définitions de Canaux
- Modules Simples et Composés

Interface utilisateur

L'interface utilisateur d'OMNeT++ concerne l'exécution de simulation. Elle permet à l'utilisateur de lancer et terminer des simulations et de changer des variables à l'intérieur des modèles de simulation. L'utilisateur peut examiner et corriger la simulation avec une interface graphique puissante.

Actuellement, deux interfaces utilisateur sont soutenues :

- **Tkenv** ("Tk-based graphical, Windowing User Interface"): c'est une interface graphique qui permet le « traçage », la correction et l'exécution de simulation. Elle a la capacité de

fournir une image détaillée de l'état de la simulation à un point quelconque pendant l'exécution. Caractéristiques de Tkenv :

- Fenêtre séparée pour chaque module
- Les messages programmés peuvent être observés dans une fenêtre pendant que la simulation progresse
- Exécution d'événement-par-événement
- Animation de l'exécution
- Fenêtres pour examiner et changer des objets et des variables dans le modèle
- Affichage graphique des résultats de simulation pendant l'exécution
- La simulation peut être remise en marche

La figure 9 présente l'interface Tkenv.

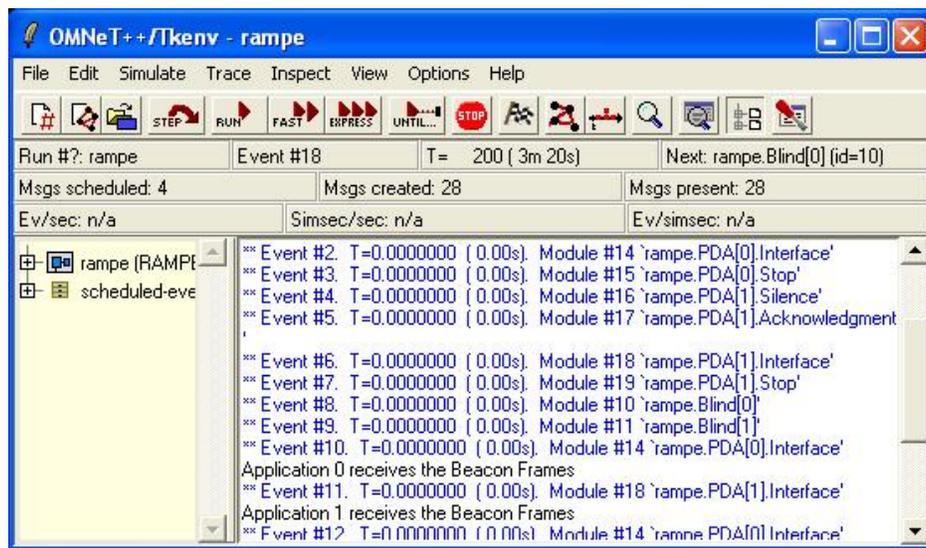


Figure 9- Tkenv avec OMNeT++

- **Cmdenv** (“Command-line User Interface for Batch execution”) : conçue principalement pour l'exécution en batch. C'est une interface par ligne de commande portative, petite et rapide. Cmdenv exécute simplement toutes les simulations « runs » qui sont décrites dans le fichier de configuration.

Différents types de fichiers

Les fichiers présents dans une simulation OMNeT++ :

- Fichier NED pour décrire le modèle de simulation
- Fichier de configuration «omnetpp.ini» pour l'initiation des variables et des paramètres
- Fichier C++ pour initialiser les différents modules et décrire leur fonctionnement
- Fichier de messages .msg décrivant les différents messages échangés entre les modules
- Fichier .h pour la déclaration des classes et variables qui seront utilisées dans le fichier de simulation C++
- Fichiers XML pour la représentation des données et scénarios de simulation

1.4.2 Simulation de RAMPE/INFOMOVILLE

Pour la simulation du fonctionnement de RAMPE/INFOMOVILLE, cinq fichiers ont été créés [9]:

- **RAMPE.ned:** décrivant l'architecture de RAMPE/INFOMOVILLE et ses différents composants : le point d'accès qui est installé dans l'arrêt de bus, le processeur client/serveur embarqué dans la borne de l'arrêt de bus (et qui communique avec le système central propre au réseau de transport), le PDA porté par la PAM (noté «blind» dans la figure 10), et la PAM lui-même. Le PDA est un module OMNeT++ composé de 4 boutons: «Acquittement», «Silence», «Arrêt» et «Interface». Cette «interface» représente l'interface homme-machine qui va interagir avec la PAM et lui énoncer vocalement les informations liées à son parcours. A chaque message reçu, la PAM peut appuyer sur l'un des boutons du PDA. Le PDA est associé à un certain point d'accès.
- **RAMPE.msg:** incluant les différents messages échangés
- **RAMPE.cpp:** simulant le fonctionnement de RAMPE/INFOMOVILLE
- **RAMPE.h:** liste les différentes classes et attributs utilisés dans RAMPE.cpp
- **omnetpp.ini:** initialise quelques variables et paramètres

Deux modes sont utilisés pour la saisie des différents paramètres de la simulation (dont le nombre de bornes par exemple, le nombre de PDAs, ...):

- Le mode interactif : dans ce mode, l'utilisateur entre de façon interactive le nombre de bornes et de PDAs désirés pour la simulation.
- Le scénario prédéfini dans un fichier XML : le nombre de bornes et de PDAs est précisé dans un fichier XML. La structure d'un fichier XML ressemble à celle d'un fichier HTML avec une différence majeure : HTML «représente» les données tandis que XML «décrit» leur structure. Aussi HTML contient des balises et des étiquettes prédéfinies tandis que dans XML, elles sont définies par le programmeur selon son besoin. Un fichier XML n'est supposé valide que s'il est conforme à un fichier DTD (pour Document Type Definition) ou XSD (pour XML Schema Definition), etc, fichiers qui décrivent les différents blocs et la structure d'un fichier XML.

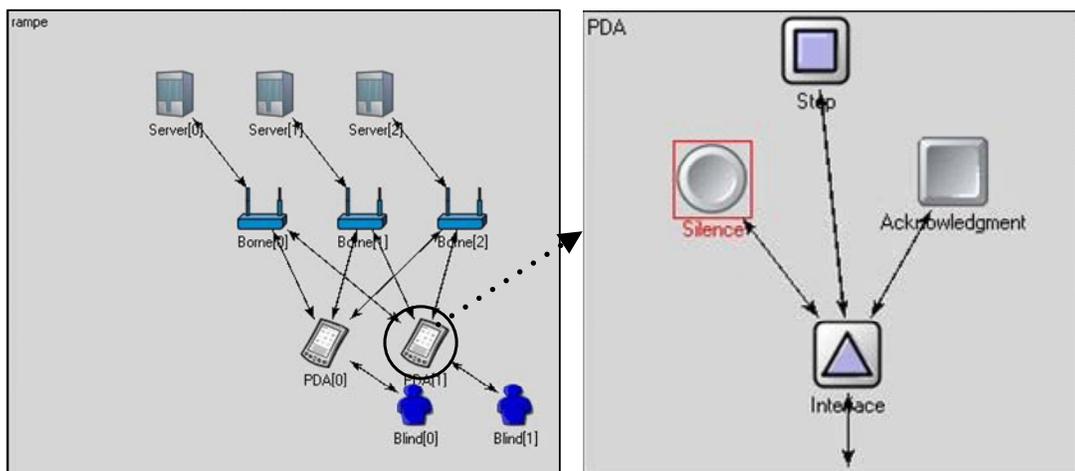


Figure 10- Les composants de RAMPE/INFOMOVILLE dans un fichier NED d'OMNeT++

A l'initialisation, l'application RAMPE/INFOMOVILLE est active (le module «interface» représentant l'état de l'application qui tourne sur le PDA est de couleur rouge). Dans RAMPE/INFOMOVILLE, chaque borne installée dans une station de bus envoie des trames balises ; l'interface homme-machine utilisant une synthèse vocale notifie le composant « blind » de la présence des stations à sa proximité et fournit leurs noms et directions. Pour se connecter à une station désirée, le composant « blind » acquitte par les boutons de son PDA ; Après acquittement, une requête d'association est envoyée depuis la borne vers la station choisie et le PDA reçoit alors une adresse IP.

Dans la simulation de la figure 10, un message est affiché sur l'écran du PC où tourne la simulation, permettant la saisie interactive du choix de l'utilisateur : s'il choisit Acknowledgment (le bouton Acknowledgment devient rouge) et le PDA s'associe à la borne. Le composant « blind » peut acquitter de nouveau pour demander qu'un carillon soit émis depuis la borne afin de repérer sa position (l'élément borne devient rouge) ; la borne communique ensuite avec le serveur (« Server » sur la figure 10) de base de données, récupère les informations liées au transport de la station correspondante et les envoie au PDA. L'interface informe le composant « blind » que la base de données a été bien téléchargée (ces messages vocaux sont montrés par des «popup» messages visualisés au cours de la simulation). Si le composant « blind » acquitte, il passe au niveau 1 qui énonce les lignes principales passant à la station ; s'il n'acquitte pas, l'interface redonne l'information que la base de données a été bien téléchargée et qu'il est possible d'y naviguer. Du niveau 1, le « blind » peut passer au niveau 2 (énonciation des stations squelettes) en acquittant, puis au niveau 3 (énonciation des stations disponibles depuis la station squelette)...

A tout moment de la simulation, si le « blind » appuie sur le bouton « stop », l'application RAMPE/INFOMOVILLE se termine (l'interface s'éteint) sauf en cas d'énonciation d'un message urgent où tous les boutons se transforment en boutons ACK ; ce message urgent est envoyé depuis le serveur de base de données vers la borne qui l'envoie à son tour au PDA. Le « blind » acquitte le message urgent, la base de données est actualisée, retéléchargée sur le PDA et tout le processus recommence.

Cette simulation permet d'illustrer de manière graphique le principe de fonctionnement de l'application. Elle peut aider un ergonome à ajuster certaines spécifications. Elle pourrait être associée à une synthèse vocale et à une « manette » de commandes simulant les touches du PDA pour permettre à une personne aveugle d'apprendre le fonctionnement du système.

1.5 Limitations du système RAMPE testé à Lyon

Des limitations existent dans la version actuelle du système RAMPE/INFOMOVILLE notamment en ce qui concerne d'une part les protocoles et la fiabilité de la transmission de données de communication entre les bornes et les PDA et d'autre part la capacité à localiser et à guider l'utilisateur de manière robuste. On peut résumer ces limitations de la manière suivante :

- **Aspect réseau**

Les deux éléments principaux de RAMPE/INFOMOVILLE sont une borne installée dans la station de bus et un dispositif de type PDA (et maintenant smartphone pour INFOMOVILLE) porté par la personne aveugle. Ces deux éléments communiquent à travers une liaison radio

WiFi. La technologie WIFI, bien qu'elle soit disponible et largement implémentée, est toutefois sujette aux erreurs et affectée par divers facteurs. Elle peut donc manquer de la fiabilité requise pour des systèmes comme RAMPE/INFOMOVILLE. D'autre part, les messages urgents envoyés depuis la borne vers les PDA qui y sont associés sont diffusés en utilisant le protocole UDP en mode broadcast ; ce protocole est un protocole de la couche transport du modèle OSI non orienté connexion et donc n'est pas fiable: aucun acquittement n'est requis de la part du récepteur et aussi les collisions ne sont pas détectées sur une connexion sans fil comme c'est le cas pour les réseaux filaires, et donc les paquets perdus suite à une collision ne sont pas retransmis. D'autre part, le protocole TCP orienté connexion de la couche de transport ne peut pas être utilisé en mode broadcast : la connexion peut souffrir d'un délai et d'une congestion intolérables à cause des acquittements.

Le travail de cette thèse a permis de proposer un nouveau protocole de communication qui, d'une part, fiabilise la communication radio et d'autre part, du point de vue ergonomique, fournit aux utilisateurs du système un indicateur de qualité de la liaison. Supposons qu'un message urgent arrive à un point d'arrêt (délai, accident, arrivée de bus...). Toutes les personnes présentes à l'arrêt doivent être averties. Le protocole proposé essaye de garantir la réception des messages urgents par les PDAs ; de plus, en utilisant comme métrique le taux de pertes paquets (en anglais PER pour Packet Error Rate), et en donnant au PDA la possibilité de calculer ce taux, le protocole servira comme indicateur de qualité de la liaison sans fil.

- **Aspect localisation et guidage**

La version actuelle de RAMPE/INFOMOVILLE ne propose pas réellement de service de localisation et de guidage à l'exception d'un guidage sonore à l'approche des bornes. Cependant plusieurs utilisations de la localisation et éventuellement du guidage sont envisageables dans RAMPE/INFOMOVILLE : permettre à une PAM de localiser une borne, permettre à la borne de localiser une PAM et de l'orienter vers sa destination à travers des chemins d'accès faciles, permettre à une personne « assistante » présente dans l'environnement de la station du transport public de localiser la PAM afin d'aller à sa recherche et l'assister dans son voyage, ...

L'infrastructure WiFi mise en place pour les besoins de communication entre les acteurs de RAMPE/INFOMOVILLE peut aussi être utilisée pour des applications de localisation. Dans le cadre de cette thèse on s'est proposé une solution basée sur les ondes radio WiFi qui pourra être utilisée pour la localisation des PAM et leur guidage dans RAMPE/INFOMOVILLE. Ce service devrait pouvoir offrir aux utilisateurs de l'application une assistance supplémentaire favorisant leur mobilité dans tous les types de transport public et les pôles d'échanges en environnement intérieur ou extérieur.

1.6 Proposition d'amélioration du guidage auditif par le carillon des bornes

Même si on n'intègre pas de technologie de localisation dans le système, on pourrait améliorer le guidage auditif par le carillon des bornes. Dans ce paragraphe, on propose des solutions concernant le repérage spatial des bornes à partir des carillons situés aux arrêts ; ces arrêts peuvent être à proximité l'un de l'autre, leurs carillons peuvent interférer et perturber les PAM cherchant à localiser l'un d'entre eux.

Après l'association du PDA au point d'accès, la borne installée à l'arrêt de bus commence automatiquement à sonner. Si deux bornes (donc deux arrêts de bus) à proximité

l'une de l'autre se mettent à sonner en même temps suite à la requête de deux utilisateurs aveugles, un aveugle cherchant à localiser la première station pourrait se mettre à suivre le carillon sonnerie de la station voisine.

Pour améliorer cette situation, on propose que les sonneries de deux bornes voisines soient différentes l'une de l'autre. Dès que la PAM s'associe avec une borne et avant qu'elle ne commence à sonner, celle-ci enverra le modèle de carillon dans un message spécifiquement destiné à l'aveugle et qu'il peut entendre sur son PDA. Dès que l'utilisateur aura bien entendu la sonnerie, il demandera alors à la borne de sonner afin de repérer sa position.

Dans le cas où plus de deux stations sont à proximité l'une de l'autre, les bornes peuvent sonner ensemble suite à la demande de plusieurs PAM. Même si les sonneries sont différentes et même si un modèle de la sonnerie est envoyé séparément à chaque PAM, l'utilisateur risque d'avoir du mal à se repérer au milieu de ces différents carillons et de ce fait à avoir des difficultés à s'orienter vers l'arrêt de bus choisi.

On peut imaginer un protocole de communication entre les différentes bornes présentes dans un même site d'une façon à éviter que plusieurs ou toutes les bornes sonnent en même temps.

On peut imaginer un système de jeton qui circulera entre les bornes. Celle qui le saisit a le droit de sonner pour un certain temps avant de libérer le jeton pour la borne suivante. De cette façon les bornes sonneront l'une à la suite de l'autre. Un délai de quelques secondes pourra être fixé entre les sonneries des différentes bornes d'une façon à minimiser le conflit des sons. Ce délai doit cependant être acceptable pour la PAM.

Chapitre 2

Technologies sans fil de communication et de localisation

2.1 Motivations

Dans le but de développer des systèmes de transmissions de données assurant une communication indépendante de l'emplacement des périphériques informatiques qui composent le réseau, et utilisant les ondes radio électromagnétiques plutôt qu'une infrastructure câblée, plusieurs technologies sans fil ont été mises en place. Ces technologies diffèrent par le débit offert, la portée, la consommation en énergie des dispositifs, la disponibilité dans les périphériques informatiques, ...etc.

RAMPE/INFOMOVILLE est un système d'aide aux personnes aveugles reposant sur une technologie de communication courte distance. Trois points importants sont à considérer dans le choix de cette technologie: sa disponibilité dans les dispositifs mobiles et sa facilité d'implémentation, la fiabilité ou en d'autres termes les performances offertes ainsi que le débit et la portée permis, et la possibilité d'utilisation de cette technologie dans des éventuelles extensions et améliorations pouvant être apportées au système. L'une des applications possibles de cette technologie de communication sans fil, qui s'avère être intéressante pour le système RAMPE/INFOMOVILLE, est son utilisation dans des services de localisation. Plusieurs systèmes de géolocalisation/localisation d'objets mobiles ont été développés et quelques uns implémentés; certains fonctionnent dans les zones intérieures aux bâtiments, d'autres en extérieur, certains nécessitent des équipements supplémentaires, d'autres peuvent se baser sur les infrastructures de communication existantes.

On compare dans les paragraphes qui suivent de ce chapitre les trois technologies sans fil Zigbee, Bluetooth et Wifi. On explique leur architecture et fonctionnement pour passer ensuite, dans la deuxième partie du chapitre, à un état de l'art sur les systèmes, méthodes et techniques de localisation existants. Les trois aspects de choix de la technologie sans fil WiFi pour l'application RAMPE/INFOMOVILLE (disponibilité, fiabilité et utilisation en dehors de la communication) sont alors détaillés et ce choix justifié.

2.2 Technologies de communication sans fil courte distance

Commençons par un tableau comparatif des trois technologies Zigbee, Bluetooth and WiFi:

Protocole	Zigbee	Bluetooth	Wi-Fi
Standard IEEE	802.15.4	802.15.1	802.11a/b/g/n/n-draft
Autonomie avec pile	Années	Jours	Heures
Nombre de nœuds	>65 000	7	(non spécifié par la norme et dépend du débit à offrir pour une station) mobile)

Débits offerts	20- 250 Kb/s	1 Mb/s	11-54-108-320 Mb/s
Portée	100 mètres	10-100 mètres	300 mètres
Applications	Surveillance et Contrôle	Remplacement de câbles	Internet (web et messagerie électronique ou e-mail), Vidéo, réseaux de données
Disponibilité	Capteurs	Ordinateurs portables, PDA, Téléphones mobiles	Ordinateurs portables, PDA, Téléphones mobiles

Table 1- Technologies de communication sans fil

2.2.1 Zigbee

2.2.1.1 Norme IEEE 802.15.4

ZigBee est basé sur le standard IEEE 802.15.4 qui est un protocole de communication utilisé par exemple dans les réseaux sans fil personnels (ou en anglais LR-WPAN pour Low Rate Wireless Personal Area Network ou aussi LP- WPAN pour Low Power Wireless Personal Area Network) du fait de leur faible consommation, de leur faible portée et du faible débit de leurs dispositifs [125]. Cette technologie a pour objectif d’offrir une solution simple, peu coûteuse, dont la partie radio a une consommation réduite et des capacités d’auto-organisation.

Zigbee est apparu après les technologies Bluetooth et WiFi pour assurer des applications qui n’étaient pas faisables avec ces deux technologies ; ses spécifications, disponibles au sein de la communauté industrielle "ZigBee Alliance", ont été ratifiées le 14 décembre 2004 et en 2005 la communauté a publié les premières spécifications officielles de la version ZigBee 1.0. Cette version propose un protocole de débit et de portée relativement faibles mais dont la fiabilité est élevée et la consommation réduite (les nœuds sont conçus pour fonctionner plusieurs mois (jusqu’à deux ans) en autonomie complète). On trouve ZigBee dans les contrôles industriels, les applications médicales, les détecteurs de fumée et d’intrusion.

2.2.1.2 ZigBee et les couches IEEE

Ce protocole fonctionne, comme WiFi, dans les couches basses du modèle IEEE : la couche Physique (couche radio notée PHY) et la couche Liaison de Données (notée MAC pour Medium Access Control). Les couches supérieures sont définies par ZigBee alliance [125].

Couche Physique

Elle est gérée au niveau matériel. C'est elle qui s'occupe de l'émission et de la réception des ondes radio. Elle définit les caractéristiques telles que la bande de fréquence et l'arrangement des canaux, les caractéristiques de l'émetteur, de la modulation, du récepteur, ...etc. Zigbee fonctionne dans les bandes de fréquence 2.400–2.484 GHz (16 canaux), 902-928 MHz (10 canaux) and 868.0–868.6 MHz (1 canal) en Europe. La couche physique utilise la modulation de séquence directe à étalement de spectre (DSSS- Direct Sequence Spread Spectrum).

Couche Liaison de Données

Deux types de dispositifs Zigbee ont été définis:

- Le dispositif ayant toutes les fonctions possibles FFD- Full Function Device : il peut être un coordinateur, un routeur, un dispositif relié à un capteur.
- Le dispositif ayant des fonctions limitées RFD- Reduced Function Device : il fonctionne uniquement en dispositif.

Pour former un réseau Zigbee, au moins un FFD doit être présent et communiquer sur le même canal physique avec des RFD. Le FFD peut dialoguer avec des RFD et des FFD, tandis que le RFD dialogue avec un FFD uniquement.

La couche Liaison de Données peut fonctionner selon deux modes: le premier dit «Réseau avec envoi de balise» (en anglais «beacon»), le second dit «Réseau sans envoi de balise» («non-beacon»).

Réseau avec balise

Dans ce type de réseau le coordinateur, qui est responsable du routage à travers le réseau, émet périodiquement une trame balise afin que l'ensemble des dispositifs reliés soient synchronisés [126]. Lors de la réception d'une trame balise, tous les dispositifs sont informés de la durée de la super-trame (période d'activité du coordinateur et qui mesure 16 intervalles temporels ou time-slots) et à quel moment ils pourront transmettre des données. Ils recevront aussi une indication quand le coordinateur entrera en hibernation et pour quelle durée. Les dispositifs savent alors quand ils peuvent rentrer en hibernation ou transmettre. La durée de la super-trame et la période d'envoi de la balise varient entre 15.38ms et 252s. Tous les dispositifs doivent se réveiller quelques instants avant l'émission de la balise et restent en attente de cette trame pour se synchroniser.

Il existe deux types d'accès au médium:

- CAP (Contention Access Period): tous les dispositifs peuvent transmettre d'une façon aléatoire, mais en respectant la durée d'un slot (une transmission ne peut pas démarrer au milieu d'un slot).
- CFP (Contention Free Period): permet de garantir l'accès au canal à un dispositif pendant une durée déterminée en nombre de slots, appelée GTS (Guaranteed Time Slot). L'allocation d'un GTS fait suite à une demande de la part d'un dispositif pendant la CAP. L'information sur la réservation d'un GTS (et l'affectation du GTS dans la CFP) est inscrite dans la prochaine balise, avec l'adresse du dispositif concerné, la durée du GTS et le slot de départ. La libération d'un GTS se fait soit par demande de la part du dispositif, soit parce que le coordinateur n'arrive plus à joindre le dispositif.

Tous les dispositifs voulant communiquer pendant la CAP entre deux balises sont mis en concurrence avec les autres en utilisant le protocole CSMA/CA.

Réseau sans balise

Dans ce mode, le coordinateur n'émet pas de trame balise et reste par défaut dans l'état d'attente de données. Le dispositif qui veut transmettre regarde si le canal est libre. Si c'est le cas, alors il transmet sinon il attend une période aléatoire (défini dans le protocole IEEE 802.15.4-2003) [126].

Lorsque le coordinateur a des données à transmettre à un dispositif, il attend que le dispositif rentre en contact et lui demande les données. Le coordinateur envoie alors un accusé de réception de la requête. Si des données sont en attente, le coordinateur transmet les données en utilisant le même principe (CSMA/CA). S'il n'y a pas de données en attente, le coordinateur envoie une trame de données vide (longueur 0). Le dispositif accuse la réception des données.

Cette solution peut permettre d'augmenter l'autonomie des batteries des capteurs et d'utiliser le canal uniquement lorsqu'il est nécessaire de transmettre des données. Par contre du fait de CSMA/CA, l'accès au canal n'est pas garanti dans une période donnée ; il dépendra de la densité du réseau et du nombre de dispositifs voulant transmettre simultanément.

Couche réseau et application

Les couches supérieures, réseau (NWK pour Network) et application (APL) sont définies par la «ZigBee Alliance». La couche réseau introduit un «composant» ZigBee supplémentaire : le ZigBee Router (ZR), qui en plus d'être un composant FFD a la responsabilité de gérer les adresses locales et de maintenir des tables de routage. Le réseau ZigBee permet différent type de topologie : en étoile, maillé (mesh) ou arborescent.

La table de découverte d'une route contient les informations sur les sources du message. Elle stocke l'adresse d'origine du dispositif qui a fait la demande et l'adresse du dispositif qui va transmettre les données en tant qu'intermédiaire (entre la source et la destination). Elle contient aussi les coûts de transmission entre la source jusqu'au nœud actuel et du nœud jusqu'au destinataire. Elle peut donc adapter la route pour être plus performante en mettant à jour les adresses à utiliser.

2.2.2 Bluetooth

2.2.2.1 Norme IEEE 802.15.1

Bluetooth est basé sur le standard IEEE 802.15.1. C'est une technologie radio courte distance destinée à simplifier les connexions entre les appareils électroniques. Elle a été conçue dans le but de remplacer les câbles entre les ordinateurs et les imprimantes, les scanners, les claviers, les souris, les téléphones portables, les PDA, les autoradios et les appareils photo numériques.

Les spécifications de Bluetooth sont disponibles au sein de la communauté Bluetooth Special Interest Group (SIG) qui a annoncé plusieurs versions et plusieurs normes de cette technologie:

- IEEE 802.15.1- 2002 (Bluetooth 1.1) : première version de Bluetooth assurant un débit de 1Mb/s. Cependant, cette version avait beaucoup de problèmes surtout en ce qui concerne l'interopérabilité des équipements.
- IEEE 802.15.1- 2005 (Bluetooth 1.2) : propose des améliorations par rapport à la version précédente surtout en ce qui concerne la rapidité de connexion entre les équipements.

- Bluetooth 2.0 : propose des débits 3 fois plus importants que les versions précédentes, de l'ordre de 3Mb/s théorique.
- Bluetooth 2.1 : apportant des modifications à la version 2.1 notamment au niveau sécurité.
- Bluetooth 3.0 : Annoncé en avril 2009 réutilise la couche air 802.11 pour atteindre des débits sur l'interface air de 54 Mbits/s et de 24 Mbit/s au niveau applicatif dans les bandes 2.5 et 5 GHz.

La topologie des réseaux Bluetooth a comme brique de base le Piconet. Un «Piconet» forme un réseau sans fil personnel (WPAN) de type ad-hoc, et suit une topologie en étoile: 1 maître et plusieurs esclaves. Le maître peut administrer jusqu'à 7 esclaves et 255 dispositifs en mode « inactif » (ou parked). La communication est directe entre le maître et un esclave. Les esclaves ne peuvent pas communiquer entre eux et sont synchronisés sur l'horloge et la fréquence du maître (c'est lui qui détermine la séquence de saut de fréquence pour tout le Piconet). Les périphériques esclaves peuvent avoir plusieurs maîtres, les différents Piconets peuvent donc être reliés entre eux. Le réseau ainsi formé est appelé un «Scatternet». Un dispositif peut jouer le rôle d'un pont (ou bridge) tout en étant un Maître dans un piconet et un esclave dans un autre.

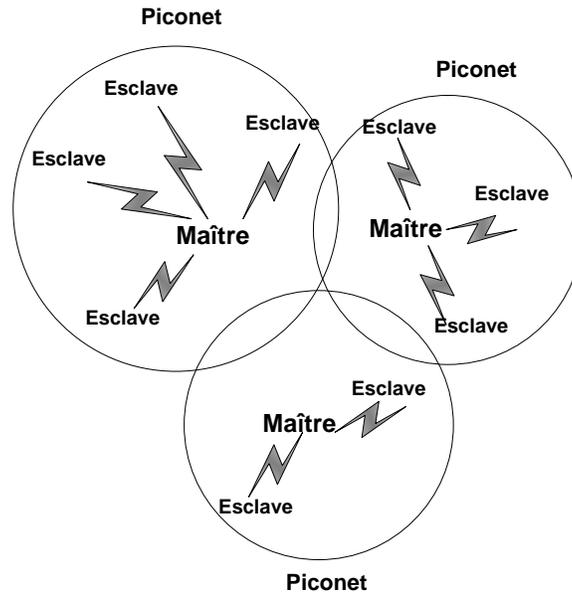


Figure 11- Réseau Scatternet Bluetooth

2.2.2.2 Bluetooth et les couches IEEE

Comme Zigbee, la technologie Bluetooth repose sur les deux couches basses du modèle IEEE, la couche PHY et la couche MAC.

Couche Physique

Elle utilise l'une des bandes de fréquences ISM (Industrial, Scientific & Medical) réservée pour l'Industrie, la Science et la Médecine. La bande de fréquences utilisée est disponible au niveau mondial et s'étend sur 83,5 MHz (de 2,4 à 2,4835 GHz). Cette bande est

divisée en 79 canaux séparés de 1 MHz. Le codage de l'information se fait par sauts de fréquence (FHSS- Frequency Hopping Spread Spectrum).

Il existe trois classes de modules radio Bluetooth sur le marché ayant des puissances différentes et donc des portées différentes:

Classe	Puissance	Portée
1	100 mW (20 dBm)	100 mètres
2	2,5 mW (4 dBm)	10 mètres
3	1 mW (0 dBm)	1 mètre

Table 2- Les trois classes de modules radio Bluetooth

La plupart des fabricants d'appareils électroniques utilisent des modules de classe 2.

Couche MAC

Chaque dispositif a une adresse physique équivalente à l'adresse MAC d'une carte réseau et nommée BD_ADDR- Bluetooth Device Address. Cette adresse est codée sur 48 bits. La technologie Bluetooth permet la transmission de deux types de trafic et de données: un trafic ayant des contraintes temps réel comme la voix et l'audio, et un trafic n'ayant pas des contraintes de temps. Dans ce but, deux types de liaisons sont définis entre 2 dispositifs:

- Synchronous Connection Oriented- SCO pour la voix et l'audio.
- Asynchronous Connectionless Links- ACL pour la transmission des données.

Les paquets ACL contiennent 72 bits nommés Access Code, 54 bits d'entête et 16 bits de CRC en plus des données utiles. Différents types de paquets existent pour différentes longueurs de données à transmettre. Le paquet ayant le plus long payload est nommé DH5. Il peut transmettre 339 octets, soit 2,712 bits. Les liens SCO fonctionnent à un débit de 64 kb/s, et il est possible d'avoir trois liens en full-duplex simultanément pour la voix ou aussi un mixage de voix et de données.

2.2.3 Wi-Fi (Wireless Fidelity)



Le réseau local sans fil (noté WLAN pour Wireless Local Area Network) est un réseau assurant à un ensemble de dispositifs mobiles (ordinateurs portables, ordinateurs de poche de type PDA, ...etc), un lien avec le réseau câblé existant, utilisant les ondes radios plutôt qu'une liaison filaire, et offrant aux utilisateurs de ces dispositifs un accès à l'ensemble des ressources et des services du réseau de l'entreprise.

L'IEEE- Institute of Electrical and Electronics Engineers a initié la spécification 802.11, norme régissant les réseaux locaux sans fil, en 1990 et l'avait finalisée en 1997. Le nom WiFi (pour Wireless Fidelity parfois noté Wi-Fi), correspond initialement au nom donné à la certification délivrée par la WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance), l'organisme chargé de maintenir l'interopérabilité entre les matériels répondant à la norme 802.11. Les réseaux sans fil deviennent de plus en plus répandus dans les zones à forte concentration d'utilisateurs (gares, aéroports, hotels, trains,...), afin de leur fournir, en général, un accès au réseau Internet ; ces zones sont appelées "Hot Spots".

Un autre standard de réseau sans fil a été proposé par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) en 1996 : HiperLAN (pour HIgh PERformance radio LAN). Cependant, cette technologie n'a pas connue de développement industriel et seule la technologie Wi-Fi est restée.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéresserons plus particulièrement à la technologie WiFi dont les principes en sont présentés dans les paragraphes suivants.

2.2.3.1 Norme IEEE 802.11

La norme IEEE 802.11 est en réalité la norme initiale offrant des débits de 1 ou 2 Mb/s. Des révisions ont été apportées à la norme originale afin d'optimiser le débit ou bien préciser des éléments afin d'assurer une meilleure sécurité ou une meilleure interopérabilité. Le tableau 3 présente les différentes révisions de la norme 802.11 et leurs significations:

Nom de la norme	Nom	Description
802.11	Legacy ou IEEE802.11-1997 ou IEEE802.11-1999	Propose des débits de 1 ou 2 Mbps envoyés dans des signaux infrarouges et utilise la modulation DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
802.11b	WiFi	Propose un débit de 11 Mb/s avec une portée pouvant aller jusqu'à 300 mètres dans un environnement dégagé. La plage de fréquence utilisée est la bande des 2.4 GHz. 802.11b avec la norme 802.11g sont les plus répandues aujourd'hui
802.11g	WiFi	Offre un débit de 54 Mb/s sur la bande de fréquence des 2.4 GHz. Elle est compatible avec la norme 802.11b, ce qui signifie que des matériels conformes à la norme 802.11g pourront fonctionner en 802.11b.
802.11a	WiFi5	Permet d'obtenir un haut débit (54 Mb/s). La norme 802.11a spécifie 8 canaux radio dans la bande de fréquence des 5 GHz.
802.11e	Amélioration de la qualité de service	Vise à améliorer la qualité de service au niveau de la couche liaison de données. Elle dispose d'un système de priorité spécifiant le traitement de l'information en fonction de sa nature. Intitulée Wireless Multimedia Extension (WME), elle libère en priorité de la bande passante pour le transport de la voix ou de la vidéo, que pour les données brutes.
802.11f	Itinérance (roaming)	Concerne l'itinérance entre les points d'accès permettant à un utilisateur de changer de point d'accès d'une façon transparente lors d'un déplacement
802.11i	WPA2	Son but est d'améliorer la sécurité des transmissions (gestion et distribution des clés, chiffrement et authentification) dans les transmissions utilisant les technologies 802.11a, 802.11b et 802.11g. Il définit un réseau de sécurité robuste (Robust Security Network ou RSN) comportant des améliorations par rapport au mode de sécurisation WEP (Wired Equivalent Privacy). Elle utilise les moyens d'authentification et de cryptage suivants : IEEE 802.1x, Le processus de chiffrement basé sur l'algorithme AES (Advanced Encryption Standard) et le processus de chiffrement TKIP (Temporal Key Integrity Protocol) permettant d'obtenir le mode de sécurisation WPA (moins robuste que WPA2) à l'aide de clés de 128 bits dynamiques modifiées de manière aléatoire.
802.11n	TGn ou P802.11n	Encore à l'état de projet, il permet d'atteindre un débit allant jusqu'à 270 Mbits/s ou 300 Mbits/s respectivement dans la bande de fréquences des 2,4 GHz ou 5 GHz, grâce à la technologie MIMO

		(Multiple-Input Multiple-Output) (qui permet d'utiliser, à la fois, plusieurs émissions spatiales et plusieurs antennes pour les récepteurs et émetteurs), le regroupement des canaux radio permettant d'augmenter la bande passante et l'agrégation de paquets de données qui permet l'augmentation des débits. 802.11n combine jusqu'à 8 canaux non superposés. Récemment, le Draft 8.0 fut lancé en Mars 2009 et le draft 9.0 suivra.
--	--	---

Table 3- Les différentes normes WiFi

2.2.3.2 WiFi et les couches OSI- Couche Physique

Comme tous les standards IEEE 802, le standard 802.11 se concentre sur les deux couches inférieures du modèle IEEE, la couche PHY et la couche MAC:

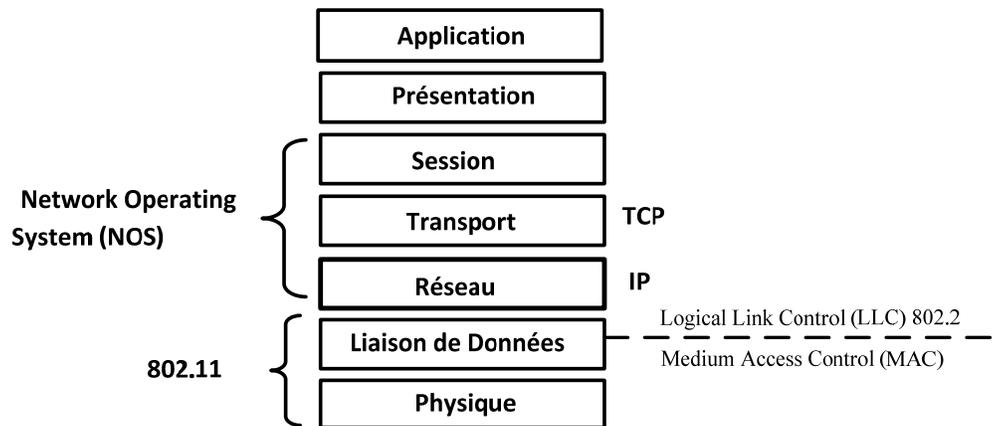


Figure 12- Les deux couches de 802.11

Normes 802.11b et 802.11g [15, 167]

Ce sont les deux normes les plus utilisées de nos jours. Toutes les deux fonctionnent dans la bande de fréquence 2.400-2.4835 Ghz, dont l'utilisation ne nécessite pas l'obtention d'une licence. Cette bande de fréquence est utilisée dans les zones intérieures et extérieures, a une largeur de 83.5 MHz et elle est découpée en 14 canaux séparés de 5 MHz, sauf pour le canal 14 qui est espacé de 12 Mhz du canal 13. Les 11 premiers canaux sont utilisés aux Etats-Unis, les 13 premiers en Europe et les 14 canaux au Japon.

Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fréquence (GHz)	2.412	2.417	2.422	2.427	2.432	2.437	2.442	2.447	2.452	2.457	2.462	2.467	2.472	2.484

Table 4- Découpage de la bande dans 802.11b/g

Ainsi les canaux adjacents se recouvrent partiellement ; les canaux séparés de 20Mhz (1 et 5, 4 et 8 par exemple) sont isolés et donc n'interfèrent pas.

La norme 802.11b utilise les modulations CCK (Complementary Code Keying) et l'étalement du spectre par séquence directe (DSSS pour Direct Sequence Spread Spectrum) [15]. La norme

802.11g utilise la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) pour les débits de 6 à 54 Mbps et les modulations CCK, DSSS et BPSK/QPSK (Binary and Quadrature Phase-shift Keying) pour les débits inférieurs à 6 Mbps.

La puissance maximale de sortie promise aux USA est de 1000mW tandis qu'en Europe elle est de 100mW.

Norme 802.11a [168]

802.11a fonctionne dans la bande des 5GHz, nommée "La Bande Universelle de l'Infrastructure des Réseaux et de l'Information" (UNII- Universal Networking Information Infrastructure band) et divisée en 3 parties: UNII-1 est pour l'utilisation en zone intérieure uniquement, UNII-2 est pour l'utilisation en zone intérieure et extérieure et UNII-3 est utilisée uniquement pour le bridging en zone extérieure uniquement. Cette bande de fréquence a été découpée en 18 canaux séparés de 20Mhz. 11 canaux sont utilisés pour les zones intérieurs avec une puissance maximale émise de 200mW ce qui permet de définir 8 canaux distincts d'une largeur de 20 Mhz chacun, c'est-à-dire une bande suffisamment large pour ne pas avoir de parasitage entre canaux en zone intérieure, et 7 canaux sont utilisés pour les zones extérieures avec une puissance maximale émise de 1000mW. 802.11a utilise uniquement la modulation OFDM- Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

Voici les fréquences associées aux 11 canaux pour les zones intérieures:

Canal	36	40	42	44	48	50	52	56	58	60	64
Fréquence (GHz)	5.180	5.200	5.210	5.220	5.240	5.250	5.260	5.280	5.290	5.300	5.320

Table 5- Découpage de la bande dans 802.11a (zone intérieure)

Et les fréquences associées aux 7 canaux pour les zones extérieures:

Canal	149	152	153	157	160	161	165
Fréquence (GHz)	5.745	5.760	5.765	5.785	5.800	5.805	5.825

Table 6- Découpage de la bande dans 802.11a (zone extérieure)

2.2.3.3 Les modes d'opération de 802.11

Le standard 802.11 définit deux modes d'opération: le mode Infrastructure et le mode Ad-Hoc.

2.2.3.3.1 Mode Infrastructure

En mode infrastructure, le réseau sans fil consiste au minimum en un point d'accès (AP- Access Point) connecté éventuellement à l'infrastructure du réseau filaire et un ensemble de postes réseaux sans fil, appelées stations. L'ensemble formé par le point d'accès et les stations situées dans sa zone de couverture est appelé ensemble de services de base BSS- Basic Service Set et constitue une cellule. Chaque BSS est identifié par un BSSID- Basic Service Set Identifier, un identifiant de 6 octets (48 bits). Dans le mode infrastructure, le BSSID correspond à l'adresse MAC- Medium Access Control du point d'accès. De même, la zone de service

correspondante à une cellule ou encore à un AP est identifiée par un SSID- Service Set Identifier, un identifiant de 32 caractères au format ASCII.

Un ensemble de services étendu ou ESS- Extended Service Set est un ensemble d'au moins deux BSS formant un seul sous-réseau, et reliés entre eux par une liaison appelée système de distribution (DS- Distribution System) (cf. figure 13). Le DS peut être aussi bien un réseau filaire, qu'un câble entre deux points d'accès ou bien même un réseau sans fil.

Un ESS est repéré par un ESSID- Extended Service Set Identifier, un identifiant de 32 caractères au format ASCII, et qui représente le nom de tout le réseau en infrastructure, donc le SSID commun à tous les BSS. En d'autres termes, l'ESS est un ensemble de plusieurs APs ayant le même SSID.

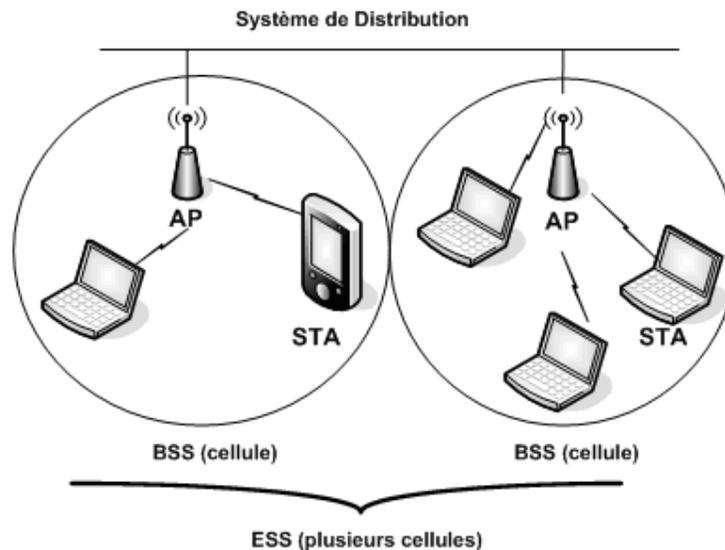


Figure 13- Mode Infrastructure de 802.11

Pour qu'une station mobile puisse émettre et recevoir des données au sein d'un BSS (communiquer avec d'autres stations du réseau filaire ou du réseau sans fil), elle doit se connecter au réseau 802.11 en s'associant à un point d'accès et éventuellement en s'authentifiant.

❖ Scanning

La couche MAC 802.11 est responsable de la manière dont un client s'associe à un point d'accès. Lorsqu'un client 802.11 entre dans le rayon d'action d'un ou plusieurs points d'accès (soit après un allumage, après un mode veille ou simplement en entrant géographiquement dans la cellule), il a besoin d'informations de synchronisation de la part du point d'accès pour s'y associer: ces informations sont obtenues par le Scanning. Deux modes de Scanning existent [15] :

Passive Scanning : Dans ce mode, la station attend les informations de synchronisation contenues dans les trames balises (beacon frames) envoyées périodiquement par l'AP. En effet chaque point d'accès diffuse régulièrement une trame balise donnant des informations sur son BSSID, ses caractéristiques et éventuellement son SSID (cf. paragraphe 2.2.3.3.1). Pour pouvoir

s'associer (c'est-à-dire se connecter à un réseau WiFi et pouvoir émettre et recevoir des trames) à un WLAN particulier, une station doit avoir le même SSID que le point d'accès.

Active Scanning : dans ce mode, la station essaye de trouver un AP en envoyant des «requêtes» (Probe Request) et en attendant des «réponses» (Probe Response) du point d'accès. Quand une station mobile rentre dans la zone de couverture d'un point d'accès, elle diffuse sur chaque canal une requête contenant le SSID pour lequel elle est configurée ainsi que les débits qu'elle supporte. Si un point d'accès configuré avec ce SSID est présent il renvoie une réponse contenant ses caractéristiques de transmission (débits supportés ...).

Modèles de sélection du point d'accès

La norme qui ne porte que sur la couche PHY et la couche MAC, ne spécifie pas de stratégie de sélection des points d'accès par une station. Il est possible de déterminer des critères (RSB, charge réseau) et une heuristique permettant d'optimiser la bande passante et la disponibilité d'un réseau WiFi [17, 18]. Parmi ces approches, on distingue deux catégories :

- **RSB** – qui consiste à choisir l'AP permettant le meilleur RSB indépendamment de la charge ou du nombre d'utilisateurs.
- **Equilibre de charge** – qui consiste à considérer à la fois le RSB et la charge de l'AP et à choisir l'AP qui semble offrir la meilleure largeur de bande disponible.

❖ Authentification

Un des problèmes majeurs des réseaux sans fils est la sécurité, notamment la confidentialité et la vulnérabilité du réseau qui peut être victime d'une écoute ou d'une intrusion. Les mécanismes d'authentification prévues dans la norme cherchent à pallier cette faiblesse de fonctionnement du point de vue sécurité. La norme prévoit deux mécanismes de base :

Open System Authentication: qui est simplement un mécanisme qui sert à identifier la station mobile au point d'accès, et qui résulte généralement en une réponse positive.

Shared Key Authentication: qui utilise un algorithme de cryptage des données: l'algorithme WEP- Wired Equivalent Privacy avec une clé secrète de cryptage de 40 bits ou de 104 bits. Cet algorithme, peu robuste, a été par la suite amélioré par l'algorithme WPA (Wi-Fi Protected Access) qui génère régulièrement de nouvelles clés dynamiques - pour chaque paquet de 10 Koctets de données transmises sur le réseau. L'objectif de ce type d'authentification et de cryptage est d'offrir une sécurité équivalente à celle offerte par un réseau filaire traditionnel.

L'authentification se fait en 4 étapes (4 messages sont échangés pour permettre à l'AP de vérifier que la station a la clé correcte):

1. Demande d'authentification de la part du poste sans fil vers l'AP
2. Réponse de la part de l'AP contenant un message aléatoire de 128 octets
3. Deuxième message du poste sans fil contenant le message aléatoire précédent crypté par l'algorithme WEP ou WPA

4. Vérification par l'AP de l'intégrité de la trame reçue et du message de 128 octets qu'elle contient, et envoi d'une réponse positive ou négative selon le résultat.

Après cette Authentification, commence l'Association.

❖ Association

Durant l'association, la station mobile STA et l'AP échangent des informations supplémentaires. La station obtiendra alors un identificateur d'association (AID pour Association Identifier). Cet AID est une valeur donnée par l'AP et qui représente l'identification de 16 bits de la STA. La longueur de ce champ AID est de 2 octets. La station peut émettre et recevoir des trames après que cette association soit terminée avec succès.

Résumé des opérations effectuées

Ces différents mécanismes sont illustrés par le schéma ci-dessous :

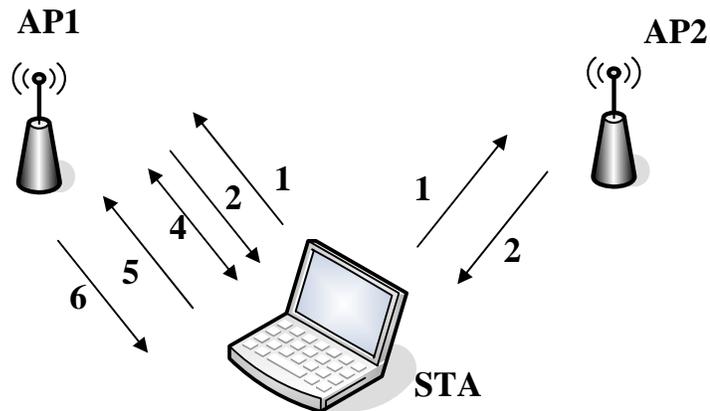


Figure 14– Opérations effectuées dans 802.11 en mode infrastructure

1. STA envoie une probe request
2. AP répond par une probe response. 1 et 2 représentent la variante du Active Scanning
3. La station aura une liste des APs du réseau et choisit alors le meilleur AP (en général l'AP avec le meilleur RSB)
4. La station s'authentifie au Point d'Accès
5. La station envoie une requête d'association
6. AP répond par une réponse d'association en attribuant un AID à la station.

❖ Les différentes trames de 802.11

Il y a trois types de trames échangées dans un réseau WiFi 802.11 en mode infrastructure [15] :

- Les trames de **Données**, utilisées pour la transmission des données.
- Les trames de **Contrôle**, utilisées pour contrôler l'accès au support (eg. RTS, CTS, ACK).
- Les trames de **Gestion**, transmises de la même façon que les trames de données pour l'échange d'informations de gestion, mais qui ne sont pas transmises aux couches supérieures.

2.2.3.3.2 Mode Ad-Hoc

Le mode Ad-Hoc, point à point, ou ensemble de services de base indépendants (IBSS-Independent Basic Service Set), représente simplement un ensemble de stations sans fil 802.11 qui communiquent directement entre elles sans point d'accès ni connexion à un réseau filaire. Un IBSS est constitué d'un seul BSS.

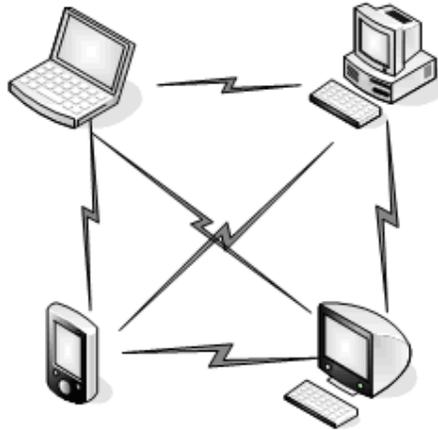


Figure 15- Mode Ad-Hoc de 802.11

2.2.3.4 La couche Liaison de Données

La norme 802.11 ne définit que la sous-couche MAC de la couche liaison de donnée du modèle OSI. Elle utilise une adresse physique classique sur 48 bits. Elle s'interface avec la sous-couche LLC 802.2, simplifiant ainsi le pontage entre les réseaux sans fil et les réseaux filaires.

La couche 802.11 MAC est très proche de 802.3 MAC dans sa conception: plusieurs utilisateurs peuvent exister sur un support partagé en faisant détecter ce support permettant un accès multiple. Elle définit deux types de protocoles ou d'accès:

- DCF- Distributed Coordination Function
- PCF- Point Coordination Function

2.2.3.4.1 DCF et le protocole CSMA/CA

Pour les LAN Ethernet 802.3, le protocole CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) gère l'accès des stations au bus ; il détecte et gère également les collisions qui se produisent lorsque deux périphériques ou plus tentent de communiquer simultanément. Pour détecter ces collisions, une station doit être capable de transmettre et d'écouter en même temps. Or, dans les systèmes radio, il ne peut y avoir transmission et écoute simultanées. Alors le standard 802.11 fait appel à un protocole légèrement modifié, appelé CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), ou à la fonction DCF (Distributed Coordination Function) qui définit un accès de type « Contention ». La période pendant laquelle ce protocole est utilisé s'appelle CP- Contention Period où chaque station essaye de gagner l'accès au médium. Le protocole CSMA/CA tente d'éviter les collisions en imposant une écoute du médium avant une tentative de transmission ainsi qu'un acquittement

systématique des paquets (ACK- Acknowledgment): si le paquet est intact à la réception, la station réceptrice émet une trame ACK. Si la trame ACK n'est pas détectée par la station émettrice (parce que le paquet original ou le paquet ACK n'a pas été reçu intact), une collision est supposée et le paquet de données est retransmis après attente d'un autre temps aléatoire.

Le protocole CSMA/CA fonctionne en se basant sur des temporisateurs. Une station qui souhaite émettre écoute le canal : si le médium est libre elle émet et attend l'accusé de réception et si le médium est occupé, elle attend un temps aléatoire appelé Back-off correspondant à un certain nombre de slots temporels puis tente de nouveau d'accéder au médium.

Les deux sens de dialogue (AP → STA et STA → AP) se déroulent sur la même bande de fréquence, il est donc organisé en half duplex. Chaque phase de dialogue est séparée par un espace entre trame (Frame Space) pendant lequel aucune transmission n'a lieu. Il existe trois types d'espace entre trames:

- SIFS (Short Inter-Frame Space): le plus petit des IFS, Il est utilisé entre les trames de la couche MAC au sein d'un même dialogue: données de la station émettrice et accusé de réception de la station réceptrice.
- PIFS (Point Coordination Function IFS): espace inter trame utilisé pour les trames PCF (cf. paragraphe suivant sur le PCF). Il permet un accès prioritaire de la station avec ce type de trames sur les stations du réseau. Sa valeur correspond à un SIFS plus un petit temps appelé slot.
- DIFS (Distributed Coordination Function IFS) temporisateur inter trame pour l'accès distribué utilisé par les stations pour accéder au support (en mode DCF).

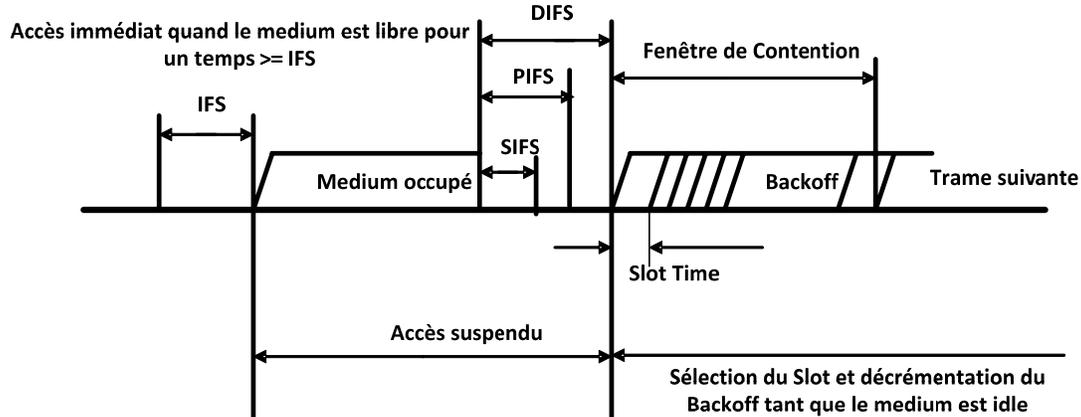


Figure 16- Fonctionnement du CSMA/CA

Problème du "Terminal Caché"

C'est un autre problème de la couche MAC sans fil: deux stations situées de chaque côté d'un point d'accès peuvent entendre toutes les deux une activité du point d'accès, mais pas de l'autre station, ce problème généralement lié aux distances ou à la présence d'un obstacle. Pour résoudre ce problème, le standard 802.11 définit sur la couche MAC un protocole optionnel de type RTS/CTS (Request To Send/Clear To Send). Lorsque cette fonction est utilisée, une station émettrice transmet un RTS comprenant l'adresse source, l'adresse destination et la durée

nécessaire pour sa transaction (i.e. la durée de transmission du paquet et la réception de son ACK), et attend que le point d'accès réponde par un CTS comprenant les mêmes informations. Toutes les stations du réseau peuvent entendre le point d'accès, aussi les informations contenues dans les RTS/CTS leur permettent de retarder toute transmission prévue, marquant un NAV (Network Allocation Vector) qui comprend la durée nécessaire pour une transaction. La station émettrice pouvant alors transmettre et recevoir son accusé de réception sans aucun risque de collision. Le protocole RTS/CTS rajoute de l'«overhead», il est généralement réservé aux plus gros paquets pour lesquels la probabilité de collision devient importante (cf. figure 17).

