

Les techniques de géolocalisation en WIFI principes, performances, comparaison

Lionel TAILHARDAT

24 mai 2016

Conservatoire National des Arts et Métiers
Paris

Synthèse bibliographique
présentée en vue d'obtenir
l'Unité d'Activité UA311X
du
Master Technologies des Hauts Débits

Résumé

Cette recherche bibliographique fait ressortir les problématiques physiques et techniques sous-tendant la conception d'un système de géolocalisation reposant sur un réseau Wifi, et traite des solutions et architectures communément déployées.

En partant de considérations sur l'aspect géométrique du problème et l'influence de l'environnement sur la propagation du signal, nous verrons peu à peu se dessiner les fondements théoriques et pratiques ayant mené aux systèmes commerciaux actuels, et toucherons du doigt l'essence des réflexions en cours sur l'amélioration des performances. Des axes de recherche discutés ressortira que le sujet dépasse largement le cadre de la propagation des signaux, et oblige à une approche transverse ouvrant la possibilité à de nombreux raffinements tout en incitant le concepteur à maîtriser l'ensemble des éléments de la chaîne.

De nombreuses références à des articles de recherche permettront au lecteur d'approfondir les sujets abordés.

Mots clé : *Wifi ; 802.11 ; LBS ; WPS ; localisation ; triangulation ; radiomap ; dead-reckoning.*

Abréviations

AoA	: Angle of Arrival
API	: Application Programming Interface
ARCEP	: Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes
BSS	: Basic Service Set
CFR	: Channel Frequency Response
CIR	: Channel Impulse Response
CSI	: Channel State Information
DR	: Dead-Reckoning
ESS	: Extended Service Set
GIS	: Geographical Information System
GPS	: Global Positioning System
IHM	: Interface Homme-Machine
ISM	: bande Industriel, Scientifique et Médical
LBS	: Location Based Service
LoS	: Line of Sight
MAC	: Medium Access Control layer
MAP	: Maximum A Priori
MS	: Mobile Station
NTP	: Network Time Protocol
PDA	: Personnal Digital Assistant
PDR	: Pedestrian Dead-Reckoning
PHY	: PHYsical layer
PIRE	: Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente
RCPI	: Received Channel Power Indicator
RSS	: Received Signal Strength
RSSI	: Received Signal Strength Indicator
STA	: Station
SVM	: Support Vector Machine (Machines à Vecteur Support)
TDoA	: Time Difference of Arrival
ToA	: Time of Arrival
ToF	: Time of Flight
WPS	: Wifi Positionning System

Abréviations typographiques

cf.	: confer
p.	: page
p. ex.	: pour exemple

Table des matières

1	Introduction	5
2	Problème posé et travaux antérieurs	7
2.1	Sur l'aspect géométrique du sujet	7
2.2	Rappels d'architecture Wifi dans le contexte des WPS	10
2.3	Propagation : pathloss, multipath, fading	15
2.4	Sur la précision attendue	19
2.5	Sur l'architecture système, la puissance de calcul, le temps-réel	21
3	Solutions proposées	24
3.1	Vue d'ensemble des principes : démarche et types d'approches	24
3.2	Approche en <i>distance</i> : RSS et trilateration	27
3.3	Approche en <i>temps</i> : TDoA et multilatération	30
3.4	Approche par comparaison de <i>pattern</i> : fingerprint	33
3.5	Approche <i>hybride</i> : dead-reckoning et map-matching	36
3.6	Eléments d'architecture réseau et système	40
4	Analyse et conclusions	44
A	Annexes	46
A.1	Tables complémentaires	46
A.2	Figures complémentaires	47
A.3	MatLab - pathloss.m	50
A.4	MatLab - trilateration.m	51
A.5	MatLab - etude_trilateration.m	52
B	Bibliographie, liste des figures et tables	54

1 Introduction

Partons des années 90 avec l'introduction sur le marché des PDA¹ et la transformation progressive des ordinateurs portatifs en ordinateurs portables tel que décrit dans [Pau02; alp13] : la mobilité devient accessible aux travailleurs et entre progressivement dans les mœurs. Les mêmes acteurs techniques du marché (cf. [Pau02]) participent à l'élaboration des solutions de connectivité : l'IrDa et le Wifi entrent en jeu, et les notions de mobilité à grande échelle et de localisation sont déjà² dans la version initiale de la norme IEEE 802.11 décrivant les communications sans fil.