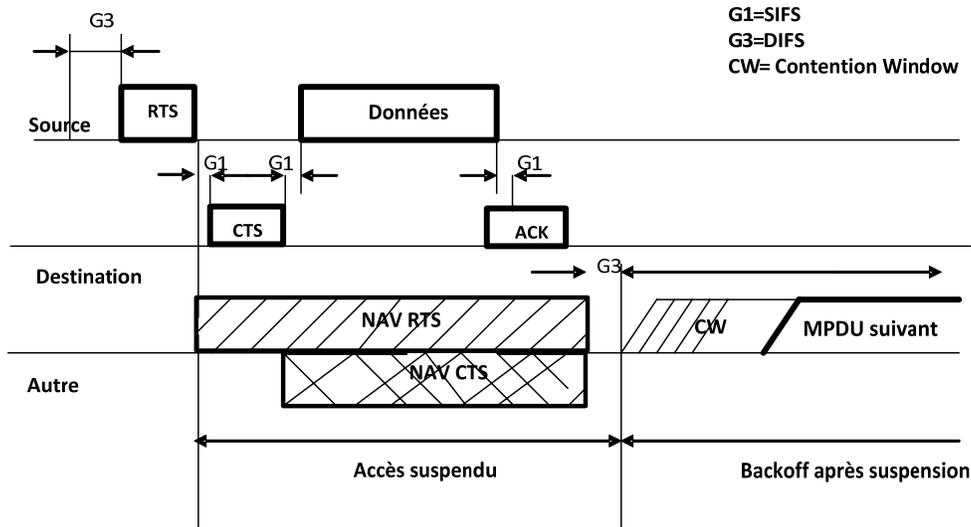


Figure 17– Protocole Request To Send/Clear To Send (RTS/CTS)

La couche MAC 802.11 offre aussi deux autres caractéristiques de robustesse: le calcul de contrôle (CRC- Cyclic Redundancy Check) et la Fragmentation des paquets. Pour chaque paquet, un CRC est calculé afin d'assurer que les données n'ont pas été corrompues durant leur transit. La Fragmentation quand à elle permet de diviser les gros paquets en unités de plus petite taille, ce qui s'avère particulièrement utile dans les environnements très congestionnés ou lorsque les interférences sont importantes.

2.2.3.4.2 PCF- Point Coordination Function

En plus de la fonction de base de coordination distribuée DCF, il y a la fonction PCF à coordination centralisée qui peut être utilisée pour implémenter des services temps réel, comme la transmission de voix ou de vidéo. Quand PCF est activé, le canal radio est divisé en super-trames. Chaque super-trame consiste en une période dite Contention-Free period- CFP pour le PCF et Contention Period- CP pour la DCF. Au début de la CFP, le coordinateur qui est généralement le point d'accès prend l'accès au médium, commence cycliquement à interroger les stations à haute priorité en leur envoyant des paquets Contention Free-Poll (CF-Poll) pour leur donner le droit d'envoyer un paquet. Donc l'AP est le coordinateur. Ceci permet une meilleure gestion de la qualité de service QoS- Quality of Service. Cependant, le PCF présente un certain nombre de limitations, par exemple il ne définit pas de classes de trafic.

2.2.3.5 Itinérance et réassociation

Périodiquement, le client explore tous les canaux 802.11 pour déterminer si un autre point d'accès est susceptible de lui offrir de performances supérieures. S'il détermine que c'est le cas, il se désassocie du premier point d'accès et s'associe au deuxième en se réglant sur le canal radio de celui-ci [15]; cette procédure est appelée «Réassociation» ou itinérance (en anglais «handover» ou «roaming»).

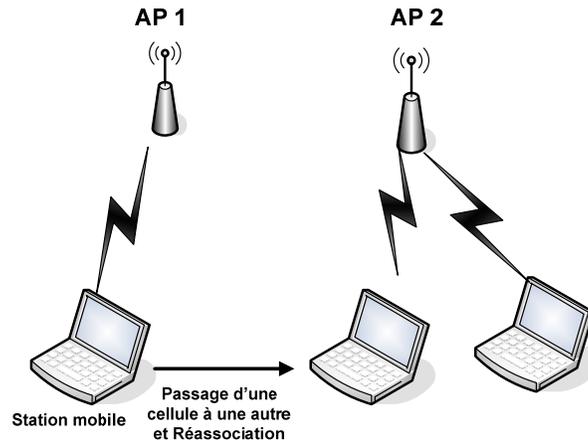


Figure 18– Itinérance entre les points d'accès

La plupart des algorithmes de handover sont principalement basés sur le rapport signal sur bruit (RSB) (les handover se produisent en général lorsque la station s'est éloignée du point d'accès original, entraînant par conséquent un affaiblissement du signal ou plus précisément du RSB). Ces algorithmes peuvent être divisés en trois catégories [18]:

- Première catégorie: elle est basée sur le RSB reçu du point d'accès seulement. Cette méthode décide le handover quand le RSB du point d'accès courant est plus petit qu'un autre point d'accès. Ce genre de méthode est simple mais peut causer un transfert répété ou inutile.
- Deuxième catégorie: elle est basée sur RSB relatif à un certain seuil (appelé en anglais « Cell Search Threshold»). Le transfert a lieu quand le RSB moyen tombe au-dessous d'une certaine valeur seuil et la station se mettra alors à chercher un autre point d'accès, dans le but de rester connectée au LAN. Cette méthode peut éviter le transfert inutile quand le signal courant de station est encore satisfaisant.

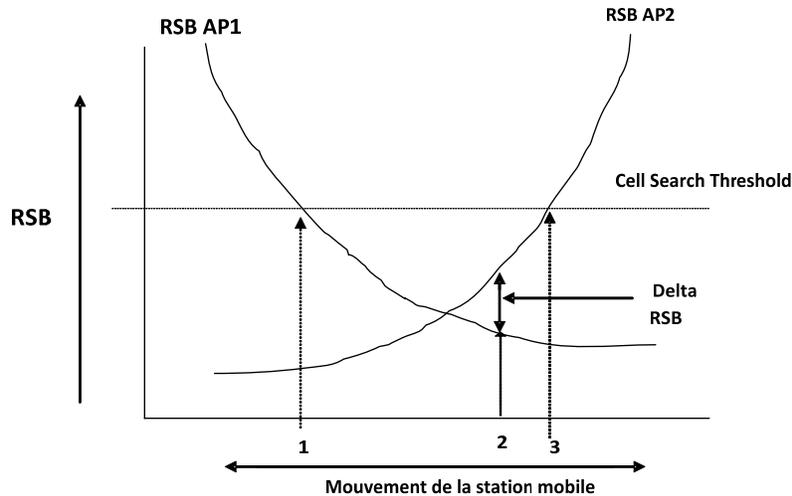


Figure 19– Itinérance et réassociation

Dans la figure 19, les RSB reçues de 2 APs sont montrées pour une certaine position de la station mobile. Quand la station s'éloigne de l'AP1, le RSB reçu de cet AP diminue ; en se rapprochant de l'AP2, le RSB commence à augmenter. Quand le RSB baisse au-dessous du «Cell Search Threshold», la station mobile rentre dans la procédure de recherche d'une cellule et commence par le scanning, cherchant seulement les canaux actifs (émettant une probe request toutes les 2 secondes). Quand la station s'éloigne davantage, le RSB de l'AP2 devient meilleur que celui de l'AP1. Une fois que la différence entre les deux RSB excède la valeur « Delta RSB », la commutation est faite (position 2). La station restera dans la procédure de recherche de cellule, jusqu'à ce que le RSB ait passé le «Cell Search Threshold» (position 3).

Une autre situation peut surgir, c'est quand une station s'éloigne de son point d'accès, tandis qu'il n'y a pas d'autre AP pouvant offrir un meilleur RSB (cf. figure 20) ; la station enverra des probe request mais ne recevra pas de réponse. Le RSB continue à diminuer jusqu'au seuil dit «Out of Range Threshold»; la station rentre alors dans l'état «Out of range» state et son débit diminuera.

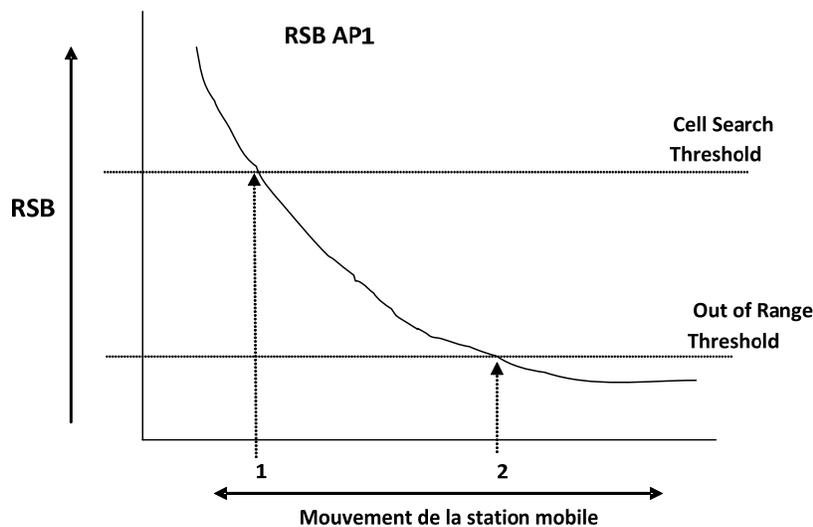


Figure 20– Handover avec un seul AP

- Troisième catégorie: elle est basée sur le RSB relatif avec un hystérésis. Le transfert est lancé seulement si le RSB du nouveau point d'accès est suffisamment plus fort que le point d'accès courant avec une marge d'hystérésis. Cette méthode peut empêcher l'effet «ping-pong», qui est le scénario du transfert répété entre deux points d'accès dû à des fluctuations rapides dans le RSB reçu des deux points d'accès.

Des procédures de réassociation pourront aussi être initiées dans le cas d'un trop fort niveau d'interférence qui pourra être détecté soit par le non réception des trames balises périodiques, soit par une absence répétée d'acquiescement. Si d'autres APs existent, la station mobile peut se réassocier à une nouvelle cellule. C'est une forme de distribution ou d'équilibrage de charge (load balancing), puisqu'elle répartie la charge totale du réseau sans fil sur l'infrastructure sans fil disponible.

Ce processus d'association/réassociation dynamique aux points d'accès permet à l'administrateur du réseau de créer une couverture très étendue, en faisant chevaucher de multiples cellules 802.11 sur l'ensemble d'un bâtiment ou d'un campus. Une réutilisation des canaux peut être adoptée, en prenant soin de configurer chaque point d'accès sur des canaux 802.11 différents de ceux utilisés par les points d'accès contigus car lorsque les rayons d'action de deux points d'accès se chevauchent alors qu'ils sont configurés sur un même canal ou sur des canaux se recouvrant partiellement, des interférences sont susceptibles de se produire entre les deux, avec pour conséquence une diminution de la bande passante sur la zone de chevauchement (cf. figure 21).

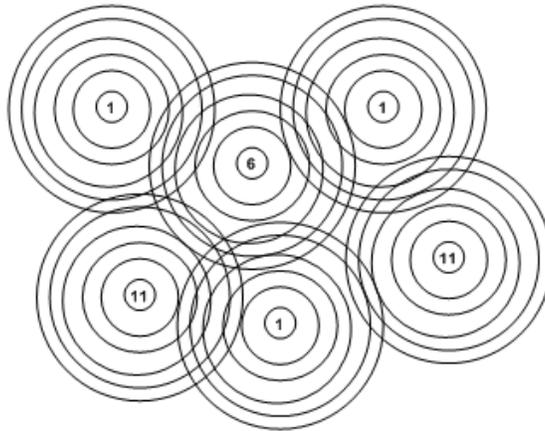


Figure 21– Chevauchement des rayons d'action des APs

2.2.3.6 Débit réel et débit théorique

La norme IEEE définit un débit de transmission allant jusqu'à 11Mbit/s pour le 802.11b, 54 Mbit/s pour le 802.11g et le 802.11a et des débits allant jusqu'à 270 Mbit/s ou 300 Mbit/s pour le 802.11n. Ces débits correspondent à la bande passante des données utilisateurs au niveau de la couche MAC (débit nominal à l'interface de la couche MAC). Cependant, la bande passante offerte à un utilisateur WiFi qui est la bande passante "réelle" ou "pratique", correspond au débit effectif en transmission (c'est-à-dire au débit utile à l'interface entre la couche PHY et l'interface air).

Le protocole mis en oeuvre au niveau de la couche PHY pour accéder au medium, le type de modulation utilisé, la taille des paquets transmis, le protocole utilisé au niveau de la couche MAC (CSMA/CA ou RTS/CTS) affectent la bande passante “théorique” [24]. Dans cet article, J. Jangeun et P. Peddabachagari ont considéré ces facteurs pour calculer la bande passante théorique maximale. Les résultats ont montré que le “débit théorique maximal” obtenu avec le CSMA/CA utilisé au niveau de la couche MAC est supérieur à celui obtenu avec le RTS/CTS (RTS/CTS implique un nombre élevé de trames de contrôle); par exemple pour un débit initial de 11Mbit/s, le débit théorique maximal est de 6.06 Mbit/s avec le CSMA/CA et de 4.52 Mbit/s avec RTS/CTS. D’autre part, les auteurs dans [24] définissent l’efficacité de la bande passante d’une modulation comme le ratio entre bande passante théorique maximale et le débit nominal à l’interface de la couche MAC. Cette efficacité est de l’ordre de 55 à 60 % pour les débits maximum de chaque modulation (11 Mbit/s pour la modulation CCK et 54 Mbit/s pour la modulation OFDM), elle atteint 90% pour les débits les plus faibles de chacune des modulations (1 Mbit/s et 6 Mbit/s).

Des études ont aussi montré que la bande passante maximale atteinte varie d’un modèle de points d’accès à un autre (d’un constructeur à un autre) [156].

A part les facteurs “théoriques” qui affectent la bande passante effectivement disponible, des études ont étudié l’impact d’autres facteurs, parmi lesquels on cite:

- La distance entre la station mobile et le point d’accès: on a logiquement un débit élevé quand la station mobile est proche de la station de base et son débit baisse quand elle s’éloigne d’elle [165].
- La mobilité des stations mobiles: peu d’études ont été faites sur la qualité du lien WLAN quand les noeuds sont en mouvement. Chen et Foreman n’ont pas remarqué une augmentation du taux de paquets perdus quand les noeuds sont en mouvement durant leur expérience faite en 1995 [147]. Hoene, Gunther et Wlisz [41], ont noté que la qualité moyenne du canal pouvait être supérieure quand les noeuds sont en mouvement (dans certaines conditions) par rapport à la situation où ils sont fixes. Des études ont été aussi faites sur l’impact de la mobilité à grande vitesse sur la qualité du lien WiFi ; une étude faite à l’Université de Californie pour des vitesses allant jusqu’à 240 km/h montre que dans un espace complètement ouvert, la communication est très robuste face à l’effet Doppler, par contre dans des scénarios de handover ainsi que dans un espace fermé (avec des obstacles, des trajets multiples, ...etc), la mobilité a un impact négatif sur la performance [42]).
- Le nombre d’utilisateurs affectent la disponibilité du lien WiFi. La bande passante est alors partagée entre les différents stations mobiles associés à un point d’accès [164].
- Les interférences et les obstacles: quand le canal est bruité, la bande passante maximale qui peut être atteinte est inférieure à celle atteinte avec un canal non bruité [131].
- L’orientation, le gain et la puissance d’émission des antennes des points d’accès [166].

Dans le chapitre 3 de ce mémoire, dans lequel on propose un nouveau protocole de communication adapté au type de trafic pour l’application considérée de ce mémoire sur un lien radio WiFi, on a mesuré la bande passante réelle avec le 802.11b aux alentours de 5 Mbit/s. Quand une transmission a lieu sur un canal adjacent interférent, elle est de l’ordre 3 Mbit/s.

Dans le paragraphe 3.7.1.2, on a aussi mesuré la bande passante quand la distance séparant l'émetteur et le récepteur augmente (pour une distance de 10 mètres, on a un débit environ de 4 Mbit/s) et quand un obstacle existe entre l'émetteur et le récepteur on a un débit aux alentours de 2Mbit/s. Il faut noter que ces tests sont faits sur du WiFi en mode ad-hoc.

Qualité de Service dans 802.11

Garantir une qualité de service veut dire garantir, pour une certaine communication, un certain débit, un délai limité, un taux d'erreur acceptable, ...etc. Les premières versions du standard 802.11 n'ont pas définis des mécanismes pouvant garantir une certaine qualité de service. Le mode PCF a été développé pour différencier les services dans le 802.11 mais sa performance reste limitée. Cependant, avec la large diffusion des réseaux sans fil 802.11, le besoin en qualité de service devient un enjeu pour les applications multimédias. C'est dans ce but que le standard 802.11e a été ratifié. Il doit permettre d'utiliser le WLAN pour des applications temps réel comme la voix et le multimédia.

802.11e propose des modifications de la couche MAC [45, 46]. Le mode DCF est maintenant nommé "EDCF (Enhanced DCF)" ou "HCF (Hybrid Coordination Function)", les stations mobiles "Enhanced Stations", le point d'accès qui est le coordinateur est nommé "HC (Hybrid Controller)" et le BSS "QBSS (QoS-supporting BSS)". D'autres protocoles et mécanismes ont été aussi proposés dans le même but comme le Distributed Fair Scheduling, Blackburst, Wireless Rether Protocol, Distributed Deficit Round Robin (DDRR), Persistent Factor DCF (P-DCF), Distributed Weighted Fair Queue (DWFQ), ... [47].

2.3 Géolocalisation – Techniques et systèmes

2.3.1 Généralités

La géolocalisation ou géopositionnement consiste à estimer la position géographique (coordonnées géographiques) d'un objet dans l'espace (sur le globe terrestre) ; plus localement, on appelle localisation ou positionnement la détermination de la position de l'objet dans l'environnement proche (par exemple : donner les coordonnées cartésiennes d'un objet dans un bâtiment). Les applications de géolocalisation/localisation sont diverses [30]: trouver un médecin dans un hôpital, surveiller le déplacement d'un véhicule, trouver un objet ou un matériel perdu, localiser des objets dans un entrepôt, localiser des personnes dans des endroits publics, ... Ce sujet intéresse beaucoup de sociétés et de chercheurs actuellement. Différents systèmes, méthodes et techniques de localisation ont été développés ; on en dresse un état de l'art succinct dans les paragraphes suivants.

2.3.2 Méthodes et Techniques de Géolocalisation

Les systèmes de géolocalisation/localisation (par la suite on dira seulement localisation) sont multiples, utilisant des méthodes et des techniques différentes (on désigne par «système», le nom donné par un constructeur ou un projet à une solution de localisation). Cette localisation peut s'appuyer par exemple sur les:

- Systèmes satellites : par exemple GPS, Galileo, Glonass, Compass, ...
- Systèmes WiFi 802.11 : Ekahau, Magic Map, etc. On les appelle WPS pour WiFi Positioning Systems

- Technologies sans fil courte distance : Bluetooth, Infrarouge, Zigbee, UWB, ...
- Systèmes de communications cellulaires : positionnement d'un téléphone portable via la connaissance des cellules GSM ou UMTS. Système Ootay, GlobalMPS, ...
- Internet : se basant sur l'adresse IP et sur une base de données de répartition de ces adresses
- Signaux de télévision (TV) : système ROSUM

Ces systèmes diffèrent par leur utilisation et les informations de positionnement qu'ils fournissent: certains fonctionnent en zone extérieure (les systèmes de localisation par Satellite), d'autres peuvent aussi fonctionner en zone intérieure (WPS) ; certains peuvent déterminer la position de l'objet en deux dimensions (2D), d'autres en trois dimensions (3D)...etc. Ils diffèrent aussi par les méthodes et les techniques de positionnement qu'ils utilisent.

Les méthodes de géolocalisation peuvent être divisées en trois catégories:

- Méthodes géométriques : utilisant les théorèmes géométriques sur les relations dans les triangles en particulier,
- Méthodes statistiques : méthode d'empreinte radio (radio fingerprinting) par exemple,
- Méthodes hybrides : utilisant une combinaison de méthodes géométriques et statistiques [31].

Parmi les principaux paramètres mesurés par les méthodes de localisation, on peut citer :

- Temps d'arrivée ou ToA - Time of Arrival
- Différence de temps d'arrivée ou TDoA - Time Difference of Arrival
- Angle d'arrivée ou AoA - Angle of Arrival
- Puissance (ou indicateur de puissance) du signal reçu ou RSS- Received Signal Strength.

Généralement dans un système de localisation, on dispose de points de référence (PR) et d'un objet souvent mobile (OM) dont on cherche à déterminer la position par rapport aux PR. Les algorithmes de positionnement et les calculs se font soit au niveau des PR soit dans les OM.

2.3.2.1 Méthodes géométriques

Ce sont les méthodes qui se basent sur les théorèmes géométriques pour le calcul des distances et/ou des angles [81].

Trilatération

Cette méthode permet de positionner un OM en 2D à l'aide de trois PR. Elle consiste à mesurer les distances (en utilisant l'une des techniques de mesure de distance détaillées dans le paragraphe 2.3.3), qui séparent le point à positionner des PR. On trace ensuite un cercle autour de chaque PR dont le rayon est égal à la distance mesurée entre le PR et l'OM. La position de l'OM se situe à l'intersection de ces trois cercles.

Triangulation

Dans cette méthode, deux PR de coordonnées connues forment avec l'OM un triangle. On utilise ensuite les propriétés géométriques des triangles pour calculer la position de l'OM : la loi des sinus, le théorème d'Al Kashi, le théorème de Pythagore, ...etc. Cette méthode utilise donc moins de PR que la méthode de trilatération mais nécessite la connaissance de plus d'informations liant les trois noeuds. Il est nécessaire de connaître les angles du triangle formé par les trois noeuds et la distance entre les points de référence.

La triangulation est divisée en sous-catégories de latération et d'angulation [33]. La latération est le terme employé pour des mesures de distance. Elle consiste à calculer la position d'un objet en mesurant sa distance aux PR. Un calcul de position en 2D exige des mesures de distance de 3 PR non colinéaires; pour des mesures en 3D, 4 PR non coplanaires sont requis.

L'angulation est employée pour des mesures d'angle. Une localisation d'angle en 2D exige généralement deux mesures d'angle et une mesure de longueur telle que la distance entre les PR ; en 3D, une mesure de longueur, une mesure d'azimut, et deux mesures d'angle sont nécessaires [85].

2.3.2.2 Méthodes Statistiques

Ce sont les méthodes qui consistent à effectuer des mesures « références » puis à comparer les mesures réalisées pour l'OM avec ces mesures de références pour en déduire la position de l'OM. Ces approches comprennent donc deux étapes : une étape de calibrage ou d'apprentissage et l'étape d'estimation de la position. Une des méthodes les plus efficaces est la méthode d'empreinte radio (en anglais RF fingerprinting), qui se base sur les mesures des puissances reçues (RSSI pour Received Signal Strength Indicator) par l'OM à partir de balises radios (comme les points d'accès WiFi par exemple).

Empreinte radio

La méthode d'empreinte radio se fait en deux phases : «Formation» (calibrage ou apprentissage) et «Positionnement» (localisation) (appelées en anglais «Training» et «Positioning» ou encore «Off-line training phase » et «Real-time or Online location determination phase»).

Durant la phase de formation, des mesures de RSS sont prises : des balises radios sont installées sur le site désiré, des points échantillons (des positions sur le site) sont choisis et les RSS mesurés et sauvegardés dans une base de données.

Pendant la phase de positionnement, la position de l'OM est déterminée en comparant les RSS mesurés par l'OM avec les RSS sauvegardés dans la base de données (appelée carte radio ou map). Plus le nombre de balises radios augmente, plus la précision s'améliore [32] ; plusieurs mesures successives de puissance doivent être réalisées pour une meilleure évaluation de la position, les ondes radios étant affectées par plusieurs facteurs.

Les besoins de calibrage et de mise à jour de la base de données sont les inconvénients de cette approche. (Nous détaillons cette méthode d'empreinte radio et les algorithmes utilisés pour le calcul de position dans le chapitre 4).

2.3.2.3 Méthodes Hybrides

Des méthodes hybrides ont été proposées. Elles comportent deux étapes : dans la première étape, elles utilisent la méthode d'empreinte radio avec une phase rapide de formation (ceci indique qu'on a peu de PR et que la base de données est très petite) pour obtenir une première évaluation de positionnement (indiquant par exemple dans quelle pièce du bâtiment se trouve l'OM), et dans la deuxième étape, un modèle empirique précis de la propagation du signal sera utilisé pour calculer la distance exacte entre émetteur et récepteur ; la triangulation pourra alors être utilisée pour calculer la position de l'OM plus précisément [31].

2.3.3 Techniques de mesure

Les distances et les angles dans les méthodes de positionnement déjà citées sont mesurés selon plusieurs techniques de mesure ; on peut citer : temps d'arrivée, différence de temps d'arrivée, angle d'arrivée et puissance du signal reçu (RSS- Received Signal Strength).

Temps d'Arrivée (ou ToA pour Time of Arrival)

Cette technique se base sur le temps de propagation du signal. La source envoie un signal daté au récepteur qui date à son tour son heure d'arrivée. Un système de géolocalisation va alors se baser sur ces informations pour en déduire la distance émetteur-récepteur en supposant le plus souvent que la propagation se fait en ligne directe. Une synchronisation complète entre l'émetteur et le récepteur est nécessaire pour des calculs précis.

Différentiel de temps d'arrivée (ou TDoA pour Time Difference of Arrival)

Le principe est similaire au ToA, mais en utilisant une source quelconque qui ne date pas son émission. Le signal est alors reçu par les récepteurs et le système de géolocalisation détermine la position de la source en fonction de la différence des temps d'arrivée sur les récepteurs. Cette technologie exige de même une horloge très précise et très bien synchronisée au niveau des récepteurs.

Cette solution est bien adaptée dans les environnements ouverts où le signal se propage en ligne directe (on utilise le term LOS line of Sight). Comme l'approche TOA, elle peut connaître des limites en intérieur à cause des obstacles et des effets de réflexion, réfraction ou diffusion.

Angle d'arrivée (ou AoA pour Angle of Arrival)

Utilisée par les radars aériens, cette technique consiste à calculer l'angle de réception d'un signal par 2 ou 3 radars, et, en utilisant cette information, positionner l'objet dans l'espace. Elle est très précise, mais demande des antennes motorisées (ou à balayage électronique) pour déterminer l'angle de réception.

Puissance du signal reçu (ou RSSI pour Received Signal Strength Indicator)

La position de l'OM est déterminée d'après la puissance du signal reçu de la part de balises radios (comme des points d'accès WiFi par exemple). Elle exploite l'atténuation du signal due à la distance. Mais la façon dont la puissance varie en fonction de la distance dépend du milieu et n'est pas toujours connue avec précision. De plus, la propagation des ondes électromagnétiques est affectée par plusieurs facteurs comme les pertes dues aux obstacles,

l'effet des trajets multiples, les interférences générées par d'autres signaux, etc. Dans la bande de fréquence de 2.4 gigahertz de WiFi par exemple, les sources d'interférences possibles sont nombreuses car il s'agit d'une bande de fréquences libre utilisée par de nombreux systèmes (four à micro-ondes, les dispositifs Bluetooth par exemple). L'orientation de l'antenne du récepteur, le mouvement et le déplacement de l'OM peuvent aussi affecter le RSS d'une manière significative. Cette technique suppose que le modèle d'atténuation des lieux (obstacles, murs...) soit bien connu, ou appris par calibration bien qu'il soit extrêmement difficile d'établir un modèle général suffisamment bon de la propagation du signal qui coïncide avec la situation réelle.

2.3.4 Systèmes de localisation

Dans cette section nous apportons quelques précisions sur les systèmes de géolocalisation cités dans le paragraphe 2.3.2 et qui utilisent les différentes méthodes et techniques de positionnement, en essayant de donner les avantages et les inconvénients de chacun d'eux.

2.3.4.1 Localisation par Satellite

Global Positioning System (GPS)

Le système GPS [91] qui peut être traduit en français par « système de positionnement mondial » ou encore selon l'acronyme GPS par « géopositionnement par satellite », est un système d'origine américaine qui se base sur la méthode de trilatération et sur le temps de propagation du signal pour déterminer la position en 3D d'un objet sur le globe.

Il se compose de trois parties distinctes appelées segments : le segment spatial constitué actuellement d'une constellation de 31 satellites, évoluant sur 6 plans orbitaux quasi circulaires, le segment de contrôle qui permet de surveiller et de contrôler en permanence le bon fonctionnement du système est composé de cinq stations au sol dépendant exclusivement des USA et dont la station (MCS pour Master Control Station) est implantée à Colorado Springs, et le segment utilisateur qui regroupe l'ensemble des récepteurs GPS qui reçoivent et exploitent les informations des satellites.

Le principe de localisation est en lui même très simple. En effet, si on imagine de vouloir localiser un point M, de la surface du globe terrestre, il suffit d'entrer en contact avec 3 satellites (4 si on veut un positionnement en 3D). Chaque satellite envoie son numéro d'identification, sa position précise par rapport à la terre, ou dans le repère lié à Greenwich, l'heure exacte d'émission du signal ; le récepteur GPS recevant le signal, grâce à son horloge supposée synchronisée sur celle des satellites, en déduit sa distance au satellite. Le GPS travaille en 3D et le principe de calcul s'appuie sur l'intersection de sphères : le point M est sur une sphère de rayon D1 et de centre le satellite S1, l'intersection avec le globe donne un premier cercle C1 ; Le point M est aussi sur une sphère de rayon D2 et de centre le satellite S2 et sur une sphère de rayon D3 et de centre le satellite S3 ; l'intersection de ces sphères avec le globe donne deux autres cercles C2 et C3 ; le point M se trouve alors à l'intersection de ces trois cercles.

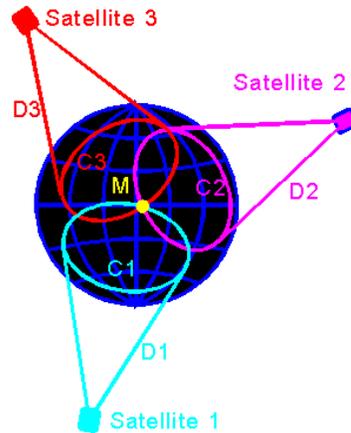


Figure 22- Principe de localisation GPS

La précision fournie par le GPS civil est estimée aux alentours de 15 mètres dans 95% des cas pour un fonctionnement de type « temps réel ». Il est cependant difficile de donner des chiffres de précision sans préciser les conditions et méthodes de mesure (en particulier la durée de ces mesures). Cette précision dépend de plus la visibilité des satellites par le récepteur et de la qualité de l'antenne utilisée. Le GPS est l'un des systèmes de positionnement les plus populaires en milieu extérieur ; cependant, il n'est pas approprié à certains environnements spécifiques, tels qu'à l'intérieur des bâtiments ou dans certains environnements urbains denses (on parle de « canyons » urbains parfois).

DGPS

Differential Global Positioning System ou GPS différentiel permet d'améliorer la précision du GPS en réduisant la marge d'erreur du système. Il est basé sur un ensemble de stations fixes à la surface de la terre, dont la position est connue très précisément ; celles-ci reçoivent les signaux des mêmes satellites que les terminaux mobiles présents dans leur zone d'action, et estiment en permanence l'erreur locale de positionnement du GPS en comparant la position calculée avec leur position réelle. Cette information est transmise par radio ou par satellite au récepteur GPS afin de lui permettre de corriger une grande partie des erreurs de mesure, qu'elles soient liées au satellite (horloge), aux conditions de propagation (effets troposphériques, etc.) ou à des fluctuations volontaires du signal émis. On peut ainsi passer d'une précision de l'ordre de 15 mètres à une précision de 5 à 3 mètres.

GLONASS

Système GLObal de NAvigation par Satellite est le nom du système de positionnement utilisé par la Russie. Il repose aussi sur une constellation de 24 satellites mis dans 3 plans orbitaux (8 satellites pour chaque plan orbital), dont, depuis 2008, 16 satellites sont actifs et en orbite. L'Agence spatiale fédérale russe (Roskosmos) prévoit la fin du déploiement des 24 satellites couvrant le monde entier vers la fin 2009. La partie au sol est formée de cinq stations de contrôle, la principale se trouve dans la région de Moscou [75].

Les utilisateurs du système, comme pour le GPS, doivent disposer d'appareils de positionnement équipés de récepteurs spécifiques.

Comme le GPS GLONASS ne peut pas être utilisé à l'intérieur des bâtiments, la puissance des ondes radios reçues des satellites étant trop atténuée par les murs.

EGNOS

EGNOS ou European Geostationary Navigation Overlay Service est le premier système européen utilisant les ondes des satellites et qui a pour but d'améliorer la précision des deux systèmes GPS et GLONASS. Il utilise les constellations de satellites GPS et GLONASS et s'appuie sur une quarantaine de stations terrestres. Ces stations terrestres. Elles constituent un maillage serré qui complète très utilement la triangulation obtenue à partir des satellites du GPS. Elles reçoivent les signaux des constellations de satellites et différentes données climatologiques. Elles communiquent avec des centres de contrôle qui exploitent les informations reçues et transmettent le résultat des corrections différentielles à un satellite géostationnaire ((INMARSAT-3 AOR-E, INMARSAT-3 IOR ou ESA ARTEMIS). Ces satellites géostationnaires peuvent ensuite les communiquer aux récepteurs des utilisateurs. Une précision de 20 m obtenue avec le GPS peut passer à une précision de 2 mètres avec EGNOS, avec des signaux fiables. Il est prévu que ce système soit complètement déployé à la fin de 2009 [75].

Galileo

Le système EGNOS préfigure Galileo. Galileo a pour but de supprimer la dépendance de l'Europe du système américain GPS. Il s'appuie sur une constellation de 30 satellites en orbite moyenne. Il est prévu que dans quelques années (implémentation prévue en 2014-2015) Galileo fournira une bonne précision de positionnement et différents types de qualité de service [27, 74, 75].

2.3.4.2 WiFi Positioning System (WPS)

Le GPS utilise une combinaison de satellites pour déterminer les coordonnées de la position d'un objet. Bien que sa couverture de la surface du globe terrestre soit très bonne, il ne peut pas être utilisé correctement dans les milieux intérieurs car les signaux satellites ne sont pas toujours assez puissants pour pénétrer dans ces zones (on parle de localisation indoor ou outdoor pour la localisation à l'intérieur des bâtiments ou à l'extérieur des bâtiments) ; d'autre part, le déploiement d'infrastructures spécifiques dédiées à la localisation indoor peut avoir un coût important pour une utilisation limitée. Il est donc utile de concevoir un système de positionnement qui peut utiliser les infrastructures existantes (utilisée pour la communication ou pour d'autres buts) et qui soit utilisable en indoor et en outdoor pour permettre une continuité de service. Les systèmes de positionnement utilisant les ondes radio WiFi ont été proposés dans ce but et deviennent de plus en plus répandus.

Le géopositionnement à l'aide de la technologie Wi-Fi est baptisé WPS pour Wi-Fi Positionning System. En comparaison avec le GPS, le WPS remplace l'infrastructure des satellites par les infrastructures radios des réseaux Wi-Fi et dispose de plusieurs atouts :

- Sa couverture intérieure et extérieure, lui permettant, au contraire du GPS, de continuer à fournir un géo-positionnement relativement précis en indoor et dans certaines zones urbaines denses avec des effets de canyon urbain. La technologie donne même les meilleurs résultats dans un environnement particulièrement dense, en raison de la multiplication des points d'accès.
- Il n'implique pas de matériel supplémentaire, l'équipement Wi-Fi étant déjà présent au sein des différents appareils de communication.

Il présente cependant des inconvénients :

- WPS pose un problème de couverture en environnement rural ou dans des zones peu équipées en points d'accès Wi-Fi.
- Les points d'accès WiFi sont des récepteurs plus mobiles que les infrastructures GPS, ce qui peut fausser les calculs si les bases de données ne sont pas mises à jour régulièrement.

D'après le paragraphe 2.3.2, plusieurs techniques de mesure (ToA, TDoA, AoA, RSS) existent pour le calcul des distances et des angles dans les systèmes de géolocalisation utilisant les ondes radio. Cependant, la méthode ToA est peu envisageable pour du WiFi car les points d'accès ne sont pas synchronisés avec les récepteurs ; de même dans la TDoA, les points d'accès radio doivent avoir une horloge très précise et bien synchronisée. Des systèmes comme « AirLocation » [76] et « AeroScout » [77] utilisent cette technique TDOA mais nécessitent du matériel supplémentaire (des points d'accès ou des récepteurs spécifiques) pour mesurer cette différence de temps. La technique AoA demande des antennes motorisées (ou à balayage) pour déterminer l'angle de réception et est peu utilisée actuellement avec les antennes des points d'accès WiFi mais l'arrivée des systèmes MIMO WiFi pourrait modifier cette situation. La technique basée sur le RSS est la plus souvent utilisée en WiFi, elle suppose cependant que le modèle d'atténuation des lieux (obstacles, murs...) soit bien connu, ou appris par calibration.

Plusieurs systèmes utilisant le WPS sont disponibles sur le marché ou dans les laboratoires de recherche. On peut citer :

Skyhook Wireless

Ce système de la société Skyhook se base sur la triangulation. Un calcul de position nécessite l'activation d'un logiciel client sur le terminal mobile qui balaie les ondes hertziennes à la recherche des signaux 802.11 [28]. Une fois ces informations obtenues, il recoupe les différents signaux et calcule la distance actuelle à partir des différentes données géographiques stockées dans une base de données. Sur le client tourne un algorithme qui calcule la position temps-réel ainsi que la vitesse. Le client inclut également des techniques avancées de filtrage et d'optimization de la base de données pour améliorer continuellement le système. Le positionnement offert présente une précision comprise entre vingt et quarante mètres.

La base de données de lieux contient une des listes les plus complètes des points d'accès Wi-Fi géopositionnés pour l'Amérique du Nord. Elle est continuellement mise à jour avec de nouvelles régions des Etats-Unis et du Canada et avec de nouvelles données des zones de couverture existantes. La collecte de données commence par identifier des secteurs géographiques cibles en utilisant l'analyse de population. Les planificateurs de territoire de Skyhook réalisent l'inventaire des points d'accès existants dans les centres publics ainsi que dans les secteurs résidentiels et

suburbains. Skyhook emploie des véhicules de collecte de données pour mener une enquête complète sur les points d'accès dans les régions cibles. Chaque région est continuellement surveillée pour évaluer la qualité du réseau référence et pour déterminer si une mise à jour est nécessaire.

Système Ekahau Real Time Location System (RTLS)

La technique de positionnement proposée par la société Ekahau est basée sur la technique d'empreinte radio, basée sur les mesures des puissances des signaux reçus (RSSI) (cf. paragraphe 2.3.2.2) et comporte deux phases de formation et de positionnement. Ce système consiste en :

- des clients agents : logiciel intégrés dans un objet tel qu'un smartphone à positionner,
- des étiquettes Ekahau portées par les dispositifs à localiser (optionnelles),
- le serveur de positionnement (EPE pour Ekahau Positioning Engine) qui calcule les estimations de position,
- le logiciel de création du modèle radio (Ekahau Manager) pour la construction de la carte radio (le calibrage du site) et la gestion du système.

Le client agent mesure les RSSI reçus des différents points d'accès et envoie ces mesures au serveur de positionnement qui calcule la position de l'objet abritant le client agent, en comparant les mesures transmises par le client aux mesures « références » présentes dans la base de données. Les algorithmes utilisés par Ekahau pour la localisation sont décrits dans le chapitre 4 de ce mémoire).

Plusieurs systèmes assez proches de celui d'Ekahau existent comme Horus de l'université du Maryland [34], CMU-TMI [78, 146], Place Lab [114], Magic Map [35], AMULET (Approximate Mobile User Location Tracking System) de l'université de Rochester [79, 80], Halibut [79, 80] de l'université de Stanford, le système de la société Cisco (solution Cisco nified wireless) [115].

Le temps de calibrage (qui est actuellement effectué manuellement en utilisant un terminal mobile et en se déplaçant dans le site pour enregistrer des points échantillons) ainsi que la mise à jour régulière de la base de données constituent l'inconvénient majeur de ces systèmes. Par exemple, pour calibrer un site de 1200 m², il faut au minimum 1 heure pour le système Ekahau [40].

2.3.4.3 Systèmes de localisation par ondes radiofréquences ou infrarouges

On parle dans cette section de quelques autres systèmes de localisation utilisant les ondes radiofréquences, les systèmes ultra-large bande (Ultra Wideband ou UWB), les infrarouges, ... [86].

RADAR

Proposé par P. Bahl et V. Padmanabhan en 2000, RADAR fût le premier système à adopter la méthode d'empreinte radio à deux phases de calibrage et de positionnement utilisant les ondes radiofréquences émises à partir d'interfaces réseaux radiofréquences (WiFi entre

autres mais pas exclusivement) [38]. La précision de localisation obtenue était aux alentours de 2 à 3 mètres.

Active Badge

Ce système utilise les ondes infrarouges (IR). Une étiquette portée par une personne émet un signal IR toutes les 10 secondes. Des capteurs placés dans des endroits spécifiques du site captent ces signaux et les envoient à un logiciel de localisation qui estime la position de l'étiquette [157].

Cricket

Le système conçu par le MIT utilise une combinaison des ondes RF (Radio fréquence) et des ondes ultrasons. Des balises « Cricket beacons » présentes dans le site envoient des ondes RF et ultrasonores aux récepteurs « Cricket listeners » attachés aux OM. L'UOM estime sa position en tenant compte de la différence entre le temps de propagation des ondes RF et des ondes ultrasonores [39].

Ubisense

Le système Ubisense utilise la technologie UWB. Des étiquettes « Ubisense tags » sont portés par l'OM et des capteurs « Ubisense sensors » sont placés sur le site. Les tags envoient des signaux UWB impulsionnels de très courte durée qui sont captés par les capteurs et communiqués à un logiciel spécifique qui estime la position de l'OM. Le site est divisé en cellules de forme rectangulaire ayant chacune ses capteurs.

Uhuru

Dans ce système, le calcul de positionnement se fait au niveau des OM. La méthode statistique est utilisée avec les deux phases de formation et de positionnement, mais c'est l'OM qui enregistre les différents signaux des stations de base avec leurs adresses MAC et fait le calcul pour estimer sa position [37].

2.3.4.4 Systèmes de localisation utilisant la diffusion des signaux de télévision

Système de la société ROSUM corporation

Ce système se base sur les équipements de diffusion des signaux de télévision notamment sur les réseaux de télévision numérique ATSC DTV et DVB-H. Ces signaux sont relativement basse fréquence et souffrent peu des effets de la propagation ionosphérique et de l'effet Doppler [36]. ROSUM a été testé dans des milieux intérieurs et a montré une bonne précision. Cependant la performance dépend toujours des signaux de télévision et de leur couverture, des niveaux d'atténuation et des effets de multi-trajets dans le milieu considéré.

2.3.4.5 Systèmes de localisation utilisant les systèmes de communications cellulaires

Ces systèmes sont aussi appelés systèmes de positionnement mobile (MPS pour Mobile Positioning System); ils consistent à déterminer la position d'un téléphone mobile. Un tel

service est offert comme une option de la classe de services géolocalisés (Location Based Services (LBS)) des opérateurs de téléphones mobiles. Cette technologie est basée sur les mesures de puissance et les diagrammes d'antennes et utilise le concept d'un téléphone portable sans fil qui communique toujours avec l'une des stations de base (BS pour Base Station) servant une cellule du système [154]. Donc connaissant avec quelle station de base le téléphone portable est en train de communiquer, le système peut estimer sa position. Dans les zones rurales cette estimation n'est pas très précise vu la grande taille des cellules ; cependant pour des localisations plus précises, les techniques comme la mesure d'angle d'arrivée ou de temps d'arrivée sont aussi utilisées ainsi qu'une combinaison de MPS et de GPS. Un exemple de ces systèmes est le 4TS dSeal lancé en 2008 par un fournisseur de solutions de positionnement finlandais, appelé 4TS Finland Oy [83] utilisant une combinaison de GPS et de MPS (appelé GlobalMPS par la société 4TS) ; il permet un positionnement des dispositifs mobiles indépendant de l'opérateur, partout où un réseau GSM est disponible (donc aussi à l'intérieur des bâtiments).

Le système Ootay [82] est un système MPS. L'utilisateur d'Ootay peut se connecter sur l'Internet et visualiser, en temps réel, la position d'un téléphone portable ; cette position lui est communiquée après estimation, à travers l'Internet, par l'opérateur mobile GSM.

2.4 Conclusion

La première partie de ce chapitre a été consacrée à l'étude et à la comparaison de différentes technologies de communication sans fil courte distance : Zigbee, Bluetooth et WiFi. Le choix d'une technologie pouvant être adaptée au principe de fonctionnement du système RAMPE/INFOMOVILLE dépend de plusieurs facteurs : la disponibilité de cette technologie dans les dispositifs mobiles pouvant être portés par les utilisateurs du système et dans les équipements de l'application, sa portée devant s'étendre sur plusieurs mètres afin de permettre la communication entre le dispositif de l'utilisateur et le dispositif installé dans les stations de transport (bus dans le cas actuel de RAMPE/INFOMOVILLE), la possibilité de l'utiliser pour une future intégration de services (services temps réel, service de localisation, ...etc). La technologie WiFi s'avère la plus satisfaisante du point de vue des aspects suivants : grande disponibilité des cartes WiFi dans les PCs portables, les ordinateurs de poche (PDA), les téléphones mobiles (à la différence de Zigbee qui est peu utilisé dans les téléphones ou PDA pour le moment), grande portée pouvant aller jusqu'à des dizaines de mètres (supérieure à celle de Bluetooth), la possibilité de son utilisation pour des services temps réel comme la voix et la vidéo (802.11e pour la qualité de service), sa grande utilisation actuelle dans les systèmes de localisation et de positionnement...

Ce dernier point a occupé la deuxième partie de ce chapitre avec un état de l'art des différents systèmes, techniques et méthodes de positionnement actuellement développés et implémentés : systèmes de localisation par ondes satellitaires, ondes cellulaires, ondes radiofréquences, ondes radio WiFi, signaux de télévision, ...etc. On cherche dans cette thèse un système de positionnement bien adapté au service qu'on désire offrir et intégrer avec RAMPE/INFOMOVILLE, qui est la localisation d'une personne aveugle et son orientation vers la station ou la destination désirée. Les systèmes de positionnement par satellites sont largement déployés et assurent une très bonne couverture internationale mais ils présentent des limitations quand ils sont utilisés en indoor et la précision qu'ils offrent est limitée sur dans certains environnements urbains (rue étroite bordée d'immeubles élevés par exemple). Il est intéressant pour notre application de pouvoir utiliser l'infrastructure existante pour intégrer le service de guidage. D'autre part, nous souhaitons pouvoir utiliser la localisation en outdoor et en indoor du

fait que le système RAMPE/INFOMOVILLE devrait pouvoir être étendu à tous les moyens de transport public (METRO, RER, ...etc) et qu'il est important de d'assurer une continuité de service ; une bonne précision est aussi un critère à considérer pour le système retenu, étant donné qu'il est destiné à des piétons aveugles.

De ce fait, la localisation basée sur les systèmes WiFi s'avère être intéressante et adéquate pour notre application. Les systèmes WPS présentent aussi des inconvénients déjà discutés dans le paragraphe précédent auxquels on a essayé de remédier dans cette thèse. Les solutions proposées sont présentées dans le chapitre 4.

Chapitre 3

RAMPE/INFOMOVILLE Application Protocol

3.1 Introduction et objectifs

L'objectif du projet RAMPE/INFOMOVILLE est de fournir un système d'assistance aux personnes à déficience visuelle pour leurs déplacements dans les transports publics. La conception d'un système utilisant les technologies de communication les plus récentes doit mettre l'utilisateur final au centre des préoccupations afin de lui fournir un service de qualité. On étudie dans ce chapitre la qualité de service du système RAMPE/INFOMOVILLE de point de vue technique. Cette qualité se définit par la disponibilité du service et sa fiabilité. RAMPE/INFOMOVILLE s'appuie sur deux technologies: les PDA et WiFi. Le PDA sur lequel tourne l'application RAMPE/INFOMOVILLE communique avec les bornes installées dans les stations à travers le réseau WiFi; il constitue donc une ressource entièrement dédiée à ce système à l'inverse du réseau WiFi qui est partagé entre plusieurs utilisateurs. Etudier la fiabilité et la disponibilité de RAMPE/INFOMOVILLE revient alors à étudier les performances de cette technologie de communication sans fil.

Un réseau est considéré comme fiable s'il permet au récepteur de recevoir les informations telles qu'elles ont été transmises. Différents protocoles, opérant à travers l'interface WiFi sont utilisés pour la communication entre les différents composants de RAMPE/INFOMOVILLE. Etudier la fiabilité du service consiste alors à étudier la fiabilité de ces protocoles.

On détaille dans ce chapitre les différents protocoles utilisés dans RAMPE/INFOMOVILLE. Les trames échangées entre le PDA et la borne sont de plusieurs types; certaines sont échangées en utilisant le protocole TCP, en transmission unicast, qui est supposé être fiable, car c'est un protocole orienté connexion de la couche de transport du modèle OSI. D'autres trames utilisent le protocole UDP qui est un protocole non orienté connexion; il est utilisé en mode broadcast pour la transmission des trames et messages urgents. Plusieurs techniques ont été proposées dans le but d'améliorer la fiabilité d'une transmission UDP sur WiFi spécifiquement la transmission en mode broadcast.

On propose dans ce chapitre un nouveau protocole dans le contexte de ce type d'application [12] qui pourra être approprié au type de trafic que l'on rencontre dans RAMPE/INFOMOVILLE. Cette proposition aura un double intérêt: le premier sera l'étude d'un protocole qui fiabilisera la communication entre PDA et point d'accès pour la transmission en broadcast des messages temps réels, et le deuxième est ergonomique: étudier la possibilité de fournir à l'utilisateur du système un indicateur de qualité de la liaison qui le relie au point d'accès et par suite un degré de confiance en l'application. On détaille le principe du protocole proposé, on simule son fonctionnement et on le compare au protocole utilisé dans la version actuelle de RAMPE/INFOMOVILLE.

3.2 Indicateur de qualité d'un lien WiFi

Plusieurs facteurs affectent la qualité du lien WiFi et par suite celle d'une communication à travers ce lien. Etudier les performances d'une communication radio revient à étudier la fiabilité du lien radio à travers lequel cette communication entre les différentes entités est établie. Ce lien d'ondes électromagnétiques est susceptible aux erreurs, vulnérable aux perturbations surtout lorsque des obstacles existent entre l'émetteur et le récepteur: réflexion, réfraction, diffraction, plusieurs chemins parallèles décalés dans le temps, absorptions, (phénomènes d'affaiblissement du signal et d'évanouissement rapide du signal), etc ... ; les ondes radios sont aussi affectées par les bruits et les interférences de la part d'autres réseaux électromagnétiques à proximité, la mobilité des utilisateurs, ...etc (cf. chapitre 2), etc... La fiabilité est aussi affectée par sa disponibilité: un manque de ressources ou un taux d'occupation élevé induiront des collisions et des pertes de paquets de données ce qui affectera la fiabilité de la communication; dans tous les cas, c'est la bande passante disponible vu de l'utilisateur qui est affectée ce qui affectera par la suite la qualité de la communication.

La qualité du lien Wifi peut être mesurée selon plusieurs métriques: Puissance Reçue (RSSI pour Received Signal Strength Indicator), Rapport Signal sur Bruit (RSB) (SNR pour Signal to Noise Ratio), Rapport Signal sur Interférences plus Bruit (SINR pour Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio), Taux d'Erreurs Paquet (PER pour Packet-Error Rate), Taux de Livraison Paquet (PDR pour Packet-Delivery Ratio) et Taux d'Erreurs Bit (BER pour Bit-Error Rate). Des expérimentations et des observations ont montré qu'aucune de ces métriques, utilisée comme seul indice, ne permet de déterminer d'une façon précise la qualité du lien radio 802.11 [44]. Le RSSI par exemple n'est mesuré seulement que lors de la réception préambule du paquet qui est transmis à un faible débit, ne peut pas déterminer précisément la qualité du lien, surtout lors des transmissions haut-débit ; il ne permet pas, d'autre part, de détecter précisément les fluctuations des interférences. Le BER constitue un bon indicateur de la qualité du lien, cependant il doit être mesuré en continue sur des périodes de temps étendues. Quant au PDR, il est considéré comme une bonne métrique d'indication de la qualité du lien WiFi, mais il dépend de plusieurs facteurs dont la taille des paquets et le débit de transmission.

Dans ce chapitre on propose un nouveau protocole de communication ajoutant une certaine fiabilité au canal radio et adoptant un mécanisme de redondance pour la transmission des paquets améliorant ainsi le taux de réception de ces paquets par l'entité destinataire. Dans cette proposition, le PER sera alors considéré comme la métrique indicatrice de la qualité du lien radio WiFi ; les expérimentations faites au niveau de ce chapitre observeront ce taux de perte paquets pour comparer la fiabilité du protocole proposé à celle d'autres protocoles existants.

Le canal radio WiFi est un élément technologique clé de l'application RAMPE/INFOMOVILLE à travers lequel l'utilisateur peut se connecter à la ressource d'information. La confiance en ce système d'assistance est donc déterminée par la qualité de ce canal radio. L'application doit donc être à même de pouvoir fournir un indicateur de haut-niveau, c'est à dire un niveau de confiance permettant d'alerter l'utilisateur de cette qualité et donc du degré de confiance qu'il pourra avoir dans l'application. Les interfaces WiFi fournissent deux types d'indicateurs un basé sur le RSSI donne la qualité du lien dont nous avons évoqué les limites ci-dessus et un indiquant le débit utilisé qui n'est pas directement exploitable pour une personne non familière avec ces technologies.

Le but du protocole proposé dans ce chapitre est de pouvoir fournir à l'utilisateur de RAMPE/INFOMOVILLE, un indicateur sur la qualité du lien WiFi basée sur la métrique PER, qui a l'avantage de ne pas nécessiter l'accès aux couches basses du device-driver WiFi pour récupérer les informations de RSSI et de débit et de refléter plus fidèlement la qualité de la liaison vu de l'utilisateur.

3.3 Modélisation d'un canal radio 802.11

Le canal radio, dans un contexte de mobilité est non stationnaire, dans [23] les auteurs proposent un modèle de chaîne de Markov à N états, dans chaque état le canal est considéré comme symétrique.

Le modèle Gilbert-Elliot (GE) est un canal de Markov à deux états: Bon et Mauvais, utilisé pour la simulation des canaux radios; chaque état est caractérisé par une probabilité d'erreurs au niveau bit (BER pour Bit Error Rate), une probabilité de transition P_{xy} vers le deuxième état ainsi qu'une probabilité de rester dans le même état.

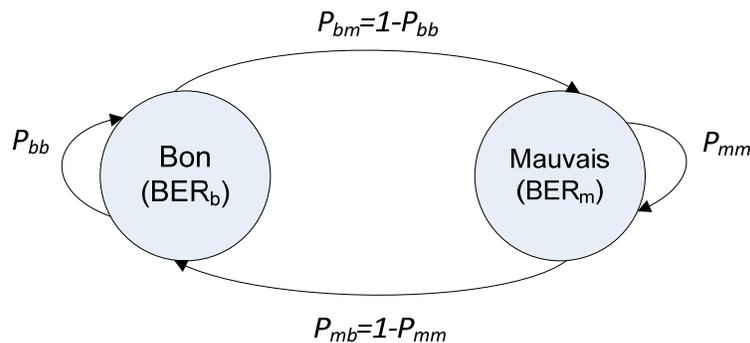


Figure 23- Les deux états du modèle de canal de Gilbert-Elliot

Le BER dépend généralement de la fréquence, du type de codage utilisé et aussi des conditions environnementales. Ce modèle de canal est un modèle au niveau bit; sa simulation est lourde et demande beaucoup de temps du fait que les bits sont analysés l'un après l'autre (pour la vérification des erreurs); deux expériences de Bernoulli doivent être effectuées à chaque bit: la première sert à déterminer si le bit est erroné et la deuxième à déterminer une transition d'état. Ce modèle de simulation est appelé «Straightforward» par les auteurs [23]. Ils proposent des solutions utilisant un modèle de Gilbert-Elliot permettant de passer du niveau «Bit» au niveau «Paquet» (pour le calcul du PER- Packet Error Rate); le but est d'accélérer les simulations des réseaux sans fil tout en obtenant la même qualité de l'estimation du taux d'erreurs que celle obtenue avec les simulations au niveau bit.

Le modèle «Amélioré» de simulation (appelé Improved Simulation Model) a été évalué dans un premier temps: dans ce modèle, la probabilité de transition entre deux états n'est plus évaluée pour chaque bit, mais on considère le temps de séjour dans un état qui correspond à une loi géométrique, l'état du canal est donc considéré comme pouvant changer chaque x bits tel que x suit une loi géométrique, et le calcul des erreurs se fait bit par bit sur cette fraction de x bits; une seule expérience de Bernoulli sera à faire dans ce cas, à chaque bit, pour déterminer s'il est erroné ou pas.

Le modèle «Optimisé» de simulation (Optimized Simulation Model) a été proposé dans un second temps: dans ce modèle on ne considère plus l'erreur bit, mais l'erreur paquet. Un paquet de bits est considéré erroné si au moins l'un de ses bits est erroné ; connaissant la probabilité d'erreur bit et la taille du paquet en bits, on pourra en conclure la probabilité d'erreur du paquet selon la formule: $PER = 1 - (1 - BER)^t$, où t est la taille du paquet en bits. Il suffira alors de faire une seule expérience de Bernoulli à chaque paquet pour déterminer s'il est erroné ou pas et la transition d'état est supposée avoir lieu chaque x bits tel que x suit une loi géométrique.