Les nombreux besoins et envies d'applications reposant sur les informations de localisation (LBS : Location Based Service) n'ont plus qu'à se concrétiser et se retrouvent dans de nombreux domaines : logistique, médecine, orientation, marketing (p. ex. : [Phi14; Pat05; RBK13]) ; gestion du réseau (p. ex. : [Hal+10]) ; et sécurité du réseau (p. ex. : [WCZ16; TAW15]). Il reste cependant à couvrir toutes les situations, tous les besoins, toutes les exigences :

Précision : compter les individus dans une zone, trouver le chemin jusqu'à l'imprimante la plus proche, vérifier la présence d'un instrument dans le tiroir qui lui est attribué,

Indoor versus Outdoor : disposer d'un référentiel en toutes circonstances et dans la continuité des déplacements ... en intérieur (les signaux GPS ne passent pas), comme en extérieur,

Temps réel ou à postériori : du robot devant être autonome pour aller chercher un colis dans un entrepôt, à l'analyse marketing des us et coutumes des clients d'un centre commercial,

Maîtrise des coûts : utiliser les ressources existantes, ne pas déployer de système complémentaire, ne pas avoir à modifier les matériels pour disposer du LBS, déployer rapidement, re-déployer simplement.

C'est cette dernière exigence qui dirige le domaine de recherche à travers l'idée : ne pourrait-on pas profiter d'infrastructures largement déployées pour satisfaire des besoins de LBS ? Il semble évident, en effet, que sous réserve de disposer d'informations nécessaires et suffisantes pour évaluer une position, utiliser les paramètres d'une infrastructure existante réduirait le coût de conception et de mise en œuvre.

1. Personnal Digital Assistant : assistants numériques personnels

2. On pensera aux concepts de BSS-Transition, d'ESS-Transition, et de RSSI décrits dans [IEE97]

C'est ainsi un domaine de recherche ouvert depuis 1989³, avec une forte croissance depuis les 3 dernières années (la table 1 rapporte que 50% des études ont été publiées sur les 3 dernières années). L'article de référence est une étude de Microsoft rapportant un essai de mise en œuvre nommé RADAR [BP00] ; près de 2200 articles Springer font référence à cette étude.

Période	Nombre
1989-2016	3451
2006-2011	1019
2011-2013	670
2013-2015	947
2015-2016	637

TABLE 1 – Nombre d'articles par période de référence dans Springer selon le critère *Wifi positioning* dans la catégorie *Computer Science*

De l'idée à la réalité : des solutions concrètes existent et sont déployées dans le monde universitaire⁴, comme dans le domaine commercial⁵. De cette multitude d'études et de solutions révélées se pose la question du choix de l'architecture optimale.

Nous allons aborder ce sujet en commençant, dans la *première partie*, par un parcours de l'ensemble des composantes physiques et techniques formant la problématique des WPS⁶. En *seconde partie*, nous parcourerons les solutions apportées par la communauté à chaque sous-problématique. En *conclusion*, nous finirons par l'analyse et la mise en perspective de ces diverses solutions ce qui nous permettra de dégager l'articulation entre les composantes et d'identifier les clés d'une architecture optimale.

3. Première occurrence d'un article sur le sujet dans Springer (www.springer.com)

4. Universitaire : p. ex. [Shi+10 ; SCM10 ; Gor+11 ; BF07 ; 15 ; 10a]

5. Commercial : p. ex. [08 ; Pat05 ; Cis14 ; Cis ; tec ; 13 ; 10b]

6. Wifi Positionning System

2 Problème posé et travaux antérieurs

2.1 Sur l'aspect géométrique du sujet

L'idée intuitive pour se localiser : se positionner dans un système de coordonnées. Ramenée dans un contexte d'infrastructure Wifi, l'idée intuitive devient : se positionner par rapport à aux éléments d'infrastructure Wifi. Trois difficultés surviennent :

- Comment faire si les éléments de cette infrastructure ne sont pas visibles, parce que cachés dans le faux plafond, parce que derrière un mur ?
- Comment faire de la géométrie dans un espace tridimensionnel sans repères au sol préétablis et normés ?
- Quels paramètres liés à la propagation de signal ou au système de communication pouvons-nous utiliser pour effectuer des calculs ?

Nous sommes face à un problème mélangeant géométrie, physique et système. Du point de vue géométrique, les questions fondamentales auxquelles nous devons répondre sont :

1. Dans quel système de coordonnées nous placer (cartésien, polaire, vectoriel) ?
2. A quelle distance sommes-nous d'un repère ?
3. Selon quel angle observons nous ce repère ?

Nous pouvons essayer d'associer des paramètres de propagation et de système à chacune de ces questions :

Distance : évaluée selon une loi d'affaiblissement, sous réserve de connaître la puissance émise,

Angle : évalué selon une loi d'affaiblissement liée à la directivité des antennes,

Temps de vol, latence, : évalué à partir de c , la vitesse de la lumière, sous réserve de disposer d'une référence temporelle⁷ synchrone pour horodater les émissions et réceptions de paquets de données,

Fréquence de porteuse : évaluée à partir d'une mesure de l'écart Doppler, sous réserve de la disponibilité d'un oscillateur ultra-stable et de mouvements de grande vitesse,

Puissance : évaluée par une mesure de la puissance composite ou de sous-porteuse, sous réserve de connaître la puissance à l'émetteur et d'être dans un moment d'émission stable en terme de séquence binaire,

7. Nous pouvons nous attendre, selon [GAN11], à une précision d'horloge de $10ms$ à $200\mu s$ en utilisant le Network Time Protocol

Débit : fonction de la puissance, de la charge du réseau, des caractéristiques du système,

Response Rate : assimilable au *temps de vol* et évalué à partir de l'horodatage des paquets de données, sous réserve d'une référence temporelle partagée et de l'absence d'influence des couches hautes sur le traitement de la couche MAC.

Les paramètres *physique* (distance, temps, fréquence, puissance) sont des valeurs intensives, il nous serait donc possible de les utiliser sans connaissance à priori du système. Les paramètres *système* (débit, response rate) sont plutôt des valeurs extensives, le Wifi étant un système à accès multiples ; il faudra donc prendre des précautions sur leur utilisation. La question de la distance est donc ainsi abordable sous quelques réserves d'usage et en supposant que certaines valeurs initiales, tel que la puissance d'émission, sont bornées et communes à tous les systèmes Wifi.

Reste à discuter la notion de référentiel : combien de points de repère, et quel modèle de calcul ? Supposons un instant que :

- Nous travaillons dans un cas idéal de propagation omnidirectionnelle des signaux,
- Qu'un élément MS soit localisé par rapport à des éléments AP (la définition de ces éléments sera précisée en section 2.2),
- Que nous sachions évaluer la distance entre AP et MS par un procédé quelconque.

La figure 1 montre que nous pouvons déterminer la distance, mais pas l'azimuth : le LBS ne serait alors que du type *présence et proximité* de MS par rapport à AP.