Cependant, J. Ebert et A. Willig dans leurs simulations faites [23] travaillent sur une valeur du BER qui n'induit pas un PER de 100% dans le mauvais état du canal c'est-à-dire même dans le mauvais état on peut toujours avoir des paquets non erronés et donc qui aboutissent au destinataire. Un modèle simplifié de Gilbert-Elliot consiste à considérer que l'état du canal bascule de l'état bon à l'état mauvais dès qu'un paquet est détecté perdu [54]; en d'autres termes, le PER est de 100% dans l'état mauvais du canal (tous les paquets sont erronés), et tous les paquets envoyés dans le bon état sont intacts et aboutissent alors au destinataire [55].

3.4 Protocoles utilisés dans RAMPE/INFOMOVILLE

L'application RAMPE/INFOMOVILLE consiste en un échange de trames entre la borne constituée d'un point d'accès et d'un Serveur de base de données d'une part, et le PDA porté par l'aveugle d'autre part. Ces trames échangées sont actuellement définies selon trois catégories utilisant chacune un certain protocole de communication:

- **Trame U (Utilisateur)** toujours envoyée depuis un PDA vers la borne. Cette trame est utilisée lorsque l'utilisateur souhaite faire sonner la borne et s'y diriger. Le protocole utilisé est TCP.
- **Trame R (Rafraîchissement)** toujours envoyée depuis la borne vers un ou plusieurs PDA. Cette trame est produite en cas de variation d'horaires ou d'événement exceptionnel sur une ligne. Ces changements sont reflétés dans la base XML que le PDA doit télécharger (rafraîchir) dès réception de la trame R. Le protocole utilisé est UDP en mode broadcast.
- **Une trame V (Véhicule)** est un message urgent, toujours envoyé depuis la borne vers un ou plusieurs PDA. Cette trame est produite lorsqu'un bus est à l'approche de l'arrêt. Un message texte est contenu dans la trame V, immédiatement synthétisé par le PDA et que l'utilisateur doit acquitter. Le protocole utilisé est UDP en mode broadcast.

Récapitulons dans le tableau 7 suivant :

Trame	Protocole	Type	Point d'Accès	PDA
Trame Utilisateur U	TCP	Unicast/ avec connexion	Serveur	Client
Téléchargement de la base de données	HTTP	Unicast/ avec connexion	Serveur	Client
Trames urgentes R et V- Rafraîchissement et Véhicule (appelées dans la suite Trames de Service)	UDP	Broadcast/ Sans connexion	Client	Serveur

Table 7– Les trames RAMPE/INFOMOVILLE

3.5 Transmission point-à-multipoint

Dans les protocoles de communication, la transmission de données peut se faire en l'un des trois modes de diffusion suivants :

- Point à Point (unicast): dans ce mode, un noeud émetteur transmet des données à un autre noeud récepteur.
- Point à Multipoint: qui se divise en deux sous-catégories : Multicast où un noeud émetteur envoie des données à un groupe de noeuds récepteurs, et broadcast où le noeud émetteur envoie des données à tous les noeuds se trouvant sur le même réseau.

Plusieurs applications nécessitent un transfert de point-à-multipoint pour diffuser une information intéressante à un groupe ou à tous les noeuds du réseau, signaux d'alarmes, trames indiquantes d'une congestion, une collision, ...etc.

TCP est un protocole orienté connexion de la couche transport du modèle OSI. TCP ne peut pas être utilisé en broadcast. A cause des acquittements multiples, la connexion peut souffrir d'un délai et d'un retard intolérables. UDP est un protocole non orienté connexion de la couche transport. Il n'exige aucun acquittement, et peut donc être utilisé en mode broadcast.

Dans les réseaux filaires, et au niveau de la couche liaison de données (notamment la couche 802.3 adoptant le CSMA-CD), des paquets en unicast, en multicast ou en broadcast peuvent être retransmis en cas d'une détection de collision. Donc en quelque sorte la couche 2 ajoute une certaine fiabilité à UDP. On note quand même des inconvénients: la retransmission des paquets se fera aussi en mode broadcast et donc les récepteurs ayant reçu le paquet en premier lieu, vont de même recevoir sa retransmission.

Dans les réseaux locaux sans fil 802.11, un paquet unicast sera retransmis en cas de collision ou de perte (un acquittement ne sera pas reçu par l'émetteur) ; mais des paquets en broadcast ne peuvent pas être détectés perdus car la technique de détection de collision des réseaux filaires ne peut pas être utilisée dans les réseaux 802.11 qui adoptent la technique CSMA/CA [20] et aussi il n'y a pas d'acquittements en mode broadcast et donc il n'y a pas de retransmissions.

Plusieurs propositions de protocoles ont été faites pour fiabiliser et rendre extensible une transmission en multicast/broadcast : protocole Scalable Reliable Multicast (SRM) [26], Real-

Time Stream Transport Protocol Multicast (RSTP Multicast) [25]. Des propositions ont été même faites pour les réseaux sans fil pour fiabiliser une transmission en broadcast : Redundant Transmission Protocol (RT) [20], Real-Time Transport Protocol (RTP) [173], ...etc.

3.6 Protocole RAP

On propose dans ce chapitre un protocole de communication approprié au type de trafic de données que nous rencontrons dans l'application RAMPE/INFOMOVILLE, spécifiquement pour la transmission des messages urgents depuis la borne vers le PDA porté par la PAM; ces messages urgents (informations temps réel) sont transmis en mode broadcast par le protocole UDP vers tous les PDAs associés à la borne, et donc aucune garantie de livraison n'est assurée. On introduit un protocole au niveau des couches supérieures du modèle OSI (couche session) pour fiabiliser les transmissions en mode broadcast.

Le protocole proposé, nommé RAP pour RAMPE/INFOMOVILLE Application Protocol, offrira un certain degré de fiabilité pour les transmissions sans fil comme le 802.11 (b/g) ; le but de RAP est de minimiser les pertes de paquets ; il cherche à fiabiliser le protocole UDP utilisé en mode broadcast. RAP sera encapsulé dans des paquets UDP et introduira une redondance périodique qui permettra de sonder et d'évaluer le canal au-dessus de ce protocole; la redondance sera introduite par une répétition des trames d'une manière spécifique, et le sondage du canal par une encapsulation des données de gestion dans les paquets UDP ; cette gestion permettra d'estimer les pertes de paquets et donc la fiabilité du réseau. Ceci permettra au récepteur (le PDA qui est en train de recevoir les messages urgents) d'élaborer un indicateur de la qualité du lien sans fil qui le relie au point d'accès, lui permettant de fournir à l'utilisateur un niveau de confiance dans l'utilisation de son système d'information.

3.6.1 Mécanisme de fonctionnement de RAP

RAP introduit une redondance au-dessus du protocole UDP afin de minimiser les pertes de paquets. Le mécanisme de fonctionnement du protocole RAP est le suivant: il y a au moins une trame de données N (paquet UDP) chaque T secondes, et ce paquet sera retransmis n fois ($n=3$ dans la figure 24) toutes les t_r secondes.

Une étude et un protocole similaire à RAP est proposé par D. Maniezzo, M. Cesana, P. Bergamo, M. Gerla et K. Yao et est appelé RT Protocol (pour Redundant Transmission) [20]; le but était de fiabiliser une transmission de type streaming en multicast de données temps-réel sur un canal radio WiFi; RT proposait une redondance au niveau des « fragments » de données ; les fragments envoyés dans un premier paquet seront répétés dans le paquet suivant selon un mécanisme de « sliding window » ; de cette façon le récepteur pourra toujours reconstituer les données d'un paquet perdu. RAP cherche par contre à introduire une redondance au niveau des « paquets » transmis, le trafic considéré (les messages urgents envoyés depuis la borne de la station de bus vers les PDAs associés) n'étant pas du type streaming.

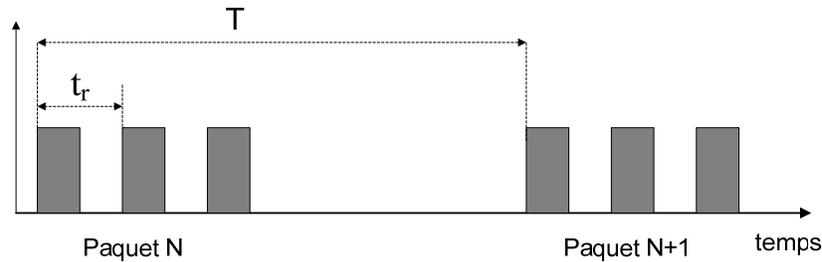


Figure 24- Format du trafic dans le protocole RAP proposé

Le trafic de données broadcast de RAMPE/INFOMOVILLE est principalement formé de trames très courtes de quelques dizaines d’octets (moins d’un MTU d’Ethernet, 1518 octets - Maximum Transmission Unit qui est la grandeur maximale d’une trame sur un réseau).

3.6.2 RAP- protocole de la couche Session

Le protocole RAP tourne au-dessus du protocole UDP et sera donc encapsulé dans des paquets UDP. RAP sera considéré alors comme un protocole de la couche session du modèle OSI.

La couche RAP de l’AP va recevoir de la couche applicative les trames Urgentes (R et V) (trames de Service) chaque T secondes. Chaque trame sera envoyée n fois par la couche session et chaque copie de trame sera encapsulée dans des paquets UDP. Au bout d’un temps T secondes, si une trame de Service n’est pas reçue de la couche applicative, la couche RAP de l’AP enverra une trame de Bourrage. Cette trame de bourrage servira à maintenir le sondage de canal pour les différents PDAs.

La trame de service et la trame de bourrage seront traitées de la même manière: elles seront envoyées en n copies au Serveur.

Comme les trames (figure 25) sont numérotées et datées, contenant des champs indiquant les dates de la trame courante, de la trame précédente et de la trame suivante, le PDA, averti du nombre de répétitions n , pourra estimer et compter les pertes et avoir par suite une idée sur l’état du canal.

En résumé (tableau 8), les différentes trames échangées lors d’une communication Client-Serveur utilisant le protocole RAP sont:

Trame	Protocole	Point d’Accès	PDA
Trame de Service (trames de rafraîchissement R et Véhicule V précédemment nommées trames urgentes)	RAP/UDP	Client	Serveur
Trame de Bourrage	RAP/UDP	Client	Serveur

Table 8- Les catégories des trames RAP

3.6.3 Format de la trame de Service RAP

TYPE (1 octet)	NUMÉRO de RÉPÉTITION (1 octet)	JOUR MOIS ANNÉE trame courante (3 octets)	
HEURE MINUTES SECONDES trame courante (3 octets)		NUMÉRO de trame (2 octets)	
NOMBRE de RÉPÉTITION (1 octet)	INTERVAL de RÉPÉTITION (1 octet)	JOUR MOIS ANNÉE trame précédente (3 octets)	
HEURE MINUTES SECONDES trame précédente (3 octets)		JOUR MOIS ANNÉE trame suivante (3 octets)	
	HEURE MINUTES SECONDES trame suivante (3 octets)		
DONNÉES (optionnel)			

Figure 25- Format de la trame de Service RAP

La trame de service est constituée des champs suivants (figure 25):

- TYPE (1 octet): nombre indiquant le type de la trame de Service (0x01: R, 0x03: V par exemple...).
- NUMERO de RÉPÉTITION (1 octet): indique le numéro de la trame dans le slot de répétition. Il doit être plus petit ou égal au NOMBRE de RÉPÉTITION.
- JOUR, MOIS, ANNÉE de la trame courante (3 octets): indique la date de la trame transmise.
- HEURE, MINUTES, SECONDES de la trame courante (3 octets): indique le temps de la trame transmise.
- NUMERO de TRAME (2 octets): donne un numéro unique à une trame. Ce numéro pourrait être entre 0 et 64535.
- NOMBRE de RÉPÉTITION (1 octet): donne le nombre maximum de répétitions.
- INTERVALLE de RÉPÉTITION (1 octet): en secondes; c'est le temps t_r estimé entre 2 répétitions.
- JOUR, MOIS, ANNÉE de la trame précédente (3 octets) et HEURE, MINUTES, SECONDES (3 octets): pourrait aider à la gestion et peut être aussi utilisé pour certaines statistiques.
- JOUR, MOIS, ANNÉE (3 octets) et HEURE, MINUTES, SECONDES (3 octets) de la trame suivante: donne la date maximum de la prochaine nouvelle trame.
- DONNÉES (le nombre des octets est égal au MTU sans l'en-tête): ce champs dépend du type de la trame.

3.6.4 Trame de Bourrage

La trame de Bourrage a une double fonctionnalité: d'une part elle servira à synchroniser le l'AP aux différents PDAs, en les informant de la date courante de l'AP, du temps prévu pour recevoir la trame suivante (soit une trame de service soit une trame de bourrage) et de la date de la trame précédente, et d'autre part elle jouera un rôle similaire à une trame balise au niveau MAC ou WiFi : prenons le cas où un PDA ne reçoit aucune des trames de Service répétées. Dans ce cas il ne va pas distinguer si la trame de Service ne lui a pas abouti ou si aucune trame de Service n'a été envoyée par le client en premier lieu. Il ne peut pas non plus savoir si le lien est bon ou non. Avec la trame de bourrage, le PDA pourra savoir qu'il va recevoir au moins cette trame de bourrage de la part de l'AP au bout d'un temps T. S'il ne reçoit rien, dans ce cas il va constater que le lien est mauvais: Le PDA sort par exemple de la zone de couverture de l'AP. C'est le cas le plus pire et c'est alors la couche MAC qui va remédier à cette situation et envoyer une trame de désassociation au PDA.

D'autre part si le PDA reçoit une trame de bourrage mais ne reçoit pas une trame de service envoyée avant cette trame de bourrage, le champ « Numéro de trame » de la trame de bourrage, qui correspond au numéro de la dernière trame de Service qui a été envoyée permettra au PDA de savoir s'il a bien reçu cette trame ou non.

Le format de la trame de bourrage est identique à celui de la trame de service hormis que la trame de bourrage ne contient pas un champ "données". Le champ TYPE de valeur 0x05 indique une trame de bourrage, et le champ "Numéro de trame urgente" indique le numéro de la dernière trame urgente qui a été envoyée.

3.6.5 Trame de Statistique

Dans le cas où on autorise le PDA à transmettre des données vers le point d'accès, on peut imaginer qu'une trame de Statistique est envoyée par le serveur (le PDA) vers le client (le point d'accès) dans laquelle il donne le nombre de trames (ou de répétitions) qu'il a bien reçues. Pour une transmission fiable, cette trame de statistique peut être envoyée en utilisant le protocole TCP. Cette trame servira alors à donner des informations sur l'état du canal en fonction desquelles l'AP pourra diminuer ou augmenter le nombre de répétitions d'une trame. Si par exemple la trame de statistique est envoyée suite à la réception de chaque trame urgente, l'AP calculera le rapport nombre de trames répétées reçues par le PDA sur le nombre n de répétitions. Cependant, l'envoi de cette trame de statistique par le PDA va lui faire consommer de l'énergie car il sera en état actif ; c'est pour cela, on peut proposer d'avoir une trame de statistique envoyée périodiquement ou à chaque changement de l'état du lien de communication entre AP et PDA.

D'autre part, le protocole RAP du PDA va aussi envoyer une trame de statistique à sa couche applicative. Cette trame servira à calculer les paramètres du modèle du canal et à élaborer un degré de confiance pour l'utilisateur ; elle servira comme un indicateur de qualité de la liaison WiFi (le PDA est bien connecté à la borne, le canal est d'une mauvaise qualité avec beaucoup de pertes, ...etc).

TYPE (1 octet)	NUMÉRO de RÉPÉTITION (1 octet)	
NUMÉRO de trame (2 octets)		NOMBRE de RÉPÉTITION (1 octet)

Figure 26- Format de la trame de Statistique RAP

Les différents champs qui constituent une trame de Statistique sont:

- TYPE (1 octet): nombre indiquant que la trame est une trame de Statistique (0x04).
- NUMERO de RÉPÉTITION (1 octet): indique le nombre des répétitions reçues.
- Numéro de trame (2 octets): indique le numéro de la dernière trame urgente reçue.
- Nombre de RÉPÉTITION (1 octet): indique le nombre de répétitions n.

3.6.6 Autres problèmes et remèdes

Au-delà du problème des pertes de paquets, le protocole RAP peut permettre de gérer d'autre type de situation.

Un cas pouvant se présenter où la borne diffuse une trame urgente puis un nouveau PDA se connecte à cette borne tandis que le message urgent est toujours valide (accident, bus à l'approche, panne sur une ligne, changement d'horaire, ...etc), ce message est alors rediffusé. Un PDA recevant alors une trame avec un numéro identique à celui d'une trame reçue précédemment, va simplement l'ignorer. Mais s'il reçoit une trame avec un numéro supérieur à celui d'une trame reçue précédemment, il la traitera et ce message sera synthétisé vocalement et énoncé à la PAM.

On peut toujours imaginer une autre solution dans laquelle le PDA lui-même, après son association à une borne, demande la rediffusion de toutes les informations urgentes encore valides. Mais ceci peut consommer de son énergie, exactement comme la redemande de sonnerie envoyée depuis le PDA vers la borne afin de repérer sa position.

3.7 Simulation et évaluation de RAP

3.7.1 Simulation sur un canal réel

Pour étudier le fonctionnement d'un protocole de communication et déterminer sa fiabilité ou ses performances, il faut pouvoir le simuler sur un canal réel afin d'observer son comportement surtout vis à vis d'éventuelles perturbations que le canal peut introduire.

Dans ce paragraphe on présente la simulation du protocole RAP proposé et on compare ses performances vis-à-vis de celles des autres protocoles utilisés dans la version actuelle de RAMPE/INFOMOVILLE notamment le protocole UDP. Le logiciel OMNeT++ est utilisé pour cette simulation. Il permet d'inclure dans la simulation des dispositifs réels ("Hardware-in-the-

loop"): deux composants d'OMNeT++ peuvent alors communiquer entre eux à travers un canal réel; la classe d'OMNeT++ qui permet de faire cette communication est la classe "cScheduler" dont les méthodes ou fonctions peuvent être modifiées selon l'application. Le comportement des deux protocoles RAP et UDP vis-à-vis les pertes pourront donc être analysés sur un canal réel et leurs fiabilités respectives comparées.

Le modèle de RAP étant un modèle Client-Serveur, le client sera implanté sur un ordinateur, le serveur sur un autre ; ces deux ordinateurs communiqueront par la suite à travers une liaison WiFi.

Pour simuler le protocole UDP, le Client et le Serveur sont composés d'une seule couche de transport (ce sont deux modules simples d'OMNeT++), tandis que pour RAP, on intègre une couche « Session » qui implémentera le protocole RAP (client et serveur seront deux modules composites d'OMNeT++).

Pour pouvoir simuler une application en temps réel, le modèle NED d'OMNeT++ est le suivant: un module «client » (cf. figure 27) générant les messages (UDP ou RAP) est connecté, à travers un module «cloud» (pouvant jouer, dans des simulations ultérieures, le rôle d'un canal WiFi modélisé) à l'interface «extClient» qui le relie au serveur tournant sur un PC distant à travers le lien WiFi. Le serveur recevant les messages du client présente une interface externe (aussi appelée «extClient» sur la figure 27) reliée, à travers un module «cloud», au module «server». Les modules client et serveur implémentent tous les deux le protocole RAP.

Le trajet des messages envoyés depuis le client au serveur est le suivant: [client ⇔ cloud ⇔ extClient (interface vers le serveur externe)] [Connexion réelle WiFi] [extClient (interface vers client externe) ⇔ cloud ⇔ server].

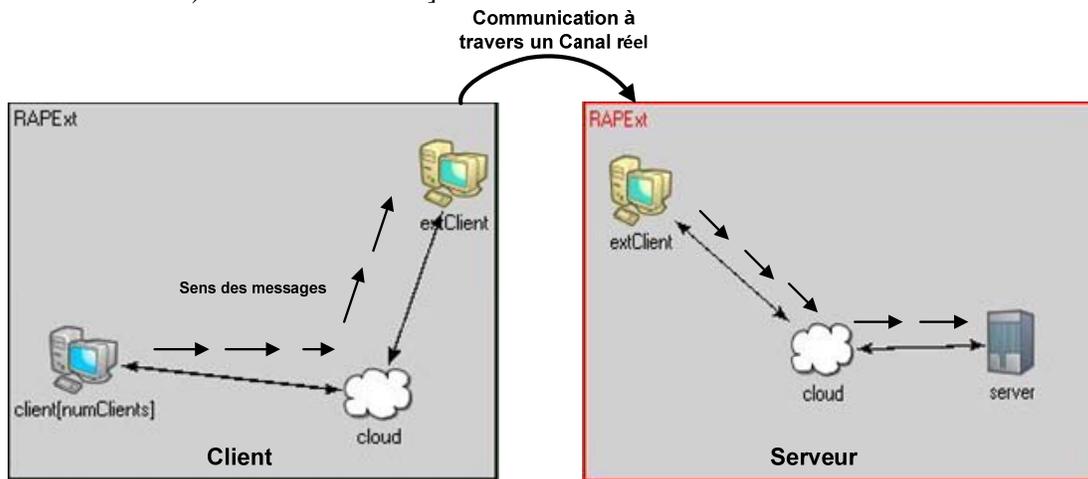


Figure 27- Modèle NED Client- Serveur de simulation sur un canal réel

3.7.1.1 Expérimentation

L'objectif de l'expérimentation est d'illustrer par une plateforme de simulation la capacité du protocole RAP à fiabiliser une communication réseau sans fil et à fournir un indice de confiance à l'applicatif RAMPE/INFOMOVILLE.

3.7.1.2 Eléments de l'expérimentation

- **Outils/Logiciels utilisés**

- Wireshark : logiciel de capture de trames et d'analyse de protocole réseau, qui permet de capturer et d'analyser les trames arrivant sur les adaptateurs et les cartes réseaux d'un dispositif de communication [170].

- Iperf : logiciel en ligne de commande, qui permet de générer du trafic UDP ou TCP, de mesurer la bande passante disponible entre le client et le serveur, ...etc [169].

- OMNeT++: outil de simulation libre d'événements discrets conçu pour simuler des réseaux informatiques, des multiprocesseurs et d'autres systèmes répartis (cf. paragraphe 4 du chapitre 1). Il permet aussi de faire des simulations temps réel [21].

- **Equipements utilisés**

Quatre ordinateurs portables ayant les spécifications ci-dessous sont utilisés dans cette manipulation:

Nom	Matériel	Système d'exploitation	Processeur	Carte WiFi
Portable 1	Toshiba Satellite	Windows XP	Intel Pentium M, 1.4Ghz	Intel Pro/Wireless LAN 2100 3B Mini PCI Adapter. Chipset: Intel 2100
Portable 2	DELL Latitude	Windows XP	Intel Pentium M, 1.6Ghz	Intel Pro/Wireless 2200 BG Network Connection. Chipset: Calexico 802.11bg MiniPCI RoW
Portable 3	IBM Lenovo	Windows XP	Intel Pentium M, 2.4Ghz	Intel Pro/Wireless 3945ABG Mini-PCI Express Adapter. Chipset: Intel WM3945AG
Portable 4	HP	Windows XP	Intel Pentium M, 2.4Ghz	Intel Pro/Wireless 2200 BG Network Connection. Chipset: Calexico 802.11bg MiniPCI RoW.

Table 9- Spécifications du matériel de la manipulation

- **Infrastructure de l'expérimentation**

Les portables 1 et 2, distants de 3.5 mètres, forment un réseau ad-hoc « RAMPEManip » 802.11b sur le canal 10. Wireshark, iperf et OMNeT++ sont installés sur les deux portables et une adresse réseau (IP pour Internet Protocol) manuelle est attribuée à chacun:

Portable 1 : 10.10.0.1

Portable 2 : 10.10.0.2

Sur le portable 1 tourne le «Serveur » OMNeT++ (cf. 3.7.1), qui communique, à travers le réseau sans fil «RAMPEManip» avec le « Client » OMNeT++ installé sur le portable 2; Client et Serveur vont échanger des trames à travers le canal radio WiFi. Iperf permet de mesurer la bande disponible entre ces 2 portables et Wireshark de capturer toutes les trames sortantes du Client et aboutissantes au Serveur.

Les portables 3 et 4 forment un réseau ad-hoc «IperfManip» 802.11b sur le canal 11. La distance entre eux est de 4 mètres et iperf est installé sur les deux.

Portable 3 : 192.168.0.1

Portable 4 : 192.168.0.2

Iperf permet de générer du trafic sur le réseau sans fil «IperfManip», opérant sur le canal 11 et donc à créer des interférences sur le canal 10 utilisé par le réseau «RAMPEManip». Ceci va permettre d'analyser le comportement du protocole RAP vis-à-vis ces interférences et comparer alors sa fiabilité à celle du protocole UDP.

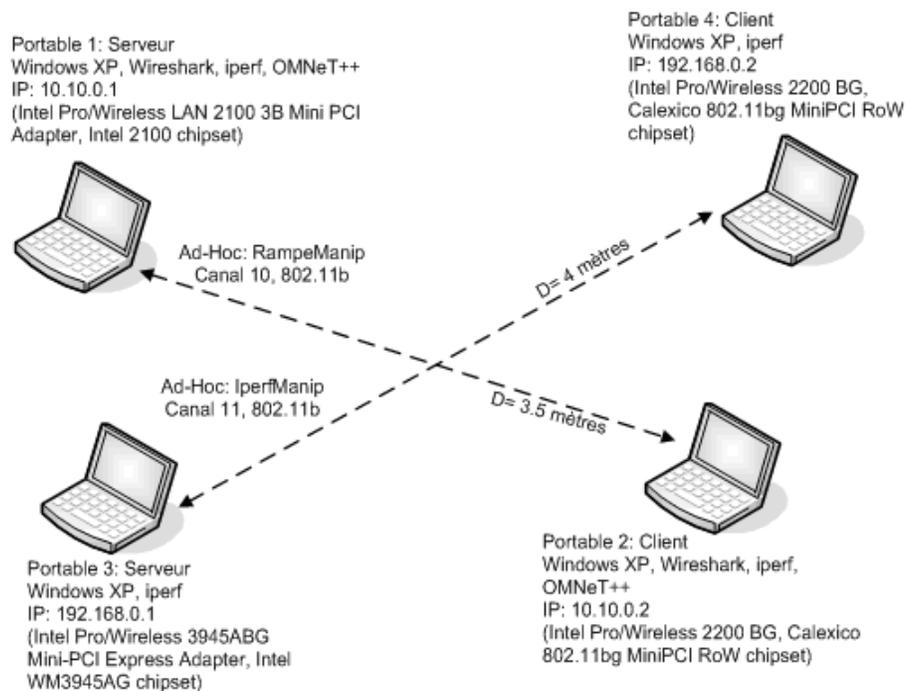


Figure 28- Infrastructure de l'expérience

- **Les commandes iperf**

Les commandes iperf utilisées dans l'expérimentation sont les suivantes :

Génération d'un trafic TCP entre 2 machines (un serveur S et un client C)

Sur la machine S: # **iperf -s**

Sur la machine C: # **iperf -c « adresse IP Serveur »**

Le test dure par défaut 10 secondes et utilise le protocole TCP sur le port 5001. Les mêmes commandes et le même protocole sont utilisés pour mesurer la bande passante disponible entre 2 machines.

Génération d'un trafic UDP entre S et C

Sur la machine S: # **iperf -s -u**

Sur la machine C: # **iperf -c « adresse IP Serveur » -u**

L'option -u désigne du trafic UDP. La bande passante par défaut est à 1 Megabits par seconde. Le test dure par défaut 10 secondes.

Pour choisir le débit on utilise l'option -b et on spécifie les lettres suivantes avec la valeur du débit:

- b: bits par seconde
- k: kilobits par seconde
- m: megabits par seconde
- g: gigabits parseconde

Pour un débit en octets par seconde, on utilise ces mêmes lettres en majuscule.

Sur la machine S: # **iperf -s -u**

Sur la machine C: # **iperf -c « adresse IP Serveur » -u -b 5m**

Générer un débit entre C et S pendant 10 heures

On utilise l'option -t et on la fait suivre par la durée désirée en secondes.

Sur la machine S: # **iperf -s -u**

Sur la machine C: # **iperf -c « adresse IP Serveur » -u -b 5m -t 36000** (trafic généré pendant 10 heures)

Avec l'option -i on peut avoir un rapport intermédiaire toutes les x secondes (x est spécifié après l'option -i):

Sur la machine S: # **iperf -s -u**

Sur la machine C: # **iperf -c « adresse IP Serveur » -u -b 5m -t 3600 -i 1** (le rapport est généré chaque seconde).

3.7.1.2.1 Tests réalisés

1- Qualité des liens- protocole TCP

Avant de commencer à tester les protocoles UDP et RAP, les liaisons entre les portables 1 et 2 et les portables 3 et 4 sont testées ; on vérifie aussi le partage de la bande passante lors d'une transmission simultanée sur ces deux liens interférents en utilisant iperf:

Entre les portables 1 et 2:

Portable1: iperf Server: > iperf -s -i 1 (serveur démarré en mode TCP et rapport intermédiaire demandé à chaque seconde)

Portable2: iperf Client : > iperf -c 10.10.0.1 -i 1 -t 60 (trafic TCP généré pendant 60 secondes)

Sur le Portable2 on observe:

```
C:\Documents and Settings\jsayah\Desktop>iperf -c 10.10.0.1 -i 1 -t 60
-----
Client connecting to 10.10.0.1, TCP port 5001
TCP window size: 8.00 KByte (default)
-----
[1912] local 10.10.0.2 port 1045 connected with 10.10.0.1 port 5001
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
-----
[1912] 0.0- 1.0 sec   632 KBytes  5.18 Mbits/sec
[1912] 1.0- 2.0 sec   672 KBytes  5.51 Mbits/sec
[1912] 2.0- 3.0 sec   712 KBytes  5.83 Mbits/sec
[1912] 3.0- 4.0 sec   632 KBytes  5.18 Mbits/sec
[1912] 4.0- 5.0 sec   456 KBytes  3.74 Mbits/sec
[1912] 5.0- 6.0 sec   688 KBytes  5.64 Mbits/sec
[1912] 6.0- 7.0 sec   640 KBytes  5.24 Mbits/sec
[1912] 7.0- 8.0 sec   680 KBytes  5.57 Mbits/sec
[1912] 8.0- 9.0 sec   680 KBytes  5.57 Mbits/sec
[1912] 9.0-10.0 sec   672 KBytes  5.51 Mbits/sec
[1912] 10.0-11.0 sec   640 KBytes  5.24 Mbits/sec
[1912] 11.0-12.0 sec   680 KBytes  5.57 Mbits/sec
[1912] 12.0-13.0 sec   672 KBytes  5.51 Mbits/sec
[1912] 13.0-14.0 sec   672 KBytes  5.51 Mbits/sec
[1912] 14.0-15.0 sec   648 KBytes  5.31 Mbits/sec
[1912] 15.0-16.0 sec   688 KBytes  5.64 Mbits/sec
[1912] 16.0-17.0 sec   704 KBytes  5.77 Mbits/sec
[1912] 17.0-18.0 sec   672 KBytes  5.51 Mbits/sec
[1912] 18.0-19.0 sec   656 KBytes  5.37 Mbits/sec
[1912] 19.0-20.0 sec   656 KBytes  5.37 Mbits/sec
```

La bande passante entre les 2 portables est aux alentours des 5 Mbits/s ; les deux portables fonctionnent en 802.11b ; la bande passante théorique pour les données utilisateurs au niveau de la couche MAC est de 11 Mbits/s mais elle est de 5 à 6 Mbits/s à l'interface entre la couche PHY et l'interface air [24] (cf. paragraphe 2.2.3.6).

Entre les portables 3 et 4:

Portable3: iperf Server: > iperf -s -i 1 (serveur démarré en mode TCP et rapport intermédiaire demandé à chaque seconde)

Portable4: iperf Client: > iperf -c 192.168.0.1 -i 1 -t 60 (trafic TCP généré pendant 60 secondes)

De même le débit utile est aux alentours de 5Mbits/s, les 2 interfaces WiFi fonctionnent en 802.11b sur le canal 11.

2- Partage de la bande passante

Maintenant on démarre les deux générateurs de trafic iperf : sur le canal 10 (sur les portables 1 et 2) en TCP puis après un délai de 10 secondes sur le canal 11 (sur les portables 3 et 4).

On observe sur le Portable2 une chute de la bande passante à l'instant 10s. Le canal 10 et le canal 11 étant adjacents, ceci explique ce partage de bande. Quand le trafic s'arrête sur le canal 11 (à l'instant 23 secondes de l'exemple suivant), le canal 10 bénéficiera de nouveau de toute la bande.

```
C:\Documents and Settings\jsayah\Desktop>iperf -c 10.10.0.1 -i 1 -t 60
-----
Client connecting to 10.10.0.1, TCP port 5001
TCP window size: 8.00 KByte (default)
-----
[1912] local 10.10.0.2 port 1060 connected with 10.10.0.1 port 5001
[ ID] Interval      Transfer      Bandwidth
[1912] 0.0- 1.0 sec   656 KBytes    5.37 Mbits/sec
[1912] 1.0- 2.0 sec   688 KBytes    5.64 Mbits/sec
[1912] 2.0- 3.0 sec   664 KBytes    5.44 Mbits/sec
[1912] 3.0- 4.0 sec   520 KBytes    4.26 Mbits/sec
[1912] 4.0- 5.0 sec   624 KBytes    5.11 Mbits/sec
[1912] 5.0- 6.0 sec   640 KBytes    5.24 Mbits/sec
[1912] 6.0- 7.0 sec   640 KBytes    5.24 Mbits/sec
[1912] 7.0- 8.0 sec   640 KBytes    5.24 Mbits/sec
[1912] 8.0- 9.0 sec   632 KBytes    5.18 Mbits/sec
[1912] 9.0-10.0 sec   664 KBytes    5.44 Mbits/sec
[1912] 10.0-11.0 sec  456 KBytes    3.74 Mbits/sec
[1912] 11.0-12.0 sec  232 KBytes    1.90 Mbits/sec
[1912] 12.0-13.0 sec  336 KBytes    2.75 Mbits/sec
[1912] 13.0-14.0 sec  352 KBytes    2.88 Mbits/sec
[1912] 14.0-15.0 sec  328 KBytes    2.69 Mbits/sec
[1912] 15.0-16.0 sec  384 KBytes    3.15 Mbits/sec
[1912] 16.0-17.0 sec  344 KBytes    2.82 Mbits/sec
[1912] 17.0-18.0 sec  408 KBytes    3.34 Mbits/sec
[1912] 18.0-19.0 sec  336 KBytes    2.75 Mbits/sec
[1912] 19.0-20.0 sec  320 KBytes    2.62 Mbits/sec
[1912] 20.0-21.0 sec  368 KBytes    3.01 Mbits/sec
[1912] 21.0-22.0 sec  328 KBytes    2.69 Mbits/sec
[1912] 22.0-23.0 sec  352 KBytes    2.88 Mbits/sec
[1912] 23.0-24.0 sec  632 KBytes    5.19 Mbits/sec
[1912] 24.0-25.0 sec  664 KBytes    5.24 Mbits/sec
[1912] 25.0-26.0 sec  624 KBytes    5.11 Mbits/sec
```

3- Qualité des liens- protocole UDP

Reprenons la même expérimentation avec un trafic UDP.

Entre les Portables 1 et 2:

Sur le réseau RAMPEManip- Canal 10:

Portable1: iperf Server: > iperf -s -u -i 1 (serveur démarré en UDP)

Portable2: iperf Client: > iperf -c 10.10.0.1 -u -b 1m -i 1 -t 60 (trafic UDP généré à un débit de 1Mbits/s pendant 60 secondes)

On a bien le débit de 1Mbits/s entre le client et le serveur.

Avec l'option 5m, on obtient 5Mbits/s au niveau de la bande.

Avec l'option 10m, le débit reste à 5 Mbits/s. Donc quand le trafic généré dépasse la bande disponible au niveau de la liaison 802.11b, cette bande est maintenue à sa valeur pratique maximale.

Entre les Portables 3 et 4:

Sur le réseau IperfManip- Canal 11:

Portable3: iperf Server: > iperf -s -u -i 1 (serveur démarré en UDP)

Portable4: iperf Client: > iperf -c 192.168.0.1 -u -b 1m -i 1 -t 60 (trafic UDP généré avec 1 Mbps)

On a bien le débit de 1Mbits/s au niveau de la bande passante entre le client et le serveur.

Avec l'option 5m, on a aussi du 5Mbits/s au niveau de la bande.

Avec l'option 10m, le débit reste à 5 Mbits/s. Donc quand le trafic généré dépasse la bande disponible au niveau de la liaison 802.11b, cette bande est maintenue à sa valeur pratique maximale.

```
C:\Documents and Settings\jsayah\Desktop>iperf -c 10.10.0.1 -u -b 5m -i 1 -t 60s
```

```
-----
Client connecting to 10.10.0.1, UDP port 5001
Sending 1470 byte datagrams
UDP buffer size: 8.00 KByte (default)
-----
[1912] local 10.10.0.2 port 1310 connected with 10.10.0.1 port 5001
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[1912] 0.0- 1.0 sec   612 KBytes  5.01 Mbits/sec
[1912] 1.0- 2.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 2.0- 3.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 3.0- 4.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 4.0- 5.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 5.0- 6.0 sec   612 KBytes  5.01 Mbits/sec
[1912] 6.0- 7.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 7.0- 8.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 8.0- 9.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 9.0-10.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 10.0-11.0 sec  610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 11.0-12.0 sec  612 KBytes  5.01 Mbits/sec
[1912] 12.0-13.0 sec  610 KBytes  5.00 Mbits/sec
```

```
C:\Documents and Settings\uobadmin\Desktop>iperf -c 192.168.0.1 -u -b 5m -i 1 -t 60s
```

```
-----
Client connecting to 192.168.0.1, UDP port 5001
Sending 1470 byte datagrams
UDP buffer size: 8.00 KByte (default)
-----
[1912] local 192.168.0.2 port 1310 connected with 192.168.0.1 port 5
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[1912] 0.0- 1.0 sec   612 KBytes  5.01 Mbits/sec
[1912] 1.0- 2.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 2.0- 3.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 3.0- 4.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 4.0- 5.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 5.0- 6.0 sec   612 KBytes  5.01 Mbits/sec
[1912] 6.0- 7.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 7.0- 8.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 8.0- 9.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 9.0-10.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 10.0-11.0 sec  610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 11.0-12.0 sec  612 KBytes  5.01 Mbits/sec
[1912] 12.0-13.0 sec  610 KBytes  5.00 Mbits/sec
```

On démarre iperf sur IperfManip à l'instant 10s et on observe bien la partage de la bande:

```
C:\Documents and Settings\jsayah\Desktop>iperf -c 10.10.0.1 -u -b 5m -i 1
-t 60s
```

```
-----
Client connecting to 10.10.0.1, UDP port 5001
Sending 1470 byte datagrams
UDP buffer size: 8.00 KByte (default)
-----

[1912] local 10.10.0.2 port 1310 connected with 10.10.0.1 port 5
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[1912] 0.0- 1.0 sec   612 KBytes  5.01 Mbits/sec
[1912] 1.0- 2.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 2.0- 3.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 3.0- 4.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 4.0- 5.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 5.0- 6.0 sec   612 KBytes  5.01 Mbits/sec
[1912] 6.0- 7.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 7.0- 8.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 8.0- 9.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 9.0-10.0 sec   610 KBytes  5.00 Mbits/sec
[1912] 10.0-11.0 sec  610 KBytes  2.78 Mbits/sec
[1912] 11.0-12.0 sec  612 KBytes  2.43 Mbits/sec
[1912] 12.0-13.0 sec  610 KBytes  2.44 Mbits/sec
[1912] 13.0-14.0 sec  610 KBytes  2.27 Mbits/sec
[1912] 14.0-15.0 sec  610 KBytes  2.50 Mbits/sec
[1912] 15.0-16.0 sec  610 KBytes  2.35 Mbits/sec
[1912] 16.0-17.0 sec  610 KBytes  2.39 Mbits/sec
```

Ces tests ont montré que le comportement du lien WiFi est normal: la débit pratique de 802.11b est inférieur au débit théorique, le partage de la bande entre deux canaux adjacents interférents est vérifié... On passe dans ce qui suit à la simulation des protocoles UDP et RAP sur les réseaux et canaux réels établis.

3.7.1.3 Simulation des protocoles RAP et UDP

Dans ce paragraphe, on décrit la simulation et on compare le fonctionnement des deux protocoles UDP et RAP sur les réseaux ad-hoc testés et configurés du paragraphe précédent. Le but est de montrer l'efficacité du protocole RAP par rapport au protocole UDP; en d'autres termes, on démontre comment RAP ajoute une certaine fiabilité par rapport à UDP sur un canal WiFi réel. Pour ce faire, on essaye d'avoir un canal WiFi perturbé et on analyse le comportement des deux protocoles sur ce même canal.

Le taux de pertes paquets (PER pour Packet Error Rate) est considéré comme la métrique indicatrice de la qualité du lien. Un certain nombre de paquets est généré et on calcule pour chaque protocole (après avoir compté les paquets perdus), le PER. UDP et RAP fonctionnent en mode Client-Serveur. On utilise pour ceci le réseau ad-hoc « RAMPEManip » entre les portables 1 et 2. Le client (UDP ou RAP) (portable 2) communique avec le Serveur (portable 1), tous les deux simulés sur OMNeT++, à travers une liaison WiFi réelle.

3.7.1.3.1 Simulation du Protocole UDP

Sur le réseau ad-hoc RAMPEManip tourne maintenant la simulation sur OMNeT++ décrite dans le paragraphe 3.7.1 du protocole UDP en mode Client- Serveur (Portable 1: Serveur et Portable 2: Client).

- **Données de la simulation**

- Les paquets générés par le client OMNeT++ sont numérotés (1, 2, 3, ...etc).
- Le serveur OMNeT++ recevant les paquets du Client compte les pertes. A chaque fois il compare le numéro du paquet qu'il est supposé recevoir au numéro du paquet reçu et s'il trouve une différence, il compte le nombre de paquets perdus et incrémente un compteur. Il enregistre dans un fichier XML, l'état de chaque paquet: un paquet qui a abouti au serveur est noté « vrai » et un paquet perdu est noté « faux » (se sont les données brut de la simulation, nous permettant plus tard d'en retirer les différents paramètres pour une modélisation du canal réel).
- Fréquence de génération des paquets : 1 paquet chaque 1 seconde.
- Longueur du Paquet : 20 octets : le message généré par la couche applicative contient une partie fixe de 20 octets et une partie de bourrage variable. La partie fixe est de 20 octets, puis on fait varier la longueur de la partie variable.

On présente dans les paragraphes suivants les résultats obtenus pour un petit nombre de paquets UDP générés par le Client (500 paquets) et ceci pour un test de validation rapide du canal (vérifier le scénario qui peut présenter le plus de pertes), puis on généralise et on récapitule les résultats pour un grand nombre de paquets générés, permettant une meilleure étude statistique.

- **Scénarios de simulation**

Sans trafic généré sur le réseau IperfManip

On commence notre manipulation sans générer du trafic sur le réseau IperfManip adjacent.

1- 500 messages UDP générés par le client → 0 messages perdus.

2- Portable 2 éloigné du portable 1 et toujours en ligne de vue (mais en espace fermé) :

- Distance à l'origine: 3.5m ; Distance actuelle: 10 m.

500 messages UDP générés par le client → 9 messages perdus

3- Portable 2 toujours éloigné du portable 1.

- Fréquence des paquets : 1 paquet chaque 0.001s.

500 messages UDP générés par le client → 10 messages perdus

4- Portable 2 éloigné du portable 1 (Distance: 10 m) mais cette fois les 2 portables ne sont plus en ligne de vue (mais toujours en espace fermé).

- Fréquence des paquets : 1 paquet chaque 0.001s.
- Longueur du paquet : 120 octets

500 messages générés par le client → 47 messages perdus

Avec trafic généré sur le réseau IperfManip

Un trafic UDP est maintenant généré avec iperf sur les deux portables 3 et 4 sur le canal 11 avec un débit de 5Mbits/s.

1- 500 messages UDP générés par le client → 2 messages perdus

2- Portable 2 éloigné du portable 1 et toujours en ligne de vue (mais en espace fermé).
- Distance à l'origine: 3.5m ; Distance actuelle: 10 m.

500 messages générés par le client → 54 messages perdus

3- Portable 2 toujours éloigné du portable 1.
- Fréquence des paquets : 1 paquet chaque 0.001s.
- Longueur du paquet : 120 octets

500 messages générés par le client → 56 messages perdus

4- Portable 2 éloigné du portable 1 (distance: 10 m) mais cette fois les 2 portables ne sont plus en ligne de vue (mais toujours en espace fermé).
- Fréquence des paquets : 1 paquet chaque 0.001s.
- Longueur du paquet : 120 octets

500 messages générés par le Client → 118 messages perdus

3.7.1.3.2 Simulation du Protocole RAP

Les mêmes tests ont été réalisés avec le protocole RAP simulé sur OMNeT++ :

• Données de la simulation

- RAP tourne dans la couche session et envoie le message reçu de la couche applicative n fois (n étant le nombre maximal de répétitions c.à.d le nombre de copies de la trame. Au début $n=2$).
- Le Serveur compte les pertes: un message est supposé perdu si les 2 copies ont été perdues; les répétitions perdues sont aussi comptées. Il enregistre entre autres, dans un fichier XML, l'état de chaque répétition: une répétition qui a abouti au serveur est notée « vrai » et une répétition perdue est notée « faux » (se sont les données brut de la simulation, nous permettant plus tard d'en retirer les différents paramètres pour une modélisation du canal réel).
- Les paquets générés au niveau du simulateur OMNeT++ sont numérotés de la façon suivante: «Numéro de Répétition:Numéro de Trame». Exemple : 1:1 (1^{ère} copie ou répétition de la 1^{ère} trame) -2 :1 (deuxième répétition de la 1^{ère} trame) - 1:2 (1^{ère} répétition de la 2^{ème} trame) - 2:2- ...etc.
- Fréquence de génération des paquets: 1 paquet chaque 1 seconde et chaque répétition à 0.1 seconde.
- Longueur du paquet : 20 octets

On présente dans les paragraphes suivants les résultats obtenus avec un petit nombre de paquets RAP générés par le Client (500 paquets), ceci pour un test de validation rapide du canal, puis on généralise et on récapitule les résultats pour un grand nombre de paquets générés, pour permettre une étude statistique plus fiable.

- **Scénarios de simulation**

Sans trafic généré sur le réseau IperfManip

1- 500 messages RAP générés par le client (messages répétés sont au nombre de 1000) → 0 messages perdus, 0 répétitions perdues

2- Portable 2 éloigné du portable 1 et toujours en ligne de vue.
- Distance à l'origine : 3.5m et distance actuelle : 10 m.

500 messages RAP générés par le client → 2 messages perdus, 15 répétitions perdues (on remarque sur Wireshark et aussi sur OMNeT++ que parfois quelques répétitions sont perdues mais d'autres non ce qui fait que le serveur reçoit au moins un exemplaire du message envoyé et donc le message n'est pas considéré perdu).

3- Portable 2 toujours éloigné du portable 1.

- Fréquence des paquets : 1 paquet chaque 0.001s avec fréquence de répétition $t_r = 0.0001s$.

500 messages générés par le client → 2 messages perdus, 17 répétitions perdues.

4- Portable 2 éloigné du portable 1 (distance: 10 m) mais cette fois les 2 portables ne sont plus en ligne de vue (mais toujours en espace fermé).

- Fréquence des paquets : 1 paquet chaque 0.001s avec fréquence de répétition $t_r = 0.0001s$.

- Longueur du paquet : 120 octets

500 messages générés par le client → 16 messages perdus, 86 répétitions perdues

Avec trafic généré sur le réseau IperfManip

Du trafic UDP est maintenant généré avec iperf sur les 2 portables 3 et 4 sur le canal 11 avec un débit de 5m.

1- 500 messages RAP générés par le client → 1 message perdu, 4 répétitions perdues.

2- Portable 2 éloigné du portable 1 et toujours en ligne de vue.

- Distance à l'origine : 3.5m et distance actuelle : 10 m.

500 messages générés par le client → 5 messages perdus, 89 répétitions perdues.

3- Portable 2 toujours éloigné du portable 1.

- Fréquence des paquets : 1 paquet chaque 0.001s avec fréquence de répétition $t_r = 0.0001s$.

- Longueur du paquet : 120 octets

500 messages générés par le client → 6 messages perdus, 91 répétitions perdues.

4- Portable 2 éloigné du portable 1 (Distance: 10 m) mais cette fois les 2 portables ne sont plus en ligne de vue (mais toujours en espace fermé).

500 messages générés par le client → 34 messages perdus, 229 répétitions perdues

3.7.1.4 Tableau récapitulatif comparatif (UDP vs. RAP sur un canal réel)

D'après les scénarios testés dans le paragraphe précédent, on remarque que le plus grand nombre de paquets perdus a été observé pour le scénario 4 (dans le cas d'UDP et de RAP). On repart alors de ce scénario, et on génère un plus grand nombre de paquets afin de pouvoir faire une analyse des protocoles UDP et RAP et pouvoir comparer leur fiabilité. Plusieurs tests ont été faits et sont récapitulés dans le tableau 10 ci-dessous.

Paramètres

- **Taux de perte** = nombre de messages perdus/nombre de messages générés
- **D** = Distance Client-Serveur. Par défaut, $D = 3.5$ m.
- **T_g** = temps de génération de messages: 1 message chaque T_g secondes. Par défaut, $T_g = 1$ s
- **t_r** = temps de répétition en RAP : 1 répétition chaque t_r secondes. Par défaut, $t_r = 0.1$ s
- **L_b** = longueur variable du message généré (b = bourrage). La longueur fixe étant de 20 octets. Par défaut, $L_b = 0$
- **n** = nombre de répétitions des trames dans RAP. Par défaut, $n=2$
- **D_{iperf}** = Débit généré avec Iperf sur le réseau IperfManip canal 11. Il vaut 0 quand on n'a pas de trafic généré au niveau d'IperfManip. Par défaut, $D_{iperf} = 0$
- **D_{rampe}** = La bande passante (mesurée avec iperf) disponible entre le Client et le Serveur RAMPE au moment de la simulation
- **V** = ligne de vue (Oui ou Non). Par défaut, $V = \text{Oui}$

On mentionne, à chaque test, le paramètre changé avec sa valeur; les autres paramètres étant maintenus à leurs valeurs par défaut (par exemple dans le test 2, on change les valeurs de T_g et t_r en mentionnant le débit sur le réseau RampeManip; pour le test 6, on change les valeurs de D_{iperf} (un débit est maintenant généré au niveau du réseau IperfManip) tout en gardant les autres paramètres à leur valeur par défaut), ... Les valeurs entre parenthèses désignent le nombre de répétitions perdues: pour UDP, nombre de paquets = nombre de répétitions puisque un paquet est envoyé une fois, tandis que pour RAP, un paquet va être répété n fois.

N° Manip	Paramètres	Taux de perte UDP	Taux de perte RAP (¹)
1	$D_{rampe} = 5.2$ Mb/s	0/500	0/500 (0/1000)
2	$T_g = 0.001$ s $t_r = 0.0001$ s $D_{rampe} = 5.2$ Mb/s	0/500	0/500 (0/1000)
3	$T_g = 0.001$ s $t_r = 0.0001$ s $L_b = 10$ octets $D_{rampe} = 5.2$ Mb/s	0/500	0/500 (0/1000)
4	$T_g = 0.001$ s $t_r = 0.0001$ s $L_b = 50$ octets $D_{rampe} = 5.2$ Mb/s	0/500	0/500 (0/1000)

¹ Nombre de répétitions perdues

5	$T_g = 0.001s$ $t_r = 0.0001s$ $L_b = 100$ octets $D_{rampe} = 5.2Mb/s$	0/500	0/500 (0/1000)
6	$D_{iperf} = 2m$ $D_{rampe} = 2.9 Mb/s$	2/500	1/500 (3/1000)
7	$D_{iperf} = 4m$ $D_{rampe} = 2.85 Mb/s$	2/500	1/500 (3/1000)
8	$D_{iperf} = 5m$ $D_{rampe} = 2.75 Mb/s$	2/500	1/500 (4/1000)
9	$T_g = 0.001s$ $t_r = 0.0001s$ $D_{iperf} = 5m$ $D_{rampe} = 2.75Mb/s$	3/500	1/500 (5/1000)
10	$T_g = 0.001s$ $t_r = 0.0001s$ $L_b = 10$ octets $D_{iperf} = 5m$ $D_{rampe} = 2.75Mb/s$	3/500	1/500 (5/1000)
11	$T_g = 0.001s$ $t_r = 0.0001s$ $L_b = 50$ octets $D_{iperf} = 5m$ $D_{rampe} = 2.75Mb/s$	3/500	1/500 (5/1000)
12	$T_g = 0.001s$ $t_r = 0.0001s$ $L_b = 100$ octets $D_{iperf} = 5m$ $D_{rampe} = 2.75Mb/s$	3/500	1/500 (5/1000)
13	$D = 10 m$ $D_{rampe} = 3.85Mb/s$	9/500	2/500 (15/1000)
14	$D=10 m$ $T_g = 0.001s$ $t_r = 0.0001s$ $D_{rampe} = 3.85Mb/s$	10/500	2/500 (17/1000)
15	$D = 10 m$ $T_g = 0.001s$ $t_r = 0.0001s$ $L_b = 10$ octets $D_{rampe} = 3.85Mb/s$	10/500	2/500 (17/1000)
16	$D = 10 m$ $T_g = 0.001s$ $t_r = 0.0001s$ $L_b = 50$ octets $D_{rampe} = 3.8Mb/s$	10/500	2/500 (17/1000)

17	$D = 10$ m $T_g = 0.001$ s $t_r = 0.0001$ s $L_b = 100$ octets $D_{rampe} = 3.8$ Mb/s	10/500	2/500 (18/1000)
18	$D = 10$ m $T_g = 0.001$ s $t_r = 0.0001$ s $L_b = 100$ octets $D_{rampe} = 1.6$ Mb/s V=Non	47/500	16/500 (86/1000)
19	$D = 10$ m $D_{iperf} = 5$ m $D_{rampe} = 1.3$ Mb/s	54/500	5/500 (89/1000)
20	$D = 10$ m $T_g = 0.001$ s $t_r = 0.0001$ s $D_{iperf} = 5$ m $D_{rampe} = 1.3$ Mb/s	54/500	6/500 (91/1000)
21	$D = 10$ m $T_g = 0.001$ s $t_r = 0.0001$ s $L_b = 10$ octets $D_{iperf} = 5$ m $D_{rampe} = 1.3$ Mb/s	54/500	6/500 (91/1000)
22	$D = 10$ m $T_g = 0.001$ s $t_r = 0.0001$ s $L_b = 50$ octets $D_{iperf} = 5$ m $D_{rampe} = 1.3$ Mb/s	54/500	6/500 (91/1000)
23	$D = 10$ m $T_g = 0.001$ s $t_r = 0.0001$ s $L_b = 100$ octets $D_{iperf} = 5$ m $D_{rampe} = 1.3$ Mb/s	56/500	6/500 (91/1000)
24	$D = 10$ m $T_g = 0.001$ s $t_r = 0.0001$ s $L_b = 100$ octets $D_{iperf} = 5$ m $D_{rampe} = 0.8$ Mb/s V = Non	118/500	34/500 (229/1000)
25	$D = 10$ m $T_g = 0.001$ s $t_r = 0.0001$ s $L_b = 100$ octets $D_{iperf} = 5$ m	6642/30000	1997/30000 (13222/60000)

	$D_{rampe} = 0.8\text{Mb/s}$ $V = \text{Non}$ $n = 2$		
26	$D = 10\text{ m}$ $T_g = 0.001\text{s}$ $t_r = 0.0001\text{s}$ $L_b = 100\text{ octets}$ $D_{iperf} = 5\text{m}$ $D_{rampe} = 0.8\text{Mb/s}$ $V = \text{Non}$ $n = 3$		680/30000 (19415/90000)
27	$D = 10\text{ m}$ $T_g = 0.001\text{s}$ $t_r = 0.0001\text{s}$ $L_b = 100\text{ octets}$ $D_{iperf} = 5\text{m}$ $D_{rampe} = 0.8\text{Mb/s}$ $V = \text{Non}$ $n = 4$		171/30000 (28101/120000)
28	$D = 10\text{ m}$ $T_g = 0.001\text{s}$ $t_r = 0.0001\text{s}$ $L_b = 100\text{ octets}$ $D_{iperf} = 5\text{m}$ $D_{rampe} = 0.8\text{Mb/s}$ $V = \text{Non}$ $n = 5$		38/30000 (31090/150000)

Table 10- Comparaison UDP et RAP (canal réel)

3.7.1.5 Interprétations et observations

Le client envoie des trames au serveur à travers le canal radio réel (canal 10). La distance à l'origine entre client et serveur (portables 1 et 2) est de 3.5 mètres et sont disposés en ligne de vue; aucun trafic sur le canal radio adjacent (canal 11) du réseau IperfManip n'est généré; le canal 10 bénéficie alors de toute la bande disponible (5.2 Mbps), et aucune perte de paquet n'est observée (l'ensemble des 500 paquets générés par le client aboutissent au serveur) (manip 1). On obtient les mêmes résultats quand on augmente la fréquence de génération des messages (1 message chaque 0.001s, dans le cas de RAP on diminue le temps de répétition). Quand on augmente la longueur du champ données (une partie de bourrage de longueur 10 octets est ajoutée, puis 50 octets et enfin 100 octets) (manip 2 à 5).