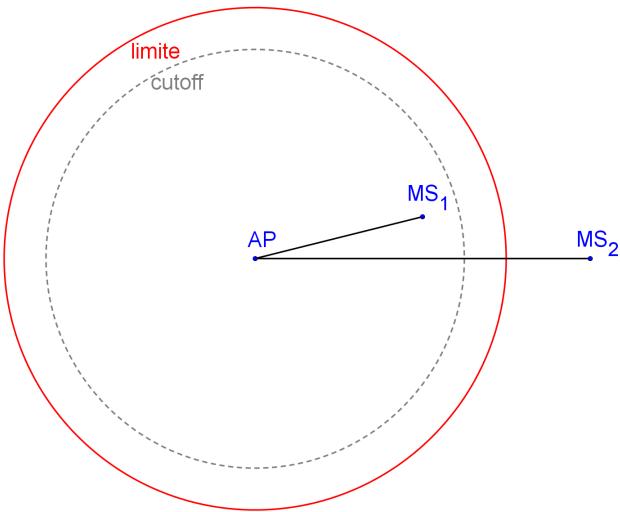


FIGURE 1 – Modèle géométrique de localisation avec 1 AP. Les limites de sensibilité des récepteurs et de $RSSI_{cutoff}$ bornent les distances où la localisation est effective : MS_1 est localisable, mais pas MS_2 .

En figure 2, en introduisant un second point de référence AP, seul le cas MS_1 est déterminé sans ambiguïté car c'est un minimum pour les 2 AP ; mais la distance des AP à MS_2 reste ambiguë par rapport à une position miroir en MS'_2 .

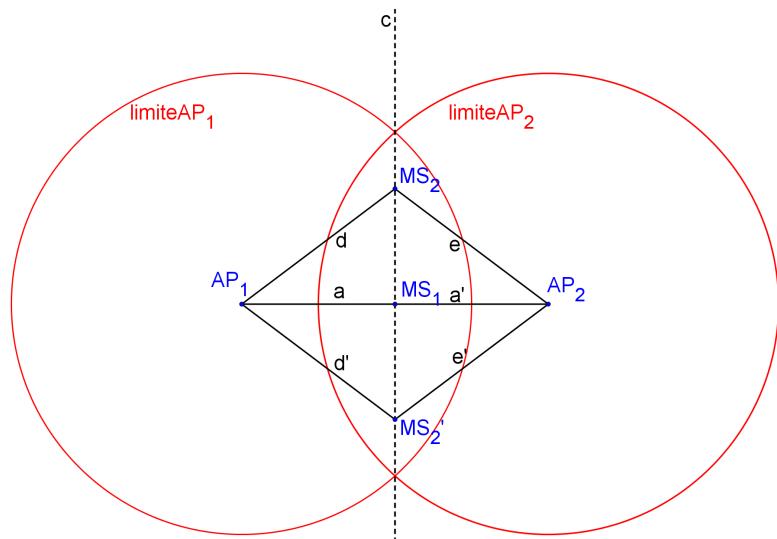


FIGURE 2 – Modèle géométrique de localisation avec 2 AP. La détermination de MS_2 est ambiguë sur la droite c du fait de la même distance perçue aux AP pour une position en MS'_2 .

Tel que décrit en figure 3, il faut introduire au moins un troisième point de référence pour préciser la localisation de MS : de la connaissance des distances respectives des AP à MS, un calcul de type *triangulation*, *trilateration* ou *multilatération* permet de déterminer les coordonnées de MS. Ces modèles de calcul, ainsi que les technologies sous-jacentes seront présentés dans la section 3.