Des pertes commencent à être observées quand le canal 11 adjacent au canal 10 commence à interférer avec ce dernier : du trafic est généré avec iperf sur ce canal 11 (manip 6) et la bande passante est alors partagée entre les deux canaux. La bande passante disponible entre le client et le serveur diminue (elle est aux alentours de 2.9 Mbps); 2 paquets parmi 500 n'aboutissent pas au serveur. Pour RAP, chaque paquet généré est répété 2 fois ($n=2$ au début) donc au total on a 1000 répétitions: 3 de ces répétitions n'aboutissent pas au serveur, d'eux d'entre elles étant les répétitions d'un même paquet et donc un paquet au total est perdu (un paquet est perdu si toutes

ses répétitions sont perdues). Pour les manipulations 7 à 12, on augmente le débit du trafic généré ainsi que la longueur du paquet et on diminue le temps entre 2 paquets et entre deux répétitions mais les pertes ne varient pas significativement par rapport à la manip 6.

La distance entre client et serveur est maintenant de 10m (manip 13), la bande passante disponible est aux alentours de 3.9 Mbps ; 9 paquets parmi 500 sont perdus en UDP pour 2 paquets en RAP (15 répétitions). Les mêmes résultats sont observés dans les manipulations 14 à 17 en diminuant T_g et t_r et en augmentant la longueur des paquets générés.

Dans la manip 18, les deux portables ne sont plus en ligne de vue; un obstacle (un paravent en fer forgé) les sépare et 47 paquets sont perdus en UDP pour 16 en RAP (la bande disponible est de 1.3 Mbps).

Revenons à la ligne de vue et à la distance de 10m entre client et serveur mais cette fois un trafic est généré sur le canal 11 (manip 19 à 23): aux alentours de 54 paquets perdus en UDP pour 6 en RAP même en modifiant T_g , t_r et L_b .

Le plus grand nombre de paquets perdus est observé dans la manip 24: la distance entre client et serveur est de 10m, ils ne sont pas en ligne de vue et un trafic est généré sur le canal interférent (la bande passante est aux alentours de 0.8Mb/s): 118 paquets sont perdus en UDP pour 49 paquets en RAP (268 répétitions).

De là, le scénario 24 sera adopté pour une comparaison du protocole UDP avec le protocole RAP: un plus grand nombre de paquets sera généré et envoyés depuis le client vers le serveur : 30,000 paquets sont générés à partir de la manip 25. Le nombre n de répétitions (pour RAP) est ensuite augmenté dans les manipulations 26 à 28 ($n = 3, 4$ et 5 respectivement).

Pour comparer la fiabilité de RAP à celle d'UDP, on calcule le taux d'erreurs paquets (PER pour Packet Error Rate), dans chacune des manipulations du tableau 10, pour les deux protocoles (PER étant la métrique indicatrice de la qualité du lien Wifi considérée dans ces expérimentations).

Prenons la manip numéro 25: pour UDP, la probabilité de pertes est de 22,14% (6642 paquets perdus parmi 30000 $\rightarrow 6642/30000 = 0,2214$).

Pour RAP avec un nombre de répétitions de 2, la probabilité de perte est de 6,65%, qui est la probabilité de perdre toutes les répétitions d'un même paquet (les 2 trames répétées) ($1997/30000 = 0,0665$).

Ceci s'explique par le fait que la probabilité de perdre 2 trames UDP correspond à la probabilité conjointe de perdre la première et la probabilité de perdre la seconde et est égale à $0,2214^2 = 4,9\%$ (une probabilité de 6,65% est retrouvée avec RAP pour $n = 2$).

Avec $n = 3$ pour RAP (manip 26), on a une probabilité de pertes de 2,26% (680 trames sur 30000 sont perdues): probabilité de perdre 3 trames UDP= $(0,2214)^3 = 1,08\%$ (qui est environ la probabilité de perte de RAP).

Pour $n=4$ (manip 27), PER RAP= 0.57%, et PER RAP= 0.12% pour $n=5$ (manip 28).

On remarque logiquement que quand on augmente le nombre de répétitions, la probabilité de pertes diminue.

Le protocole UDP est un protocole sans connexion et donc n'est pas fiable pour des conditions de transmissions difficiles. Le protocole RAP ajoute une certaine fiabilité au

protocole UDP, il ne nécessite aucun acquittement de la part du récepteur et peut alors être utilisé en mode broadcast.

3.7.2 Identification des paramètres du canal WiFi

Les protocoles UDP et RAP ont été simulés, dans le paragraphe 3.7.1, sur un canal radio 802.11 réel. Différents paramètres doivent être identifiés pour pouvoir modéliser ce canal par un modèle de Gilbert-Elliot. La simulation des protocoles UDP et RAP sur un canal modélisé permettra d'évaluer leurs performances et de comparer leurs fiabilités tout en ayant la flexibilité de modifier les différents paramètres et étudier leurs impacts sur le fonctionnement des deux protocoles.

Le paragraphe 3.3 présente le modèle de canal de Gilbert-Elliot et la méthode de simulation « Optimisée » proposée par J. Ebert et A. Willig [23] (simulation au niveau paquet d'une communication radio). Ce modèle considère deux états du canal: « Bon » et « Mauvais » et la durée de séjour dans un certain état suit une loi géométrique de paramètre p .

Cette méthode de simulation sera adoptée dans nos simulations des protocoles UDP et RAP, et on calcule tous les paramètres de ce canal de Gilbert-Elliot d'après les simulations faites sur le canal réel.

Commençons par calculer la taille du paquet envoyé depuis le client vers le serveur: les données envoyées depuis la couche applicative du client vers le serveur sont de 120 octets (partie fixe + partie de bourrage) (cas 24 du tableau 10); on ajoute à cette longueur les 8 octets d'entête UDP et les 20 octets d'entête IP; la longueur totale du paquet considéré sera alors de 148 octets soit 1184 bits.

Pour le taux d'erreur binaire des deux états du canal, et en considérant dans un premier temps le modèle simple de Gilbert-Elliot (tous les paquets envoyés durant le mauvais état sont perdus et ceux envoyés durant le bon état aboutissent au destinataire), le taux d'erreur binaire du mauvais état (noté BER_m - cf. figure 23) sera alors de 0.05 (ceci impliquera un PER_m de 1 d'après la formule $PER=1-(1-BER_m)^t$, tel que t est la longueur du paquet en bits, soit 1184 bits) et le taux d'erreur binaire du bon état, noté BER_b , sera égal à 0 (impliquant un PER de 0).

D'autre part, dans le modèle optimisé de Gilbert-Elliot, les durées de séjour dans le bon et le mauvais état suivent une loi géométrique de paramètre p . Ce paramètre peut être calculé d'après les histogrammes tracés à partir des fichiers XML de la simulation sur canal réel (ces fichiers XML contiennent les données brut de la simulation; l'état de chaque paquet ou répétition est indiqué par «faux » si le paquet est perdu et par « vrai » s'il a abouti); dans le cas du modèle simple de Gilbert-Elliot, ce paramètre p est calculée d'après les histogrammes des nombres de paquets consécutifs sans erreurs (pour le bon état) et le nombre de paquets consécutifs erronés (pour le mauvais état);

Voici un extrait du fichier XML, de la simulation UDP sur canal réel :

```
<root>
<META>
Distance=10m (pas en ligne de vue), période=0.001s, nombre de répétitions=1, longueur
totale du paquet avec bourrage: 148 octets
</META>

<NumPaquet n="1">
<NumRep n="1">
```

```

<Received>vrai</Received>
</NumRep>
</NumPaquet>

<NumPaquet n="2">
<NumRep n="1">
<Received>vrai</Received>
</NumRep>
</NumPaquet>

<NumPaquet n="3">
<NumRep n="1">
<Received>vrai</Received>
</NumRep>
</NumPaquet>
...

```

Pour RAP avec un nombre de répétitions de 3:

```

<root>
<META>
Distance=10m (pas en ligne de vue), période=0.001s, nombre de répétitions=3, rythme
des répétitions=0.0001s, longueur totale du paquet avec bourrage: 148 octets
</META>

<NumPaquet n="1">
<NumRep n="1">
<Received>vrai</Received>
</NumRep>
<NumRep n="2">
<Received>vrai</Received>
</NumRep>
<NumRep n="3">
<Received>vrai</Received>
</NumRep>
</NumPaquet>

<NumPaquet n="2">
<NumRep n="1">
<Received>vrai</Received>
</NumRep>
<NumRep n="2">
<Received>vrai</Received>
</NumRep>
<NumRep n="3">
<Received>vrai</Received>
</NumRep>
</NumPaquet>
...

```

Les histogrammes sont tracés avec le logiciel Matlab [171]. Un outil (toolbox) nommé `xml_toolbox` présent sous Matlab, permet d'analyser des fichiers XML et d'en extraire les données. Ceci permet de relever le nombre consécutifs de paquets «vrai» et le nombre consécutifs de paquets «faux» et de les sauvegarder dans un fichier.

On montre dans la figure 29 suivante les histogrammes tracés dans le cas du canal réel (l'axe des x détermine le nombre de paquets consécutifs et l'axe des y le nombre de fois que ce nombre consécutif a été observé) pour les bons et les mauvais états (les graphes de gauche concernent les paquets consécutifs dans le bon état et ceux de droite les paquets consécutifs erronés du mauvais état), et ce pour les deux cas d'UDP et RAP (avec un nombre n de répétitions égal à 3):

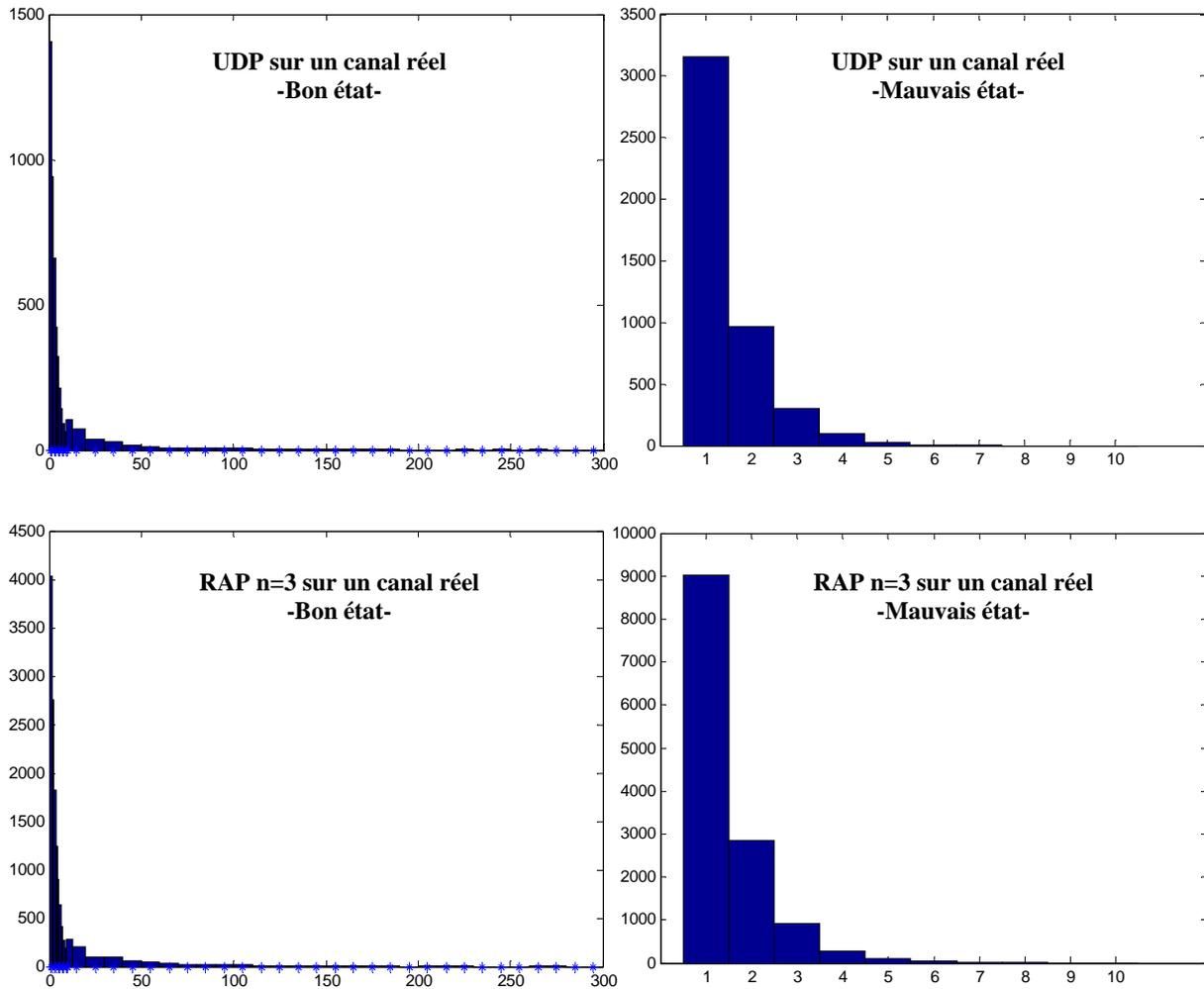


Figure 29- Histogrammes des bons et mauvais états de la simulation d'UDP et de RAP sur un canal réel

Un nombre de paquets consécutifs reçus sans erreurs plus grand que celui des paquets consécutifs erronés est toujours observé: par exemple (dans le cas d'UDP), 265 paquets consécutifs non erronés ont été observés; en RAP ($n = 3$), 280 paquets ont été observés. Par contre, dans UDP, on a un maximum de 7 paquets consécutifs erronés pour 8 paquets consécutifs erronés dans RAP ($n = 3$).

Pour en déduire le paramètre p de la loi géométrique, la fonction sous matlab `gkdeb()` est utilisée; elle permet, à partir d'un histogramme, de déterminer la moyenne et la variance d'une loi géométrique. La moyenne d'une loi géométrique étant l'inverse de son paramètre p (moyenne= $1/p$) d'où on peut en déduire p .

$p_0 = 0.00058213$ pour le mauvais état (le mauvais état étant l'état0) et $p_1 = 0.00016577$ pour le bon état (le bon état étant l'état1).

Récapitulons les paramètres du modèle de canal de Gilbert-Elliot (simplifié et optimisé) calculés d'après les simulations du canal réel par le schéma de la figure 30 suivante:

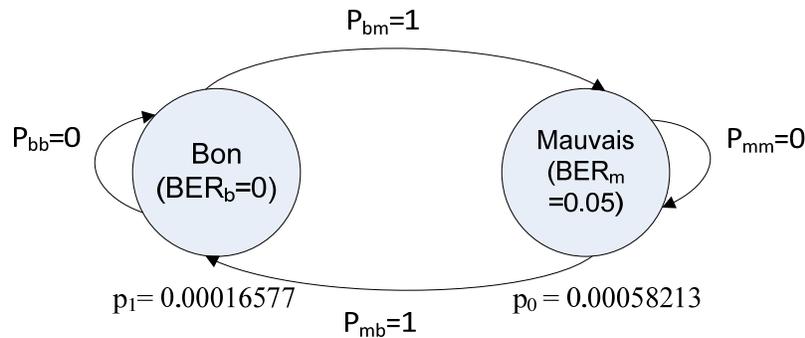


Figure 30- Identification des paramètres du canal WiFi

Dans ce modèle simple, et d'après les histogrammes des paquets consécutifs erronés et des paquets consécutifs sans erreur, les probabilités de transition du bon état vers le mauvais état (P_{bm}) et vice versa (P_{mb}) sont égales à 1: le canal reste dans le mauvais état pendant X bits (qui est la durée de séjour dans ce mauvais état et qui suit une loi géométrique de paramètre p_0); après ces X bits, il bascule directement au bon état; de même pour le bon état qui bascule au mauvais état après X bits suivant une loi géométrique de paramètre p_1 . Le canal ayant ces paramètres est considéré un «canal de mauvaise qualité».

Dans un second temps, on considère le modèle optimisé de Gilbert-Elliott mais cette fois en considérant les probabilités de transition d'état. En d'autres termes, on considère un PER différent de 1 dans le mauvais état (les paquets envoyés durant le mauvais état ne sont pas tous perdus), tandis qu'un PER de 0 est toujours considéré pour le bon état (tous les paquets envoyés durant le bon état aboutissent à leur destination). On évalue par ce scénario les protocoles UDP et RAP pour différents types de canaux : canal de qualité moyenne et canal de bonne qualité (celui de mauvaise qualité étant déjà montré dans la figure 30).

Pour cela, et pour un canal de qualité moyenne, on considère un BER de 0 dans le bon état et un BER de 0.001 dans le mauvais état (BER = 0.001 implique PER = 0.69; 69% des paquets envoyés durant le mauvais état sont perdus).

Pour un canal de bon état, on considère un BER de 0 dans le bon état et un BER de 0.0005 dans le mauvais état (BER = 0.0005 implique PER = 0.44; 44% des paquets envoyés durant le mauvais état sont perdus). Dans les deux cas du canal, $p_0 = 0.00058213$ pour le mauvais état et $p_1 = 0.00016577$ pour le bon état, p_0 et p_1 étant les paramètres des lois géométriques des temps de séjour dans l'état0 et dans l'état1 respectivement.

On présente dans le paragraphe suivant, les résultats de simulation obtenus pour les protocoles UDP et RAP sur un canal modélisé de Gilbert-Elliott avec les différents paramètres calculés dans ce paragraphe.

3.7.3 Simulation sur un modèle de canal de Gilbert-Elliott

3.7.3.1 Description de la simulation

Pour simuler les deux protocoles RAP et UDP et comparer leur fonctionnement dans le paragraphe 3.7.1, un canal réel a été considéré. Pour un canal simulé, on considère le modèle simplifié de Gilbert-Elliott (cf. paragraphe 3.3) et les paramètres calculés dans le paragraphe

3.7.2 à partir des simulations sur le canal réel. On s'intéresse dans RAP aux taux de pertes paquets (PER). Au niveau du récepteur, le calcul du PER permettra d'estimer les paramètres du modèle du canal et de déterminer sa nature : bon, moyen ou mauvais. Cette indication pourra être exploitée par l'application embarquée afin d'adapter les messages de l'interface homme-machine en fonction de ce contexte. Cette aptitude devra permettre d'indiquer à l'utilisateur le niveau de confiance qu'il peut accorder à son dispositif d'assistance.

Le modèle optimisé du canal de Gilbert-Elliot a les caractéristiques suivantes:

- Deux états: état0 (mauvais) et état1 (bon) ; la durée de séjour dans chaque état suit une loi géométrique de paramètre p_s calculé dans le paragraphe 3.7.2 à partir des histogrammes du canal réel. $p_0 = 0.00058213$ pour l'état0 et $p_1 = 0.00016577$ pour l'état1.
- Taille du paquet considéré (en nombre de bits) = 1184 bits (cf. paragraphe 3.7.2)
- $BER_m = 0.05$ pour le mauvais état (état0) et $BER_b = 0$ pour le bon état (état 1).
- Une fois dans l'état 0, on reste dans cet état pendant X bits (X suit une loi géométrique de paramètre p_0 déjà calculé), puis on passe à l'état 1 ayant un BER = 0; on reste dans cet état pendant X' bits (X' suit une loi géométrique de paramètre p_1 déjà calculé) puis on passe à l'état 1 ayant un BER = 0.05.

Les résultats de la simulation sur OMNeT++ de ce canal de Gilbert-Elliot et des protocoles UDP et RAP sont récapitulés dans le tableau 11 ci-dessous, ils montrent que le protocole RAP est clairement plus fiable qu'UDP en termes de taux de paquets perdus.

3.7.3.2 Tableau comparatif (UDP vs. RAP sur un canal de Gilbert-Elliot)

UDP est simulé sur le canal modélisé de Gilbert-Elliot ($n=1$, nombre de répétitions du paquet pour UDP, chaque paquet est envoyé en une seule copie). Pour RAP, on fait varier le nombre n de répétitions des trames: $n = 2$ puis 3, 4 et 5. Le tableau 11 suivant récapitule les résultats de simulation sur un canal modélisé de Gilbert-Elliot (optimisé de mauvaise qualité):

Paramètre	Taux de perte UDP	Taux de perte RAP ⁽²⁾
n=1	7875/30000	
n=2		4036/30000 (15849/60000)
n=3		2023/30000 (23821/90000)
n=4		1085/30000 (31706/120000)
n=5		565/30000 (39781/150000)

Table 11- UDP vs. RAP (canal Gilbert-Elliot optimisé et de mauvaise qualité)

Le tableau 12 montre les résultats obtenus pour le canal de "qualité moyenne", BER= 0.001 dans le mauvais état (PER= 0.69), et pour le canal de "bonne qualité", BER=0.0005 (PER= 0.44); ces résultats sont donnés pour le protocole UDP et pour le protocole RAP avec $n = 3$.

² Nombre de répétitions perdues

Paramètre	Taux de perte (canal de mauvaise qualité)	Taux de perte (canal de qualité moyenne)	Taux de perte avec (canal de bonne qualité)
n=1 (UDP)	7875/30000 (7875/30000)	5461/30000 (5461/30000)	3479/30000 (3479/30000)
n=3	2023/30000 (23821/90000)	681/30000 (16432/90000)	174/30000 (10463/90000)

Table 12- Canal de mauvaise, moyenne et bonne qualité

3.7.3.3 Histogrammes du canal de mauvaise qualité de Gilbert-Elliot

On montre dans la figure 31 suivante les histogrammes tracés dans le cas du canal de Gilbert-Elliot de mauvaise qualité (l'axe des x détermine le nombre de paquets consécutifs et l'axe des y le nombre de fois que ce nombre consécutif a été observé) pour les bons et les mauvais états (les graphes de gauche concernent les paquets consécutifs dans le bon état et ceux de droite les paquets consécutifs erronés du mauvais état), et ce pour les deux cas d'UDP et RAP (avec un nombre n de répétitions égal à 3):

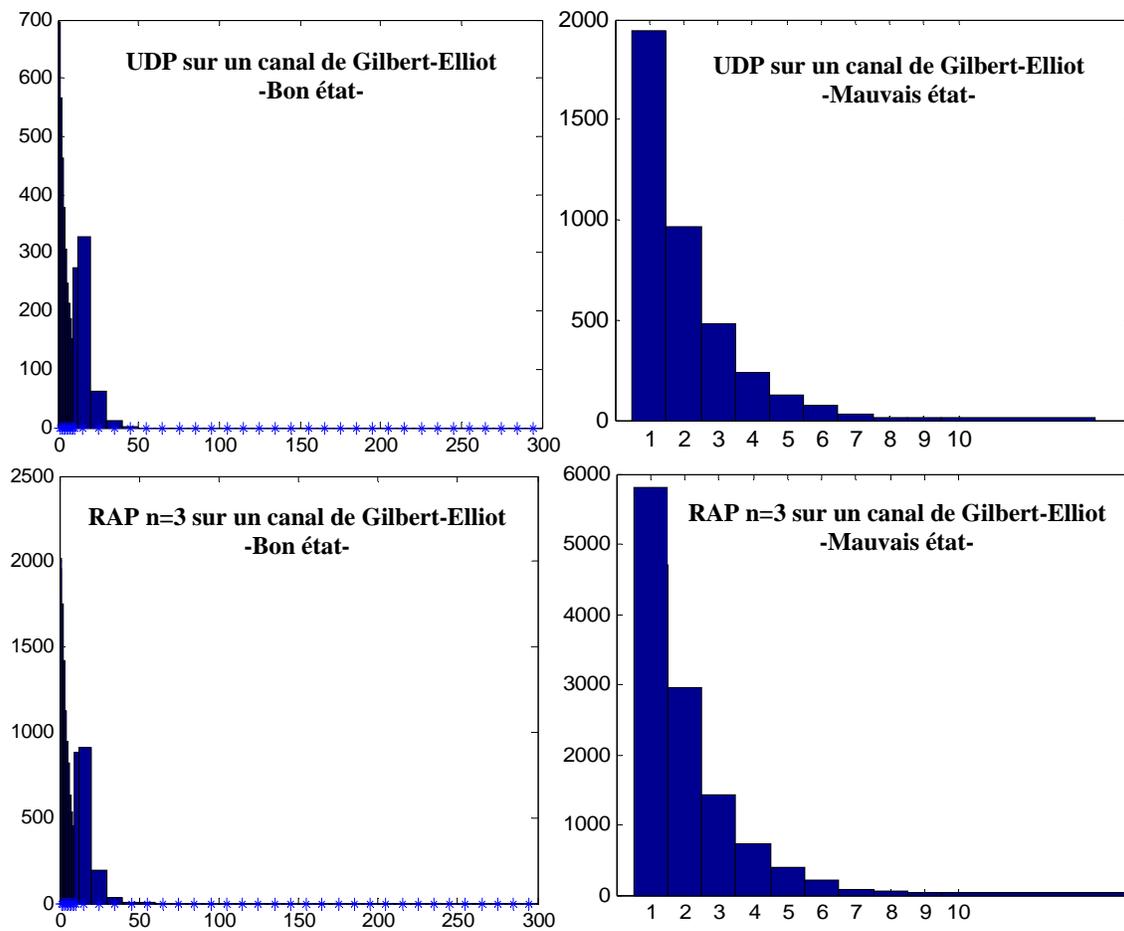


Figure 31- Histogrammes des bons et mauvais états de la simulation d'UDP et de RAP sur un canal de Gilbert-Elliot

3.7.4 Comparaison UDP - RAP

On récapitule dans le tableau 13 suivant les résultats de simulation des deux protocoles UDP et RAP sur un canal réel puis sur un canal de Gilbert-Elliot de qualité moyenne.

Protocole	UDP		RAP (n=3)	
	Canal Réel	Canal Simulé	Canal Réel	Canal Simulé
Longueur du paquet (octets)	148	148	148	148
Paquets générés	30000	30000	30000	30000
Répétitions générées	30000	30000	90000	90000
Paquets perdus	6642	5461	680	681
Répétitions perdues	6642	5461	19415	16432
PER	$6642/30000=0.2214$	$5461/30000=0.182$	$680/30000=0.0226$	$681/30000=0.0227$

Table 13- RAP vs. UDP (canal réel et canal simulé)

3.7.5 Analyse

D'après les simulations faites sur le canal réel et sur le canal simulé de Gilbert-Elliot, le protocole RAP proposé semble être bien adapté au genre de trafic qu'on rencontre dans RAMPE/INFOMOVILLE précisément pour la transmission en mode broadcast des messages urgents envoyés depuis la borne vers les PDAs à travers une liaison radio WiFi. Le mécanisme de redondance des paquets qu'il propose, rend la communication plus fiable, en permettant un taux d'erreur paquets inférieur à celui que subit le protocole UDP. Ce taux de perte paquets (PER) qui pourra être calculé par le serveur recevant les trames répétées et numérotées, lui permettra d'identifier le type de canal, et pourra servir à élaborer un indicateur de la qualité du lien WiFi qui sera exploité au niveau de l'application embarquée du PDA, lui permettant de fournir à l'utilisateur un degré de confiance en son dispositif d'assistance.

Le PER calculé pourra être de même communiqué au client, par des trames statistiques envoyées depuis le serveur; en fonction de la valeur de ce PER, le client peut augmenter ou diminuer le nombre de répétitions (c.à.d la valeur du paramètre n du protocole RAP désignant le nombre de fois de répétition d'un paquet), évitant un grand nombre de répétitions quand le canal est d'une bonne qualité et vice versa.

Chapitre 4

Positionnement et guidage dans RAMPE/INFOMOVILLE

4.1 Introduction

Le déplacement dans l'environnement des systèmes de transports publics ainsi que le cheminement piétonnier pour y accéder représentent, pour les personnes à déficience visuelle, des tâches complexes à pratiquer. La mise en place d'un système d'aide disposant d'un module de positionnement et de guidage devrait permettre de faciliter certaines de ces tâches.

Dans la version actuelle de RAMPE/INFOMOVILLE, l'utilisateur de l'application peut faire sonner la borne installée dans une station de bus afin de repérer auditivement sa position et s'orienter vers cette station. Toutefois, la PAM peut être loin de la station et ne pas arriver à entendre la sonnerie surtout lorsqu'il est dans un milieu bruyant (aux alentours de 80dBa mesuré en moyenne durant les expérimentations effectuées à Lyon). D'autre part, plusieurs trajets peuvent exister pour aboutir à la station désirée, des obstacles peuvent être présents et empêcher un trajet en ligne droite. Il semble donc utile d'intégrer dans le système RAMPE/INFOMOVILLE un service de localisation et d'orientation pour accompagner et assister les PAM. Ce système doit être fiable de façon à assister efficacement l'utilisateur sans lui faire prendre de risque. Il doit aider la personne à s'orienter vers sa destination en évitant autant que possible les trajets difficiles encombrés tout en fournissant les informations de localisation et de guidage au bon moment et d'une façon compréhensible.

Plusieurs travaux ont porté sur la localisation pour l'aide et l'assistance au déplacement des personnes malvoyantes. Les systèmes proposés se basent pour la plupart sur la technique de positionnement GPS et se limitent donc à la localisation en outdoor. Certains systèmes expérimentaux utilisent les ondes radio ou infra-rouge comme support à la localisation en milieu indoor. Le système «Strider» [49] développé en Californie utilise le GPS et des cartes de plusieurs villes des Etats-Unis afin de localiser la PAM et lui donner des informations sur son environnement; «MoBic» (Mobility of Blind and Elderly People Interacting with Computers), projet développé à l'université Magdeburg en Allemagne [121] a proposé d'utiliser le GPS différentiel (DGPS) et un module de détermination de l'orientation. Un autre système basé sur le GPS a été développé au Japon par l'équipe de Makino [122] à l'université de Niigata. Il utilise le téléphone mobile comme interface entre l'utilisateur et le serveur de localisation et de guidage contenant les informations géographiques; le «Personal Guidance System» proposé par Loomis en 1998, utilise le DGPS [49]; en 2008, la compagnie HumanWare, basée au Canada et spécialisée dans les dispositifs d'assistance aux personnes aveugles propose un GPS parlant appelé «Trekker Breeze» [50]. Il a été conçu pour être utilisé d'une seule main. Parmi les informations vocales fournies par le système, on peut citer les noms des rues, des points d'intérêt, l'annonce du prochain arrêt dans le bus.

Pour le service de localisation et de guidage intégré dans RAMPE/INFOMOVILLE on a choisi d'utiliser la technologie WiFi pour les raisons déjà exprimées précédemment ; à savoir utiliser la même technologie que pour la communication de façon à réutiliser les mêmes infrastructures, utiliser des technologies génériques disponibles sur les PDA ou smartphones (aujourd'hui on dispose de GPS, WiFi, Bluetooth), pouvoir effectuer une localisation en indoor

et en outdoor, permettre une précision suffisante, avoir une couverture suffisante en extérieur avec un nombre limité d'équipements d'infrastructure. L'utilisation de WiFi n'est pas exclusive. Elle pourrait être associée au GPS en outdoor. Le GPS seul n'est cependant pas suffisant en indoor. La technologie Bluetooth pourrait être employée mais elle nécessiterait l'installation d'une infrastructure supplémentaire et sa couverture est plus faible. Nous n'avons pas retenu la technologie Zigbee car il n'y a généralement pas de carte zigbee dans un PDA ou un smartphone. Nous n'avons pas retenu la localisation par système de communication cellulaire à cause de son manque de précision.

4.2 Principes d'un système de localisation radio et infrastructure nécessaire

Comme indiqué dans le chapitre 2, il existe plusieurs méthodes de localisation utilisant WiFi. Cependant peu de méthodes permettent d'apporter une précision suffisante pour une application comme RAMPE/INFOMOVILLE.

Les systèmes comme « AirLocation » [76] et « AeroScout » [77] utilisent la technique TDoA avec WiFi mais nécessitent du hardware supplémentaire (des points d'accès ou des récepteurs spécifiques) pour mesurer cette différence de temps. D'autre part ces méthodes, bien qu'elles aient montré une bonne performance dans les zones outdoor, ne sont pas assez performantes en indoor à cause des interférences multi-trajets [52].

La méthode statistique basée sur les mesures de la puissance des signaux reçus (RSS) et sur la technique d'empreinte radio en WiFi offre les caractéristiques recherchées en termes de précision et ne nécessite pas d'infrastructure spécifique supplémentaire à l'exception du serveur de localisation. Aussi avons-nous retenu cette technique. Nous en avons décrit le principe dans le chapitre 2. Cette méthode a été proposée en 2000 par Bahl and Padmanabhan dans un premier système appelé RADAR [29, 38] utilisant les ondes radiofréquences émises par des interfaces réseaux. Elle consiste en deux phases: la première phase appelée « Calibrage » ou « Apprentissage », consiste à prendre des mesures de RSSI et à sauvegarder ces mesures dans une base de données, et la deuxième phase appelée « Localisation » consiste à calculer la position des terminaux mobiles à partir des mesures sauvegardées dans la base de données. On parle dans la littérature de « machine learning » qui consiste en un apprentissage automatique à partir d'exemples [155].

Nous détaillons dans les sections suivantes les aspects pratiques des deux phases de la méthode d'empreinte digitale en précisant les éléments nécessaires de chacune.

4.2.1 Calibrage

Les éléments nécessaires de cette phase sont :

- Un plan du site (différents formats sont possibles : JPG, Autocad, GIF, BMP, ... selon le logiciel utilisé)
- Des points d'accès répartis sur le site
- Un ordinateur équipé d'une carte WiFi avec le logiciel de calibrage installé et communiquant avec une base de données (carte d'empreinte radio)
- Un serveur de base de données (le logiciel de calibrage et la base de données peuvent être présents sur le même serveur).

La phase de calibration consiste à se déplacer sur l'ensemble du site avec l'ordinateur équipé de l'interface WiFi. Au cours du déplacement des mesures sont effectuées régulièrement. L'ordinateur se trouvant à chaque fois dans la zone de couverture d'un ou de plusieurs points d'accès (APs) (sans être nécessairement associé à un AP sauf s'il doit communiquer avec la base de données connectée au réseau si cette base de données n'est pas installée sur le même ordinateur), le logiciel de calibration mesure les puissances des différents signaux reçus des APs (RSSs) et les sauvegarde dans la base de données. On appelle échantillon l'ensemble formé des adresses MAC des APs et des puissances des signaux reçus de ces APs, ainsi que les coordonnées cartésiennes du point du site où la mesure a été effectuée. Les mêmes étapes sont répétées pour plusieurs points du site.

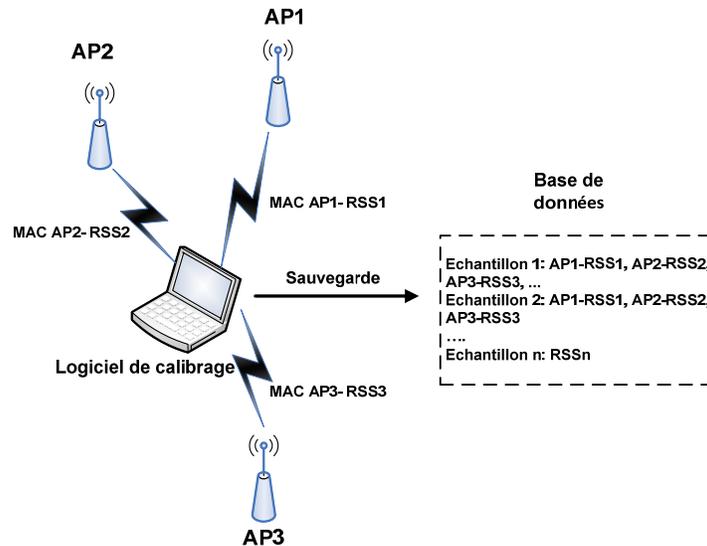


Figure 32- Phase de calibration de la méthode d'empreinte digitale

4.2.2 Positionnement

Pour cette phase, les éléments suivants doivent être présents :

- Un plan du site déjà calibré durant la première phase (la carte d'empreinte radio du site)
- Un ordinateur sur lequel est installé le logiciel de positionnement. Cet ordinateur doit être connecté au réseau (connexion filaire ou connexion sans fil et dans ce dernier cas il est associé à un AP) afin de pouvoir communiquer avec le terminal mobile à localiser. Toutefois, le logiciel de calibration, le logiciel de positionnement et la base de données peuvent être installés sur le même serveur.
- Un/des terminaux mobiles à localiser ayant une carte WiFi.

Le terminal mobile, dont on cherche la position, mesure les RSSI des APs dans la zone de couverture desquels il se situe. Il envoie ces mesures au logiciel de positionnement. Ce terminal mobile doit alors s'associer à un AP présent sur le site (c.à.d se connecter au réseau) afin de pouvoir communiquer avec le logiciel de positionnement installé sur un serveur lui aussi connecté au réseau.

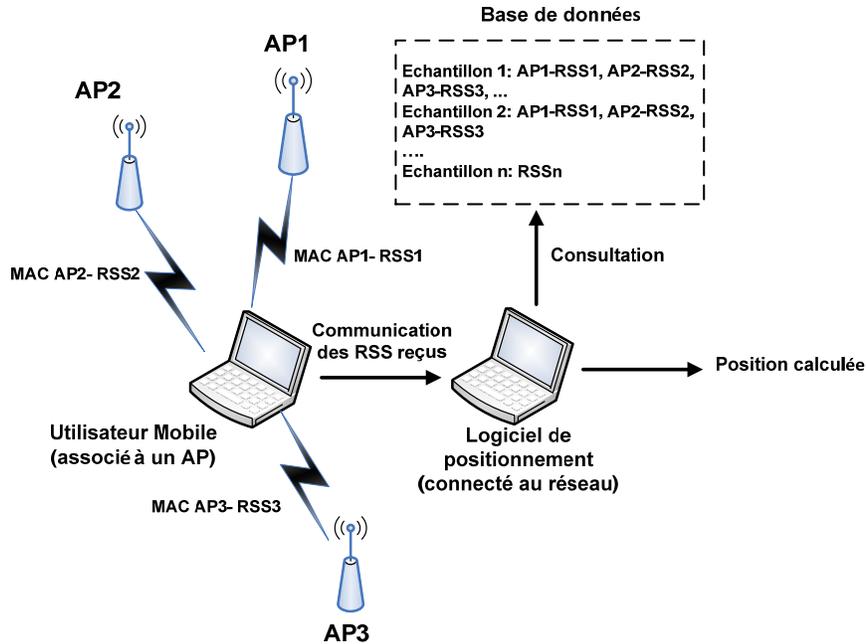


Figure 33- Phase de localisation de la méthode d'empreinte radio

Quand le logiciel de positionnement reçoit les mesures (adresses MAC APs- RSSI) de la part des clients mobiles, il compare ces mesures aux mesures références (points échantillons) déjà apprises durant la phase de calibrage, afin d'en estimer la position de l'objet.

4.2.2.1 Algorithmes de positionnement

Cependant, et vu les variations non-linéaires des RSSI et la susceptibilité des ondes radio aux erreurs et à différents facteurs qui peuvent affecter leur qualité, la simple comparaison des mesures reçues du client mobile avec les mesures prises dans un temps précédent et qui sont sauvegardées dans la base données ne sera pas précise. Il est donc nécessaire d'utiliser certains algorithmes ou méthodes pour l'estimation de la position afin de bien exploiter les mesures relevées durant la phase de calibrage [63]. En effet, ces mesures n'ont été effectuées qu'en certains points et il faut interpoler au mieux en tous les points de la zone de localisation.

Plusieurs algorithmes sont utilisés à ce propos : des algorithmes simples comme celui des k plus proches voisins (en anglais k -Nearest Neighbor ou k -NN) (appelé par Roos, Misikangas et Sievänen [155] les méthodes "case-based"), aux méthodes statistiques plus complexes comme les modèles de Markov cachés (Hidden Markov model ou HMM) et les approches bayésiennes.

L'algorithme k -NN calcule la distance euclidienne [150] entre les puissances des signaux mesurées et celles sauvegardées dans la base de données. Supposons que les puissances transmises par l'objet mobile soient notées SS_i (puissance du signal reçu de l'AP _{i}). L'algorithme cherchera dans la base de données, les échantillons de la même série d'APs (soit AP₁, AP₂, AP₃ ... AP _{n}), et calculera, pour chaque échantillon trouvé, la distance euclidienne entre les puissances transmises par l'objet mobile et les puissances sauvegardées dans la base de données ss_i , distance qui est de la forme:

$$D = \left(\sum_{i=1}^n |SS_i - SS_i|^2 \right)^{1/2}$$

Pour déterminer la position de l'objet, les k échantillons ayant la plus petite distance aux mesures transmises par l'objet mobile sont retenus, la moyenne des coordonnées cartésiennes associées à ces k échantillons est calculée, et la position estimée. Des études ont montré qu'une bonne précision de localisation est obtenue avec une valeur de k égale à 4 [29]. Le système RADAR [38] utilise cet algorithme de Nearest Neighbor.

Le système Ekahau qui sera utilisé dans l'expérimentation du paragraphe 4.5 utilise, en plus de l'algorithme k-NN, une approche bayésienne (Maximum A Posteriori ou MAP distribution) et les modèles de Markov cachés avec l'algorithme de Viterbi pour l'estimation de position durant le mouvement. Le positionnement est alors basé sur l'historique des RSSI enregistrés durant la phase de calibrage ce qui augmentera la précision de localisation.

On explique l'approche bayésienne en donnant certaines notations, variables et équations:

On note par l la variable indiquant la position de l'objet et par o la variable d'observation (ou vecteur correspondant aux RSSI relevés durant la phase de calibrage). Les n échantillons de la base de données sont notés par l_i, o_i tel que $i \in \{1, \dots, n\}$.

Le modèle estime la probabilité de distribution de la variable o étant donné la valeur de la variable l ; on parle de la probabilité conditionnelle notée $p(o/l)$.

On applique la règle de Bayes pour obtenir la distribution à posteriori $p(l/o)$ [64, 65, 151, 152, 155] :

$$p(l/o) = \frac{p(o/l)p(l)}{p(o)} = \frac{p(o/l)p(l)}{\sum_{i=1}^n p(o/l_i)p(l_i)}$$

$p(l)$ étant la probabilité à priori que l'objet soit à l'endroit l , avant de connaître la valeur de la variable d'observation o .

$p(o)$ ne dépend pas de la variable d'endroit l et pourra être remplacée par une constante normalisée, dans les cas où seulement les probabilités relatives ou les rapports de probabilité sont requis.

La position correspondant à la probabilité maximale obtenue sera retenue pour l'estimation de position du client mobile par le serveur de positionnement.

En considérant des $p(l)$ uniformes, $p(o/l)$ peut déterminer la probabilité à posteriori $p(l/o)$ d'une certaine position de l'objet et donc il est important que le calcul de cette probabilité conditionnelle $p(o/l)$ (nommée fonction de vraisemblance ou likelihood function) soit le plus

précis possible. Deux méthodes possibles d'estimation de cette distribution statistique à partir d'observations sont la méthode des histogrammes et la méthode des noyaux ("Kernel method"). La méthode des noyaux est une méthode d'ajustement de distribution statistique non paramétrique à des observations, équivalente à une méthode d'histogramme lissé. Elle consiste à attribuer une fonction noyau (masse de probabilité) à chacun des vecteurs d'observations relevés pendant le calibrage pour une position donnée de l'objet. Dans ce cas, $p(o/l)$ sera égale à:

$$p(o/l) = \frac{1}{n_l} \sum_{i=1}^{n_l} K(o', o_i)$$

Tel que n_l désigne le nombre de vecteurs échantillons relevés pour la position l et K est la fonction noyau ; une fonction noyau très utilisée est la fonction Gaussienne qui est de la forme:

$$K_{\text{Gauss}}(o', o_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(o' - o_i)^2}{2\sigma^2}\right)$$

σ étant un paramètre ajustable qui spécifie la largeur du noyau autour de chaque échantillon de mesure.

Dans la méthode des histogrammes, on considère la variable d'observation o comme ayant un minimum min et un maximum max ; l'intervalle $(min - max)$ est divisé en k intervalles séparés (appelés "bins" en anglais). Pour simplifier les calculs, les intervalles peuvent être de même largeur w et disposés comme suit :

$$[min + i w, min + (i + 1) w] \text{ tel que } 0 \leq i < k \text{ et } w = (min - max) / k$$

On calcule la proportion d'observations comprises dans chaque intervalle. La probabilité des intervalles détermine la fonction $p(o/l)$. Cette probabilité correspond aux fréquences relatives des intervalles de l'histogramme.

D'autre part Ekahau se base sur les modèles de Markov cachés [71] pour estimer la position d'un client mobile quand il est en mouvement. Ce modèle permet de représenter un processus de Markov pour lequel certains états sont non observables ; des informations sur ces états peuvent être déduites de données observées.

Supposons que les différentes positions possibles d'un client mobile soient $\{l_0, \dots, l_n\}$ et que s_t désigne l'état (la position) du client mobile à l'instant t .

La probabilité de transition d'un état i à un état j est donnée par $a(i,j) = p(s_{t+1}=l_j / s_t=l_i)$.

$d(m) = p(s_0=m)$ est la probabilité d'être à l'état m à l'instant initial.

$\{o_1, \dots, o_j\}$ représentent les différentes observations relevées et $b(m, k) = p(o_t=k / s_t=m)$ désigne la probabilité que le client émette un signal $o = k$ lorsqu'il est dans l'état m à l'instant t .

Ainsi, les états s_t , les o_j ainsi que les probabilités $a(i,j)$, $b(m,k)$ et $d(m)$ caractérisent le modèle de Markov caché.

L'algorithme de Viterbi [174] permet d'estimer la séquence d'états $\{l_1, \dots, l_n\}$ la plus probable qui a engendré les observations obtenues, appelée "chemin de Viterbi".

La probabilité du chemin le plus probable atteignant l'état s_i à l'instant i est composée du chemin le plus probable atteignant s_m à l'étape $i-1$ et de la transition entre les deux états s_m et s_i et peut être calculée récursivement selon la formule :

$$p(o_1 \dots o_i)_{s_i} = \max_{s_m \neq i} (p(o_1 \dots o_{i-1})_{s_m} \times a(m,i) \times b(i, o_i))$$

Ainsi chaque état a un prédécesseur, ce qui servira à retrouver la séquence d'états ayant engendré les observations obtenues.

Le banc de test de l'expérimentation réalisé par Roos, Misikangas et Sievänen [155, 172] était le suivant : un étage de surface 40m×16 m avec dix APs utilisés. Des échantillons ont été enregistrés dans 155 endroits du site disposés sous forme de grille et espacés de 2m l'un de l'autre; de plus des échantillons ont été enregistrés dans 120 endroits situés au milieu des cellules de la grille. Ces expérimentations ont montré des erreurs d'estimation de position faibles en adoptant les techniques statistiques par rapport à l'algorithme k-NN ; d'autre part, la méthode des noyaux a montré des erreurs faibles par rapport à la méthode des histogrammes quand les observations d'un seul échantillon sont considérées, tandis que la méthode des histogrammes a donné de meilleurs résultats quand plusieurs échantillons sont utilisés (pour la méthode des histogrammes 5.4 m d'erreur avec un seul échantillon et 2.8 m avec 20 échantillons utilisés ; dans la méthode des noyaux, l'erreur est de 4.6 m et 3.1 m pour un échantillon et pour 20 échantillons utilisés respectivement).

Le système de localisation par WiFi Horus [34] utilise aussi les méthodes probabilistes; de même que le système Nibble [65] mais ce dernier se base sur les rapports signal sur bruit (SNR pour Signal to Noise Ratio) pour faire le calibrage plutôt que sur les RSSI.

Une fois la position de l'objet mobile estimée par le serveur de positionnement, elle pourra être transmise sur demande à une troisième entité. Ceci peut être intéressant pour le cas de RAMPE/INFOMOVILLE : le logiciel de positionnement peut être installé sur le serveur de la station de bus et après le calcul de la position du PDA (ou smartphone) porté par la PAM, il peut transmettre cette position au PDA qui cherche à se localiser, ou bien encore, il peut communiquer la position du PDA porté par la PAM à un autre PDA porté par une personne qui cherche à localiser la PAM afin d'aller à sa rencontre pour l'aider.

Plusieurs facteurs peuvent influencer la précision de localisation (la différence entre la position réelle de l'objet et la position calculée par le système) obtenue avec un tel système: le nombre de points d'accès présents sur le site (la localisation basée sur WiFi ne fournit pas toujours une bonne précision dans les milieux extérieurs à cause du fait que la densité des points d'accès installés en outdoor est plus petite que leur densité en indoor [51], la disposition de ces points d'accès, la méthodologie de calibrage utilisée (des études ont montré que la précision de la localisation en WiFi peut être améliorée par calibrage [51]), les caractéristiques environnementales du milieu (obstacles, perturbations, interférences, ...etc), la mobilité des dispositifs (des observations ont montré que pour les récepteurs WiFi en mouvement, les puissances des signaux reçus présentent une plus grande dispersion que pour les terminaux fixes [53], leurs cartes WiFi, ...etc).

4.2.3 Système Ekahau

Dans l'expérimentation décrite au paragraphe 4.5 de ce chapitre, dont l'objectif est de proposer un système de localisation et de guidage pouvant être intégré dans RAMPE/INFOMOVILLE, on utilise le système Ekahau de localisation en temps réel par ondes WiFi adoptant la technique d'empreinte radio [43]. Ce système consiste en:

- des Clients Agents
- des Etiquettes Ekahau portées par les dispositifs à localiser (optionnelles)
- logiciel de calibrage (nommé Ekahau Manager)
- logiciel de positionnement (nommé Ekahau Positioning Engine (EPE))
- le logiciel facultatif d'applications Ekahau pour les utilisateurs accédant à l'information de localisation

Le tableau 14 décrit les fonctionnalités des différents éléments du système Ekahau et les plateformes adéquates pour chacun:

Composant	Fonctionnalités	Plateformes supportées
Client Agent	Logiciel installé sur le dispositif à localiser (qui peut être un ordinateur portable, un ordinateur de poche de type PDA, ...etc).	Windows Vista, XP, 2000, Pocket PC 2002 et 2003, windows mobile
Etiquette WiFi	Petite étiquette radio qui peut être attachée à n'importe quel objet mobile qu'on cherche à localiser ou aussi portée par des personnes (qui ne possèdent pas un dispositif avec carte WiFi). Cette étiquette comprend un émetteur WiFi.	
Ekahau Manager ou Ekahau site survey (ESS)	Application permettant de créer des modèles de positionnement et les sauvegarder dans la base de données de l'Ekahau Positioning Engine	Windows 2000, XP Professional et 2003 Server
Ekahau Positioning Engine (EPE)	Basé sur Java, ce serveur calcule la position des équipements WiFi. Il fournit l'information de position de l'agent en coordonnées cartésiennes avec une indication de la qualité de l'estimation. Il est compatible avec tous les points d'accès WiFi 802.11a/b/g	Windows 2000, XP Professional et 2003 Server, linux

Table 14- Composants du système Ekahau

Pour l'implémentation du système Ekahau, les éléments suivants doivent être présents:

- Le serveur de localisation qui est un PC avec le logiciel EPE : au minimum un processeur de 1 GHz x86, 256 MB de RAM, 200 MB de disque dur, avec Windows XP, 2000, 2003 Server ou Linux
- Un PC portable avec le logiciel ESS servant à faire le calibrage (site survey) : le portable doit comporter au minimum un processeur Pentium III, 512 MB RAM, 200 MB HD et Windows XP Professional, Windows 2000 ou Windows 2003 Server. Ce portable doit aussi être équipé du logiciel client de localisation (on l'appelle par la suite client agent ou client ou client mobile).

- Réseau sans fil : points d'accès de la norme 802.11 a/b/g
- Le logiciel Client Agent Ekahau installé sur les PCs ou PDA à localiser. Ces objets (PC ou PDA) à localiser doivent utiliser un système d'exploitation de type Windows Pocket PC 2002 ou 2003, windows mobile 5 ou 6, WinCE 3.0, Windows XP et Windows 2000. Ces clients Agents supportent des interfaces WiFi spécifiques (basées sur Agere, Atheros, Broadcom, Texas Instruments ou chip sets Conexant, ...).

Ekahau propose quelques indications pour de bons résultats [43] :

- Avant de commencer le calibrage, ESS permet de choisir les points d'accès qui entreront dans la construction du modèle radio. En effet, les points d'accès détectés n'appartiennent pas nécessairement au réseau propre à la localisation ; ils peuvent appartenir à une entreprise voisine ou simplement être présents dans l'environnement. Ceci peut poser des problèmes et peut fausser les résultats si ces APs changent de position ou s'ils tombent en panne. Pour cela il peut être est préférable d'éviter d'utiliser les points d'accès non désirés ou incertains dans la localisation.
- L'accroissement du nombre d'APs augmente la précision de localisation ; pour cela on peut installer des points d'accès additionnels sans les connecter au réseau. On appellera ces APs « dummy ». La configuration des canaux n'est pas très importante car ces APs n'envoient pas de données et n'interfèrent pas avec des réseaux informatiques existants.
- L'échelle exacte du site concerné doit être spécifiée. On peut faire correspondre un certain nombre de pixels sur la carte du site avec la distance exacte exprimée en mètres ou en centimètres et mesurée réellement sur le site à calibrer.
- Des rails de cheminement peuvent être précisés sur le site à calibrer afin de savoir les chemins possibles sur lesquels le client agent peut se déplacer et avoir alors une meilleure précision.

Ekahau utilise une méthode de calcul statistique pour l'estimation de la position d'un client agent. Cette méthode a été expliquée dans le paragraphe 4.2.2.

4.3 Besoins utilisateurs et contraintes d'exploitation

Un système d'assistance aux personnes voyageurs aveugles comme RAMPE/INFOMOVILLE, doit satisfaire aux besoins des utilisateurs du système et prendre en compte les contraintes des exploitants.

4.3.1 Besoins utilisateurs

Plusieurs études [116, 118, 123] et expérimentations [8, 62] ont été présentées dans la littérature sur les besoins des PAM au cours de leurs déplacements. Au cours du projet INFOMOVILLE, une analyse réelle « in-situ » des déplacements naturels des personnes dans les transports publics a été réalisée [117, 124].

Cette étude et l'analyse de la littérature ainsi que l'expérience acquise précédemment par les ergonomes du projet (Gérard Uzan et Marie-France Dessaigne) ont permis de faire émerger les

stratégies de déplacement des PAM et de mettre en évidence leurs besoins. Ces besoins peuvent être divisés en quatre catégories prioritaires [8, 61, 93, 96, 117, 119] :

Besoins en sécurité

Éviter les chutes, les chocs, les risques de collision. Éviter les risques liés aux situations dégradées, et à la sûreté.

Plusieurs systèmes ont été développés pour aider les PAM à détecter la présence d'obstacles : canne blanche, mowat sensors, ... (cf. chapitre 1). Les PAM durant leurs déplacements cherchent à emprunter des chemins faciles présentant peu d'obstacles et de risques chutes ou encore des chemins familiers.

Besoins en localisation

On peut distinguer deux types de localisation [93, 116]:

- l'auto-localisation qui permet de se localiser dans l'espace immédiat (hall, couloir, escalier), un peu plus distant (station gare ou quartier) ou plus global (réseau, ville). L'auto-localisation correspond à la question « Où suis-je ? »
- l'allo-localisation : localisation d'éléments de l'environnement immédiat ou un peu plus distant (escalier, couloirs, guichet, ligne de contrôle, quai, siège, services, commerces, entrée et sortie des quais) et très distant (autre point de transport, rues, ...). L'allo-localisation correspond à la question « Qu'y a-t-il autour de moi ? »

D'une façon générale, la PAM essaye de découvrir le site et l'environnement où il se trouve (topographie et topologie, distribution fonctionnelle) ; il cherche à vérifier l'existence des stations de transport à sa proximité.

Besoins en orientation

Il s'agit de pouvoir maintenir une trajectoire à la fois lors du déplacement et dans sa représentation mentale, respecter un itinéraire, accéder à une destination intermédiaire ou finale du déplacement.

Besoins en informations

Les besoins en informations concernent toutes les activités du lieu, qu'elles soient ou non dédiées au(x) transport(s).

Pour les informations non liées au transport, on peut citer les informations de sécurité (présence d'obstacles, d'escaliers,...), les informations de localisation et d'orientation (détaillées dans le paragraphe suivant).

Gérard Uzan [96, 119, 131] distingue pour l'interface, les tâches descriptives destinées à la connaissance des sites (topographie et topologie, distribution fonctionnelle) et les tâches d'orientation destinées au guidage ou à sa correction.

Quant aux informations liées au transport, on peut les séparer en trois catégories :

- Les informations d'existence, d'identification et de localisation des arrêts : inventaire des stations à proximité du voyageur, noms des stations, repérage de la position des stations.
- Les informations de parcours (lignes, directions, stations desservies, horaires ...).
- Les informations événementielles (bus à l'approche, panne, changement d'horaire, accident sur une ligne ...).

Dans RAMPE/INFOMOVILLE, l'objectif est de pouvoir fournir à l'utilisateur la bonne information au bon moment et au bon endroit. Pour cela, ces informations liées au transport ont été actualisées selon trois niveaux temporels [8] :

- Informations structurelles : ce sont les informations prédéfinies et stables ; localisation et identification des arrêts, lignes desservies, parcours, horaires, etc. Ces informations permettent au PAM de découvrir son environnement en terme de transport et de planifier son déplacement.
- Informations temporaires : ce sont les informations structurelles mais exceptionnellement modifiées pour une durée limitée (changement de place d'un arrêt, détournement provisoire d'une ligne,...). En l'absence d'information sur ces perturbations ou situations inhabituelles, la PAM pourra par exemple attendre un bus à un arrêt alors que pour des raisons exceptionnelles la ligne de bus est détournée et l'arrêt n'est pas desservi.
- Les informations immédiates d'urgence : ce sont les informations "temps réel" (bus à l'approche, changement de parcours, terminus, retard, accident ...).

Une analyse théorique effectuée lors du projet RAMPE a permis de modéliser le déplacement en quatre zones spatiales qui permettent de comprendre en quoi un mode de transport est plus "accessible" qu'un autre et quelles sont les spécifications pertinentes d'un système d'information [8]. On distingue :

- La zone ouverte de la voirie et du bâti. Cette zone se caractérise par la diversité et la mixité des activités (déplacements, habitations, commerces, culture,...) et par la diversité des moyens de déplacement utilisés (véhicules privés ou de transport en commun, piétons - deux roues – automobiles – bus - tramways...) ; les espaces n'y sont pas nécessairement dédiés, et quand ils le sont, ils peuvent ne pas l'être strictement, soit formellement soit à travers les usages ; c'est une zone qui peut être soumise à des niveaux de bruit élevés (souvent plus de 75 dBa) en permanence. Les informations utiles sont des informations d'existence et de localisation des arrêts
- Zone d'accès : zone dédiée à un système de transport (hall de gare, couloir de métro, file d'attente de taxis ...). Elle se caractérise par l'unicité fonctionnelle: la plupart des individus qui s'y trouvent ont pour but de prendre ou quitter un véhicule de transport public. Espace délimité où ne circule que des piétons, cette zone est un espace stable qui peut donc être facilement mémorisé. Dans ces zones, les PAM bénéficient de la "communauté de but" induite par la zone. Ils peuvent ainsi utiliser l'assistance humaine de guidage et d'information "par les autres voyageurs". Cette assistance trouve ces limites dans les erreurs (ratés de parcours et lapsus de localisation ou de destination) et

dans les situations de lieux et horaires peu fréquentés. Les informations utiles sont des informations de guidage vers une zone de transfert.

- Zone de transfert, appelée aussi zone d'accostage. Il s'agit du lieu d'entrée ou de sortie du véhicule (extérieur de véhicule, portes et zone de seuil, lacune, quai, trottoir et plus largement zone d'accueil). C'est une zone de risque pour les PAM (collision, chutes, accidents) et une zone d'incertitude et de charge mentale. Cette zone entraîne des stratégies exploratoires par tâtonnements nécessitant du guidage. Les informations utiles sont des informations événementielles et des informations de guidage (position de la porte), ainsi que des informations liées à des préoccupations de sécurité
- Zone intérieure au véhicule : zone dans laquelle le voyageur devient statique. Sa charge mentale peut éventuellement diminuer. Les informations utiles concernent la progression du déplacement, le prochain arrêt, les correspondances.

De façon générale, on peut distinguer pour l'interface, les tâches descriptives destinées à la connaissance des sites (topographie et topologie, distribution fonctionnelle) et les tâches d'orientation destinées au guidage ou à sa correction.

Dans le cadre des projets RAMPE/INFOMOVILLE, la spécification des systèmes a été effectuée en considérant le déplacement de bout en bout avec une utilisation des transports publics (bus, tramway, metro, train), en prenant en compte certaines propriétés importantes (familiarité avec le trajet ou le mode de transport utilisé) et en cherchant à aider l'utilisateur à avoir une bonne représentation mentale de sa situation réelle durant le parcours. L'ensemble des déplacements possibles a été formalisés à travers trois types de scénarios élémentaires :

- Scénario simple: la PAM part d'un lieu (la maison par exemple), va à pied au point d'arrêt de départ A, prend le transport, descend au point d'arrivée B, et termine le déplacement à pied jusqu'à sa destination.
- Scénario 2: la PAM part d'un lieu (la maison par exemple), va à pied au point d'arrêt de départ A, prend le transport, descend au point d'arrêt B pour un changement de ligne, attend au même point d'arrêt qui devient un point de départ, reprend le transport et descend au point d'arrivée C, puis va à sa destination à pied.
- Scénario 3 : la PAM part d'un lieu (la maison par exemple), va à pied au point d'arrêt de départ A, prend le transport, descend au point d'arrivée B, puis fait un changement : il marche jusqu'à un nouveau point d'arrêt de départ C, prend le transport (ce n'est pas forcément le même mode de transport), descend au point d'arrêt d'arrivée D et va à sa destination à pied.

Dans ce contexte, les applications possibles de la localisation et éventuellement du guidage pour un piéton PAM sont nombreuses. Par exemple :

- La PAM veut localiser une borne ;
- L'application sur PDA veut savoir où est la PAM pour lui délivrer les messages d'information utiles dans la zone où il se situe ;
- L'application sur PDA guide la PAM en évitant les chemins difficiles et encombrés ;
- Une personne veut localiser une autre personne. Par exemple on peut imaginer que des agents dans une gare ou un pôle d'échanges compliqué soient chargés d'aller aider

- les PAM. Ces agents pourraient disposer de PDA (ou smartphones) sur lesquels s'afficherait une carte avec la position de la personne aveugle à aller chercher ;
- La borne pourrait vouloir localiser un PAM pour sonner plus ou moins fort selon la distance de la personne.

Dans la version initiale de RAMPE/INFOMOVILLE, le seul moyen disponible pour se guider vers une borne était de la faire sonner. Mais compte tenu du bruit environnant, cette technique n'est efficace qu'à une courte distance de la borne (typiquement une dizaine de mètres). Lors de l'expérimentation à Lyon, les PAM qui ont testé le système ont indiqué qu'ils aimeraient disposer d'une assistance supplémentaire lors de la traversée des grandes places telle que connaître la distance approximative de l'arrêt recherché ou savoir si on se dirige dans la bonne direction.

Les applications d'un service de localisation et de guidage dans RAMPE/INFOMOVILLE sont multiples. Cependant, le système doit en premier lieu permettre une bonne précision de localisation tout en fournissant les informations de localisation et de guidage d'une manière compréhensible ; Par ailleurs, on ne cherchera pas à utiliser la localisation partout mais seulement dans les zones où elle pourrait être le plus utile : dans les places complexes par exemple ou les pôles d'échanges.

4.3.2 Contraintes d'exploitation

La conception du système intégrant un service de localisation doit aussi prendre en compte les contraintes des opérateurs de transports qui devront installer, exploiter et maintenir le système. Ce système doit satisfaire à plusieurs exigences et contraintes.

Les exploitants d'un système d'assistance aux PAM utilisant des technologies de communication et de localisation devront fournir un système possédant une qualité de service suffisante. D'un point de vue technique, tous les éléments du système ont un impact sur la qualité de service (QoS). La technologie WiFi est l'élément le plus critique pour les performances de l'application en termes de communication et de localisation. La QoS dépend en particulier de la disponibilité (possibilité de se connecter) et de la fiabilité (possibilité de recevoir les informations qui ont été transmises) du réseau WiFi en environnement urbain. Ces deux caractéristiques sont reliées étant donné que le manque de ressources (affectant la disponibilité) ou l'augmentation du taux d'utilisation introduira des collisions et des congestions, ce qui peut aboutir à une perte de données et donc à un manque de fiabilité. La bande ISM de 2.45GHz utilisée par WiFi est aussi employée pour d'autres applications sans fil comme Bluetooth.

Des mesures radio ont été effectuées lors de l'expérimentation de RAMPE sur site à Lyon [62]. Elles ont été réalisées à l'aide d'un analyseur de spectre permettant de réaliser des mesures dédiées à la bande ISM de 100MHz autour de 2.45GHz. Les données recueillies sont de deux types : une cartographie de la puissance d'émission du point d'accès situé dans le poteau d'arrêt et un relevé de l'évolution du spectre radio tout au long de chaque parcours du scénario d'expérimentation.

Lors de cette expérimentation, le réseau WiFi n'est jamais apparu comme un chaînon vulnérable du système d'assistance RAMPE et cela a été confirmé par le dépouillement des mesures radio effectuées. Les données collectées ont montré un très fort déploiement de points d'accès WiFi en environnement urbain, puisque sur les sites nous constatons couramment une trentaine de points d'accès actifs. Cependant cette présence de nombreux points d'accès ne se traduit pas aujourd'hui par un trafic effectif important qui pourrait poser de problèmes d'interférence et de disponibilité.

Le profil d'utilisation de WiFi en environnement urbain est aujourd'hui compatible avec son utilisation pour un service comme RAMPE. Cependant ce résultat peut évoluer dans les prochaines années et l'occupation de la bande ISM devrait être surveillée par l'exploitant

La simplicité d'implémentation du système est un autre élément important pour l'exploitant. La technologie 802.11 est de plus en plus répandue et sa mise en place de plus en plus simple. Presque tous les terminaux portatifs (PDA, ordinateurs portables) sont équipés d'une carte sans fil WiFi. D'autre part, les systèmes radio WiFi pouvant opérer dans les milieux internes et externes rendent possible l'implémentation de cette technologie dans toutes les zones où l'application d'assistance RAMPE/INFOMOVILLE peut être utile.

La méthode retenue pour la localisation par ondes WiFi est la technique d'empreinte digitale qui est composée de deux phases : calibrage et positionnement. Cette méthode se base sur les mesures des puissances reçues des points d'accès qui sont affectées par plusieurs facteurs comme l'affaiblissement sur le parcours, l'effet des trajets multiples, Si les obstacles stationnaires peuvent être pris en compte pendant le calibrage, il faudra aussi considérer les erreurs dues à d'autres objets et obstacles mobiles se trouvant dans le site.

Le calibrage nécessite un temps important surtout dans les environnements externes de grande dimensions, étant donné que ce calibrage doit être fait manuellement [51, 52]; d'autre part, ces environnements demandent des mises à jour régulières puisqu'ils sont susceptibles aux changements environnementaux. Des études ont essayé de minimiser ce temps de calibrage ou de proposer des méthodes de construction de cartes radio sans avoir recours au calibrage. On peut citer la méthode de sniffers proposée par Luís Felipe et Bruno Astuto [52] : elle utilise des sniffers qui sont des PCs équipés d'une carte réseau sans fil (WNIC) et d'une carte réseau filaire (NIC) ; un logiciel installé sur ces sniffers capture les trames détectées sur la WNIC et en relève l'adresse MAC d'un client mobile ainsi que les RSSI des différents AP dans la zone où se trouve le client.; les sniffers envoient ces valeurs au serveur de localisation connecté à leur interface NIC ; ils enregistrent d'autre part les RSSI qu'ils reçoivent d'un ou de plusieurs point d'accès références (AP_{ref}). Ces deux tâches sont exécutées simultanément et sans interruption pour construire le modèle de localisation. Les positions des sniffers et celles des AP_{ref} étant bien connues, le serveur de localisation pourra en estimer la position de l'objet mobile. Une autre méthode similaire est proposée par Y. Gwon et R. Jain [127] où le serveur de localisation enregistre simultanément les RSSI transmis par le client mobile (reçus des différents AP détectés par ce client) et les RSSI qu'il reçoit des différents APs (les positions de ces APs sont bien connues par le système) et en construit le modèle de positionnement ; en utilisant un algorithme de triangulation, d'interpolation et d'extrapolation, le système calcule la position du client mobile ; les résultats d'expérimentation de cette méthode ont montré une précision de localisation proche de celle obtenue avec les méthodes de calibration classiques (calibration manuelle de la méthode d'empreinte radio). Un algorithme proposé par X. Chai et Q. Yang [128] essaye de réduire le nombre de points échantillons enregistrés et modélise les traces non calibrés d'un client en mouvement (pour les utiliser durant le positionnement), en utilisant pour ceci les modèles de Markov cachés. F. Gschwandtner et P. Ruppel proposent une méthode de

calibrage automatique [51] pour les systèmes de localisation WiFi utilisés dans les environnements de grandes dimensions; cette méthode se base sur un deuxième système de positionnement (le GPS) qui calcule les coordonnées du terminal mobile WiFi utilisé pour la calibration.

La durée de la phase de calibrage est un élément important pour les exploitants, pour qui le temps d'implémentation d'un système constitue une contrainte importante.

Une autre préoccupation des exploitants est la maintenance et la mise à jour du système. La principale maintenance va concerner le réseau WiFi. Le service de localisation et de guidage utilisant les ondes radio WiFi, nécessite la mise en place de points d'accès couvrant le site considéré. Comme expliqué au paragraphe 4.2, le nombre de ces APs et leurs emplacements influent sur la précision de localisation ; le PDA qui doit reporter les mesures des puissances reçues au serveur de localisation doit pouvoir se connecter au réseau WiFi en tout point de la zone où est effectuée la localisation : tout déplacement d'un point d'accès peut fausser les résultats. Il se peut par exemple que l'on fasse des travaux dans un site et que l'on déplace des APs. L'idéal dans ce cas, est de refaire le calibrage du site et de mettre à jour la base de données ; de même si certains APs tombent en panne.. Il peut donc être utile de concevoir un système de surveillance automatique de la qualité de la localisation de façon à détecter automatiquement la nécessité de recalibrer un site (ESIEE Paris travaille actuellement sur ce sujet). Une autre contrainte est la nécessité d'alimenter les APs. On peut les installer dans les panneaux d'affiches électroniques et partager avec eux une source d'alimentation disponible en ville (éclairage public par exemple).

4.4 Proposition d'une méthodologie de calibrage avec chemins privilégiés

On propose dans cette thèse une méthodologie de calibration qui minimise le temps de calibrage tout en obtenant une bonne précision dans la phase de localisation [16] ; on cherche à renforcer cette précision dans les endroits critiques du site ou plus précisément dans les zones de déplacement et sur les chemins que la PAM, dans le cas de RAMPE/INFOMOVILLE, peut emprunter durant son déplacement dans l'environnement des transports publics. On parlera de méthode de chemins «Privilégiés», qu'on notera PPs pour Preferred Paths. Le but est d'orienter la PAM vers un de ces chemins pour ensuite le guider tout au long de ce chemin trajets jusqu'à la destination.

La méthode consiste à faire un double calibrage du site : un calibre uniforme de précision moyenne sur tout le site plus un calibrage fin sur les PPs. Le calibrage uniforme consiste à prendre des points échantillons distribués sur le site avec un pas d'échantillonnage assez grand, tandis que ce calibrage devient plus fin sur les PPs (le nombre des échantillons pris sur les PPs est important) afin d'avoir une bonne précision de localisation sur ces PPs. Cela va permettre au logiciel de positionnement de connaître globalement la position de la PAM (à gauche du PP, à sa droite, etc) afin de le ramener sur l'un des PPs et le guider à travers ce PP vers la destination ; on évitera ainsi les trajets difficiles présentant trop de détours ou d'obstacles. Il s'agit ici d'obstacles fixes de positions connues a priori et présents lors du calibrage.

Les expérimentations de RAMPE à Lyon faites sur la place Grange Blanche ont montré clairement l'existence de chemins privilégiés utilisés par les PAM et leurs différentes efficacités;

en particulier, une grande partie des PAM se déplaçaient en longeant le bord du trottoir qu'elles détectaient avec leur canne blanche. Cette stratégie s'est avérée la plus efficace sur cette place de forme quasi circulaire et de grandes dimensions. D'autres personnes essayaient de traverser la place en ligne droite mais se heurtaient à un ensemble d'obstacles tels que des murets ou plots sur le sol et éprouvaient des difficultés à maintenir une trajectoire rectiligne vers le point de destination même en l'absence d'obstacles (effet dalle).

On évalue dans les expérimentations décrites au paragraphe 4.5 l'efficacité de cette méthode.

4.5 Expérimentation

Dans ce paragraphe, on évalue par une expérimentation faite sur le site d'un campus universitaire au nord du Liban, l'efficacité de cette approche.

4.5.1 Description du site et de l'infrastructure de l'expérimentation

Commençons par décrire le site où la manipulation a eu lieu : il s'agit d'une zone externe de forme carrée (figures 34 et 35) et d'une surface de 50x50m². Des obstacles sont toutefois présents au milieu du site : des arbres, des bacs à fleurs, ...etc. Le site est assez bruyant (présence d'étudiants, cours d'eau, voitures se déplaçant juste dans une ruelle à côté, ...) mais moins bruyant que les sites urbains des grandes villes. Il est entouré de bâtiments élevés présents de deux côtés du site. Nous y avons installé huit APs WiFi pour l'expérimentation. D'autres AP (voisins/interférents) sont présents sur le site peuvent être détectés (7 APs étrangers ont été vus). Tous les APs détectés (installés spécifiquement pour cette expérimentation ou étrangers) peuvent être utilisés pour le calibrage du site ; cependant, et pour bien contrôler les expériences, on n'a utilisé que les APs spécifiquement installés pour cette expérimentation ; le système Ekahau utilisé dans l'expérimentation donne la possibilité d'exclure certains APs (voisins/interférents) de la calibration.

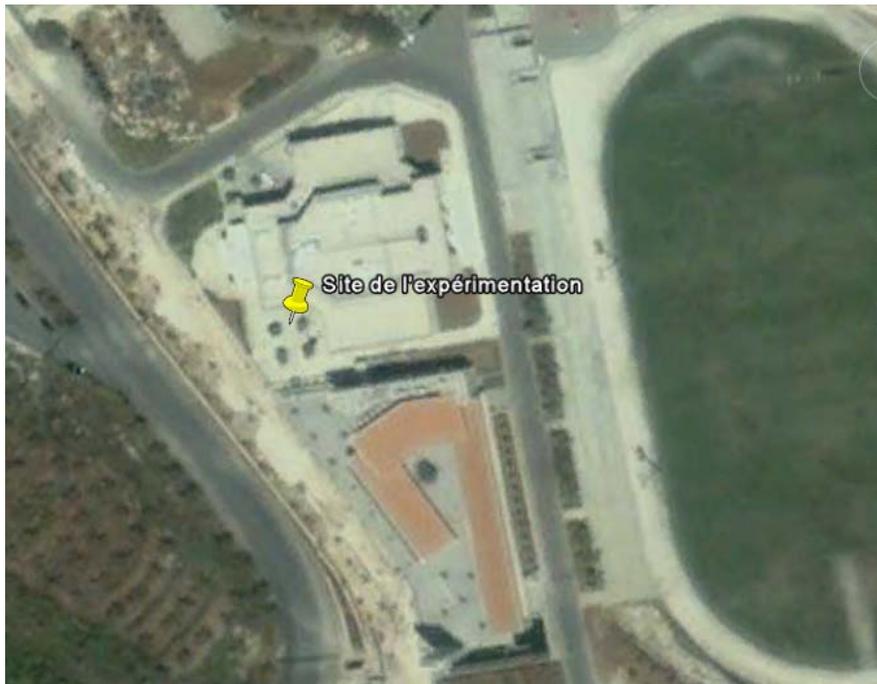


Figure 34- Vue Google satellite du site de l'expérimentation



Figure 35- Photos du site d'expérimentation

D'autre part un réseau de communication propre à la manipulation a été implémenté (figure 36). Il comprend un commutateur (de type Power over Ethernet permettant d'alimenter les points d'accès à travers le câble utilisé pour la connexion au réseau) auquel sont connectés 8 points d'accès par une liaison filaire. Chaque AP a une adresse IP fixe. Le logiciel de positionnement EPE est installé sur un ordinateur connecté au réseau par une liaison filaire (connecté au commutateur). Une adresse IP fixe lui est attribuée. Un serveur DHCP (de type Serveur Windows 2003) se trouve sur le réseau et permet la distribution automatique des adresses IP aux clients mobiles (PDAs ou PCs portables). De cette façon, chaque client mobile à localiser, s'associe à un certain AP, obtient une adresse IP, ce qui lui permettra, en tout point du site, de se connecter au réseau et de communiquer avec le logiciel de positionnement pour lui transmettre les mesures des puissances reçues des différents APs. Au cours de son déplacement, ce client mobile peut changer d'APs (roaming) et s'associer à un second AP lui assurant un meilleur rapport signal sur bruit, tout en restant connecté au réseau avec la même adresse IP.

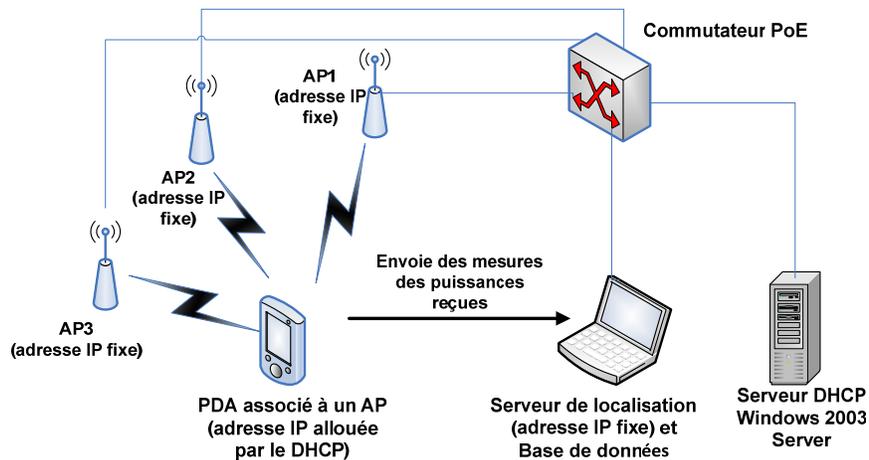


Figure 36- Infrastructure de la manipulation

4.5.2 Éléments de l'expérimentation

Le système Ekahau (une version gratuite) a été utilisé dans cette expérimentation. Ce système utilise la méthode d'empreinte radio avec ses deux phases de Calibrage et de Positionnement. Les éléments suivants sont présents:

- La carte du site en format JPG (voir cette carte annexe A)
- Huit Points d'Accès WiFi Cisco Aironet 1100 Series installés dans le site comme indiqué dans la figure 37 : avec ces 8 APs on a pu couvrir tout le site i.e on a pu recevoir, en chaque point, le signal d'au moins 3 APs.
- Un portable Windows XP ayant une carte Centrino intégrée - Intel Pro/Wireless LAN 2100 3B Mini PCI Adapter. Chipset: Intel 2100, sur lequel tourne Ekahau Manager (logiciel de calibrage- cf. paragraphe 4.2.3) et Ekahau Engine (faisant les calculs et les estimations de localisation).
- Des portables et des PDA à localiser avec le client agent installé ; Les PDA utilisés sont de la marque i-mate. Ce sont des téléphones portables ayant les fonctionnalités d'un ordinateur de poche et fonctionnant avec Windows Mobile comme système d'exploitation).

Ekahau propose de tracer sur la carte du site (téléchargée dans Ekahau Manager) des rails de cheminement qui spécifient les chemins possibles où le client à localiser peut se trouver et sur lesquels il peut se déplacer ; ceci fournira au logiciel de positionnement une certaine indication permettant d'obtenir une meilleure précision. Un rail a par défaut 7.9 feet (2.4 mètres) de largeur. Les rails tracés dans notre cas sur la carte du site représentent les PP que l'aveugle peut emprunter pour arriver à la station. Chaque PP a une largeur de 2.4 mètres (ils sont montrés hachurés sur la figure 37) (on a aussi tracé ces PP sur le sol du site avec une craie blanche). Leurs longueurs respectives sont notées dans le tableau 15 suivant :

Preferred Path	Longueur
PP1	42 mètres
PP2	84 mètres
PP3	53 mètres
PP4	44 mètres

Table 15- Longueur des différents PPs

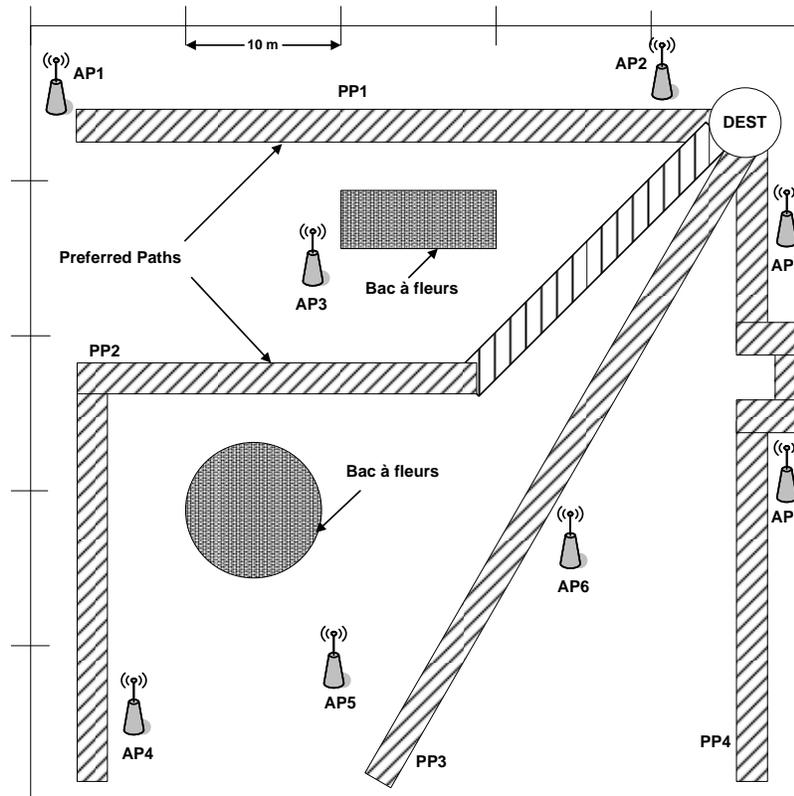


Figure 37- Banc de test de la manipulation de localisation

4.5.3 Scénario de base (scénario 1)- Calibrage uniforme du site

4.5.3.1 Méthodologie de calibration

Dans ce scénario, on utilise les 8 APs pour calibrer tout le site de façon uniforme : en recueillant un échantillon tous les 4 mètres sur toute la longueur et la largeur du site. Au total, environ 150 échantillons ont été relevés pour tout le site. Chaque échantillon nécessite approximativement 6 secondes pour être enregistré. Cette durée dépend de la carte WiFi utilisée pour le calibrage et de sa vitesse de balayage radio (scan rate), du processeur du serveur de calibrage et de sa vitesse de connexion à la base de données. Le temps de calibrage nécessaire pour le site complet est d'environ 15 minutes ($150 * 6 = 900$ secondes soit 15 minutes). Pour faire le calibrage, le portable sur lequel tourne le logiciel Ekahau Manager (ou ESS) est déposé au point où on veut relever un échantillon. On clique sur le point correspondant sur la carte du site dans Ekahau pour enregistrer ce point échantillon dans la base de données (dans l'Ekahau Engine installé dans notre cas sur le même portable que l'Ekahau Manager).

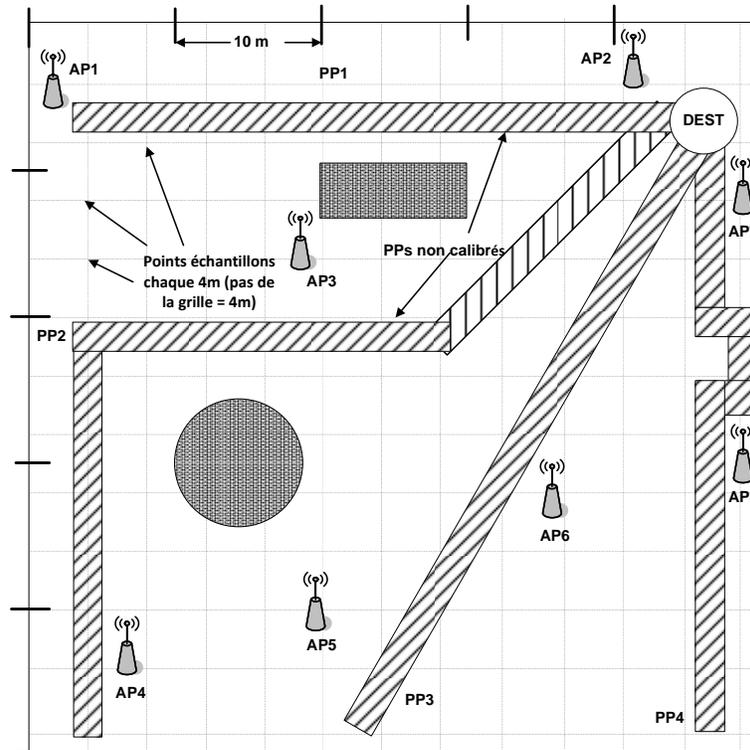


Figure 38- Scénario de base: calibrage uniforme

4.5.3.2 Positionnement et résultats de précision

Dans cette phase on cherche à localiser des agents mobiles (on rappelle qu'on utilise cette expression pour désigner les objets mobiles (PC ou PDA) disposant du logiciel client et que l'on souhaite positionner) et à déterminer la précision de localisation. Les agents sont déposés à des endroits précis du site (donc ils ne sont pas en mouvement mais on change leurs positions à chaque mesure).

On appelle par «Précision» la différence en distance entre la position réelle de l'agent à localiser et sa position calculée par Ekahau. Elle est calculée comme suit : l'agent est déposé en une position donnée et ses coordonnées cartésiennes (x , y) sont relevées. Le logiciel de positionnement Ekahau retourne aussi les coordonnées de l'agent localisé (ces coordonnées sont exprimées en nombre de pixels mais comme la correspondance pixels/mètres du site considéré est configurée sur Ekahau, on peut facilement calculer les coordonnées en mètres). Supposons que x et y sont les coordonnées réelles de l'objet et x' et y' les coordonnées de l'objet estimées par Ekahau, on peut déduire la différence en distance ou encore la précision comme suit :

$$\text{Précision} = \sqrt{|y - y'|^2 + |x - x'|^2}$$

Cette précision est calculée pour chaque position de l'agent, puis la moyenne de toutes les précisions (obtenues des différentes positions) est calculée (c'est cette moyenne qui sera notée dans les tableaux de résultats qui suivent).

Nous avons mesuré cette précision soit directement sur la carte affichée à l'écran du PC soit en la mesurant avec une mètre sur le site réel.

Dans le scénario de base (scénario 1) qui utilise la méthodologie de calibration uniforme on a observé que la précision est presque la même pour tous les dispositifs à localiser. On localise chaque agent dans 50 endroits différents (ces endroits sont aléatoires et ne sont pas situés uniquement sur les points de la grille de la figure 38 là où les points échantillons ont été relevés) avant de passer à localiser un autre agent (dans d'autres positions qui ne sont pas toujours les mêmes que pour l'agent précédent).

Pour chaque position, la mesure est effectuée sur 1 minute. C'est-à-dire qu'Ekahau peut moyennner les estimations de position pendant 1 minute ce qui permet de diminuer la variance de cette estimation. En effet le serveur de positionnement Ekahau calcule une estimation de position de façon périodique. La durée minimale de cette période dépend du temps de calcul du serveur positionnement, de la vitesse de balayage du chipset WiFi du client agent, de la qualité de la liaison radio qui affecte la vitesse avec laquelle les mesures des RSSI sont reçues par le serveur. Par exemple si la vitesse de balayage du chipset WiFi de l'agent mobile est de 1 seconde, alors la position de l'agent est actualisée une fois par seconde par le serveur de positionnement ; le temps nécessaire pour effectuer l'ensemble des mesures sur les 50 positions différentes a été d'environ une heure.

Voici un tableau récapitulant les résultats de précision de ce scénario:

Agent	Logiciel	Adapteur WiFi	Précision moyenne sur le site ⁽³⁾
Ordinateur portable	Windows 2000	Cisco Aironet 802.11a/b/g Cardbus Adapter	0.6 m (0.28 m)
Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	0.65 m (0.30 m)
i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbps Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	0.5 m (0.17 m)
i-mate JASJAM	Windows Mobile 5.0	WiFi IEEE 802.11b/g internal WLAN antenna	0.6 m (0.25 m)

Table 16- Résultats de précision moyenne pour le scénario de base

On montre dans le tableau 16 les résultats de localisation de quatre agents : deux PCs portables et deux ordinateurs de poche de type i-mate. Les résultats des tests ont montré que la précision était meilleure sur les points de la grille, c.à.d quand les clients agents sont placés exactement là où les points échantillons ont été enregistrés lors de la phase de calibrage. Le troisième agent du tableau était placé sur les points de la grille, et par suite la précision de sa localisation est la meilleure. Pour ce même agent placé en dehors des points de la grille, la précision était aux alentours de 0.6m (semblable à celle de l'agent i-mate JASJAM). On peut dire que les différences de précision obtenues ne dépendaient pas des cartes matérielles wifi intégrées dans les objets mais plutôt des positions des objets.

4.5.3.3 Impact de la mobilité sur la précision

On a aussi étudié dans ce scénario, l'impact de la mobilité du dispositif à localiser sur la précision.

³ Valeur de l'écart-type

Au passage du dispositif sur les positions indiquées pour la mesure de précision, les coordonnées retournées par Ekahau sont notées. A la fin de l'expérience, la moyenne de précision pour toutes les positions a été calculée.

Une personne (qu'on appellera la personne 1) tenait le PDA ou PC portable à localiser (sur lequel tournait le client agent) et se déplaçait tout au long du site à une vitesse d'environ 2 km/h, ce qui correspond à un pas de l'ordre de 50 cm par seconde. Le trajet que devait effectuer cette personne était prédéfini : on l'avait marqué sur le sol avec une craie. On avait indiqué sur ce trajet les 70 positions où l'on devait retenir les positions estimées par Ekahau. La forme de ce trajet est montrée sur la figure 39 suivante :

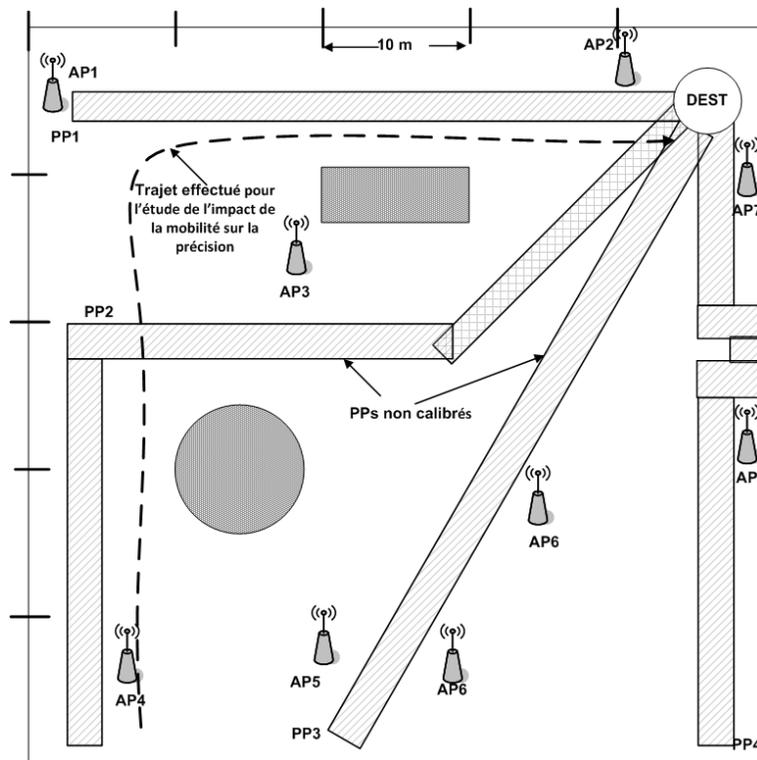


Figure 39- Trajet effectué pour l'étude de l'impact de la mobilité sur la précision de localisation

Une deuxième personne était installée devant le PC disposant du logiciel EPE de calcul de positions. Elle pouvait voir la personne 1 se déplacer réellement sur le site. Lorsque la personne 1 arrivait sur les positions indiquées pour la mesure de précision, les coordonnées retournées par Ekahau étaient notées. A la fin de chaque test, on effectuait les calculs de la précision pour chacune des positions.

La moyenne de la précision obtenue pour une distance de 50 mètres (parcourue pendant une durée de 90 secondes) est calculée. On note dans le tableau 17 la précision obtenue avec un ordinateur portable et un i-mate :

Agent	Logiciel	Adapteur WiFi	Précision moyenne (⁴)
Ordinateur portable	Windows 2000	Cisco Aironet 802.11a/b/g Cardbus Adapter	0.95 m (0.72 m)
i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	0.9 m (0.7 m)

Table 17- Impact de la mobilité sur la précision dans le scénario 1

Plusieurs facteurs principaux peuvent influencer la précision obtenue en mobilité. Un premier facteur est l'orientation du dispositif à localiser. On avait en effet remarqué en mode statique que la précision était meilleure pour les positions où le dispositif était posé dans la même orientation que celle de l'ordinateur utilisé pendant le calibrage ; Un deuxième facteur est la présence de la personne qui portait le dispositif pour les tests en mobilité. La personne qui tenait le dispositif pouvait influencer sur les puissances des signaux reçus des différents APs (son corps pouvait en quelque sorte atténuer les signaux des APs). Il aurait été intéressant de faire déplacer le dispositif sur un support téléguidé par exemple, mais ceci n'a pas pu être mis en œuvre dans le cadre de cette expérimentation. D'autre part, le logiciel EPE ne peut pas moyenniser les estimations de position pendant une durée d'une minute comme dans le cas des tests en mode statique. Enfin, des études ont montré que pour les récepteurs WiFi qui sont en mouvement, les puissances des signaux reçus des APs présentent une variance plus grande que lorsqu'ils ne sont pas en mouvement [53] et que cette caractéristique pouvait être utilisée pour déterminer si un piéton était à l'arrêt ou en déplacement.

4.5.4 Scénario proposé (scénario 2) - RAMPE/INFOMOVILLE RWPS

4.5.4.1 Méthodologie de calibration

Le but de ce 2^{ème} scénario est de renforcer la précision dans certains endroits du site précisément sur les PPs, les chemins privilégiés que la personne peut emprunter pour aboutir à la destination, tout en ayant, en dehors des PPs, une idée sur la position globale de la personne (à gauche du PP, à sa droite, ...etc) ; ceci va nous permettre, dans les scénarios de guidage détaillés ultérieurement dans ce chapitre, de localiser la personne sur le site puis de la ramener sur un PP afin de le guider à travers ce PP vers la destination. On montre dans cette section, les performances de cette technique baptisée RAMPE/INFOMOVILLE WiFi Positioning System (RWPS).

Pour ce faire, les points échantillons ont été mesurés sur chaque PP en prenant un échantillon tous les 0.4 mètres. On prend donc 6 échantillons en largeur du PP (2.4 m/0.4 m =6 échantillons), puis on s'éloigne de 0.4 m sur le PP et on prend de nouveau 6 autres échantillons en largeur. Pour un PP de longueur 50 m, on obtient ainsi à environ 750 échantillons. La mesure de chaque échantillon a été effectuée en environ 6 secondes. Il faut donc de l'ordre de 75 minutes pour relever l'ensemble de ces échantillons sur un PP. Nous avons calibré 4 PPs. Il a fallu entre 5 et 6 heures pour effectuer le calibrage complet sur les 4 PPs. Sur le reste du site, les échantillons sont pris, comme pour le scénario 1, en raison d'un échantillon tous les 4 mètres pour la longueur et la largeur du site. On obtient donc aux alentours de 150 échantillons en total.

⁴ Valeur de l'écart-type

Et en effectuant chaque mesure en 6 secondes, il faut environ 15 minutes pour calibrer le reste du site.

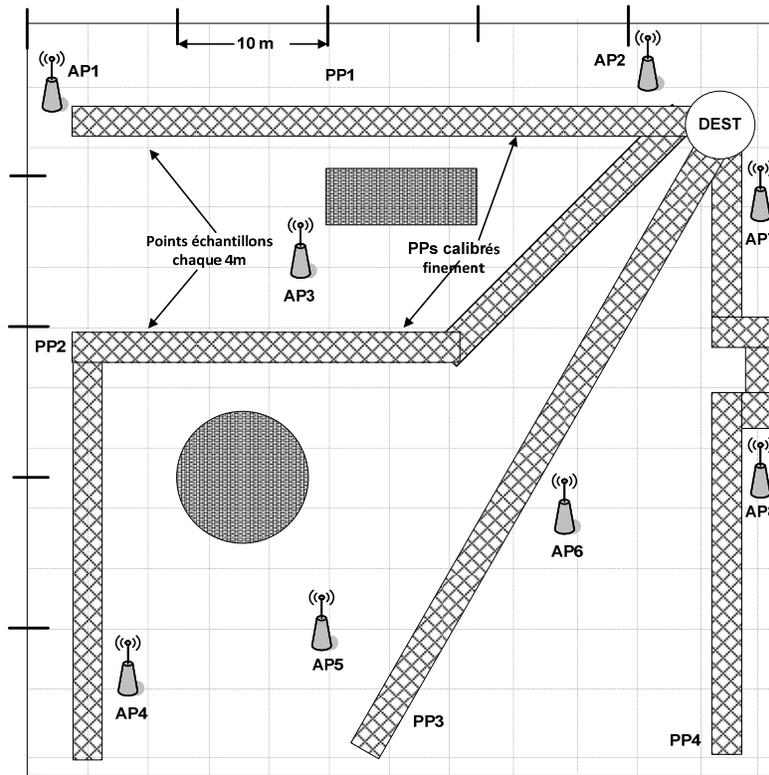


Figure 40- RWPS : calibrage fin sur les PPs

4.5.4.2 Résultats de précision

Durant la phase de localisation, on a remarqué que la précision est meilleure sur les PPs que partout sur le reste du site, ce qui nous a permis de localiser les clients globalement sur le site mais en arrivant sur les PPs la précision devient de l'ordre de 20 cm. La méthode de calcul de précision est la même que dans le premier scénario : les différents dispositifs à localiser sont placés en 50 positions différentes du site (parfois sur les points de la grille), et la moyenne de la précision est calculée pour ces 50 positions ; de même sur les PPs, 50 positions différentes ont été choisies. Les mesures dans ce cas ont duré environ deux heures par dispositif (une heure pour le positionnement sur le site et une heure pour le positionnement sur les PPs).

Le tableau 18 récapitule les résultats obtenus:

Agent	Logiciel	Adapteur WiFi	Précision moyenne sur les PP ⁽⁵⁾	Précision moyenne hors des PP ⁽⁶⁾
Ordinateur portable	Windows 2000	Cisco Aironet 802.11a/b/g Cardbus Adapter	0.2 m (0.13 m)	0.6 m (0.28 m)

⁵ Valeur de l'écart-type

⁶ Valeur de l'écart-type

Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	<0.2 m (0.12 m)	0.65 m (0.30 m)
i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	<0. 2m (0.12 m)	0.5 m (0.17 m)
i-mate JASJAM	Windows Mobile 5.0	WiFi IEEE 802.11b/g internal WLAN antenna	<0.2 m (0.12 m)	0.6 m (0.25 m)

Table 18- Performances en précision de RWPS

4.5.4.3 Réflexions

Si l'on désirait avoir la même précision que celle obtenue sur les PPs partout sur le site, on devrait calibrer tout le site de la même manière que les PPs, ce qui demanderait à peu près 26 heures de calibration. En effet, à raison d'un échantillon tous les 0.4 mètres, sur 50 m de longueur et 50 m de largeur, on obtient 15,625 échantillons pour tout le site et comme chaque échantillon demande 6 secondes, il faut environ 26 heures. On a minimisé ce temps en renforçant la précision seulement dans certains endroits spécifiques du site qui sont les PPs.

4.5.4.4 Impact de la mobilité sur la précision

Comme dans le scénario 1, on a testé dans ce scénario l'impact de la mobilité du dispositif à localiser sur la précision. Le même type de démarche que dans le scénario 1 a été adoptée : une personne tenait le dispositif et se déplaçait sur un trajet prédéfini à une vitesse de l'ordre de 2 km/h, puis dans un 2^{ème} temps elle se déplaçait sur l'un des PPs finement calibrés ; la précision est calculée pour 70 positions au total sur chaque trajet. Les trajets effectués en dehors des PPs et sur un PP sont montrés dans la figure 41.

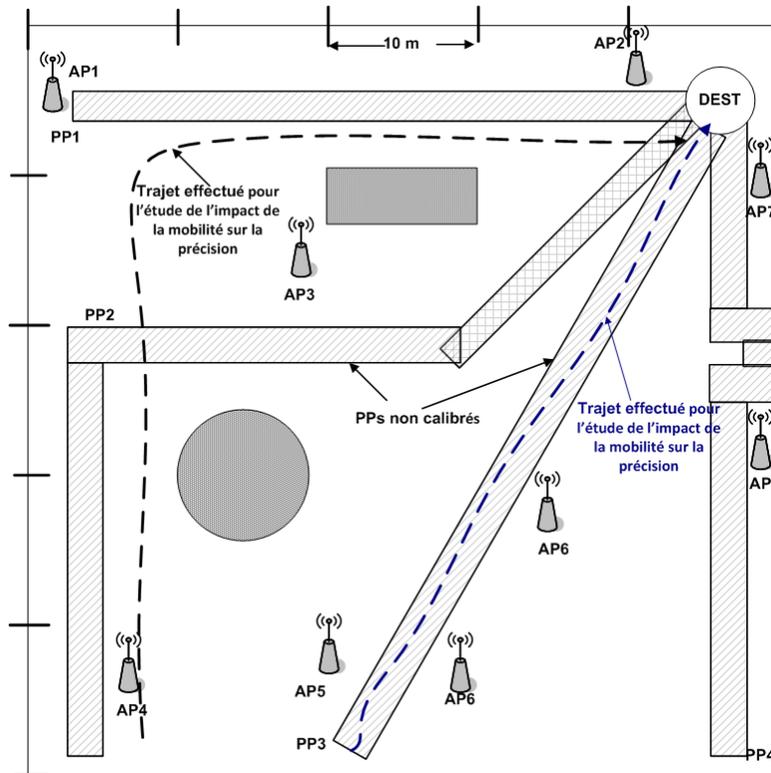


Figure 41- Trajets effectués pour l'étude de l'impact de la mobilité sur la précision de localisation

Agent	Logiciel	Adaptateur WiFi	Précision sur les PP ⁽⁷⁾	Précision hors des PP ⁽⁸⁾
Ordinateur portable	Windows 2000	Cisco Aironet 802.11a/b/g Cardbus Adapter	0.3 m (0.26 m)	0.95 m (0.72 m)
i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbps Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	0.3 m (0.26 m)	0.9 m (0.7 m)

Table 19- Impact de la mobilité sur la précision dans le scénario 2

Les mêmes facteurs que ceux présentés pour le scénario 1 influencent sur la précision obtenue en mobilité de ce scénario.

4.5.5 Scénarios de modifications et de perturbations

L'une des contraintes d'exploitation du système de localisation et de guidage basé sur les ondes WiFi et la méthode d'empreinte radio, concerne les éventuelles perturbations ou modifications que peuvent subir les éléments de cette méthode. Par exemple, on peut changer la position des points d'accès suite à des travaux, ou bien certains APs peuvent tomber en panne,

⁷ Valeur de l'écart-type

⁸ Valeur de l'écart-type

de nouvelles constructions peuvent apparaître, ... Ce qui peut modifier la carte radio du site et par suite influencer les calculs de positions.

On présente dans ce paragraphe les expérimentations qui ont été réalisées pour évaluer l'impact sur la précision, de quelques perturbations sur l'infrastructure du site de test principal. On essaie d'étudier la capacité du système à rester fonctionnel (c'est-à-dire à fournir des informations de localisation correctes) même quand une partie des équipements est hors-service. Trois scénarios ont été étudiés et sont détaillés dans les paragraphes suivants.

4.5.5.1 Scénario 3 - Elimination de quelques APs avant le calibrage

On étudie dans ce scénario la précision du système en fonction du nombre d'APs mis en service. Le même site que dans les tests précédents a été calibré mais avec moins d'APs.

4.5.5.1.1 Méthodologie de calibration

Dans ce scénario, l'AP3, l'AP5 et l'AP7 ont été débranchés dès le début (simulation du cas où il y a moins d'APs dans le site). Le calibrage a donc été fait avec 5 APs seulement : AP1, AP2, AP4, AP6 et AP8, avec le même principe que celui du scénario 2: calibrage fin sur les PPs et uniforme hors des PPs.

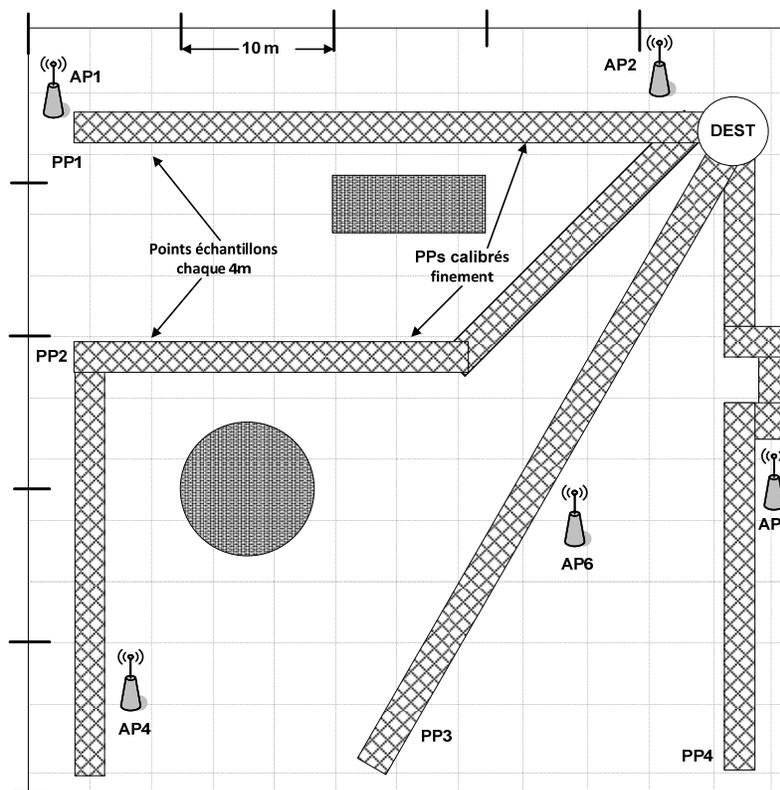


Figure 42- Calibrage avec moins d'APs

4.5.5.1.2 Résultats de précision

Dans ce scénario, la précision a varié par rapport à celle du scénario 2 comme le montre le tableau suivant:

Agent	Logiciel	Adapteur WiFi	Précision sur les PP ⁽⁹⁾	Précision hors des PP ⁽¹⁰⁾
Ordinateur portable	Windows 2000	Cisco Aironet 802.11a/b/g Cardbus Adapter	0.35 m (0.14 m)	<0.95 m(0.29 m)
Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	<0.35 m (0.14 m)	<0.95 m (0.29 m)
i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	<0.3 m (0.14 m)	<0.85 m (0.19 m)
i-mate JASJAM	Windows Mobile 5.0	WiFi IEEE 802.11b/g internal WLAN antenna	<0.3 m (0.14 m)	~ 0.9 m (0.28 m)

Table 20- Elimination d’APs pendant le calibrage

Dans ce scénario, certains points du site recevaient le signal de moins de 3 APs, ce qui a diminué la précision par rapport au scénario 2. L’erreur absolue a augmenté en moyenne de 32 cm en dehors des PPs et de 12 cm sur les PPs, ce qui représente une variation relative de respectivement 55% et 62%.

4.5.5.2 Scénario 4 – Suppression d’APs pendant le positionnement

4.5.5.2.1 Méthodologie de calibration

Dans ce scénario, le calibrage du site est fait de la même façon que pour le scénario 2 : 8 APs utilisés durant le calibrage, avec un calibrage fin sur les PPs. Mais, pendant la phase de positionnement, l’AP3, l’AP5 et l’AP7 ont été débranchés (simulation du cas où les APs tombent en panne pendant le positionnement (Figure 43)).

⁹ Valeur de l’écart-type

¹⁰ Valeur de l’écart-type

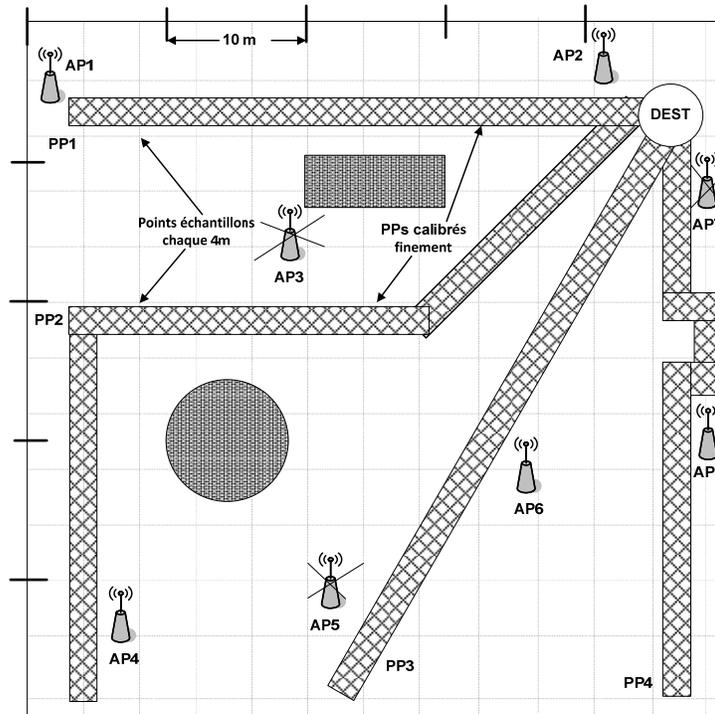


Figure 43- APs en panne pendant le positionnement

4.5.5.2.2 Résultats de précision

Agent	Logiciel	Adaptateur WiFi	Précision sur les PP ⁽¹¹⁾	Précision hors des PP ⁽¹²⁾
Ordinateur portable	Windows 2000	Cisco Aironet 802.11a/b/g Cardbus Adapter	0.25 m (0.13 m)	~ 0.7 m (0.29 m)
Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	<0.25 m (0.13 m)	<0.75 m (0.29 m)
i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	<0.25 m (0.13 m)	<0.6 m (0.18 m)
i-mate JASJAM	Windows Mobile 5.0	WiFi IEEE 802.11b/g internal WLAN antenna	<0.2 m (0.13 m)	~ 0.7 m (0.28 m)

Table 21- APs en panne pendant le positionnement

On remarque que la précision n'a pas beaucoup varié par rapport au scénario 2 surtout sur les PPs où le calibrage était fin. La carte radio avait été construite avec 8 APs fonctionnant simultanément. L'erreur absolue a augmenté en moyenne de 10 cm en dehors des PPs et de 4 cm sur les PPs, ce qui représente une variation relative inférieure à 20% dans les deux cas.

¹¹ Valeur de l'écart-type

¹² Valeur de l'écart-type

On constate donc que la « panne » des APs a moins d'influence sur la précision quand elle se produit pendant la phase de localisation que pendant la phase de calibrage. Dans les deux cas, la variation relative de la précision est similaire en dehors et sur les PPs, mais la variation absolue est bien sûr plus faible pour les PPs.

4.5.5.3 Scénario 5 - Déplacement des APs

4.5.5.3.1 Méthodologie de calibration

Dans ce scénario, après avoir calibré tout le site avec les 8 APs disposés comme dans le scénario 2, avec un calibrage fin sur les PPs, on a déplacé ces points d'accès afin d'étudier l'effet de ce déplacement sur la précision de localisation. On a commencé par déplacer un seul AP, puis 2 APs à la fois et enfin 3 APs.

Considérons l'AP1; on montre dans la figure 44 suivante sa position initiale et sa position après déplacement.

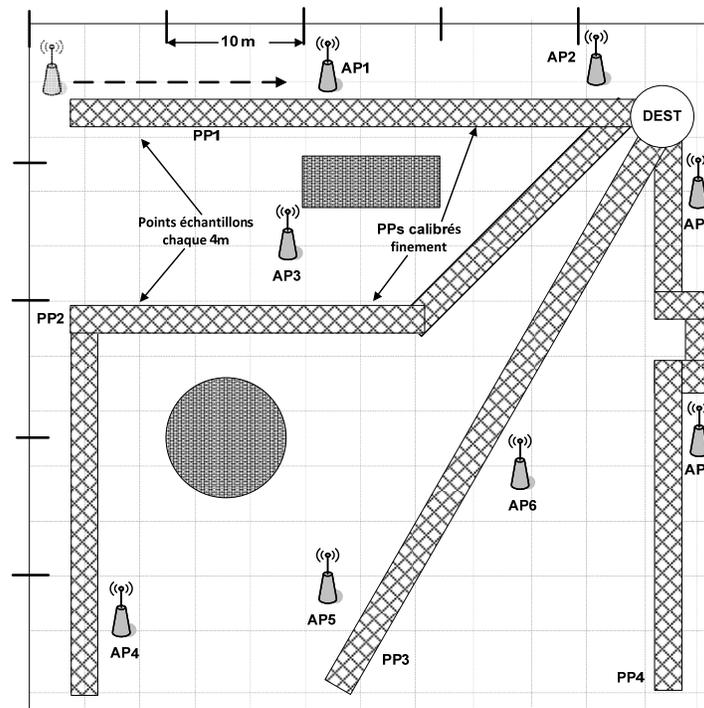


Figure 44- Déplacement d'un seul AP pendant la phase de positionnement

La nouvelle position de l'AP1 est maintenant éloignée de la position initiale de 1 m horizontalement. En adoptant la même méthode de calcul de précision (les différents clients agents sont mis en 50 positions différentes du site (parfois sur les points de la grille), et en 50 positions sur les PPs, et la moyenne de la précision est calculée pour ces 50 positions), cette précision n'a pas changé pour les positions sur les PPs de même que pour les positions hors des PPs. Pour un déplacement de 1,5 m, la précision a varié : elle devient en moyenne de 0.3 m sur les PPs et 0.8 m en dehors des PPs ; pour un déplacement de 2 m, elle varie d'avantage ; elle devient en moyenne de 0.4 m sur les PPs et 0.9 m en dehors des PPs) ; elle continue à varier au fur et à mesure qu'on déplace d'avantage l'AP1. Le tableau 22 regroupe tous les résultats obtenus pour un déplacement d'un seul AP pendant le positionnement :

Valeur du déplacement des AP	Agent	Logiciel	Adapteur WiFi	Précision sur les PP	Précision hors des PP
1.5 mètres	Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	0.3 m	0.8 m
	i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	0.3 m	0.75 m
2 mètres	Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	0.4 m	0.9 m
	i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	0.4 m	0.9 m
5 mètres	Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	0.6 m	1.2 m
	i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	0.6 m	1.2 m
20 mètres	Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	2.4 m	3.2 m
	i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	2.4 m	3.2 m

Table 22- Déplacement d'un AP pendant le positionnement

Avec 2 points d'accès déplacés à la fois, l'AP1 et l'AP5 (cf. figure 45), la précision commence à varier dès le premier mètre de déplacement horizontal des 2 APs (0.35 m de précision sur les PPs et 0.9 m en dehors des PPs).

AP1 est toujours déplacé de 1 m, et on déplace AP5 de 2 m : la précision est de 0.65 m sur les PPs et de 1.4 m en dehors des PPs.

Le tableau 23 suivant regroupe les résultats obtenus avec un déplacement de 2 APs pendant le positionnement :

Valeur du déplacement de l'AP	Agent	Logiciel	Adapteur WiFi	Précision sur les PP	Précision hors des PP
1 mètre	Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	0.35 m	0.9 m
	i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	0.35 m	0.9 m

2 mètres (AP1 déplacé de 1 m et AP5 de 2 m)	Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	0.65 m	1.4 m
	i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	0.65 m	1.4 m
5 mètres	Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	1 m	1.9 m
	i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	1 m	1.9 m
10 mètres	Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	1.8 m	3 m
	i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	1.8 m	3 m

Table 23- Déplacement de 2 APs pendant le positionnement

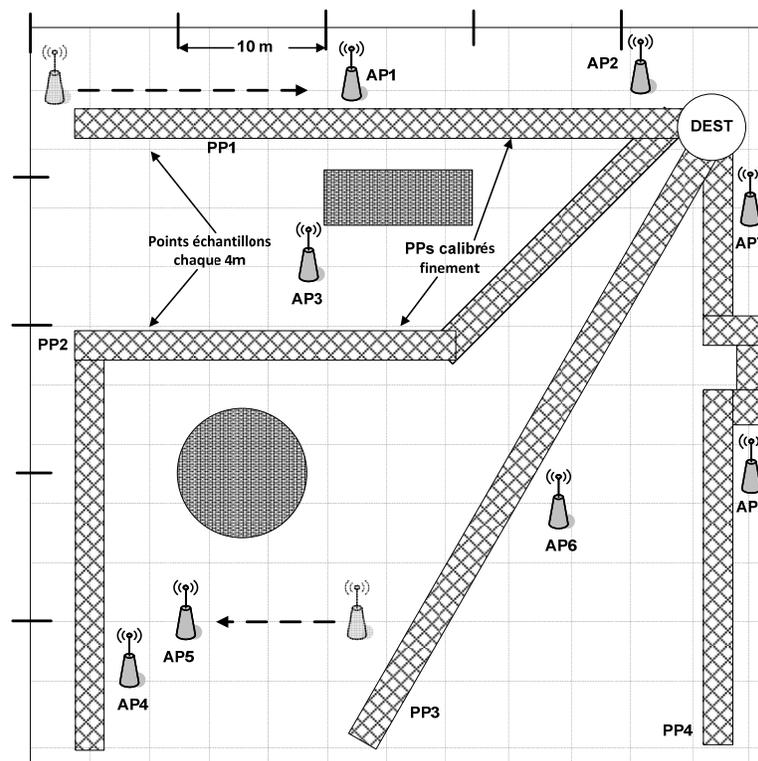


Figure 45- Déplacement de 2 APs pendant la phase de positionnement

La situation s'aggrave avec le déplacement de 3 points d'accès déplacés à la fois: l'AP1, l'AP5 et l'AP8 (cf. figure 46) ; la précision commence à varier dès le 1^{er} mètre de déplacement des 3

APs. Les résultats notés dans le tableau 24 représentent les précisions de localisation obtenues suite à un déplacement de 3 APs de 10 mètres chacun :

Agent	Logiciel	Adaptateur WiFi	Précision sur les PP	Précision hors des PP
Ordinateur portable	Windows XP	3Com OfficeConnect Wireless 11a/b/g PC Card	2.2 m	3.8 m
i-mate JAM	Windows Mobile 2003 Second Edition	SDIO Wireless 11Mbs Adapter for PDA imate Jam XDA mini 802.11g	2.2 m	3.8 m

Table 24- Déplacement de 3 APs de 10 mètres

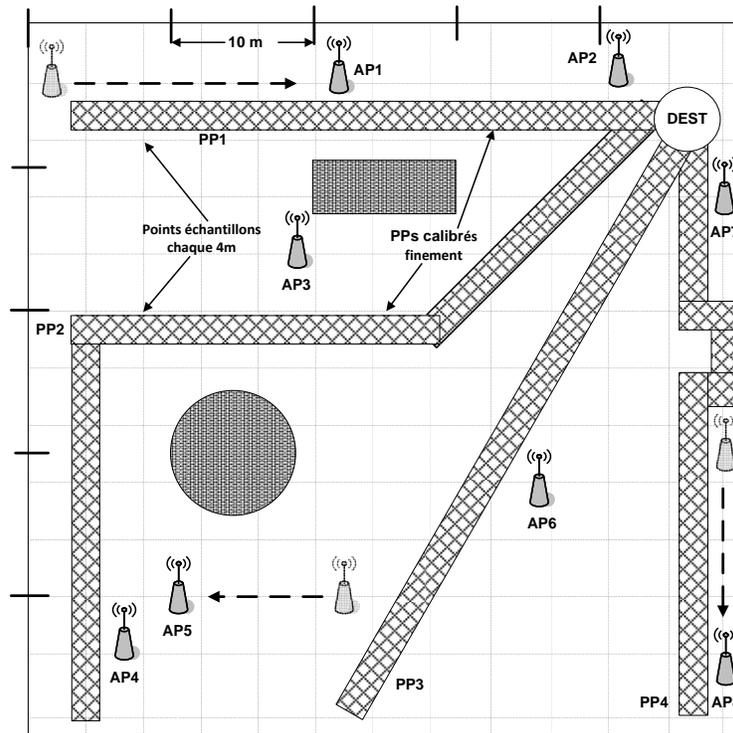


Figure 46- Déplacement de 3 APs pendant la phase de positionnement

La précision est beaucoup dégradée, mais malgré un déplacement de 10 m pour 3 APs, on conserve une précision inférieure à 4 m car il reste encore 5 APs bien positionnés sur une surface de 50 m x 50 m.

On peut noter que la différence de précision entre les points en dehors des PPs et sur les PPs tend à s'atténuer, même si elle reste meilleure sur les PPs.

En comparant les résultats obtenus avec 3 APs en panne et 3 APs déplacés de 10 m chacun pendant la localisation, on remarque que les résultats sont beaucoup plus dégradés dans le deuxième cas. Lorsque l'on déplace des APs, il vaut mieux les éteindre que de les laisser fonctionner.

Dans le cas de déplacement important des APs, un recalibrage du site doit être effectué pour maintenir la précision de localisation. C'est l'une des contraintes à considérer dans l'exploitation du système.

4.6 Guidage dans les différents scénarios

On expose dans ce paragraphe le travail effectué pour analyser l'effet de la précision de localisation sur le guidage. Les tests de guidage ont été effectués sur plusieurs personnes.

On reprend les différents scénarios des paragraphes précédents. Dans chaque scénario, on essaye de positionner la personne puis de la ramener sur le chemin privilégié le plus proche et de la guider à travers ce PP vers la destination.

La personne « guidée » a les yeux fermés et ne connaît pas le site ; elle porte le i-mate JAM sur lequel tourne le client et tient dans sa main un interphone ; cet interphone lui permet d'entendre la personne « Guide ». La personne « guide » est installée dans un bureau derrière le site et donc ne voit pas la personne guidée mais visualise la position de l'i-mate sur le logiciel de positionnement en temps réel. Elle doit guider la personne aux yeux fermés vers la destination (notée DEST sur les différentes figures) à l'aide d'un jeu limité de messages de guidage vocaux qui seront précisés plus loin.

Les personnes guidées n'avaient pas le droit de poser de questions lors de l'expérimentation, toutefois des interrogations se font parfois entendre : « Comme ça c'est bon ?, suis-je sur le bon chemin, ...etc ». La personne guide pouvait entendre ces questions à travers l'interphone mais elle ne répondait pas ; elle se contentait d'énoncer les consignes de guidage, prédéfinies pour cette expérimentation, et apprises à la personne guidée avant le test de guidage:

- « Tu es à gauche du PP ! » et donc la personne sait qu'elle doit prendre sa droite en avançant.
- « Tu es à droite du PP ! » la personne sait qu'elle doit prendre sa gauche en avançant.
- « Tu es sur le bon PP ! Avance! » ce message est répété tant que la personne est sur le bon PP, à intervalles réguliers (toutes les 20 à 25 secondes environ).
- « Tourne à droite ! » la personne sait qu'elle doit tourner de 90° à sa droite.
- « Tourne à gauche ! » la personne sait qu'elle doit tourner de 90° à sa gauche.
- « Tourne de 45° à ta gauche et avance ».
- « tourne de 45° à ta droite et avance! ».

À côté de la personne guide, une autre personne relève régulièrement des estimations de position données par le logiciel Ekahau.

Une dernière personne se trouvant à proximité de la personne guidée, notait sur le sol à la craie certains des points du trajet réel effectué par la personne guidée ; à la fin de chaque test les coordonnées (x,y) de ces points ont été mesurées et sauvegardées.

À noter que la personne guidée pouvait atteindre la destination sans avoir à changer le sens de son trajet (pas de détour), c'est-à-dire en restant toujours dirigée dans la direction de la destination (sauf si elle se perdait) ; Aussi le message « tourne dans le sens opposé » n'a-t-il pas été inclus dans la liste des messages, La connaissance de l'orientation des personnes n'est pas considérée dans le contexte de cette expérimentation (le Personal Guidance System proposé par Jack Loomis, Reginald Golledge et Roberta Klatzky [49] aborde des consignes de guidage spécifiques au système qu'ils proposent et qui consiste à guider des personnes aux yeux fermés sur des routes prédéfinies; ce système est basé sur la localisation GPS et l'orientation des personnes est détectée grâce à un compas de type «fluxgate compass» qui fournit le cap magnétique et qui peut être porté sur la tête).

4.6.1 Guidage dans le scénario de calibrage uniforme (scénario 1)

Dans ce scénario, dix personnes (UM- Utilisateur Mobile) ont été guidées. On montre dans la figure 47, d'une part le trajet réel effectué par l'UM (avec des marqueurs en forme de +

ou en format gras) et d'autre part le trajet calculé par Ekahau (avec des marqueurs en forme de disque plein ou en pointillé). Chaque marqueur représente un point de mesure et on a interpolé linéairement entre ces marqueurs pour le tracé. On donne 2 versions de la figure ; une première version avec un tracé à l'échelle en indiquant sur chaque tracé les points de mesure relevés. Il est à noter qu'il n'y a pas de synchronisation temporelle entre les points de mesure sur les tracés réels et les tracés Ekahau. Une deuxième version plus schématique (pas à l'échelle) rappelant les positions des points d'accès. Les mêmes conventions seront utilisées pour les figures 47 à 52. Le point de départ n'était pas le même pour toutes les personnes (ce point se trouve là où est dessinée la personne malvoyante). La table 25 donne le temps mis par chaque personne pour aboutir à la destination (temps depuis le repérage de la position de l'UM jusqu'à son arrivée à la destination).

Il a été possible de conduire les dix personnes vers un PP, mais cette première étape a nécessité un temps assez différent d'un UM à l'autre. De plus, certains UM ont parfois suivi un autre PP que celui que le guide désirait vraiment (cas d'UM3, d'UM9 et d'UM10) ; parfois, alors que le guide essayait de mettre une personne sur le bon PP, cette personne a heurté un obstacle se trouvant au milieu du site (cas d'UM2 heurtant un bac à fleurs) ; le virage trop serré du PP4 qui présente quatre angles à 90° rapprochés (cerclé sur la figure 47) n'a pas été suivi par UM5.

Parfois la personne se trouve réellement sur un PP tandis que sur le système Ekahau la détecte hors chemin et vice-versa. La précision de localisation du piéton en mouvement est inférieure à celle obtenue avec les tests décrits précédemment car la personne ne cherche pas à maintenir une vitesse de déplacement lente et régulière. On observe sur les différents tracés que les distances entre les positions estimées et réelles sont souvent de l'ordre de 3 m (au lieu de 0,9 m dans le tableau 17). si par exemple la position estimée par Ekahau est sur le PP, la personne guide va énoncer le message de «Tu es sur le bon chemin; Avance!»; tandis qu'en réalité la personne se trouve hors du PP et de cette façon elle va continuer à s'avancer hors du PP. L'inverse est aussi vrai : la position estimée par Ekahau est hors du PP (à gauche de celui-ci). La personne guide va énoncer : «Tu es à gauche du PP!» ; tandis que cette personne se trouve réellement sur le PP, elle va aller à sa droite et sortir du PP.

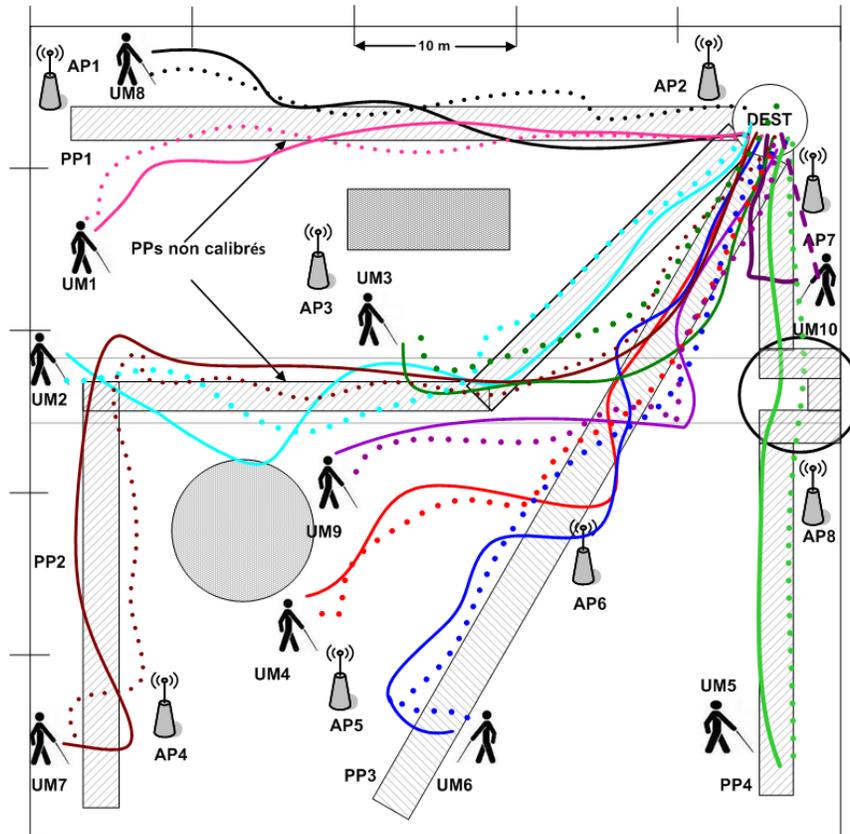
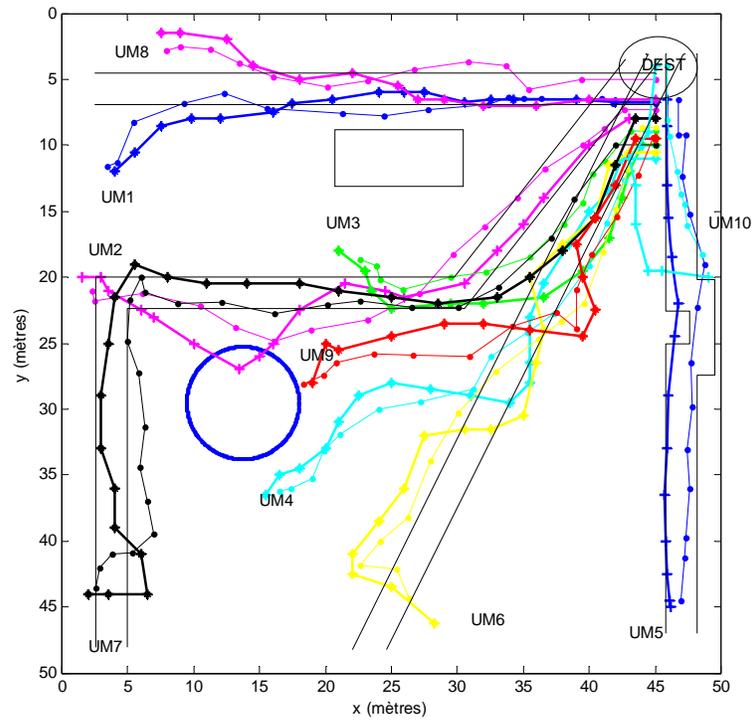


Figure 47- Guidage dans le scénario de calibrage uniforme

Utilisateur Mobile	Preferred Path	Distance à la destination au démarrage ¹³	Temps pour arriver à la destination
UM1	PP1	46 m	5 minutes 10 secondes
UM2	PP2	61 m	6 minutes
UM3	PP2	45 m	5 minutes 40 secondes
UM4	PP3	50 m	5 minutes 50 secondes
UM5	PP4	43 m	5 minutes
UM6	PP3	51 m	5 minutes 57 secondes
UM7	PP2	84 m	6 minutes 9 secondes
UM8	PP1	42 m	5 minutes 6 secondes
UM9	PP2	46 m	5 minutes 35 secondes
UM10	PP4	25 m	4 minutes 5 secondes

Table 25- Temps de guidage dans le scénario de calibrage uniforme

D'après le tableau 25, on peut déduire la vitesse de la personne guidée qui est inférieure à 1 km/h. Le temps de guidage est affecté par les nombreuses oscillations qu'a subi le trajet réel de la personne ; Les consignes de guidage dans ce scénario ont été fréquentes, ce qui perturbait en quelque sorte la personne guidée. UM7 par exemple ne cessait de demander ce qu'il devait faire: «maintenant à gauche, maintenant quoi ?...».

4.6.2 Guidage dans le scénario de RWPS (scénario 2)

Parmi les 10 personnes qui ont participé à ce nouveau test, deux avaient déjà effectué le test pour le scénario 1 : UM7 (PP2) et UM10 (PP4). Mais pour le scénario RWPS elles ont été guidées sur des chemins différents (PP1 et PP3). Pour ce nouveau scénario, elles sont notées respectivement UM1 (PP1) et UM6 (PP3).

¹³ Cette distance correspond à un trajet sur un PP plus la distance pour aboutir à ce PP

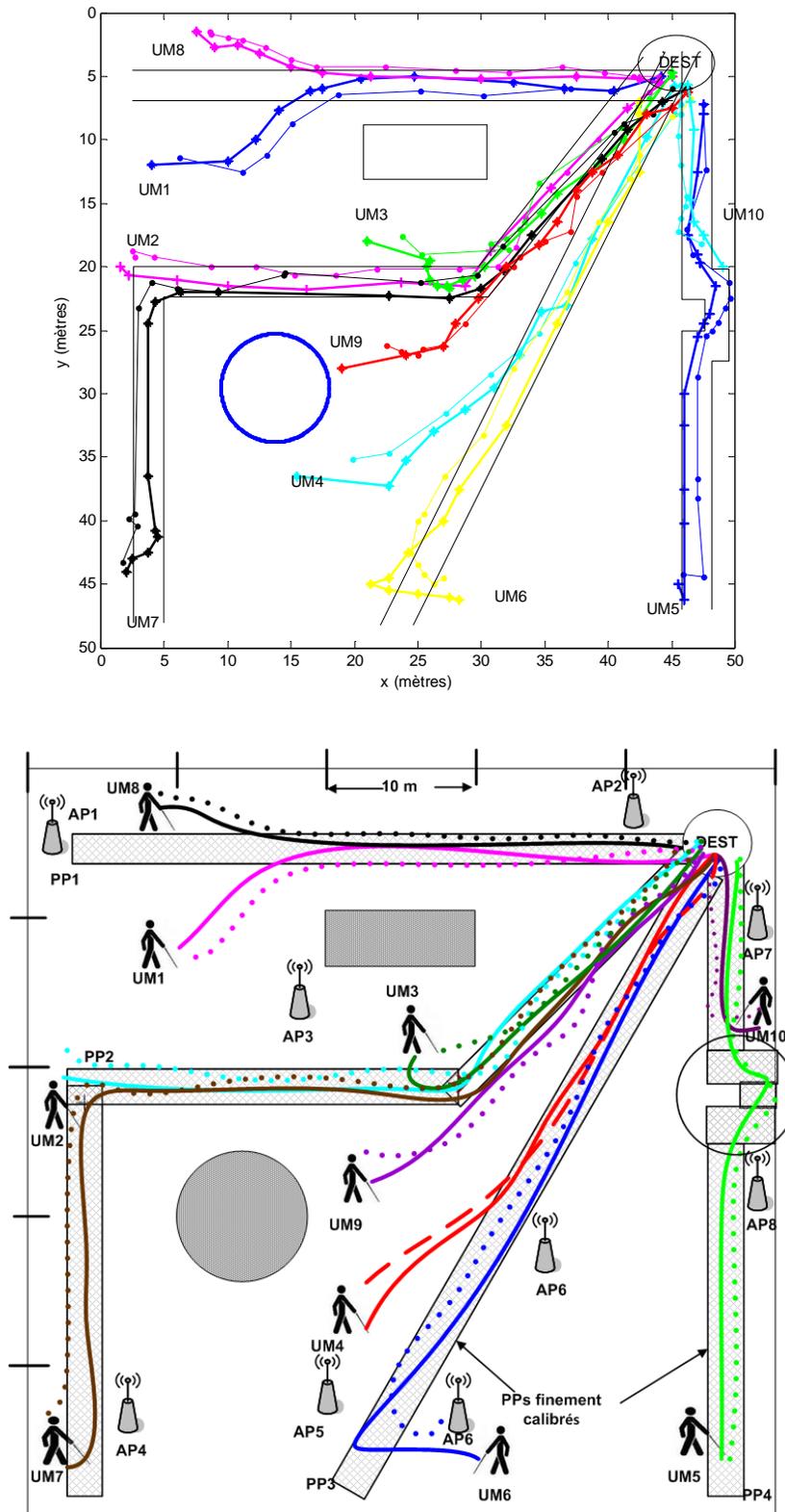


Figure 48- Guidage utilisant RWPS

Utilisateur Mobile	Preferred Path	Distance à la destination au démarrage	Temps pour arriver à la destination
UM1	PP1	46 m	2 minutes 42 secondes
UM2	PP2	61 m	2 minutes 49 secondes
UM3	PP2	45 m	2 minutes 18 secondes
UM4	PP3	50 m	3 minutes 5 secondes
UM5	PP4	43 m	3 minutes 31 secondes
UM6	PP3	51 m	2 minutes 37 secondes
UM7	PP2	84 m	3 minutes 19 secondes
UM8	PP1	42 m	2 minutes 30 secondes
UM9	PP2	46 m	2 minutes 26 secondes
UM10	PP4	25 m	2 minutes 2 secondes

Table 26- Temps de guidage dans RWPS

On constate que la durée moyenne pour guider les personnes jusqu'à la destination est inférieure à celle du scénario1 (environ 2 fois plus courte).

Dès que l'UM atteint réellement un PP (entre dans la zone du PP), le logiciel de positionnement peut le localiser avec une bonne précision et le guidage peut ensuite s'effectuer sans beaucoup « d'oscillations » jusqu'à la destination.

Afin de pouvoir résoudre le problème rencontré dans le cas du scénario 1, pour le virage du PP4 (voir la zone cerclée de la figure 48 (la personne guidée continuait tout droit son chemin sans suivre le PP)), des échantillons supplémentaires ont été relevés sur le contour du PP4 et dans la zone du virage à raison d'un échantillon tous les 0.2 ou 0.3 m, ce qui a permis une précision de l'ordre de 0,1m dans cette région.

4.6.3 Guidage dans le scénario d'élimination d'APs avant le calibrage

Comme la fois précédente, 3 APs ont été débranché (AP3, AP5 et AP7) dès la phase de calibrage.

Les tests ont été réalisés sur trois personnes. La figure 49 illustre les trajets parcourus et estimés. La table 27 précise les résultats obtenus en termes de durée.

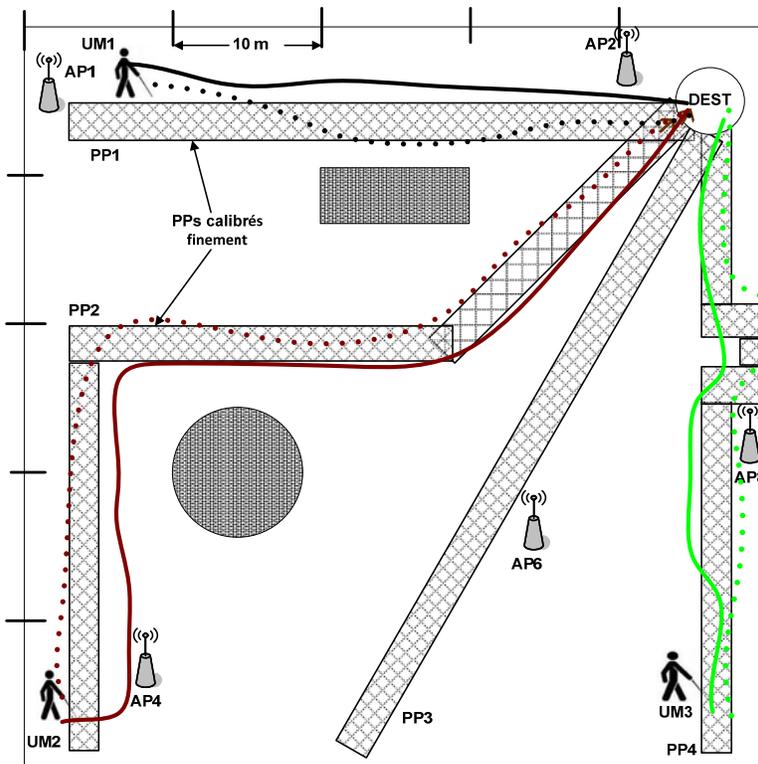
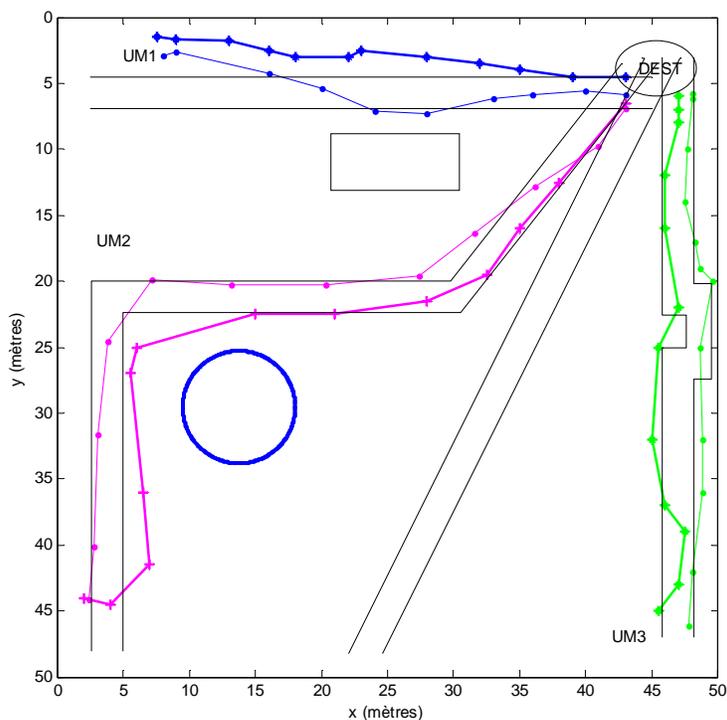


Figure 49- Guidage dans le scénario de suppression d'APs avant le calibrage

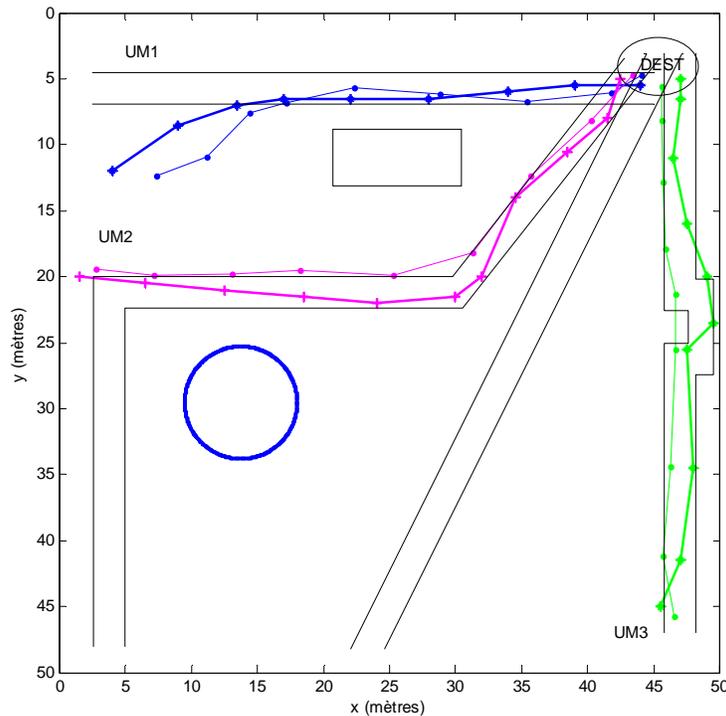
Utilisateur Mobile	Preferred Path	Distance à la destination au démarrage	Temps pour arriver à la destination
UM1	PP1	42 m	4 minutes 12 secondes
UM2	PP2	84 m	5 minutes 29 secondes
UM3	PP4	43 m	4 minutes 10 secondes

Table 27- Temps de guidage dans le scénario d'élimination d'APs avant le calibrage

On observe une dégradation significative de la précision du positionnement quand on n'utilise que 5 APs au lieu de 8.

4.6.4 Guidage dans le scénario de suppression d'APs pendant le positionnement

Dans cette expérimentation, les 8 APs ont été utilisés pour le calibrage puis 3 APs ont été débranchés pendant la phase de localisation (AP3, AP5 et AP7). Les tests ont été réalisés sur trois personnes. La figure 50 illustre les trajets parcourus et estimés. La table 28 précise les résultats obtenus en terme de durée.



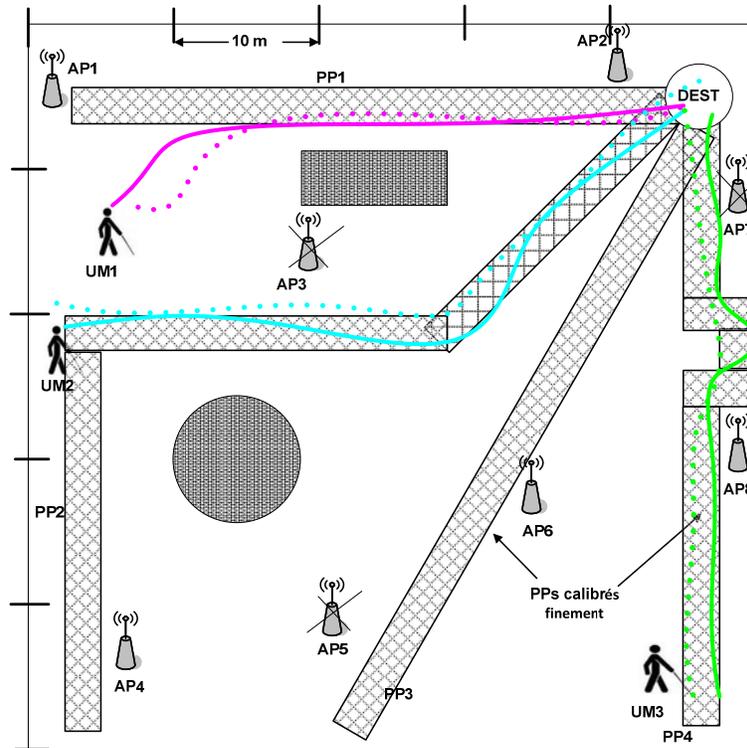


Figure 50- Guidage dans le scénario de suppression d'APs pendant le positionnement

Utilisateur Mobile	Preferred Path	Distance à la destination au démarrage	Temps pour arriver à la destination
UM1	PP1	46 m	2 minutes 50 secondes
UM2	PP2	61 m	2 minutes 52 secondes
UM3	PP4	43 m	3 minutes 52 secondes

Table 28- Temps de guidage dans le scénario de suppression d'APs pendant le positionnement

Dans ce scénario, les résultats sont assez proches de ceux obtenus avec les 8 APs pendant la localisation. Les chemins semblent cependant un peu moins rectilignes.

4.6.5 Guidage dans le scénario de déplacement des APs

Dans un premier test, on déplace un seul AP (AP1) de 20 mètres. Les tests ont été réalisés sur trois personnes. La figure 51 illustre les trajets parcourus et estimés. La table 29 précise les résultats obtenus en termes de durée.

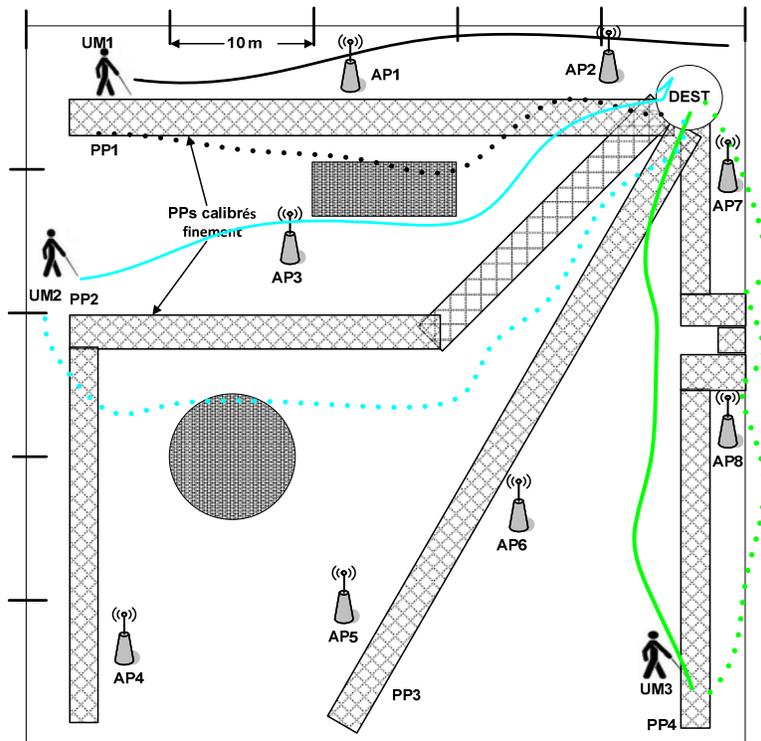
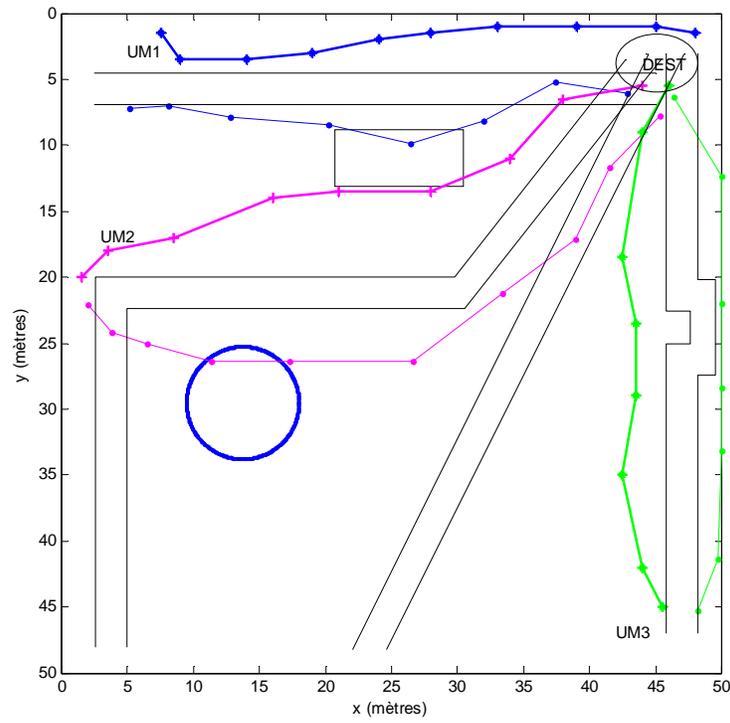


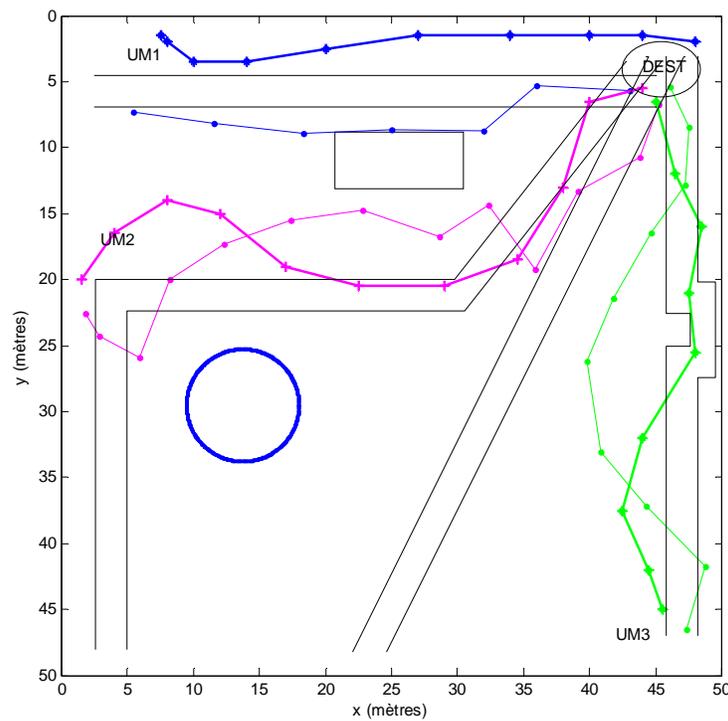
Figure 51- Guidage dans le scénario de déplacement d'un AP (de 20 mètres)

Utilisateur Mobile	Preferred Path	Distance à la destination au démarrage	Temps pour arriver à la destination
UM1	PP1	42 m	(n'a pas abouti au bout d'une durée de 2 minutes 55 secondes)
UM2	PP2	61 m	2 minutes 50 secondes
UM3	PP4	43 m	3 minutes 40 secondes

Table 29- Temps de guidage dans le scénario de déplacement d'un AP (de 20 mètres)

On constate que la précision de localisation s'est beaucoup dégradée. Même si il a été possible de guider 2 des 3 personnes jusqu'à destination.

On a ensuite déplacé 2 APs de 20 mètres (AP1 et AP5). Les résultats sont présentés sur la figure 52 et la table 30. Ils sont comparables à ceux du test précédent.



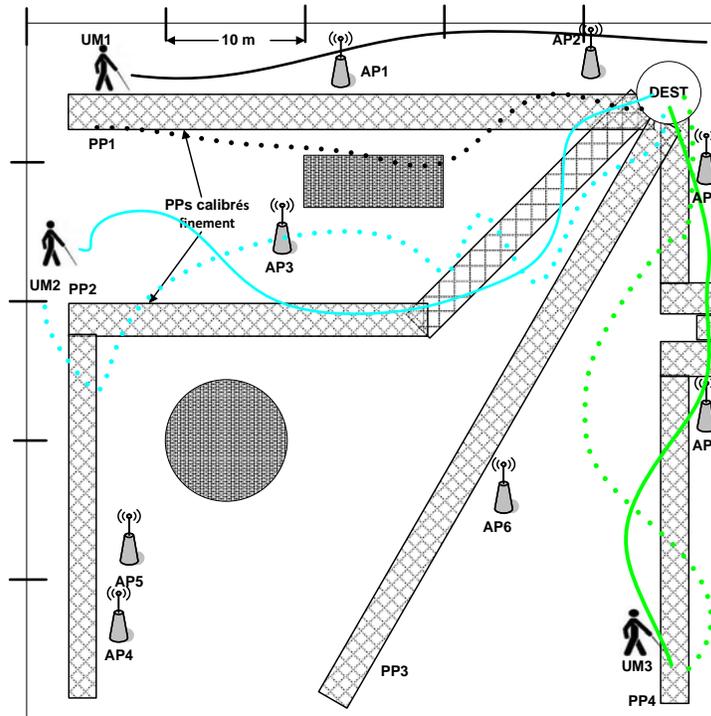


Figure 52- Guidage dans le scénario de déplacement de 2 APs (de 20 mètres)

Utilisateur Mobile	Preferred Path	Distance à la destination au démarrage	Temps pour arriver à la destination
UM1	PP1	42 m	(n'a pas abouti au bout d'une durée de 2 minutes 50 secondes)
UM2	PP2	61 m	3 minutes 40 secondes
UM3	PP4	43 m	4 minutes

Table 30- Temps de guidage dans le scénario de déplacement de 2 APs

4.6.6 RSSI durant le guidage

Pendant le guidage des personnes (des UM) on a relevé les RSSI reçus par l'i-mate JAM porté par l'UM. Cette mesure est donnée par le logiciel de positionnement EPE d'Ekahau¹⁴. Les valeurs sont indiquées pour chaque canal radio (sur lequel opère chaque AP) et sont comprises entre -100 et 0, -100 correspondant au RSSI minimum et 0 au RSSI maximum. Ce sont des valeurs indicatrices sans unité.

On trace sur les figures suivantes, les valeurs des RSSI relevés pour chaque client agent lors de son déplacement. Ces valeurs sont prises à des instants spécifiques dans l'intervalle [0-280 secondes] pour le scénario 1 avec un pas de 20 secondes, et dans l'intervalle [0-140 secondes] pour le scénario 2 de RWPS avec un pas de 10 secondes (15 valeurs de RSSI de chaque AP ont été notées; mais comme le temps de guidage dans le scénario 1 est supérieur à celui du scénario

¹⁴ Il suffit de faire un « Show RSSI » en sélectionnant, sur le logiciel de positionnement EPE, l'agent i-mate positionné, et en faisant un clic droit sur son adresse MAC.

2, on a relevé une valeur toutes les 20 secondes pour le scénario 1 et une valeur toutes les 10 secondes pour le scénario 2) ; chaque courbe représente les mesures reçues d'un point d'accès (8 courbes pour 8 APs).

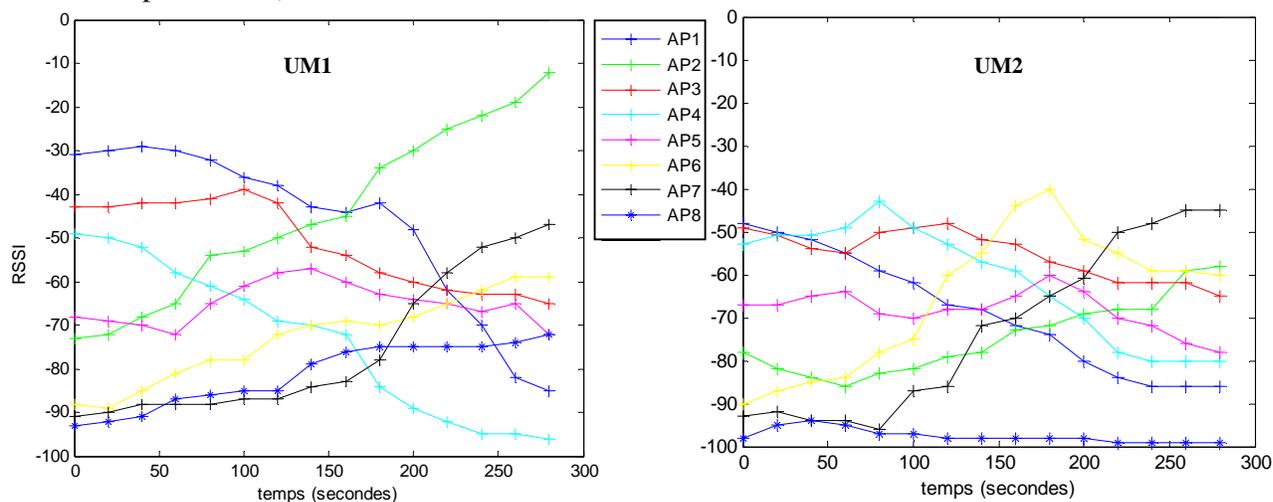


Figure 53- UM1 et UM2 durant le guidage du scénario de base (scénario n°1)

La valeur du RSSI pour un AP donné, diminue quand l'UM s'éloigne de cet AP et inversement. Le PDA peut récupérer les signaux des 8 APs lors de son déplacement et en mesurer la puissance. En ignorant les faibles puissances (au-dessous de -80 par exemple), on a au moins les signaux de 5 APs pour l'UM1 et de 4 APs environ pour l'UM2 qui participent à sa localisation.

UM1 a pris un temps de 5 minutes 10 secondes pour aboutir à la destination (cf. tableau 25 de ce chapitre); à l'instant 280 secondes (4 minutes 40 secondes) de son trajet, il était à peu près à une distance de 8 mètres (mesurée réellement) de l'AP2 et donc pouvait récupérer le signal de l'AP2 avec une puissance de -12 (voir graphe 1 de la figure 38 et figure 47 montrant le trajet effectué par l'UM1 dans le cas du scénario 1).

UM2 qui a pris 6 minutes pour aboutir à la destination, se trouvait à l'instant 4 minutes 40 secondes à peu près à une distance de 33 mètres de l'AP2 (son trajet présentait beaucoup d'oscillations au début ; il a donc pris plus de temps que UM1 au début de ce trajet) et recevait le signal de l'AP2 avec une valeur RSSI de seulement -58.

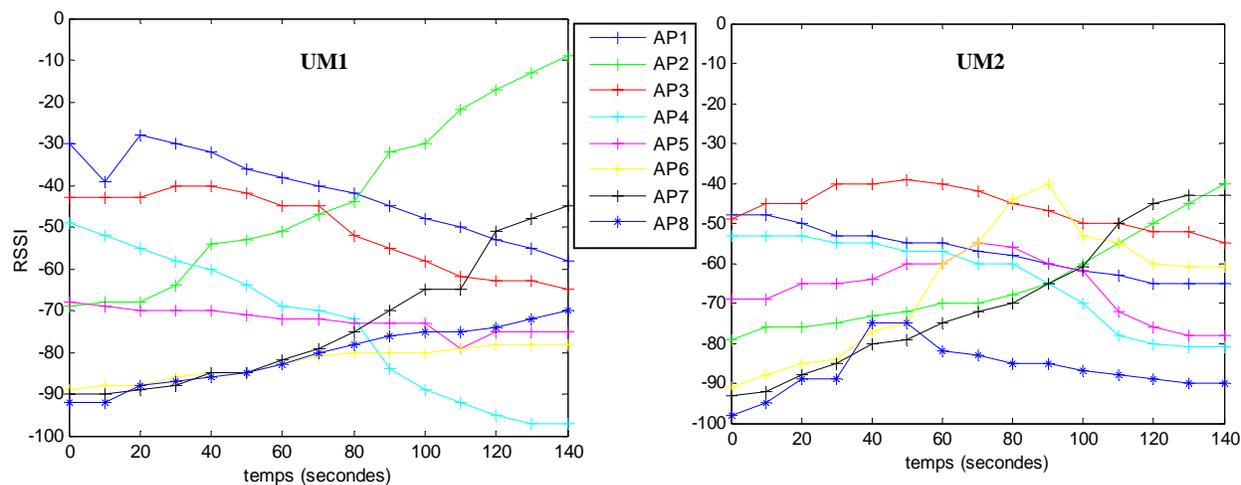


Figure 54- UM1 et UM2 durant le guidage du scénario 2 (RWPS)

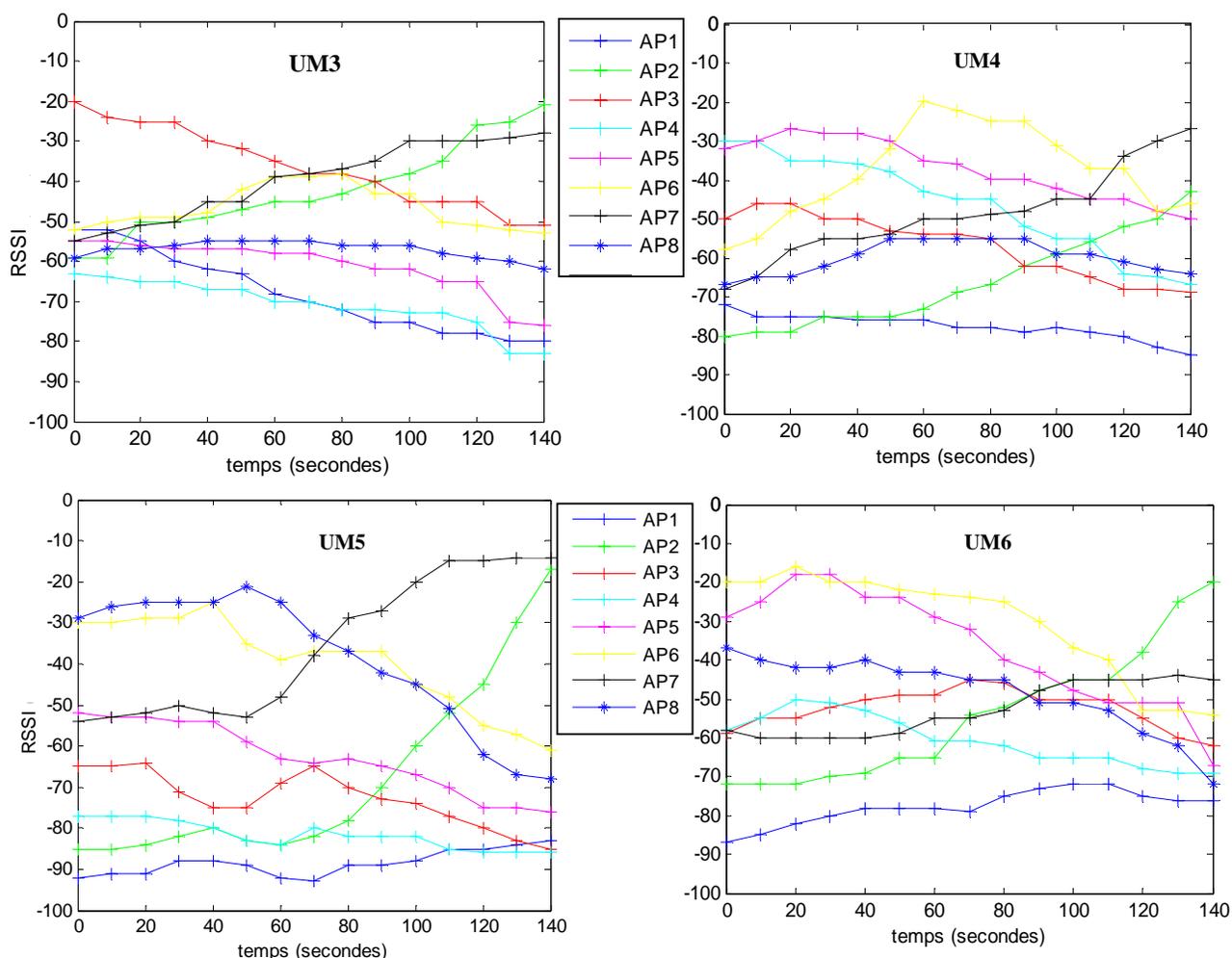
Comme pour le scénario 1, en ignorant les faibles puissances (RSSI au-dessous de -80 par exemple), on reçoit au moins les signaux de 5 APs pour UM1 et de 4 APs environ pour UM2 qui participent à sa localisation.

On vérifie qu'en moyenne les RSSI varient de façon cohérente par rapport à la distance de la personne par rapport aux points d'accès.

UM1 a pris un temps de 2 minutes 42 secondes pour aboutir à la destination (voir tableau 26 de ce chapitre) ; à l'instant 140 secondes (2 minutes 20 secondes) de son trajet, il était à peu près à une distance de 5 mètres de l'AP2 et donc pouvait récupérer le signal de l'AP2 avec une puissance de -9 voir graphe 1 de la figure 40 et figure 48 montrant le trajet effectué par l'UM1 dans le cas du scénario 1).

Pour l'UM2 qui a pris 2 minutes et 49 secondes pour aboutir à la destination, à l'instant 2 minutes 20 secondes, il a récupéré le signal de l'AP2 avec un RSSI de -40 et donc il était encore un peu loin de l'AP2 (AP2 se trouve à la destination) (un peu plus que 20 mètres).

On représente dans la figure 55 suivante les courbes des RSSI des 8 APs pour les différents utilisateurs mobiles durant leur guidage dans le scenario RWPS.



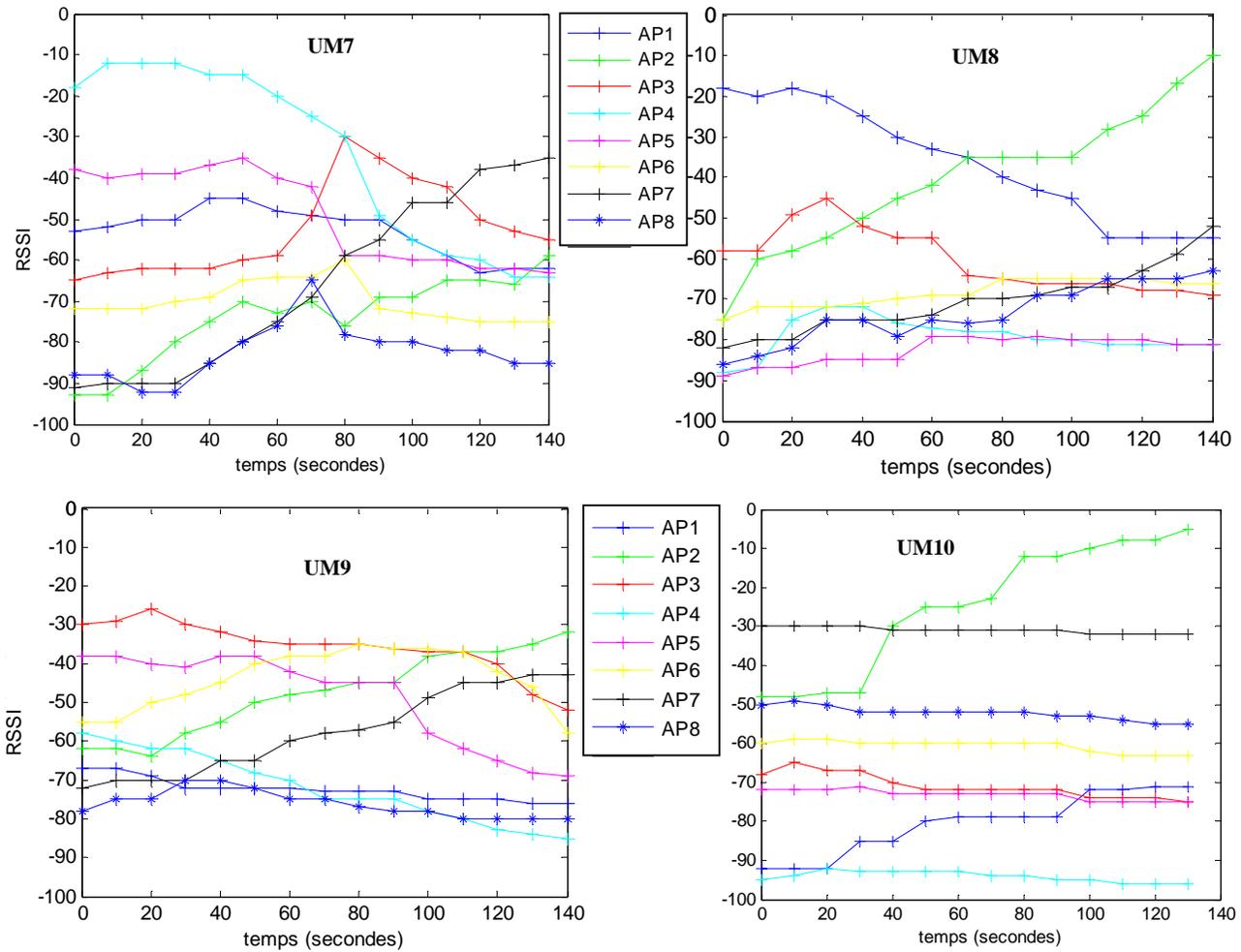


Figure 55- RSSI des 8 APs pour les différents UM

4.6.7 Analyse

La précision de localisation des dispositifs mobiles dans un système de positionnement utilisant les ondes radio WiFi et adoptant la technique d’empreinte radio dépend de plusieurs facteurs: le nombre d’APs utilisés durant le calibrage, leurs emplacements, le nombre d’échantillons pris et sauvegardés dans la base de données, le changement des conditions environnementales du site et éventuellement les caractéristiques électromagnétiques, les cartes WiFi des dispositifs, la mobilité des agents

La solution proposée dans ce chapitre (le scénario 2 appelé RWPS), utilise une méthodologie de calibration qui consiste à prendre un grand nombre de points échantillons sur les chemins préférés et à effectuer un calibrage plus grossier sur une grille uniforme pour le reste du site. Ceci renforce la précision sur les chemins préférés, tout en évitant le temps important qui serait nécessaire pour calibrer un site complet avec cette précision. Le nombre des points d’accès participant au calibrage doit être suffisant. Il est nécessaire d’installer des APs d’une façon à bien couvrir le site considéré et recevoir le signal d’au moins 3 APs en tout point du site. Tout déplacement et/ou élimination de points d’accès pendant la phase de localisation peut résulter en

des calculs de positions erronés et dans ce cas le calibrage doit être refait afin de reconstruire la carte radio du site pour refléter ces changements. Ceci reste l'un des problèmes dans un tel système d'empreinte radio et constitue une des perspectives de travaux futurs pour cette thèse.

Pour le guidage dans RAMPE/INFOMOVILLE, et d'après les expérimentations faites, RWPS a montré une bonne fiabilité et efficacité (des trajets parcourus avec peu d'oscillations et des temps de guidage inférieurs à ceux du scénario 1). On étudie dans le paragraphe suivant la possibilité d'intégrer ce service de localisation et de guidage dans RAMPE/INFOMOVILLE.

4.7 Intégration dans RAMPE/INFOMOVILLE

L'intégration d'un service de localisation et de guidage dans RAMPE/INFOMOVILLE permettra de fournir aux utilisateurs du système une assistance supplémentaire favorisant leur mobilité et leur sécurité en déplacement.

Différentes applications de localisation et éventuellement de guidage d'un piéton PAM sont possibles (discutés dans le paragraphe 4.3). On considère le système de localisation par ondes WiFi et la méthode d'empreinte radio ainsi que la solution proposée dans le scénario 2 du paragraphe 4.5 qui consiste à adopter une méthodologie de calibration fine dans les zones critiques afin de renforcer la précision sur celles-ci (la méthode des chemins privilégiés PPs nommée RWPS).

Une application intéressante sera de pouvoir localiser le PDA porté par la PAM et puis le guider, sur l'un des chemins choisis comme privilégiés, vers la destination (la borne) ; des observations faites sur le site considéré permettront de spécifier ces PPs : des PPs faciles, si possible peu encombrés et présentant moins de détours, d'obstacles et de risques de collisions devront être choisis ; On pourrait par ailleurs identifier ces chemins privilégiés par une observation, effectuée sur un nombre suffisant de PAM, des meilleures stratégies de cheminements adoptés par eux sur le site. Pour cette application, le client agent sera installé sur le PDA ou smartphone du PAM et la carte radio du site construite par calibrage et chargée dans les bornes présentes sur le site. Après l'association de son PDA avec une borne, la PAM peut recevoir un message auditif par le biais de son PDA lui demandant s'il veut profiter du service de guidage (car il se peut que la station de bus soit juste à côté de lui et qu'il puisse la localiser d'après sa sonnerie sans avoir besoin du service de guidage). Si la PAM accepte le service, le logiciel de positionnement détecte le PDA et le localise. Ce logiciel choisit le PP le plus proche de la position du PAM et essaye de le guider sur ce PP en utilisant des consignes de guidage bien déterminées («tu es à droite du PP, à sa gauche, tourne à droite...etc»). On appellera ces messages «Messages de Position». Le logiciel pourra envoyer des messages de position avec une période rapprochée tant que la PAM est en dehors du chemin privilégié. Quand la PAM est positionnée sur le chemin choisi, le logiciel de positionnement lui envoie un message de position du genre «Tu es sur le bon chemin!!» avec une fréquence de répétition plus faible ou éventuellement sur déclenchement par la PAM (appui sur une touche pour demande de confirmation). Si la PAM s'éloigne du PP, les messages de position fréquents seront à nouveau générés. Arrivant à proximité de la borne, un message de « Bien arrivé » peut se faire entendre. On illustre ceci par le schéma de la figure 56 ci-dessous.

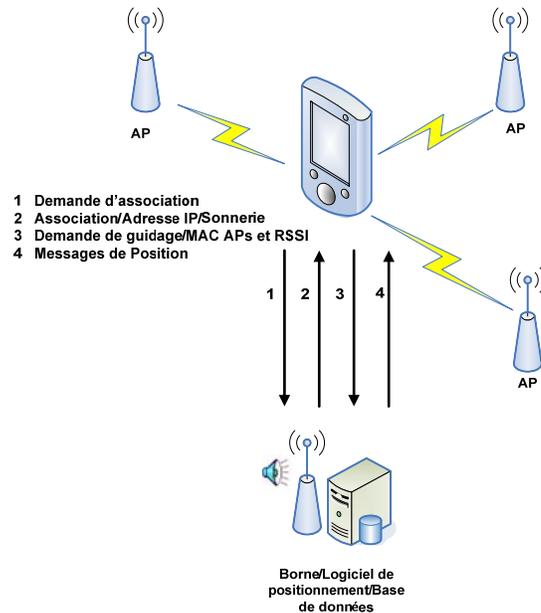


Figure 56- Intégration de RWPS

Une autre application utile pour RAMPE/INFOMOVILLE est celle qui consiste à indiquer à une autre personne la position du PAM de façon à permettre à cette personne d'aller à la rencontre du PAM. On peut imaginer un service individualisé d'assistance dans les gares par exemple. Pour cette application, la personne assistante dispose elle aussi d'un PDA ou smartphone sur lequel elle reçoit une carte du lieu avec la position du PAM.

Différents points seront à considérer dans l'implémentation d'un tel système de positionnement. On peut citer les points suivants :

- Implantation dans un site complexe de grandes dimensions : l'expérimentation faite pour montrer la fiabilité de la solution proposée (la solution RWPS) a eu lieu dans un site en espace ouvert et à l'intérieur d'une même zone, tandis que, l'un des objectifs de l'intégration d'un tel système de guidage dans RAMPE/INFOMOVILLE est de proposer une extension de cette application utilisable dans les bâtiments de transport public et les pôles d'échanges et donc dans de grands sites composés parfois de plusieurs étages ou zones. Dans ce cas, les différentes zones doivent être calibrées et leurs cartes radios sauvegardées dans la base de données du serveur de positionnement ; les points d'accès des différentes zones et le serveur de positionnement doivent être connectés au même réseau, ce qui permettra au PDA agent, après son association à un certain AP, de transmettre les mesures des puissances des signaux reçus au serveur de positionnement qui calculera alors sa position sur le site; les escaliers, les couloirs et les frontières séparant les différents étages ou zones peuvent de même être équipés par des points d'accès et feront alors partie de la carte radio calibrée.
- Prise en compte de l'orientation des personnes pour le guidage : dans l'expérimentation de guidage du paragraphe 4.6, l'orientation des personnes n'était pas fournie séparément, elle ne pouvait être déduite qu'indirectement en observant leur progression. Les personnes à guider ont été amenées dans un endroit du site calibré, après leur avoir bandé les yeux,

et ont été toujours orientées vers la destination (c.à.d dans la direction de la destination). Le message « Tourne dans le sens opposé » n'existait pas dans le cadre de cette expérimentation. Pour une utilisation de ce système dans un environnement de transport public complexe, la connaissance de l'orientation de la personne devrait permettre d'effectuer un guidage plus efficace en particulier dans la phase avant le positionnement sur un PP. Considérons le cas où la PAM est localisée et doit être guidée vers la station de bus. Le logiciel de positionnement la détecte mais doit savoir quel message de guidage utiliser: « tu es sur le bon chemin, avance » (si jamais la PAM est détectée sur un PP) ou bien « tu es sur le bon PP mais la station de bus est derrière toi, et tu dois alors tourner dans le sens opposé avant d'avancer ». L'orientation du dispositif à localiser influe sur les puissances des signaux reçus (les RSSI), aussi les systèmes de positionnement comme Ekahau recommandent-ils de prendre des échantillons dans toutes les directions possibles lors du calibrage du site, pour une bonne précision. Ce point n'a pas été considéré dans le cadre de cette thèse et constitue alors un travail futur.

- Respect de la vie privée : des considérations de respect de la vie privée sont à prendre en compte. En effet, le logiciel de positionnement peut connaître l'adresse MAC du dispositif à localiser.

Conclusions et perspectives

Actuellement, le développement des réseaux sans fil 802.11, l'augmentation continue de leur débit et de leur portée, l'intégration d'une interface appropriée dans un grand panel de terminaux (téléphones mobiles, PDA, portables,...), et des nouveaux dispositifs intelligents comme les PDA et les téléphones intelligents ainsi que les méthodes d'accès aux données et aux informations, rendent possible le développement de nouvelles applications et systèmes facilitant la vie quotidienne par un accès simple à des informations temps-réel. D'autre part, l'intégration et la promotion des personnes handicapées constituent l'un des enjeux de nos sociétés. En ce qui concerne l'assistance aux personnes aveugles, des systèmes élémentaires s'appuyant sur des télécommandes ont été installés dans plusieurs villes. Mais les collectivités ont encore peu déployé de services interactifs personnalisés exploitant les potentialités des technologies en partie car de tels services, pour être efficaces et fiables nécessitent la prise en compte de contraintes ergonomiques fortes. L'utilisation de technologies génériques conduisant à des services utiles à tous et de faible coût devrait faciliter le déploiement de services plus ambitieux.

Dans cette thèse, on s'est intéressé aux personnes à déficience visuelle, aveugles ou malvoyantes (PAM) et aux différents systèmes et outils développés pour répondre à leurs besoins et préoccupations, notamment en ce qui concerne l'utilisation des transports publics et les déplacements dans les pôles d'échanges. Nous avons centré notre travail sur les transports de surface car ils représentent une tâche particulièrement difficile pour une PAM.

Le travail s'est appuyé sur les acquis des projets RAMPE et INFOMOVILLE. Les limitations de la version actuelle du système RAMPE/INFOMOVILLE ont été analysées et des améliorations ont été proposées pour les aspects protocoles réseau, localisation et guidage, simulation de l'application. Nous résumons dans ce qui suit les principales contributions de cette thèse et nous introduisons quelques perspectives pour des travaux futurs.

Principales contributions

La thèse a porté sur deux aspects critiques de l'application RAMPE/INFOMOVILLE : la fiabilité de la transmission de données et la capacité à localiser et à guider l'utilisateur de manière robuste.

Les deux éléments clés du système RAMPE/INFOMOVILLE sont d'une part la borne embarquée dans les points d'arrêt de transport (composées d'un point d'accès et d'un processeur client/serveur d'information) et d'autre part l'application intelligente embarquée dans les dispositifs (de type ordinateur de poche ou PDA, ou Smartphone) portés par l'utilisateur et communiquant avec la borne à travers un réseau WiFi. Ce réseau est soumis à différentes perturbations qui peuvent limiter la fiabilité de la transmission de données. Dans la version actuelle de RAMPE/INFOMOVILLE, les messages urgents transmis depuis la borne vers les PDAs, sont diffusés en utilisant le protocole UDP en mode broadcast. Ce protocole de la couche transport du modèle OSI, étant sans connexion, il manque de robustesse. Un protocole de communication, principalement conçu pour le transfert des messages urgents, a donc été proposé. Ce protocole, appelé RAMPE/INFOMOVILLE Application Protocol (RAP) ajoute une certaine fiabilité en introduisant une redondance au niveau des paquets envoyés. D'autre part, il permet de calculer le taux d'erreur paquets (PER) qui pourra être utilisé comme une métrique

indicateur de la qualité de la liaison radio WiFi et par suite utilisé pour fabriquer un indicateur de qualité de la transmission réseau. Cet indicateur peut être traduit en un message compréhensible par les utilisateurs du système pour leur donner un degré de confiance en l'application et en leurs dispositifs. Ce protocole a été simulé, évalué et comparé à UDP sur deux types de canaux : un canal réel pouvant être perturbé par plusieurs types d'interférences, et un canal modélisé par un modèle de Gilbert-Elliott en utilisant dans les deux cas le simulateur OMNeT++. Afin de minimiser le temps de simulation, le modèle de canal introduit simule les erreurs au niveau paquet.

Dans la deuxième partie du travail, un service de localisation et de guidage est proposé pour être intégré dans le système RAMPE/INFOMOVILLE, qui, dans sa version actuelle, n'en possède pas à l'exception d'un guidage sonore à l'approche des bornes. On propose d'utiliser la technologie WiFi à la fois pour la localisation et la communication. Le positionnement par ondes radio WiFi est de plus en plus utilisé. A la différence du GPS utilisant les systèmes satellites, il peut être employé en indoor et en outdoor, ce qui permet une continuité de service. Nous avons choisi d'utiliser une approche de positionnement par la technique d'empreinte radio qui permet d'obtenir une précision suffisante pour ce type d'application mais présente comme inconvénient principal le temps nécessaire pour calibrer un site avec la précision voulue pour guider des PAM. Dans cette thèse, on a proposé une solution qui renforce la précision dans certains endroits appelés chemins préférés et correspondant à des parcours privilégiés pour des PAM. On ne cherche pas à obtenir une très bonne précision uniforme sur l'ensemble dans le site, mais uniquement sur les chemins "privilégiés" ; la PAM sera localisée sur le site puis guidée à travers l'un de ces chemins. L'efficacité de cette solution a été démontrée par une expérimentation faite sur un site universitaire en zone ouverte.

Perspectives et travaux futurs

Les travaux réalisés durant cette thèse et les résultats obtenus laissent la porte ouverte à un ensemble de perspectives pour des travaux futurs.

Validation du protocole RAP

Le protocole RAP proposé dans cette thèse a pour but d'ajouter une certaine fiabilité à la communication entre les bornes et les dispositifs des utilisateurs de l'application RAMPE/INFOMOVILLE spécifiquement à la transmission en broadcast des messages urgents. L'efficacité de ce protocole a été étudiée par des expérimentations, où on a considéré des transmissions en mode unicast. Il serait intéressant de vérifier que les conclusions restent valides dans des transmissions en broadcast.

D'autre part, l'utilisation des trames de bourrage et de statistique proposées pourra être développée et analysée plus finement : la trame de bourrage sert à synchroniser les différents PDA avec le point d'arrêt et leur permet de sonder le canal en estimant continuellement un taux d'erreur paquet dans une fenêtre temporelle. Ce taux d'erreur paquet doit permettre de pouvoir estimer au niveau de l'application embarquée les paramètres d'un modèle représentant ce canal, dans ce travail nous avons considéré un modèle de Gilbert Elliot. L'enjeu est alors de déduire de ces paramètres la classe du canal (bon, moyen ou mauvais) afin d'adapter d'un point de vue ergonomique la manière et la forme selon lesquelles les informations sont fournies à l'utilisateur du dispositif intelligent.

Les champs ouverts par ce travail sont :

- La validation de la fiabilité du modèle choisi, c'est-à-dire de sa généralité pour toutes les situations de transmission.
- La méthodologie d'estimation des paramètres du modèle en fonction des données collectées, le taux d'erreur paquet.
- L'élaboration d'une classification pertinente d'un point de vue ergonomique des types de canaux.

L'enjeu des trames dites « statistiques » dans ce travail est d'informer le point d'arrêt des conditions de réception des différents dispositifs utilisateurs. A partir de ces données le point d'arrêt pourra modifier son schéma de transmission (nombre de répétition et intervalles entre ces répétitions) sous la double contrainte de minimiser sa consommation et donc le nombre de transmission et de maximiser la qualité de fonctionnement des dispositifs utilisateurs c'est la qualité du canal que chacun voit.

Proposition d'une méthode de calibrage automatique

La localisation par ondes radio WiFi utilisant la méthode d'empreinte radio détaillée dans cette thèse présente un inconvénient qui est le temps mis pour calibrer un site. Pour une bonne précision de localisation, il est nécessaire de calibrer le site d'une façon fine, en d'autres termes de prendre plusieurs points échantillons qui serviront comme points références pour l'estimation de la position de l'objet mobile par le serveur de positionnement. Dans cette thèse, une nouvelle méthodologie de calibration a été proposée, cherchant à renforcer la précision dans certains endroits spécifiques du site plutôt que dans le site entier. Ceci diminue le temps de calibrage tout en obtenant une bonne précision sur les zones de préférence.

Cependant, la carte radio construite peut changer suite à des événements imprévus tels que la panne ou le déplacement de points d'accès ce qui nécessitera l'actualisation de la base de données et le recalibrage du site. Une solution est la conception d'une méthode de calibrage automatique. Des études ont proposé de telles solutions [51, 52, 127, 128], mais le calibrage manuel reste pour le moment le plus adéquat pour une bonne précision de localisation [52]. Une autre perspective est le développement de techniques permettant de détecter automatiquement les changements de l'environnement.

Une approche pourrait consister à calibrer manuellement le site dans un premier temps, puis, à utiliser un système de contrôle surveillant la qualité de la localisation (le groupe ESIEE travaille déjà sur ce sujet) et générant une alerte de demande de recalibrage en cas de modification importante constatée. Un algorithme de mise à jour automatique pourrait alors être utilisé qui s'appuierait sur le premier

Pour cet algorithme automatique, on peut imaginer par exemple, que lors de l'enregistrement des points échantillons durant la phase de calibrage, les distances aux différents points d'accès soient enregistrées ; quand on déplace les points d'accès vers une nouvelle position connue, les RSSI des échantillons sauvegardés seront modifiées automatiquement en fonction de ces changements (en fonction de la nouvelle distance séparant les points échantillons des points d'accès). On peut de même imaginer un calcul automatique de cette distance de déplacement : par exemple les points d'accès peuvent être localisés comme le sont les PDA et leurs coordonnées mises à jour suite à un déplacement.

Utilisation d'une méthode "centralisée" dans le déploiement d'un réseau WiFi

Dans le déploiement d'un système comme RAMPE/INFOMOVILLE, on pourra profiter de la méthode récente de déploiement d'un réseau local sans fil, qui est la méthode "centralisée". Cette méthode s'appuie sur un contrôleur central auquel seront connectés les différents APs (parmi les constructeurs de ces systèmes, on peut citer Cisco, Aruba, 3Com, ...). La configuration des adresses IP, des SSIDs, ... est faite sur ce contrôleur puis déployée vers les différents APs ; de cette façon la configuration ne se fait plus sur chaque AP mais sur l'ensemble des APs connectés au contrôleur. La configuration des canaux est automatique : le contrôleur qui connaît la disposition des APs, pourra configurer automatiquement leurs canaux afin que les canaux de deux APs voisins n'interfèrent pas. Cette architecture centralisée permettra aussi de détecter les APs en panne et la zone de couverture de chaque AP. Une option intéressante est la possibilité qu'un AP augmente sa puissance d'émission si l'un de ses APs voisins est détecté hors service afin d'étendre sa couverture pour la zone que servait l'AP en panne. Il pourrait aussi être utile de proposer, dans de tels systèmes, un algorithme de calcul de la distance de déplacement d'un point d'accès. Ces systèmes peuvent être intéressants pour l'implémentation de RAMPE/INFOMOVILLE ainsi que pour les services de localisation et de guidage qu'on cherche à y intégrer.

Prise en compte de l'orientation des personnes pour le guidage

Dans les expérimentations de guidage présentées dans le chapitre 4 de ce manuscrit, l'orientation des personnes n'était pas fournie séparément, elle ne pouvait être déduite qu'indirectement en observant leur progression. Les personnes à guider ont été amenées dans un endroit du site calibré, après leur avoir bandé les yeux, et ont été toujours orientées vers la destination (c.à.d. dans la direction de la destination). La personne guide supposait toujours ce fait dans ses consignes de guidage. Le message « Tourne dans le sens opposé » n'existait pas dans le cadre de cette expérimentation. Cependant, l'orientation constitue un paramètre important à considérer pour une implémentation du système proposé sur un site réel en particulier pour les consignes de guidage. Cette orientation peut être obtenue par des capteurs spécifiques ou indirectement en utilisant la carte radio, les mesures RSSI (influencées par l'orientation de la personne) [43], le mouvement de la personne.

Autres perspectives pour la localisation :

Fusion des données GPS et WPS pour améliorer la localisation outdoor.

Étude in situ de la continuité de localisation indoor-outdoor.

Test in situ dans des environnements fortement métalliques (gares)

Autres perspectives pour les aspects communications :

Le réseau WiFi est de plus en plus déployé dans les environnements urbains ; de nombreux points d'accès peuvent être détectés (une trentaine de points d'accès actifs a été constatée durant des expérimentations faites sur site en 2007 [62]). Actuellement ceci ne constitue pas un chaînon vulnérable du système RAMPE/INFOMOVILLE. Cependant, pour les années à venir, le nombre des points d'accès va sûrement continuer à augmenter ainsi que le trafic qu'ils supportent et d'une façon générale l'utilisation de la bande radio ISM va évoluer. Cette augmentation de trafic pourra générer des interférences. Il sera alors important voire nécessaire de contrôler l'évolution de l'utilisation de cette ressource afin de déterminer la

méthodologie de déploiement des applications utilisant les bandes de fréquences ISM ou UNII (Unlicensed National Information Infrastructure).

Extension à différents types de transports et aux pôles d'échanges :

Le système pourrait être étendu pour un fonctionnement dans un environnement multimodal incluant des transports de surface et des transports souterrains ainsi que des pôles d'échanges, des centres commerciaux et différents bâtiments publics et ceci dans une perspective de conception pour tous.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Baudoin, O. Venard, G.Uzan. “The RAMPE Project: Interactive, Auditive Information System for the Mobility of Blind People in Public Transports”. *Proc. of the 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications, ITST 2005*. Brest France. June 2005.
- [2] G. Baudoin, O. Venard, G. Uzan, A. Rousseau et al. “How can blinds get information in Public Transports using PDA? The RAMPE Auditive Man Machine Interface”. *Proc. of the 8th European Conference for the Advancement of Assistive Technology in Europe, AAATE 2005*. Lille, France. September 2005.
- [3] J. Sayah, G. Baudoin, O.Venard, B. El Hassan. “Simulation using OMNeT++ of the RAMPE system - an Interactive Auditive Machine helping blinds in Public Transport”. *Proc. of the 3rd IEEE Region 8 International Conference on Computer as a Tool, EUROCON 2005, Volume 2, p. 1028 - 1031*. Serbia & Montenegro, Belgrade. November 2005.
- [4] Riginald G. Golledge, James R. Marston, C. Michael Costanzo. “Attitudes of Visually Impaired Persons Toward the Use of Public Transportation”. *University of California Transportation Center. Berkeley, California. Journal of Visual Impairment & Blindness Vo191, no 5, pp 446-459*. September- October 1997.
- [5] James R. Marston, Reginald G. Golledge. “Quantitative and Qualitative Analysis of Barriers to Travel by Persons with Visual Impairments and its Mitigation through Accessible Signage”. *Proc. of the 10th International Conference on Mobility and Transport for Elderly and Disabled Persons, TRANSED 2004*. Hamamatsu, Japan. May 2004.
- [6] William Crandall, Billie Louise Bentzen, Linda Myers, John Brabyn. “New orientation and accessibility option for persons with visual impairment: transportation applications for remote infrared audible signage”. *Clinical and Experimental Optometry, volume 84, number 3, p. 120-131*. May 2001.
- [7] Site du projet Blueeyes : www.blueeyes.fr
- [8] Final Report of the BIOVAM (Besoin en Information et en Orientation des Voyageurs Aveugles et Malvoyants dans les transports collectifs) project phase 1 (April 1999) and phase 2 (January 2003).
- [9] J. Sayah, G. Baudoin, O.Venard, B. El Hassan. “Architecture and Protocols of the RAMPE system- An Interactive Auditive Machine Helping Blinds in Public Transport”. *Proc. of the 2nd IEEE International Conference on Information & Communication Technologies: from Theory to Applications, ICTTA’06, Volume 1, p. 843 - 848*. Umayyad Palace, Damascus, Syria. April 2006.

- [10] Site de la société EO-EDPS. "Un chemin pour tous, une accessibilité commune". <http://www.eo-edps.fr>. Lyon, France.
- [11] Gilles CANDOTTI. "Navworks, pour guider les mal voyants". Projet PREDIT, 2004. *Revue Recherche R&E Equipement éditée par SG/Drast, N°6, p 15, Mai 2006.*
- [12] J. Sayah, G. Baudoin, O.Venard, B. El Hassan. "RAMPE/INFOMOVILLE Application Protocol- Protocole Point à Multipoint adapté au système RAMPE/INFOMOVILLE- Assistance aux Personnes à Handicap Sensoriel pour leur Mobilité dans les Transports Publics et en Ville". *5th International Conference on Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, SETIT 2009*. Hammamat, Tunisia. March 2009.
- [13] Sami Koskinen, Ari Virtanen. "Navigation and Guidance System for the Blind". *VTT Industrial Systems, Finland, ITS World 2004*. http://virtual.vtt.fi/virtual/noppa/noppa%20eng_long.pdf
- [14] RIAS Talking Signs- Baton Rouge. Disponible sur: <http://www.talkingsigns.com/SeattleSoundTransit.html>
- [15] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, IEEE Standard 802.11, 1999.
- [16] J. Sayah, G. Baudoin, O.Venard, B. El Hassan. "Localization and Guidance in RAMPE/INFOMOVILLE- an Interactive System of Assistance for Blind Travelers". *Proc. of the 2nd International Conference on the Applications of Digital Information and Web Technologies, ICADIWT 2009*. London Metropolitan University, UK. August 2009.
- [17] Lan Wang, Zhisheng Niu, Yanfeng Zhu, Hui Deng, Masashi Yano. "Integration of SNR, Load and Time in Handoff Initiation for Wireless LAN". *Proc. of the 14th IEEE conference on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2003, volume 3, p. 2032 - 2036*. Beijing, China. September 2003.
- [18] Glenn Judd and Peter Steenkiste. "Fixing 802.11 Access Point Selection". *Carnegie Mellon University- Graduate School of Industrial Administration. ACM SIGCOMM Computer Communications Review. Volume 32, Number 3, July 2002*. Disponible sur: <http://www.cs.cmu.edu/~glennj/scp/FixingAPSelection.html>
- [19] G. Baudoin, O. Venard, G. Uzan, A. Paumier, J. Cesbron. "Le projet RAMPE: système interactif d'information auditive pour la mobilité des personnes aveugles dans les transports publics". *Proceedings of the 2nd French-speaking conference on Mobility and Ubiquity computing, UbiMob 2005, vol 120, p. 169-176, ISBN: 1-59593-172-4*. Grenoble, France. Mai 2005.
- [20] D. Maniezzo, M. Cesana, P. Bergamo, M. Gerla, K. Yao. "Real-Time Caption Streaming over WiFi Network". *Proc. of the International Conference on Information Technology: Research and Education, ITRE 2003, p. 316 - 320*. Newark, New Jersey, USA. August 2003.

- [21] Andras Varga. "OMNeT++- Discrete Event Simulation System". User Manual. March 2005. Disponible sur : www.omnetpp.org
- [22] Ahmet Sekercioglu. "Accurate Modelling of IPv4 and IPv6 Protocols with OMNeT++ Simulation Framework". *Tutorials of the IEEE Region 10 International Conference on Technology Enabling Tomorrow : Computers, Communications and Automation towards the 21st Century, TENCON 2005*. Melbourne, Australia. November 2005.
- [23] Jean-Pierre Ebert, Andreas Willig. "A Gilbert-Elliot Bit Error Model and the Efficient Use in Packet Level Simulation". *Telecommunication Networks Group, TKN Technical Report TKN-99-002, Technical University Berlin*, March 1999.
- [24] Jangeun Jun, Pushkin Peddabachagari, Mihail Sichitiu. "Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its Applications". *Proceedings of the Second IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, NCA 2003*, p. 249, ISBN: 0-7695-1938-5. Year 2003.
- [25] H. Jinzeji, K. Hagishima. "Real-time audio and video broadcasting of IEEE GLOBECOM'96 over the Internet using new software". *IEEE Communications Magazine. Volume 35, Issue 4*, p. 34-38. April 1997.
- [26] Sneha Kumar Kasera. "Scalable Reliable Multicast in Wide Area Networks". *Doctoral Thesis. University of Massachusetts Amherst. ProQuest Dissertations & Theses, Computer science, Electrical engineering. Order number AAI9950169, ISBN: 0-599-53024-3, 152 pages, 1999*.
- [27] Mirko Antonini, Marina Ruggieri, Ramjee Prasad. "Communications within the Galileo Locally Assisted Services". *Proceedings of IEEE Aerospace Conference 2004, Volume 2*, p. 1312 - 1321. March 2004.
- [28] Site de la société Skyhook : <http://www.skyhookwireless.com>
- [29] Yu-Chung Cheng, Yatin Chawathe, Anthony LaMarca, John Krumm. "Accuracy Characterization for Metropolitan-scale Wi-Fi Localization". *Proc. of the 3rd International Conference on Mobile systems, Applications, and Services*, p. 233 – 245. Seattle, Washington. 2005
- [30] Jim Geier. "Deploying Indoor WLAN Positioning Systems". *Wi-Fi planet tutorials*. October 2002. Disponible sur: <http://www.wi-fiplanet.com/tutorials/article.php/1487271>
- [31] Binghao Li, Andrew Dempster, Chris Rizos, Joel Barnes. "Hybrid Method for Localization Using WLAN School of Surveying and Spatial Information System". *Spatial Sciences Institute Biennial Conference, SSC 2005, Melbourne, Australia*. September 2005.
- [32] Andrew Howard, Sajid Siddiqi, Gaurav S. Sukhatme. "An Experimental Study of Localization Using Wireless Ethernet". *4th International Conference on Field and Service Robotics, FSR 2003*. Lake Yamanaka, Japan. July 2003.

- [33] Jeffrey Hightower and Gaetano Borriello. "A Survey and Taxonomy of Location Systems for Ubiquitous Computing". University of Washington, Computer Science and Engineering. *Technical Report UW-CSE 01-08-03*. August 24, 2001.
- [34] Moustafa Youssef, Ashok Agrawala. "The Horus WLAN Location Determination System". *Proc. of the 3rd International Conference on Mobile systems, Applications and Services, MobiSys 2005*, p. 205 – 218. Seattle, Washington. June 2005.
- [35] Stefan Brünig, Johannes Zapotoczky, Peter Ibach, Vladimir Stantchev. "Cooperative Positioning with MagicMap". *Proc. of the 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication, WPNC 2007*, p. 17-22. March 2007.
- [36] Matthew Rabinowitz, James J. Spilker. "A New Positioning System Using Television Synchronization Signals". *IEEE Transactions on Broadcasting, Volume 51, Issue 1*, p. 51 - 61. March 2005.
- [37] Vijay Abhijit, Carla Ellis, Xiaobo Fan. "Experiences with an Inbuilding Location Tracking System: Uhuru". *Proc. of the 14th IEEE conference on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2003, Volume 3*, p.2789 – 2793. Beijing, China. September 2003.
- [38] Paramvir Bahl, Venkata N. Padmanabhan. "RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System". *Proc. of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2000, Volume 2*, p. 775 - 784. Tel Aviv, Israel. Mars 2000.
- [39] Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, Hari Balakrishnan. "The Cricket Location-Support System". *Proc. of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, ACM MOBICOM*, p. 32 – 43, ISBN 1-58113-197-6. Boston, MA, August 2000.
- [40] Teruaki Kitasuka, Kenji Hisazumi, Tsuneo Nakanishi. "WiPS: Location and Motion Sensing Technique of IEEE 802.11 Devices". *Proc. of the 3rd International Conference on Information Technology and Applications, ICITA, Volume 2*, p. 346 - 349. Sydney, July 2005.
- [41] Christian Hoene, Andre Gunther, Adam Wlisz. "Measuring the Impact of Slow User Motion on Packet loss and Delay over 802.11b Wireless Links". *Proc. of the 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, LCN 2003*, p. 652- 662, ISBN: 0-7695-2037-5. Bonn, Germany. October 2003.
- [42] Pierpaolo Bergamo, Daniela Maniezzo, Kung Yao et al. "IEEE 802.11 Wireless Network Under Aggressive Mobility Scenarios". *IEEE International Test Conference, ITC 2003*. Charlotte, NC, USA. September 2003.
- [43] Site de la société Ekahau. Ekahau Real Time Location System (RTLS). www.ekahau.com

- [44] Angelos Vlavianos, Lap Kong Law, Ioannis Broustis et al. "Assessing Link Quality in IEEE 802.11 Wireless Networks: Which is the Right Metric?". *19th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2008*. Cannes, France. September 2008.
- [45] Stefan Mangold, Sunghyun Choi, Peter May, Ole Klein et al. "IEEE 802.11e Wireless LAN for Quality of Service". *IEEE International Performance Computing and Communications Conference, IPCCC 2003*. Phoenix, Arizona. April 2003.
- [46] Anders Lindgren, Andreas Almquist, Olov Schelén. Evaluation of Quality of Service Schemes for IEEE 802.11 Wireless LANs. *Proc. of the 26th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, LCN 2001*, p. 348 - 351. Tampa, Florida, USA. November 2001.
- [47] Hua Zhu, Ming Li, Imrich Chlamtac, B. Prabhakaran. "A Survey of Quality of Service in IEEE 802.11 Networks". *Mobility And Resource Management. IEEE Wireless Communications*. August 2004.
- [48] Maryvonne Dejeammes. "Les systèmes télématiques et l'aide au déplacement des personnes aveugles et malvoyantes". *Rapport pour le CERTU (Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques)*. Juin 2001.
- [49] Jack Loomis, Reginald Golledge, Roberta Klatzky. "Navigation System for the Blind: Auditory Display Modes and Guidance. *Presence, Vol. 7 (1998)*, pp. 193-203 by the Massachusetts Institute of Technology. April 1998.
- [50] Site de la société Humanware, Québec. Produit Trekker Breeze : <http://www.humanware.com/en-international/products/gps/trekker>
- [51] Florian Gschwandtner, Peter Ruppel. "Automatic Calibration of Large-scale WiFi-Positioning Systems". *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 2008*. New Orleans, USA. November 2008.
- [52] Luís Felipe M. de Moraes, Bruno Astuto A. Nunes. "CalibrationFree WLAN Location System Based on Dynamic Mapping of Signal Strength". *4th ACM International workshop on Mobility management and Wireless Access, MOBIWAC 2006*. Spain. October 2006.
- [53] John Krumm, Eric Horvitz. "LOCADIO: Inferring Motion and Location from Wi-Fi Signal Strengths". *First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, MOBIQUITOUS 2004*, p. 4 - 13. Boston, Massachusetts, USA. August 2004.
- [54] Chiping Tang and Philip K. McKinley. "Modeling Multicast Packet Losses in Wireless LANs". *6th ACM international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems, MSWiM 2003*. San Diego, USA. September 2003.
- [55] Gerhard Haßlinger et Oliver Hohlfeld. "The Gilbert-Elliott Model for Packet Loss in Real Time Services on the Internet". *14th GI/ITG Conference on Measurement, Modeling*

-
- and Evaluation of Computer and Communication Systems, MMB 2008*. Germany. March 2008.
- [56] Jean-Claude Sperandio, Gérard Uzan, Nathalie Jobard. “Difficultés rencontrées par les aveugles et déficients visuels pour la consultation de sites WEB sur les transports et le tourisme”. *Rapport d'étude effectuée dans le laboratoire d'Ergonomie Informatique de l'université René Descartes- Paris 5*. Novembre 2002.
- [57] Clémence Lhermey. “Traitement des Messages Vocaux d'Aide aux Déplacements des Personnes Déficiences Visuelles”. *Mémoire de Master en Humanité et Sciences humaines- Mention Sciences Cognitives, Université Lumière Lyon 2*. Réalisé sous la direction de Claude Marin-Lamellet. Laboratoire LESCOT Bron, France. Juin 2006.
- [58] Jérôme Bertrand, Robert Allio. “L'information destinée aux personnes à mobilité réduite dans les transports en commun”. *Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Île-de-France. Département Transports et Infrastructures*. Février 2005.
- [59] J. R. Marston. “Empirical measurements of barriers to public transit for the vision-impaired and the use of remote infrared auditory signage for mitigation”. *16th Annual International Conference, Technology and Persons with Disabilities, CSUN 2001*. Los Angeles. March 2001.
- [60] H. Ohkubo, M. Furukawa, K. Ito, S. Sasaki. “Remote Infrared Audible Signage System for Visually Impaired at Railway Station”. *10th International Conference on Mobility and Transport for Elderly and Disabled Persons, TRANSED 2004*. Japon. May 2004.
- [61] G. Baudoin, O. Venard, G. Uzan, A. Paumier, Projet RAMPE- Rapport final de la phase 1, mars 2005. Disponible à <http://www.esiee.fr/~rampe/presentation.html>
- [62] G. Baudoin, O. Venard, G. Uzan, A. Paumier, Projet RAMPE- Rapport final de la phase 2, juin 2007. Disponible à <http://www.esiee.fr/~rampe/presentation.html>.
- [63] Yu-Xi Lim. “Efficient Wireless Location Estimation Through Simultaneous Localization and Mapping”. *Doctoral Thesis in Electrical and Computer Engineering- School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology*. May 2009.
- [64] Ladd, A.M., et al. “Robotics-Based Location Sensing using Wireless Ethernet”. *8th International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom 2002*. Atlanta Georgia- USA. September 2002.
- [65] Paul Castro, Patrick Chiu, Ted Kremenek, RichardMuntz. “A Probabilistic Room Location Service for Wireless Networked Environments”. *Proc. of the 3rd International Conference on Ubiquitous Computing, Ubicomp 2001, volume 2201 of Lecture Notes in Computer Science, p. 18-34*. Atlanta, Georgia, USA. September 2001.
- [66] R. Farcy, R. Damaschini, R. Legras, R. Leroux et al. “Perception de l'espace et locomotion des non-voyants par profilométrie laser : aides électroniques à la locomotion”. *J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, Volume 3, Hors-Série 1, 5*. 2004.

- [67] Christophe Jacquet, Yacine Bellik, René Farcy, Yolaine Bourda. "Aides électroniques pour le déplacement des personnes non-voyantes: vue d'ensemble et perspectives". *16^{ème} Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine, IHM 2004*. Belgium. Août 2004.
- [68] Michel Banatre, Paul Couderc, Julien Pauty, Mathieu Becus. "Ubibus: Ubiquitous computing to help blind people in public transport". *Proc. of the International Symposium on Mobile Human-Computer Interaction, MobileHCI 2004*, vol. 3160, p. 310-314. Glasgow, Scotland. September 2004.
- [69] Julian Hine, Derek Swan, Judith Scott, David Binnie, John Sharp. "Using Technology to Overcome the Tyranny of Space: Information Provision and Wayfinding". *Urban Studies Journal, UK, Vol. 37, No. 10, p. 1757-1770, 2000*.
- [70] Gill Whitney. "The Use of Remotely Triggered Talking Sign Systems by Blind and Partially Sighted People". *Joint Mobility Unit- Royal National Institute for the Blind*. London, W1N 6AA. August 1998.
- [71] L. R. Rabiner. "A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition". *Proceedings of the IEEE, Vol.77, No.2, p.257-286, 1989*.
- [72] Ugo Biader Ceipidor, Carlo Maria Medaglia. "Sesamonet: Mobile Navigation Services for Visually Impaired. Smart Mobility- Building Trusted Mobile Applications". Sophia-Antipolis, French Riviera. September 2008.
- [73] Site de la société ESIUM - Concepteur de solutions pour informer, orienter, guider: Modules Sonores pour feux piétons- Informer les Personnes Déficiantes Visuelles en Milieu Urbain. <http://www.esium.fr/esium/fr/Sinfea.html>
- [74] Adam Lipka , Rafal Niski. "The Concept of the GALILEO Receiver". *Proc. of the 4th IEEE Region 8 International Conference on Computer as a Tool, EUROCON 2007*, p. 1106 - 1112. Warsaw, Poland. September 2007.
- [75] "Galiléo, un système de navigation par satellites pour l'Europe". *CNES magazine, Juillet 1999, ISSN 1283-9817*.
- [76] Hitachi Ltd. "Launch of Hitachi AirLocation(TM), a Wireless LAN-Based Location Detection System Achieving Highly Accurate Positioning with Small Error Range of 1 to 3 Meters". <http://www.hitachi-cable.co.jp/en/infosystem/news/20031119la.html>
- [77] Site de la société Aeroscout. Wi-Fi RFID- AeroScout has partnered with all of the leading WLAN equipment vendors to integrate industry-leading products in Enterprise Networking and Wi-Fi RFID. Mars 2008. <http://www.aeroscout.com/content/wi-fi-rfid>
- [78] David Garlan, Daniel P. Siewiorek, Asim Smailagic, Peter Steenkiste. "Project Aura: Toward Distraction-Free Pervasive Computing". Carnegie Mellon University. *IEEE Pervasive computing magazine, Volume 1, Issue 2, p. 22- 31, ISSN: 1536-1268*. April-June 2002.

- [79] Johnny Shih. "Wireless LAN Location System". *School of Information Technology and Electrical Engineering, The University of Queensland. Thesis submitted for the degree of Master of Engineering- division of Telecommunications Engineering*. November 2003.
- [80] Ludmila Salaur. "Building a Commodity Location-based Service at Botanic Garden of University of Freiburg". Master thesis, Communication Systems Department, University of Freiburg, 2005.
- [81] Mathieu Bouet, Erwan Ermel, Guy Pujolle. "Performances d'une méthode de localisation dans les réseaux sans fil mobiles". 8èmes Journées Doctorales en Informatique et Réseaux (JDIR), Marne la Vallée, France. Janvier 2007.
- [82] Site du service de localisation Ootay basé sur la géolocalisation des téléphones portables. <http://www.ootay.fr/QuiSommesNous.asp>
- [83] Site de la société 4TS Finland Oy. Produit 4TS dSeal : http://www.4ts.com/dseal_r120.php
- [84] Site de la société APEX, Jesenice, République tchèque. Page dédiée au produit TYFLOSET "the electronic orientation and information system for the visually impaired persons" : <http://www.apex-jesenice.cz/tyfloset.php?lang=en>
- [85] A. Shaik, N. S. Tlale, G. Bright. "2 DOF Resolution Adjustment Laser Position Sensor". *15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, MMVIP 2008*, p. 233 - 238. Auckland, New Zealand. December 2008.
- [86] George M. Giaglis, Ada Pateli, Kostas Fouskas et al. "On the Potential Use of Mobile Positioning Technologies in Indoor Environments". *15th Bled Electronic Commerce Conference eReality: Constructing the eEconomy*. Slovenia. June 2002.
- [87] Pierluigi Caddeo, Ferdinando Fornara, Anna Maria Nenci, Amelia Piroddi. "Wayfinding tasks in visually impaired people: the role of tactile maps". *3rd International Conference on Spatial Cognition, ICSC 2006*. Rome, September 2006.
- [88] David Guth, John Rieser. "Perception and the control of locomotion by blind and visually impaired pedestrians". In Blasch, B., Wiener, W., & Welsh, R. (Eds.). *Foundations of Orientation and Mobility*, 9-39. 1997.
- [89] Jack M. Loomis, Roberta L. Klatzky, Reginald G. Golledge. "Navigating without Vision: Basic and Applied Research". *Optometry and Vision Science*, vol. 78, n^o 5, p. 282-289. 2001.
- [90] Jack M. Loomis, Reginald G. Golledge, Roberta L. Klatzky, Jon M. Speigle, Jerome Tietz. "Personal guidance system for the visually impaired". *First Annual ACM Conference on Assistive Technologies, Assets 1994*. California, USA. October 1994.

- [91] Michael Wright, Dion Stallings, Derrek Dunn. "The Effectiveness of Global Positioning System Electronic Navigation". *Proc. of the IEEE SoutheastCon 2003*, p. 62 – 67, ISBN 0-7803-7856-3/03. Ocho Rios, Jamaica. April 2003.
- [92] Projet ANR-PREDIT. "DANAM Dispositif d'Assistance à la Navigation pour personnes Aveugles dans les couloirs du Métro". Partenaires CEA, RATP, PGES, THIM P-8.
- [93] Maryvonne Dejeammes, Gérard Uzan, M'Balo Seck, Catherine Sidot. "Déplacements des déficients visuels en milieu urbain. Analyse des besoins en sécurité, localisation et orientation, et pistes d'évolution". *Recherche pour le Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques (CERTU)*. Lyon, France. Novembre 2008.
- [94] Bertrand Theys. "Faciliter l'accès aux transports des personnes à mobilité réduite". *Secrétariat permanent du PREDIT, Carrefour final, Mai 2008*.
- [95] Site de la société Phitech- Allée Pelletier Doisy - 54603 Villers-lès-Nancy Cedex. "Actitam, une réponse performante, simple à mettre en œuvre pour répondre à tous les besoins d'information des déficients visuels". <http://www.phitech.fr/solution.html>
- [96] Uzan G., Seck M., Dejeammes M., Rennesson C. "Besoins en sécurité, localisation et orientation des déficients visuels en milieu urbain: analyse de la situation et pistes d'évolution". <http://cnpsaa.fr/> accessibilité de la Commission Accessibilité du CNPSAA. Année 2008.
- [97] Site de la société ANGeo Technology : <http://www.angeo.fr/>
- [98] B. N. Walker, J. Lindsay. "Navigation performance with a virtual auditory display: Effects of beacon sound, capture radius, and practice". *Human Factors*, vol. 48, n°2, p. 265-278. 2006.
- [99] J H Sánchez and C A Oyarzún. "Mobile audio assistance in bus transportation for the blind". *7th International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies with ArtAbilitation, ICDVRAT 2008*. Maia & Porto, Portugal. September 2008.
- [100] Société VisuAide, Montréal, Canada. *VisuAide's Trekker GPS system creates handheld personal guide with HP iPAQ Pocket PC*. Communiqué de presse, 2003.
- [101] Hewlett-Packard. "HP and VisuAide Launch Maestro - First Handheld PC for the Blind". *National Federation of The Blind Conference*. Atlanta. June 2004.
- [102] Association pour le Bien des Aveugles et malvoyants (ABA). "ABA plans- Plans de ville pour personnes aveugles". *7^{ème} Congrès de l'Union Mondiale des Aveugles*. Geneva. Août 2008.
- [103] François Rambaud, Maryvonne Dejeammes. "Pour des systèmes de transports collectifs et d'information accessibles à tous". *11th International Conference on Mobility and*

-
- Transport for Elderly and Disabled Persons, TRANSED 2007*. Montréal, Canada. June 2007.
- [104] Jack M. Loomis, James R. Marston, Reginald G. Golledge, Roberta L. Klatzky. "Personal Guidance System for People with Visual Impairment: A Comparison of Spatial Displays for Route Guidance". *Journal of Visual Impairment and Blindness*, April 2005.
- [105] Alireza Darvishy, Hans-Peter Hutter, Peter Früh et al. "Personal Mobile Assistant for Air Passengers with Disabilities (PMA)". *11th International Conference Computers Helping People with Special Needs, ICCHP 2008*. Linz, Austria. July 2008.
- [106] G. Baudoin, G. Uzan, O. Venard. "Présentation des résultats d'expérimentation du projet RAMPE". *CERTU, groupe d'échanges « AOTU-exploitants » sur l'accessibilité des réseaux de transports urbains de surface*. Lyon, France. Décembre 2007.
- [107] Site du RNIB présentant le systèmes RNIB REACT : http://www.rnib.org.uk/professionals/accessibleenvironments/signagewayfinding/rnibreact/Pages/rnib_react.aspx
- [108] Brighton & Hove City Council - Talking Bus Stops for the blind and visually impaired (linked to Real Time Bus Information signs). Case study, Public Technology, UK. April 2008.
- [109] Kooijman A.C, Uyar M.T. "Walking speed of visually impaired people with two talking electronic travel systems". *Visual Impairment Research, Volume 2, Number 2, p.81-93(13)*. August 2000.
- [110] Marie-France Dessaigne, Flore Lequate. "Accessibilité de l'information aux usagers déficients sensoriels dans les transports collectifs urbains". *Etude effectuée par le cabinet Ergonomos pour le CERTU*. Avril 2005.
- [111] Reginald G. Golledge, James R. Marston. "Towards an Accessible City: Removing Functional Barriers to Independent Travel for Blind and Vision Impaired Residents and Visitors". *Part of the California PATH Program of the University of California*. September 1999.
- [112] James R Marston, Reginald G. Golledge. "Removing Functional Barriers: Public Transit and the Blind and Vision Impaired". *Transportation Center of the University of California at Berkeley. Proceedings of the Society for Disability Studies*. 1997.
- [113] M.-F. Dessaigne. "Infomoville, un dispositif qui rend la ville plus accessible aux mal voyants". *Colloque GERRA 2008*.
- [114] A. LaMarca, Y. Chawathe, S. Consolvo, J. Hightower, G. Borriello et al. "Place Lab: Device positioning using radio beacons in the wild". *3rd International Conference on Pervasive Computing*. Munich, Germany. May 2005.
- [115] Cisco Systems. Serveur de localisation sans fil Cisco. www.cisco.com

- [116] Cratty, B. J. "The perception of gradient and the veering tendency while walking without vision". *American Foundation for the Blind, Research Bulletin*, 14, 13-51, in Hatwell Y. 2003.
- [117] M.-F. Dessaigne, G. Baudoin, G. Uzan, O. Venard. "Accéder à l'information Voyageurs quand on a un handicap sensoriel visuel ou auditif. Et l'ergonomie et le Design dans ce système innovant ?". Colloque Ergo Design, Lyon, France. Juin 2009.
- [118] Klatzky, R.L. Loomis, J.M. Golledge, R.G. Cicinelly et al. "Acquisition of route and survey knowledge in absence of vision". *Journal of Motor Behaviour, University of California, Santa Barbara*, 22, 1, (1990),19-43.
- [119] G. Uzan. "Technologies pour le déplacement des déficients visuels en milieu urbain et dans les transports". *Présentation à l'Institut Fédératif de Recherche sur les Aides Techniques pour personnes Handicapées, IFRATH*. Mai 2009.
- [120] David Harris, Gill Whitney. "Visually Impaired people and Public Transport Information". *Proceedings of the IEEE Colloquium on Public Transport Information and Management Systems*, p. 5/1 - 5/7. London, UK. May 1993.
- [121] "The MoBIC project". *University of Magdeburg, Germany. Project being supported by the Commission of the European Union through the TIDE program (Technology Initiative for Disabled and Elderly people)*. April 1996. <http://isgwww.cs.uni-magdeburg.de/projects/mobic/mobicuk.html>
- [122] H. Makino, I. Ishii, M. Nakashizuka. "Development of navigation system for the blind using GPS and mobile phone connection". *18th annual meeting of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS 1996*. Amsterdam, Netherlands. October 1996.
- [123] D. Guth, R. Laduke. "The veering tendency of blind pedestrians: an analysis of the problem and literature review". *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 88, 1994, 91-400.
- [124] G. Baudoin, O. Venard, M.-F. Dessaigne, G. Uzan, Y. Lemaitre. "Rapport d'avancement du projet INFOMOVILLE". Juin 2008.
- [125] Site de ZigBee Alliance. "ZigBee Architecture Overview". Embedded Systems Conference Silicon Valley April 2006. <http://www.zigbee.org/>
- [126] Patrick Kinney. "ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works". *Communications Design Conference*. San Jose, California. October 2003.
- [127] Youngjune Gwon, Ravi Jain. "Error Characteristics and Calibration-free Techniques for Wireless LAN-based Location Estimation". *2nd International workshop on Mobility management and Wireless access protocols, MobiWac 2004*. Philadelphia, Pennsylvania, USA. September 2004.

- [128] Xiaoyong Chai Qiang Yang. "Reducing the Calibration Effort for Location Estimation Using Unlabeled Samples". *3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2005*, p. 95 - 104 . Kauai Island, HI. March 2005.
- [129] Jaime Lopez Krahe. "Introduction to Assistive Technology for the Blind". *Information technologies for visually impaired people, Cepis Upgrade, the European Journal for the Informatics Professional*, Vol. 8, issue no. 2. April 2007.
<http://www.upgrade-cepis.org/issues/2007/2>
- [130] D. Moreno Eddowes, J. Lopez Krahe. "Pedestrian Traffic Lights Recognition in a Scene using a PDA". *Visualization, Imaging, and Image Processing (VIIP 2004)*. Marbella, Spain. September 2004.
- [131] Yang Xiao. "Throughput and Delay Limits of IEEE 802.11". *IEEE Communications letters Volume 6, Issue 8*, p. 355- 357, ISSN: 1089-7798. August 2002.
- [132] M. Mokhtari, M.A Feki. "User needs and usage analysis in a smart environment for people requiring assistance". *Topics in Geriatric Rehabilitation, Volume 23, Number 1*, p.52-59. January-March 2007.
- [133] Mohamed Ali Feki, Sang Wan Lee, Z. Zenn Bien, Mounir Mokhtari. "Combined Fuzzy State Q-learning Algorithm to Predict Context Aware User Activity under Uncertainty in Assistive Environment". *Proc. of the 9th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, SNPD 2008*, p. 57 - 62. Phuket, Thailand. August 2008.
- [134] M. Mokhtari, M. Ghorbel, M.A. Feki. "From Smart home to smart space in independent living: a framework for multiple contexts management". *3rd IEEE international Conference on Wireless and Mobile Computing Networking and Communications, WIMOB'2007*. New-York City, USA. October 2007.
- [135] Daqing Zang, M. Mokhtari. "Toward a human-friendly assistive environment (Assistive Technology Research series)", 300 pages, *Proceedings of the 2nd International Conference On Smart homes and health Telematics, ICOST'2004*. Singapore. September 2004.
- [136] Johnson, J., Johnson, B., Blasch, B., De l'Aune, W. "Gait and long cane kinematics: A comparison of sighted and visually impaired subjects". *Journal of Orthopedic & Sports Physical Therapy, Volume 27, n^o2*, p. 162-166, 2008.
- [137] Bruce B. Blasch, William R. Wiener, Richard L. Welsh. *Foundations of Orientation and Mobility, Second edition, Length: 800 pp, ISBN: 978-0-89128-946-3, Publisher: AFB Press, 1997*.
- [138] Tetsuo Kamina, Noboru Koshizuka, Ken Sakamura. "Embedding Legacy Keyword Search into Queries for the Ubiquitous ID Database". *2nd International Conference on Network-Based Information Systems, NBIS 2008*. Turin, Italy. September 2008.

- [139] K. Sakamura. "Ubiquitous computing: Making it a reality". In *ITU TELECOM World* p. 1-9, 2003.
- [140] Sakamura, K. "Ucode Architecture and RFID". In *2004 RFID International Symposium*, pp. 3-24, *T-Engine Forum*. Ubiquitous ID Center: <http://www.uidcenter.org>
- [141] Lisa Ran, Sumi Helal, Steve Moore. "Drishti: An Integrated Indoor/Outdoor Blind Navigation System and Service". *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2004*, p.23. Orlando, Florida, USA. March 2004.
- [142] David Harris, Gill Whitney. "Visually Impaired people and Public Transport Information". *Proceedings of the 6th International Conference on Mobility and Transport for elderly and Disabled Persons*. Lyons. May 1992.
- [143] Walker, B. N., Lindsay, J. "Using virtual reality to prototype auditory navigation displays". *Assistive Technology Journal* 17(1), p. 72-81, 2005.
- [144] O. Venard, G. Baudoin, G. Uzan. "Field Experimentation of the RAMPE Interactive Auditive Information System for the Mobility of Blind People in Public Transport: Final Evaluation". *9th IEEE International Conference on ITS Telecommunications, ITST 2009*. Lille, France. Octobre 2009.
- [145] O. Venard, G. Baudoin, G. Uzan. "Experiment and evaluation of the RAMPE interactive auditive information system for the mobility of blind people in public transport". *10th ACM Conference on Computers and Accessibility, ASSETS 2008*. ISBN: 1-59593-976-0. ACM, pp. 271-272. Halifax, Nova Scotia. Canada. Octobre 2008.
- [146] A. Smailagic, D. Kogan. "Location Sensing and Privacy in a Context-Aware Computing Environment". *IEEE Wireless Communications, Volume 9, Issue 5*, p. 10- 17, ISSN: 1536-1284. October 2002.
- [147] C. Chen, M. Asawa, B. Foreman. "Outdoor Measurements on WaveLAN Radio". *Technical Report, California Path Program, technical note 96-2*. April 1996.
- [148] Site de la société Freedom Scientific, St. Petersburg, produit StreetTalk: <http://www.freedomscientific.com/products/fs/streettalk-gps-product-page.asp>
- [149] R. Ivanov. "Mobile GPS navigation application, adapted to visually impaired people". *Proceedings of the International Association for the Scientific Knowledge conference (IASK 2009), Session W 1.5 - E-Health, ICT and People with Disabilities*. Spain. June 2009.
- [150] Kamol Kaemarungsi, Prashant Krishnamurthy. "Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting". *Proceedings of the 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2004, Volume: 2*, p. 1012- 1022, ISBN: 0-7803-8355-9. Hong Kong. March 2004.

- [151] Julia Letchner, Dieter Fox, Anthony LaMarca. "Large-Scale Localization from Wireless Signal Strength". *Proc. of the 20th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2005)*, Volume 1, p. 15-20, ISBN: 1-57735-236-x. Pittsburgh, Pennsylvania. July 2005.
- [152] Dieter Fox, Jeffrey Hightower, Gaetano Borriello et al. "Bayesian Filters for Location Estimation". *IEEE pervasive computing*, ISSN 1536-1268, vol. 2, no3, pp. 24-33 [10 page(s)], 2003. Published by the IEEE Computer Society, 2002.
- [153] B. Tóth, G. Németh. "Speech Enabled GPS Based Navigation System in Hungarian for Blind People on Symbian Based Mobile Devices". *Regional Conference on Embedded and Ambient Systems, RCEAS 2007*. Budapest, Hungary. November 2007.
- [154] Christopher Drane, Malcolm Macnaughtan, Craig Scott. "Positioning GSM Telephones". *IEEE Communications Magazine*, Volume: 36, Issue 4, p. 46-54, 59. ISSN: 0163-6804. April 1998.
- [155] Teemu Roos, Petri Myllymäki, Henry Tirri et al. "A Probabilistic Approach to WLAN User Location Estimation". *International Journal of Wireless Information Networks*, Vol. 9, No. 3, July 2002.
- [156] Pelletta, E.; Velayos, H. "Performance measurements of the saturation throughput in IEEE 802.11 access points". *Proc. of the 3rd International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks, WIOPT 2005*. Volume 3, Issue 7 p. 129 – 138. Italy, April 2005.
- [157] Roy Want, Veronica Falcao, Jon Gibbons. "The Active Badge Location System". *ACM Transactions on Information Systems*. Volume 10, p. 91-102. 1992.
- [158] Atul M Gonsai. "Bandwidth Performance testing of IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks". *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, IMECS 2009, Vol I*. Hong Kong. March 2009.
- [159] P. Foucher, D. Moreno Eddowes, J. Lopez Krahe. "Traffic light silhouettes recognition using Fourier descriptors". *Proc. of the 5th International Conference Visualisation Imaging and Image Processing, VIIP 2005*. pp 186-190. Benidorm, Spain. September 2005.
- [160] M. Ghorbel, R. Kadouche, M. Mokhtari. "User & service modeling in assistive environment to enhance accessibility of dependent people". *1st International Conference on ICT & Accessibility, ICTA 2007*. Hammamet, Tunisia. April 2007.
- [161] M. Mokhtari. "Human-centric Approach in Designing Assistive Living Environments". *8th International Workshop on Human-Friendly Welfare Robotic Systems, HWRS'2007*. Daejon, Korea. October 2007.
- [162] Okadome Takeshi, Yamazaki Tatsuya, Mokhtari Mounir. "Pervasive Computing for Quality of Life Enhancement". *5th International Conference on Smart Homes and Health Telematics, ICOST 2007*. Nara, Japan. June

- [163] C. Penaud, M. Mokhtari, B. Abdulrazak. "Technology Usage for dependant people: Towards the right balance between user needs and technology". *Proc. of the 9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, ICCHP 2004 pp. 898-905*. Paris, France. July 2004.
- [164] Martin Heusse, Franck Rousseau, Gilles Berger-Sabbatel, Andrzej Duda. "Performance Anomaly of 802.11b". *Proc. of the 2nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications, INFOCOM 2003, Volume 2, p. 836- 843, ISBN: 0-7803-7752-4*. San Francisco, California, USA. April 2003.
- [165] M. H. Manshaei, G. R. Cantieni, C. Barakat, T. Turetletti. "Performance Analysis of the IEEE 802.11 MAC and Physical Layer Protocol". *Proc. of the 6th IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM'05. ISBN: 0-7695-2342-0*. Taormina, Italy. June 2005.
- [166] Kartikeya Tripathi, Janise McNair, Haniph Latchman. "Directional Antenna Based Performance Evaluation of 802.11 Wireless Local Area Networks". *From the book Intelligence in Communication Systems, IFIP International Federation for Information Processing series, Volume 190/2005, p.211-220, ISBN: 978-0-387-29121-5*.
- [167] Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification: High-speed physical layer extension in the 2.4 GHz band, IEEE Standard 802.11, 1999.
- [168] Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification: High-speed physical layer in the 5 GHz band, IEEE Standard 802.11, 1999.
- [169] Site de l'outil Iperf. National Laboratory for Applied Network Research : <http://iperf.sourceforge.net/>
<http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>
- [170] Site du logiciel Wireshark : <http://www.wireshark.org/>
- [171] Site du logiciel Matlab : <http://www.mathworks.fr/>
- [172] MichaelWallbaum, Stefan Diepolder. "Benchmarking Wireless LAN Location Systems". *Proc. of the 2nd IEEE International Workshop on Mobile Commerce and Services, WMCS'05. p. 42-51, ISBN: 0-7695-2391-9*. Munich, Germany. July 2005.
- [173] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobson. "RTP: A transport protocol for real-time applications". *IETF Audio-Video Transport Working Group, RFC 1889 (revised), 2001*.
- [174] Matthieu Petit, Henning Christiansen. "Un calcul de Viterbi pour un Modèle de Markov Caché Contraint". *Publié dans Cinquièmes Journées Francophones de Programmation par Contraintes, Actes JFPC 2009*. Orléans, France. Juin 2009.

Annexe A

Ekahau Real time Location System (RTLS)

1- Carte du site utilisée pour les expérimentations avec Ekahau

Pour assurer un bon fonctionnement du logiciel EPE, on doit définir l'échelle exacte de la carte. On disposait d'une carte au format Autocad et grâce à l'échelle inscrite sur cette carte, on a pu déterminer la distance exacte entre deux points et en déduire le rapport pixels/mètres.

Cette information est entrée dans le logiciel Ekahau.

La figure 57 montre le plan du site utilisé pour les expérimentations et illustre l'opération à effectuer pour fournir l'échelle exacte de la carte.

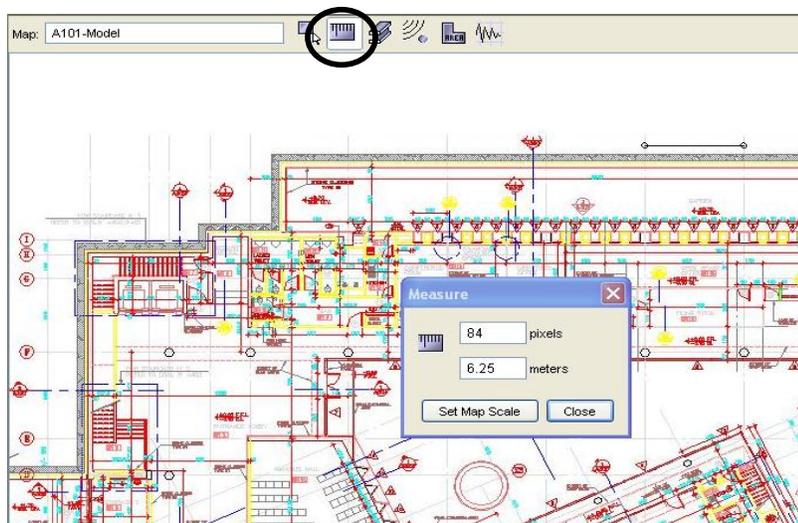


Figure 57- Insérer l'échelle exacte de la carte du site

2 - Visulation des puissances des signaux reçus des différents points d'accès

Le logiciel Ekahau Manager permet de visualiser le niveau de puissance des signaux des différents APs (cf. figure 58).

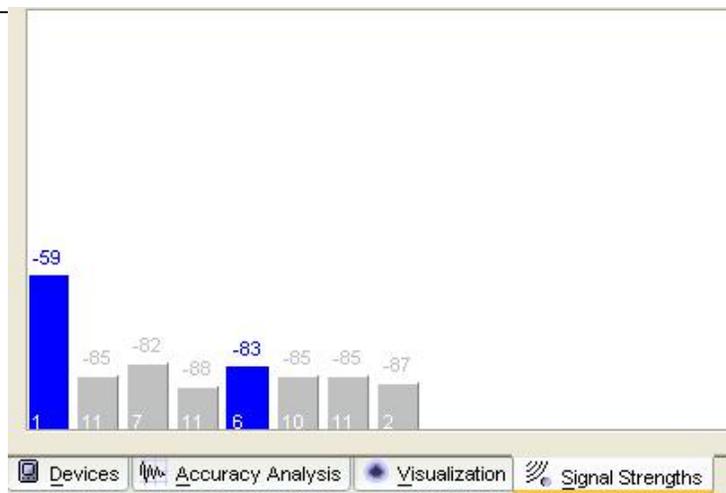


Figure 58- Puissance des signaux des APs visualisés sur Ekahau Manager

3 - Choix des Points d'Accès contribuant à la localisation

Les points d'accès détectés n'appartiennent pas nécessairement à notre réseau. Ceci peut fausser les résultats si la position de ces APs est modifiée sans qu'on le sache. Pour éviter ces problèmes, on peut choisir de ne pas utiliser les points d'accès qui ne nous appartiennent pas. On peut sélectionner les points d'accès qu'on veut utiliser dans la localisation dans "Access Point View".

4- Dessin des rails de cheminement

Les rails de cheminement doivent être placés sur la carte pour indiquer les chemins possibles entre les salles, les couloirs en indoor par exemple.

- On active l'outil de rail en cliquant son icône (cf. figure 59).
- On place l'indicateur de souris au centre d'un chemin, d'une salle, ou d'un couloir de marche, et on clique la carte une fois pour créer un point de départ.
- On déplace l'indicateur sur le chemin sans croiser de murs ni d'obstacles. On clique sur la carte une deuxième fois pour créer un nouveau point du rail et on continue ainsi jusqu'à la fin du tracé du rail souhaité.

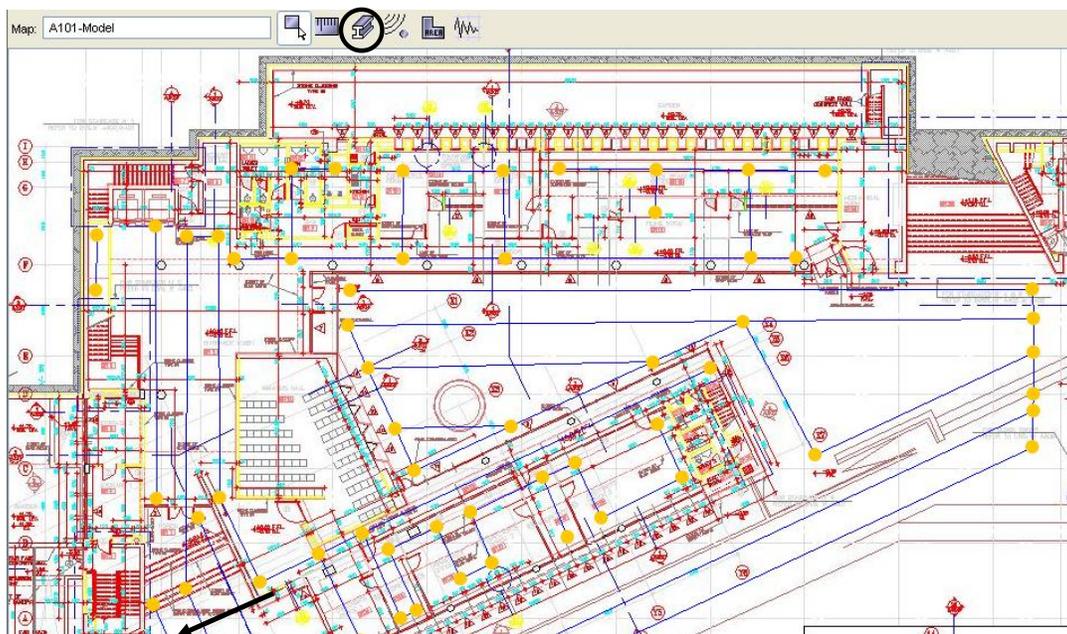


Figure 59- Les rails de cheminement

La partie indiquée par une flèche sur la figure 59 représente le plan du site de l'expérimentation effectuée dans le chapitre 4 de ce mémoire (cf. figure 60) :

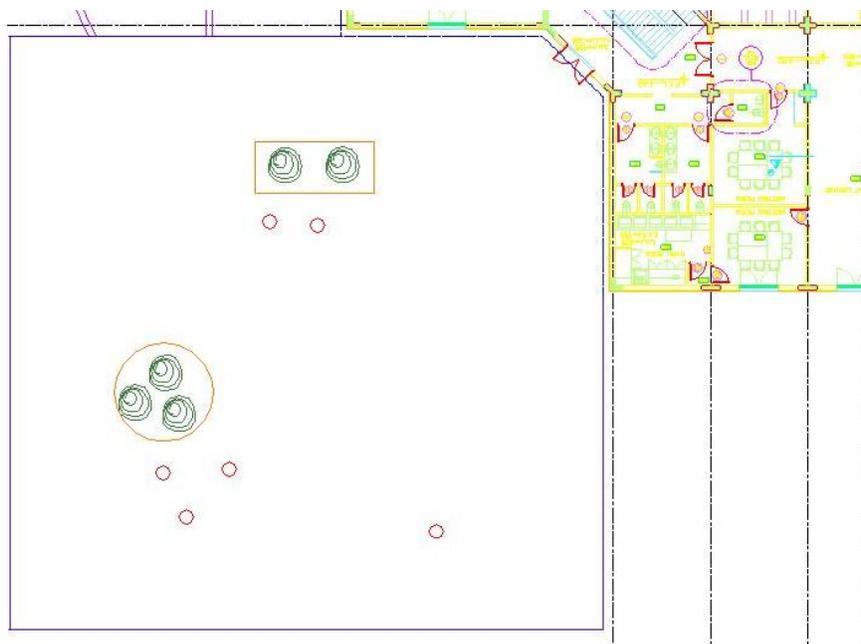


Figure 60- Plan du site de l'expérimentation

5 - Calibrage du site

- Sur l'ordiateur portable où le logiciel Ekahau Manager est installé, on active l'outil de calibrage.
- On déplace l'indicateur de souris à l'endroit où on se situe et on clique la carte pour enregistrer un PR (point de référence ou échantillon).
- En restant au même endroit, on peut tourner dans toutes les directions pour enregistrer des PR.
- On répète l'étape (cf. figure 61)

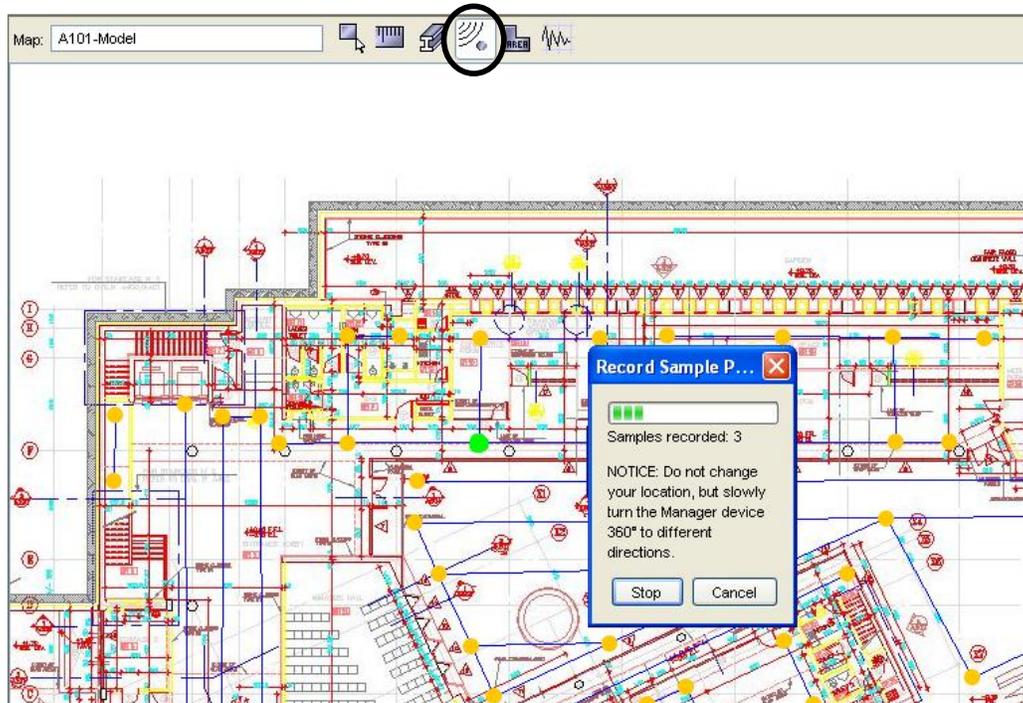


Figure 61- Enregistrement des PR

Il est recommandé:

- d'enregistrer un PR tous les 3-5 mètres
- d'enregistrer un PR sur toutes les intersections des rails
- d'enregistrer un PR sur toutes les extrémités des rails
- d'enregistrer un PR dans tous les endroits où l'environnement radio change soudainement. Par exemple, enregistrer un PR des deux côtés d'une porte (typiquement d'une salle et d'un couloir).

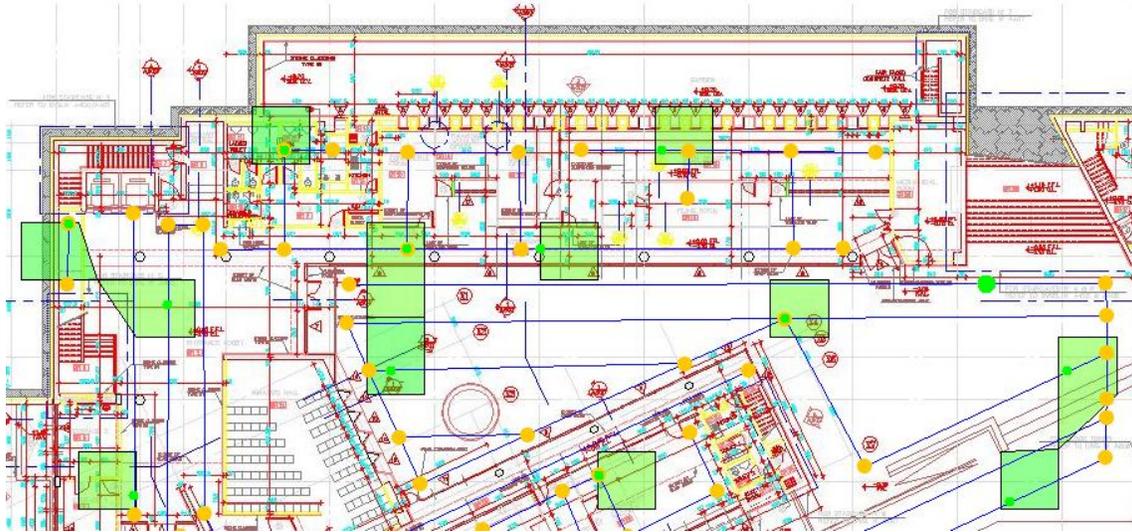


Figure 62- Carte du site calibrée

Les rectangles verts sur la figure 62 représentent la couleur indicatrice des RSSI reçus par le point échantillon enregistré.

A la fin du calibrage, on sauvegarde le modèle.

6 - Positionnement

Après la phase de calibrage du site, on peut localiser des objets. Ces objets peuvent être des étiquettes Ekahau ou des objets disposant d'une puissance de calcul (ordinateur, PDA, smartphone) dans lesquels on a installé le logiciel client. Dans cette thèse on n'a travaillé qu'avec la deuxième approche (localisation de PC ou de PDA intégrant un logiciel client de localisation).

Par exemple, pour localiser l'ordinateur portable où le logiciel Ekahau Manager est installé, on clique l'icône d'Ekahau sur le bandeau supérieur (cf. figure 63).

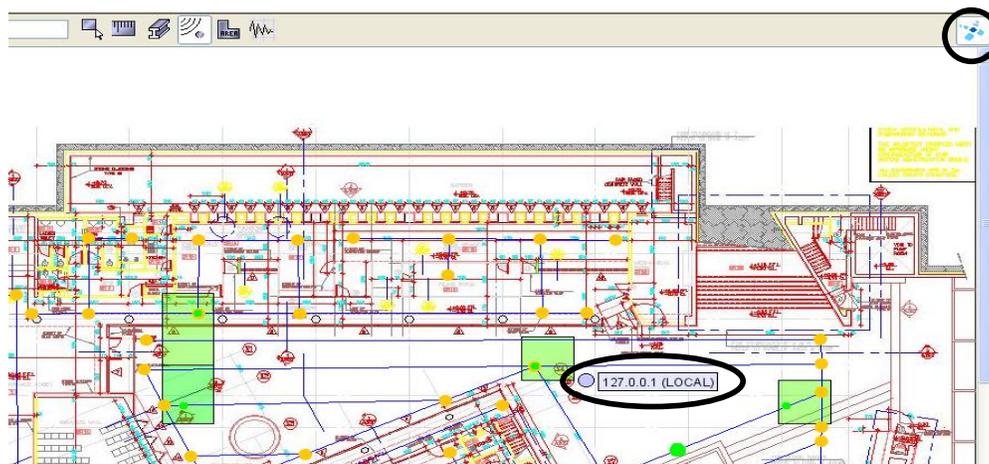


Figure 63- Positionnement des clients agents

Pour localiser n'importe quel autre dispositif, on sélectionne « Devices » dans la partie inférieure de l'écran

On clique le checkbox "Tracking" pour chaque dispositif sur la liste pour le localiser.

Seuls les dispositifs où le client Ekahau est installé apparaîtront sur la liste des dispositifs qui peuvent être localisés. Si on sélectionne un client, en appuyant sur la touche droite de la souris, on obtient un menu (cf. figure 64) avec les rubriques suivantes :

- Propriétés : pour montrer les caractéristiques du client telles que son adresse MAC
- Follow : pour maintenir automatiquement le client dans la carte de localisation

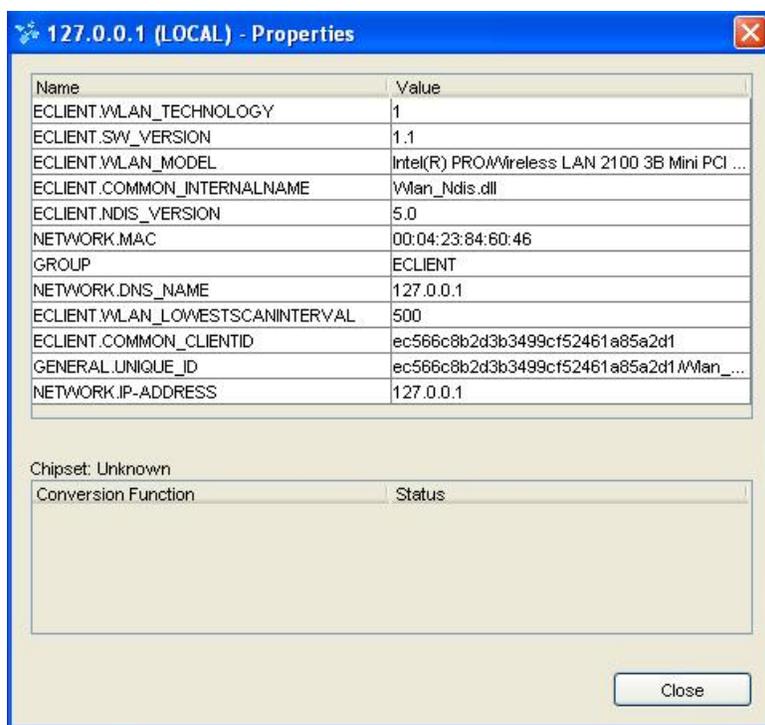


Figure 64- Spécifications du client à localiser

Annexe B

Installation d'OMNeT++

Initialement OMNeT++ a été développé sur Linux mais actuellement il fonctionne sur la plupart des systèmes Unix et plateformes Windows (NT4.0, Windows 2000 ou Windows XP) : Win32 et Cygwin32 ou encore Win32 et Microsoft Visual C++.

Installation des outils gratuits de compilation C++ Microsoft

On décrit les étapes nécessaires pour l'installation des outils gratuits de compilation C++ (VC7) nécessaire pour travailler avec l'environnement de simulation OMNeT++:

- 1- Télécharger l'environnement de compilation Microsoft Visual C++ Toolkit 2003 puis:
 - Créer la variable d'environnement `"VCToolkitInstallDir"` avec comme valeur le répertoire d'installation, par exemple `"C:\Program Files\Microsoft Visual C++ Toolkit 2003"`.
 - Mettre à jour la variable d'environnement `"PATH"` en rajoutant `"%VCToolkitInstallDir%\bin;"`
 - Mettre à jour ou créer la variable d'environnement `"INCLUDE"` avec la valeur `"%VCToolkitInstallDir%\include;%INCLUDE%"`.
 - Mettre à jour ou créer la variable d'environnement `"LIB"` avec la valeur `"%VCToolkitInstallDir%\lib;%LIB%"`.

- 2- OMNeT++ nécessite aussi d'autres bibliothèques Microsoft, Microsoft Platform SDK. On les télécharge, on le installe et on modifie les variables d'environnement suivantes
 - Créer la variable d'environnement `"MSSdk"` avec comme valeur le répertoire d'installation, par exemple `"C:\Program Files\Microsoft Platform SDK"`
 - Mettre à jour la variable d'environnement `"INCLUDE"` avec la valeur `"%VCToolkitInstallDir%\include;%MSSdk%\Include;%INCLUDE%"`
 - Mettre à jour ou créer la variable d'environnement `"LIB"` avec la valeur `"%VCToolkitInstallDir%\lib;%MSSdk%\Lib;%LIB%"`.

- Note : L'ordre des déclarations ci-dessus est important.

- 3- L'utilitaire Nmake n'est pas inclus dans la distribution Visual C++ Toolkit 2003, il est donc nécessaire de Télécharger et d'installer Microsoft .NET Runtime (*Microsoft .NET Framework Version 1.1 Redistributable Package*) et de copier ensuite `"nmake.exe"` dans le répertoire `"%VCToolkitInstallDir%\bin"`.

Une fois ces outils C++ installés, le fichier exécutable OMNeT++ (qui pourra être téléchargé sur le site d'OMNeT++ www.omnetpp.org) peut être lancé; il suffit de suivre les instructions d'installation.

4- La compilation du programme avec les librairies OMNeT++ et les outils Microsoft se fait avec la séquence de commandes suivantes:

- `opp_nmakemake`: permettant de créer un fichier Makefile
- `nmake -f Makefile.vc`: création de l'exécutable .exe

Annexe C

Codes de simulation

On intègre dans cette annexe les fichiers C++ et config (omnetpp.ini) d'OMNeT++ de la simulation d'UDP et de RAP sur un canal réel et sur un canal modélisé de Gilbert-Elliot.

***** Canal Réel *****

```

/* Client.cpp (idem pour la simulation sur un canal de Gilbert-Elliot) */

//
// C'est le code du client RAP dont la couche applicative envoie une trame urgente
//chaque t secondes à la couche session. La couche session enverra une copie de la
//trame chaque tr secondes
//
#include <omnetpp.h>
#include "apppkt_m.h"
#include "rappacket_m.h"

class Application : public cSimpleModule
{
Module_Class_Members(Application,cSimpleModule,0);
private:
    int addr, srvAddr, t;

protected:
    virtual void initialize();
    virtual void handleMessage(cMessage *msg);
    void simulateUserTyping();
    void processEcho(RAPPacket *rapPkt);
};

class Session : public cSimpleModule
{
Module_Class_Members(Session,cSimpleModule,0);

private:
    int addr, srvAddr, type;
    FILE *pFile;

protected:
    virtual void initialize();
    virtual void handleMessage(cMessage *msg);

    int numServicesent,packet_limit;
    double tr, freq;
    int numSent;
    char nuSent[5];
    int i, nbrepetition, expected_repetitionnb;
    cMessage *repetitiondata;
    RAPPacket *data;
    RAPPacket *Packet;
    simtime_t expected_time;

    // process packets from application
    virtual void processMsgFromApp(APPPkt *msg);
    virtual void sendRapPacket();

```

```

};

Define_Module(Application);
Define_Module(Session);

void Application::initialize()
{
    addr = parentModule()->par("addr");
    srvAddr = parentModule()->par("srvAddr");

    cMessage *timer = new cMessage("timer");
    scheduleAt(simTime()+parentModule()->par("sendIaTime").doubleValue(), timer);
}

void Session::initialize()
{
    addr = parentModule()->par("addr");
    srvAddr = parentModule()->par("srvAddr");
    pFile=fopen("Client.txt", "w");
    numSent=i=0;
    expected_repetitionnb=1;
    freq=30;
    tr=parentModule()->par("tr");
    nbrepetition=par("nbrepetition");
    expected_time=freq;
    repetitiondata=new cMessage("sendTimer");
}

void Application::handleMessage(cMessage *msg)
{
    if (msg->isSelfMessage())
    {
        simulateUserTyping();
        scheduleAt(simTime()+parentModule()->par("sendIaTime").doubleValue(), msg);
    }
    else
    {
        processEcho(check_and_cast<RAPPacket *>(msg));
    }
}

void Application::simulateUserTyping()
{
    char msgpayload[1000];
    sprintf(msgpayload,"%s"%s,"Message Urgent!");
    char msgname[50];
    sprintf(msgname,"%s","Message RAP urgent");

    // send a packet
    APPpkt *apppkt = new APPpkt(msgname);
    apppkt->setPayload(msgpayload);
    apppkt->setType(1); //1 to indicate R frame, 2 to indicate V frame, 3 to indicate
        U frame
    apppkt->setDestAddress(srvAddr);
    apppkt->setSrcAddress(addr);

    send(apppkt, "out");
}

void Application::processEcho(RAPPacket *rapPkt)
{
    delete rapPkt;
}

void Session::handleMessage(cMessage *msg)

```

```

{
    if (msg->arrivedOn("inupper"))
        processMsgFromApp(check_and_cast<APPPkt *>(msg));

    else if(msg->isSelfMessage())
    {
        if(strcmp(msg->name(),"sendTimer")==0)
            sendRapPacket();
    }
}

void Session::processMsgFromApp(APPPkt *msg)
{
    //Urgent messages received from the Application layer must be sent

    ev<<"The message includes: "<<msg->getPayload();

    cancelEvent(repetitiondata);

    numSent++;
    sprintf(nuSent, "%05d", numSent);

    scheduleAt(simTime()+tr,repetitiondata);

    i=1; //repetition number of the frame

    data=new RAPPacket();
    data->setDestAddress(msg->getDestAddress());
    data->setSrcAddress(msg->getSrcAddress());
    data->setPayload(msg->getPayload());
    data->setName(msg->name());
    data->encapsulate(msg);
    data->setNbrepetition(nbrepetition);
    data->setFramenb(nuSent);
    data->setCurrent_time(simTime());
    data->setType(msg->getType());
    type=msg->getType();

    if(nbrepetition==1)
        data->setNext_time(simTime()+ freq);
    else if (nbrepetition>1)
        data->setNext_time(simTime()+ tr);
    if(numSent==1)
        data->setPrevious_time(simTime());
    else if(numSent>1)
        data->setPrevious_time(simTime()-(freq - (nbrepetition-1)*tr));

    RAPPacket *copy = (RAPPacket *)data->dup();

    char msgName[32];
    sprintf(msgName, "%s:%d:%d:%d:%d",data->name(),type,i,nbrepetition,numSent);

    if(numSent==1)
    {
        fprintf (pFile, "Payload du paquet RAP contient: %s:%d:%d:%d:%s\n",msg-
        >getPayload(),type,i,nbrepetition,nuSent);
        fprintf (pFile, "Chaque paquet sera envoye %d fois\n\n",nbrepetition);
        fclose(pFile);
    }
    copy->setName(msgName);
    copy->setRepetitionnb(i);
    copy->setKind(i);
}

```

```

//send to UDP
send(copy,"out");
i++;
}

void Session::sendRapPacket()
{
    if(i<nbrepetition)
    {
        cancelEvent(repetitiondata);
        scheduleAt(simTime()+tr, repetitiondata);

        RAPPacket *copy = (RAPPacket *)data->dup();

        copy->setCurrent_time(simTime());
        copy->setNext_time(simTime()+ tr);
        copy->setPrevious_time(simTime()- tr);

        char msgName[32];
        sprintf(msgName,"%s:%d:%d:%d:%d",data-
        >name(),type,i,nbrepetition,numSent);
        copy->setName(msgName);
        copy->setRepetitionnb(i);
        copy->setKind(i);

        send(copy,"out");
        i++;
    }

    else if(i==nbrepetition)
    {
        //delete repetition;
        cancelEvent(repetitiondata);

        RAPPacket *copy = (RAPPacket *) data->dup();

        copy->setCurrent_time(simTime());
        copy->setNext_time(simTime()+ freq);
        copy->setPrevious_time(simTime() - tr);

        char msgName[32];
        sprintf(msgName,"%s:%d:%d:%d:%d",data-
        >name(),type,i,nbrepetition,numSent);
        copy->setName(msgName);
        copy->setRepetitionnb(i);
        copy->setKind(i);

        send(copy,"out");
        delete data;
        data=new RAPPacket();
    }

    else if(i>nbrepetition)
    {
        cancelEvent(repetitiondata);

        delete data;
        data=new RAPPacket();
    }
}

```

```

/* Server.cpp (idem pour la simulation sur un canal de Gilbert-Elliot) */

//
// C'est le code du RAP Server qui reçoit les trames urgentes de la part du client et
// compte les paquets perdus
//

#include "RAPServer.h"
#include "APPpkt_m.h"
#include <ctype.h>
#include "rappacket_m.h"
#include <cstrtokenizer.h>

Define_Module(Application);
Define_Module(Session);

simtime_t Application::startService(cMessage *msg)
{
    if(strcmp(msg->name(),"Statistics")==0)
        ev<<"Report:"<< msg->name() << endl;
    else
        ev << "Message received: " << msg->name() << endl;
    return parentModule()->par("serviceTime");
}

void Application::endService(cMessage *msg)
{
}

std::string Application::processChars(const char *chars)
{
    std::string s = chars;
    for (unsigned int i = 0; i < s.length(); i++)
        s.at(i) = toupper(s.at(i));
    return s;
}

void Session::initialize()
{
    numPassedUp= rcvdframenb=rcvdrepcb=lostPkt=lostRep=0;
    packet_limit=par("packet_limit");
    firstmessage=lastmessage=1;
    expected_framenb=1;
    expected_repetitionnb=1;
    rcvdPkt=0;
}

void Session::handleMessage(cMessage *msg)
{
    if(msg->arrivedOn("in"))
        processMsgFromUDP(check_and_cast<RAPPacket *>(msg));
}

void Session::processMsgFromUDP(RAPPacket *msg)
{
    if(strcmp(msg->name(),"OMNET connecte")==0)
        send (msg,"outupper");

    else
    {
        rcvdPkt++;
        const char *content=msg->getPayload();
    }
}

```

```

ev<<"The urgent message contains:"<<content<<"\n";

std::vector<const char *>cont;
cStringTokenizer tokenizer(content,":");
const char *token;
while((token=tokenizer.nextToken())!=NULL)
    cont.push_back(token);

nbrepetition=atoi(cont[3]);
if(firstmessage==1)
{
    char file[50];
    sprintf(file,"%s"%d".xml","RAPServer",nbrepetition);
    pFile=fopen(file,"w");
    firstmessage=0;
    fprintf(pFile,"<root>\n");
}

if(atoi(cont[1])==1 || atoi(cont[1])==2 || atoi(cont[1])==3) //treat Data
frame
{
    if(atoi(cont[2])==expected_repetitionnb &&
    atoi(cont[4])==expected_framenb)
    {
        ev<<"On time!! No Loss!!\n";
        rcvdframenb=atoi(cont[4]);
        rcvdrepcb=atoi(cont[2]);

        if(atoi(cont[2])==1)
        fprintf(pFile,"<NumPaquet n=\"%d\">\n",atoi(cont[4]));
        fprintf(pFile,"<NumRep n=\"%d\">\n",atoi(cont[2]));
        fprintf(pFile,"<Received>");
        fprintf(pFile,"true");
        fprintf(pFile,"</Received>\n");
        fprintf(pFile,"</NumRep>\n");

        if(atoi(cont[2])==nbrepetition)
            fprintf(pFile,"</NumPaquet>\n\n");

            if(expected_repetitionnb<nbrepetition)
                expected_repetitionnb++;

            else
            {
                expected_repetitionnb=1;
                expected_framenb++;
            }
        }
    }

    else
    {
        ev<<"Some packets/repetitions were lost!!\n";

        if(atoi(cont[4])==expected_framenb)
        {
            rcvdframenb=atoi(cont[4]);
            rcvdrepcb=atoi(cont[2]);
            ev<<"The number of Packets lost is: "<<lostPkt<<"
            Packets\n";
            lostRep+= atoi(cont[2])-expected_repetitionnb;
            ev<<"And the number of repetitions that were lost is:
            "<<lostRep<<" repetitions\n";

            for(int p=expected_repetitionnb;p<atoi(cont[2]);p++)
            {

```

```

        if(p==1)
            fprintf(pFile, "<NumPaquet
n=\">%d\">\n", atoi(cont[4]));
            fprintf(pFile, "<NumRep n=\">%d\">\n", p);
            fprintf(pFile, "<Received>");
            fprintf(pFile, "fals");
            fprintf(pFile, "</Received>\n");
            fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
            if(p==nbrepetition)
                fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");
        }

fprintf(pFile, "<NumRep n=\">%d\">\n", atoi(cont[2]));
fprintf(pFile, "<Received>");
fprintf(pFile, "true");
fprintf(pFile, "</Received>\n");
fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
if(atoi(cont[2])==nbrepetition)
    fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");

    if(atoi(cont[2])<nbrepetition)
        expected_repetitionnb=atoi(cont[2])+1;

    else
    {
        expected_repetitionnb=1;
        expected_framenb++;
    }
}

else if(atoi(cont[4])>expected_framenb &&
atoi(cont[4])>(rcvdframenb+1))
{

    lostPkt+=atoi(cont[4])-(rcvdframenb+1);
    ev<<"The number of Packets lost is: "<<lostPkt<<"
Packets\n";

    if(atoi(cont[2])==expected_repetitionnb)
    {
        for(int q=rcvdframenb;q<=atoi(cont[4]);q++)
        {
            if(q==atoi(cont[4]))
            {
                for(int p=1;p<atoi(cont[2]);p++)
                {
                    if(p==1)
                        fprintf(pFile, "<NumPaquet
n=\">%d\">\n", atoi(cont[4]));
                        fprintf(pFile, "<NumRep n=\">%d\">\n", p);
                        fprintf(pFile, "<Received>");
                        fprintf(pFile, "fals");
                        fprintf(pFile, "</Received>\n");
                        fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
                        if(p==nbrepetition)
                            fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");
                }
            }
            else if(q==rcvdframenb)
            {
                for(int p=rcvdrepcb+1;p<=nbrepetition;p++)
                {
                    if(p==1)

```

```

        fprintf(pFile, "<NumPaquet
n=\"%d\">\n", rcvdframenb);
        fprintf(pFile, "<NumRep n=\"%d\">\n", p);
        fprintf(pFile, "<Received>");
        fprintf(pFile, "fals");
        fprintf(pFile, "</Received>\n");
        fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
        if(p==nbrepetition)
            fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");
    }
}
else
{
for(int p=1;p<=nbrepetition;p++)
{
    if(p==1)
        fprintf(pFile, "<NumPaquet
n=\"%d\">\n", q);
        fprintf(pFile, "<NumRep n=\"%d\">\n", p);
        fprintf(pFile, "<Received>");
        fprintf(pFile, "fals");
        fprintf(pFile, "</Received>\n");
        fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
        if(p==nbrepetition)
            fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");
    }
}
}

rcvdframenb=atoi(cont[4]);
rcvdrepcb=atoi(cont[2]);
lostRep+=(atoi(cont[4])-expected_framenb)*atoi(cont[3]);

ev<<"And the number of repetitions lost is: "<<lostRep<<"
repetitions\n";

if(atoi(cont[2])==1)
    fprintf(pFile, "<NumPaquet n=\"%d\">\n", atoi(cont[4]));

    fprintf(pFile, "<NumRep n=\"%d\">\n", atoi(cont[2]));
    fprintf(pFile, "<Received>");
    fprintf(pFile, "true");
    fprintf(pFile, "</Received>\n");
    fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
    if(atoi(cont[2])==nbrepetition)
        fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");
}

else if (atoi(cont[2])< expected_repetitionnb)
{
    lostRep+=(atoi(cont[3])-
expected_repetitionnb)+1)+((atoi(cont[3]))*(atoi(cont[4])-
(expected_framenb+1)))+(atoi(cont[2])-1);
ev<<"And the number of repetitions that were lost is: "<<lostRep<<" repetitions\n";

for(int q=rcvdframenb;q<=atoi(cont[4]);q++)
{
if(q==atoi(cont[4]))
{
for(int p=1;p<atoi(cont[2]);p++)
{
    if(p==1)
        fprintf(pFile, "<NumPaquet n=\"%d\">\n", atoi(cont[4]));
        fprintf(pFile, "<NumRep n=\"%d\">\n", p);

```

```

        fprintf(pFile, "<Received>");
        fprintf(pFile, "fals");
        fprintf(pFile, "</Received>\n");
        fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
        if (p==nbrepetition)
            fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");
    }
}
else if (q==rcvdframenb)
{
for(int p=rcvdrepcb+1;p<=nbrepetition;p++)
{
    if (p==1)
        fprintf(pFile, "<NumPaquet n=\"%d\">\n",rcvdframenb);
        fprintf(pFile, "<NumRep n=\"%d\">\n",p);
        fprintf(pFile, "<Received>");
        fprintf(pFile, "fals");
        fprintf(pFile, "</Received>\n");
        fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
        if (p==nbrepetition)
            fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");
    }
}
else
{
for(int p=1;p<=nbrepetition;p++)
{
    if (p==1)
        fprintf(pFile, "<NumPaquet n=\"%d\">\n",q);
        fprintf(pFile, "<NumRep n=\"%d\">\n",p);
        fprintf(pFile, "<Received>");
        fprintf(pFile, "fals");
        fprintf(pFile, "</Received>\n");
        fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
        if (p==nbrepetition)
            fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");
    }
}
}

if (atoi(cont[2])==1)
    fprintf(pFile, "<NumPaquet n=\"%d\">\n",atoi(cont[4]));
fprintf(pFile, "<NumRep n=\"%d\">\n",atoi(cont[2]));
fprintf(pFile, "<Received>");
fprintf(pFile, "true");
fprintf(pFile, "</Received>\n");
fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
if (atoi(cont[2])==nbrepetition)
    fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");

rcvdframenb=atoi(cont[4]);
rcvdrepcb=atoi(cont[2]);

}

else if (atoi(cont[2])>expected_repetitionnb)
{
lostRep+=((atoi(cont[4])-expected_framenb)*atoi(cont[3]))+(atoi(cont[2])-
expected_repetitionnb);
ev<<"And the number of repetitions lost is: "<<lostRep<<" repetitions\n";

for(int q=rcvdframenb;q<=atoi(cont[4]);q++)
{
if(q==atoi(cont[4]))
{

```

```

for(int p=1;p<atoi(cont[2]);p++)
{
    if(p==1)
        fprintf(pFile,"<NumPaquet n=\"%d\">\n",atoi(cont[4]));
    fprintf(pFile,"<NumRep n=\"%d\">\n",p);
    fprintf(pFile,"<Received>");
    fprintf(pFile,"fals");
    fprintf(pFile,"</Received>\n");
    fprintf(pFile,"</NumRep>\n");
    if(p==nbrepetition)
        fprintf(pFile,"</NumPaquet>\n\n");
}
}
else if(q==rcvdframenb)
{
for(int p=rcvdrepcb+1;p<=nbrepetition;p++)
{
    if(p==1)
        fprintf(pFile,"<NumPaquet n=\"%d\">\n",rcvdframenb);
    fprintf(pFile,"<NumRep n=\"%d\">\n",p);
    fprintf(pFile,"<Received>");
    fprintf(pFile,"fals");
    fprintf(pFile,"</Received>\n");
    fprintf(pFile,"</NumRep>\n");
    if(p==nbrepetition)
        fprintf(pFile,"</NumPaquet>\n\n");
}
}
else
{
for(int p=1;p<=nbrepetition;p++)
{
    if(p==1)
        fprintf(pFile,"<NumPaquet n=\"%d\">\n",q);
    fprintf(pFile,"<NumRep n=\"%d\">\n",p);
    fprintf(pFile,"<Received>");
    fprintf(pFile,"fals");
    fprintf(pFile,"</Received>\n");
    fprintf(pFile,"</NumRep>\n");
    if(p==nbrepetition)
        fprintf(pFile,"</NumPaquet>\n\n");
}
}
}

if(atoi(cont[2])==1)
    fprintf(pFile,"<NumPaquet n=\"%d\">\n",atoi(cont[4]));
fprintf(pFile,"<NumRep n=\"%d\">\n",atoi(cont[2]));
fprintf(pFile,"<Received>");
fprintf(pFile,"true");
fprintf(pFile,"</Received>\n");
fprintf(pFile,"</NumRep>\n");
if(atoi(cont[2])==nbrepetition)
    fprintf(pFile,"</NumPaquet>\n\n");

rcvdframenb=atoi(cont[4]);
rcvdrepcb=atoi(cont[2]);

}

if(atoi(cont[2])<nbrepetition)
{
    expected_repetitionnb=atoi(cont[2])+1;
    expected_framenb=atoi(cont[4]);
}

```



```

rcvdframenb=atoi(cont[4]);
rcvdrepcb=atoi(cont[2]);

    }
    else if (atoi(cont[2])< expected_repetitionnb)
    {
        lostRep+=((atoi(cont[3])-
expected_repetitionnb)+1)+((atoi(cont[3]))*(atoi(cont[4])-
(expected_framenb+1)))+(atoi(cont[2])-1);
        ev<<"And the number of repetitions that were lost
is: "<<lostRep<<" repetitions\n";

for(int q=rcvdframenb;q<=atoi(cont[4]);q++)
{
if(q==atoi(cont[4]))
{
for(int p=1;p<atoi(cont[2]);p++)
{
    if(p==1)
        fprintf(pFile, "<NumPaquet n=\"%d\">\n", atoi(cont[4]));
    fprintf(pFile, "<NumRep n=\"%d\">\n", p);
    fprintf(pFile, "<Received>");
    fprintf(pFile, "fals");
    fprintf(pFile, "</Received>\n");
    fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
    if(p==nbrepetition)
        fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");
}
}
else
{
for(int p=rcvdrepcb+1;p<=nbrepetition;p++)
{
    if(p==1)
        fprintf(pFile, "<NumPaquet n=\"%d\">\n", q);
    fprintf(pFile, "<NumRep n=\"%d\">\n", p);
    fprintf(pFile, "<Received>");
    fprintf(pFile, "fals");
    fprintf(pFile, "</Received>\n");
    fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
    if(p==nbrepetition)
        fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");
}
}
}

if(atoi(cont[2])==1)
fprintf(pFile, "<NumPaquet n=\"%d\">\n", atoi(cont[4]));
fprintf(pFile, "<NumRep n=\"%d\">\n", atoi(cont[2]));
fprintf(pFile, "<Received>");
fprintf(pFile, "true");
fprintf(pFile, "</Received>\n");
fprintf(pFile, "</NumRep>\n");
if(atoi(cont[2])==nbrepetition)
    fprintf(pFile, "</NumPaquet>\n\n");

rcvdframenb=atoi(cont[4]);
rcvdrepcb=atoi(cont[2]);

    }

    else if (atoi(cont[2])>expected_repetitionnb)

```

```

    {
        lostRep+=(atoi(cont[4])-
expected_framenb)*atoi(cont[3])+(atoi(cont[2])-expected_repetitionnb);

ev<<"And the number of repetitions lost is: "<<lostRep<<" repetitions\n";

for(int q=rcvdframenb;q<=atoi(cont[4]);q++)
{
if(q==atoi(cont[4]))
{
for(int p=1;p<atoi(cont[2]);p++)
{
    if(p==1)
        fprintf(pFile,"<NumPaquet n=\"%d\">\n",atoi(cont[4]));
    fprintf(pFile,"<NumRep n=\"%d\">\n",p);
    fprintf(pFile,"<Received>");
    fprintf(pFile,"fals");
    fprintf(pFile,"</Received>\n");
    fprintf(pFile,"</NumRep>\n");
    if(p==nbrepetition)
        fprintf(pFile,"</NumPaquet>\n\n");
}
}
else
{
for(int p=rcvdrepcb+1;p<=nbrepetition;p++)
{
    if(p==1)
        fprintf(pFile,"<NumPaquet n=\"%d\">\n",q);
    fprintf(pFile,"<NumRep n=\"%d\">\n",p);
    fprintf(pFile,"<Received>");
    fprintf(pFile,"fals");
    fprintf(pFile,"</Received>\n");
    fprintf(pFile,"</NumRep>\n");
    if(p==nbrepetition)
        fprintf(pFile,"</NumPaquet>\n\n");
}
}
}

if(atoi(cont[2])==1)
    fprintf(pFile,"<NumPaquet n=\"%d\">\n",atoi(cont[4]));
fprintf(pFile,"<NumRep n=\"%d\">\n",atoi(cont[2]));
fprintf(pFile,"<Received>");
fprintf(pFile,"true");
fprintf(pFile,"</Received>\n");
fprintf(pFile,"</NumRep>\n");
if(atoi(cont[2])!=nbrepetition)
    fprintf(pFile,"</NumPaquet>\n\n");

rcvdframenb=atoi(cont[4]);
rcvdrepcb=atoi(cont[2]);

}

if(atoi(cont[2])<nbrepetition)
{
    expected_repetitionnb=atoi(cont[2])+1;
    expected_framenb=atoi(cont[4]);
}
else
{
    expected_repetitionnb=1;
    expected_framenb=atoi(cont[4])+1;
}
}

```

```

    }
}

if(atoi(cont[4])!=numPassedUp)
{
    msg->setType(atoi(cont[1]));
    msg->setName(cont[0]);
    send(msg, "outupper");
    numPassedUp++;
}

}

if(atoi(cont[4])>=packet_limit && atoi(cont[2])==nbrepetition &&
lastmessage==1)
{
    fprintf(pFile,"</root>\n");
    fprintf(pFile,"Nombre total de paquets RAP perdus: %d parmi %d
paquets\n",lostPkt,atoi(cont[4]));
    fprintf(pFile,"Nombre total de repetitions RAP perdues: %d parmi %d
repetitions\n",lostRep,(atoi(cont[4])*nbrepetition));
    lastmessage=0;
    fclose(pFile);
}
}
}

/* module cloud */

#include <omnetpp.h>
#include "netpkt_m.h"

/**
 * Represents the network "cloud" between clients and the server;
 * see NED file for more info.
 */

class Cloud : public cSimpleModule
{
Module_Class_Members(Cloud,cSimpleModule,0);
private:
    double propDelay;

protected:
    virtual void initialize();
    virtual void handleMessage(cMessage *msg);
};

Define_Module(Cloud);

void Cloud::initialize()
{
    propDelay = (double)par("propDelay");
}

void Cloud::handleMessage(cMessage *msg)
{
    // determine destination address
    NetPkt *pkt = check_and_cast<NetPkt *>(msg);
    int dest = pkt->getDestAddress();
    ev << "Relaying packet to addr=" << dest << endl;

    // send msg to destination after the delay
    sendDelayed(pkt, propDelay, "out", dest);
}

```

```

/* fichier omnetpp.ini */

[General]
preload-ned-files=*.ned
scheduler-class = "cSocketRTScheduler"
#debug-on-errors = true
#modif OV
socketrtscheduler-port=4242
socketrtscheduler-ipAddr="10.10.0.1"
extServer=true
tcp=false

[Cmdenv]
express-mode = yes
module-messages = yes
event-banners = yes

[Tkenv]
#default-run=1

[Run 1]
description="External Model"

network = rapExt
**.numClients = 1
**.cloud.propDelay = 0.0s
**.server.serviceTime= 0.1s
**.client[*].Session.nbrepetition=3 # 1 pour UDP, 2 pour RAP=2,...etc
**.client[*].sendIaTime = 0.001
**.client[*].tr=0.0001

```

*******Canal de Gilbert-Elliot*******

```

/* cloud.cpp (canal de Gilbert Elliot) */

/**
 * Représente le modèle de canal de Gilbert-Elliot
 */

#include <omnetpp.h>
#include "netpkt_m.h"

class Cloud : public cSimpleModule
{
Module_Class_Members(Cloud,cSimpleModule,0);
private:
    double propDelay;
    int state_channel;
    double pe, per,ber;
    int packet_length;
    int counter;

protected:
    virtual void initialize();
    virtual void handleMessage(cMessage *msg);
};

Define_Module(Cloud);

void Cloud::initialize()
{
    propDelay = (double)par("propDelay");
}

```

```

state_channel=0;
ber=0.05;
packet_length=1184;
counter=0;
}

void Cloud::handleMessage(cMessage *msg)
{
    NetPkt *pkt = check_and_cast<NetPkt *>(msg);
    int dest = pkt->getDestAddress();

    switch(state_channel)
    {
        case 0:
            ev<<"Le canal est d'une mauvaise qualite!!"<<endl;

            if(counter==0)
            {
                x=geometric(0.000582137015063844);

                ev<<"Duree du mauvais etat: "<<x<<" bits"<<endl;

                per=1-pow((1-ber),packet_length);

                ev<<"Packet Error Rate: "<<per<<endl;
            }

            pe= uniform (0,1);
            ev << "PE= " << pe << endl;

            if(pe>per)
            {
                ev << "Relaying packet to addr=" << dest << endl;

                //send msg to destination
                sendDelayed(pkt, propDelay, "out", dest);
            }

            else
            {
                delete(msg);
            }

            counter+=packet_length;

            if(counter>=x)
            {
                state_channel=1;
                lostRep=lostPkt=counter=0;
                ber=0;
            }

            break;

        case 1:
            ev<<"Le canal est d'une bonne qualite!!"<<endl;
            if(counter==0)
            {
                x=geometric(0.00016577);

                ev<<"Duree du bon etat:"<<x<<" bits"<<endl;
                per=1-pow((1-ber),packet_length);
                fprintf (pFile, "Packet Error Rate: %f\n\n",per);
            }
    }
}

```

```

        ev << "Relaying packet to addr=" << dest << endl;

        // send msg to destination after the delay
        sendDelayed(pkt, propDelay, "out", dest);

        counter+=packet_length;

        if(counter>=x)
        {
            state_channel=0;
            ber=0.05;
            counter=0;
        }

        break;
    }
}

/* fichier omnetpp.ini */

[General]
preload-ned-files=*.ned
scheduler-class = "cSocketRTScheduler"
#debug-on-errors = true
#modif OV
socketrtscheduler-port=4242
socketrtscheduler-ipAddr="127.0.0.1"
extServer=true
tcp=false

[Cmdenv]
express-mode = yes
module-messages = yes
event-banners = yes

[Tkenv]
#default-run=1

[Run 1]
description="External Model"

network = rapExt
**.numClients = 1
**.cloud.propDelay = 0.0s
**.server.serviceTime= 0.1s
**.client[*].Session.nbrepetition=1 # 1 pour UDP, 2 pour RAP=2,...etc
**.client[*].sendIaTime = 0.001
**.client[*].tr=0.0001

```

Résumé

Le développement des systèmes de communication et de localisation et les progrès des dispositifs mobiles rendent possible la mise en œuvre de nouvelles applications et services, permettant l'accès à des informations temps réel et l'amélioration de l'intégration des personnes aveugles. Dans ce contexte, la thèse a contribué au développement d'un système d'information et de guidage destiné aux personnes aveugles dans les transports en commun. La thèse a porté sur deux aspects critiques de ce type de systèmes : la fiabilité de la transmission de données et la capacité à localiser et à guider l'utilisateur de manière robuste. Elle a d'autre part développé un environnement de simulation pour le prototypage et l'analyse du fonctionnement de l'application nomade ainsi que l'étude des aspects réseaux de communication mobile. Les travaux se sont appuyés sur les acquis des projets RAMPE et INFOMOVILLE.

Mots clés :

Applications nomades, systèmes d'information, aveugles et malvoyants, transports en commun, localisation, guidage, WiFi, WiFi Positioning System (WPS), protocoles réseau, PDA.

Title

Contribution to modelling, simulation and evaluation of mobile applications with distributed intelligence.

Application to the assistance of blind travellers in public transports and interchange areas

Abstract

The development of communication and locating systems and the progress of mobile devices have made possible new applications and services, allowing access to real-time information and improving the integration of blind people. In this context, the thesis has contributed to the development of an information and guidance system to be used by blind travellers in public transports.

The work has focused on two critical aspects for this kind of systems: the reliability of data transmission and the ability of localizing and guiding the user in an efficient way. A simulation environment has also been developed that can be used for the prototyping and the analysis of the mobile application as well as for the study of communication over the wireless network. The thesis is based on the results of the RAMPE and INFOMOVILLE projects.

Keywords

Key words: Mobile applications, information system, blind and visually impaired, public transports, localization, guidance, WiFi, WiFi Positioning System (WPS), network protocols, PDA.