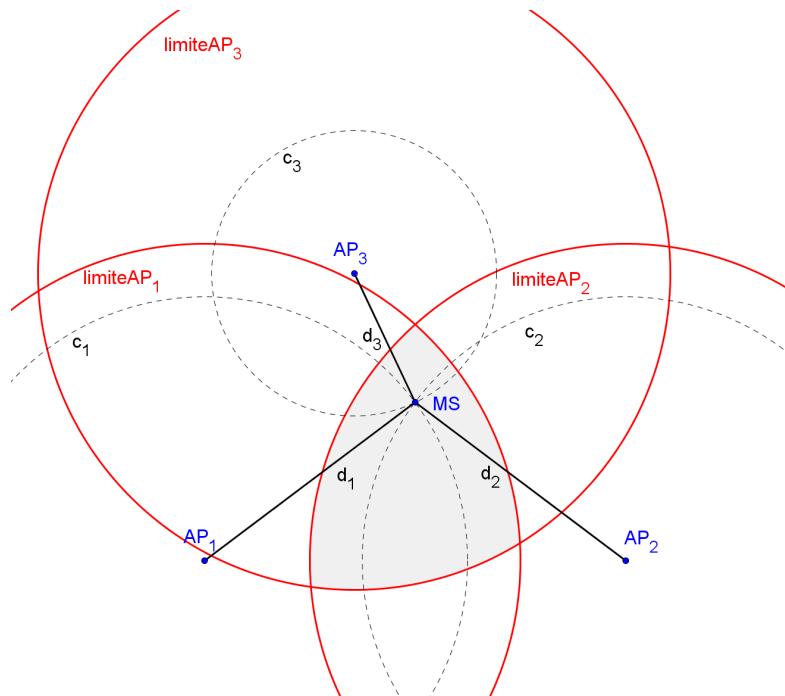


FIGURE 3 – Modèle géométrique de localisation avec 3 AP. L’intersection des cercles c_1 , c_2 , et c_3 détermine la localisation de MS . L’aire commune aux surfaces de couverture des 3 AP (surface grisée) restreint la zone où cette détermination est possible.

2.2 Rappels d'architecture Wifi dans le contexte des WPS

Le Wifi est normalisé dans le document IEEE 802.11⁸. Cette norme traite de la gestion de la couche physique (PHY⁹) et des moyens d'accès au média

8. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous appuierons sur les versions de 1997 [IEE97] et 2012 [IEE12] de cette norme.

9. PHYSical layer

sans fil (MAC¹⁰). On y utilise le nom générique STA¹¹ pour désigner un élément ayant des capacités d'émission-réception. STA se décline en deux catégories :

AP : Access Point, point d'accès au réseau,

MS : Mobile Station, terminaux mobiles.

En tant que réseau *sans fil* avec une capacité de *mobilité des terminaux*, des processus de gestion de la qualité de liaison ont été mis en place pour permettre : la gestion du handover ; l'adaptation de la puissance d'émission ; l'allocation de canal. Ces processus s'appuient sur un sous ensemble de la norme nommé *WLAN Radio Measurement*. En citant [IEE12] sur le contexte de mise en œuvre du *WLAN Radio Measurement* :

A STA may choose to make measurements locally, request a measurement from another STA, or may be requested by another STA to make one or more measurements and return the results. Radio Measurement data is made available to STA management and upper protocol layers where it may be used for a range of applications.

Nous avons vu au chapitre précédent que la puissance reçue peut nous servir d'indicateur de distance. *WLAN Radio Measurement* inclut (via des mécanismes actif (cf. figure 4) ou passif¹²) divers paramètres permettant d'obtenir ce genre d'information :

RSSI : Received Signal Strength Indicator. Concept général, présent dans divers systèmes de radiocommunication, fournissant la puissance de signal reçue en *dBm*. En Wifi, cette puissance est mesuré sur le préambule de synchro de trame (cf. figure 5).

RCPI : Received Channel Power Indicator. Cet indicateur est mis à disposition lors d'une requête d'une STA demandant à une autre STA de faire un rapport sur *TransmitAddress*¹³ et retourne la puissance totale (signal + bruit + interférence) mesurée sur une trame reçue, au niveau du connecteur d'antenne. Il s'agit d'une puissance moyenne calculée par : $\overline{RCPI} = 1/\#frames \cdot \sum RCPI_{frame_i}$,

10. Medium Access Control loyer

11. STAtion

12. La mesure *active* se distingue de la mesure *passive* en ce qu'elle émet une trame *Probe Request* sur chaque canal afin de forcer toutes les STA à répondre, tandis que la méthode *passive* repose sur les informations en mémoire issues des trames *beacon*. La figure 27 (p. 47) illustre une demande de mesure dans une capture de trame.

13. Plus de détails dans [IEE12], section 10.11.9.2 *Frame Report*

Max Transmit Power : borne supérieure de la puissance d'émission à utiliser sur le canal¹⁴,

Transmit Power Used : puissance d'émission effective, en dBm ¹⁵. Cette mesure s'effectue au niveau du connecteur d'antenne et est incluse dans le champ *Transmit Power Used* de la trame émise suivante.

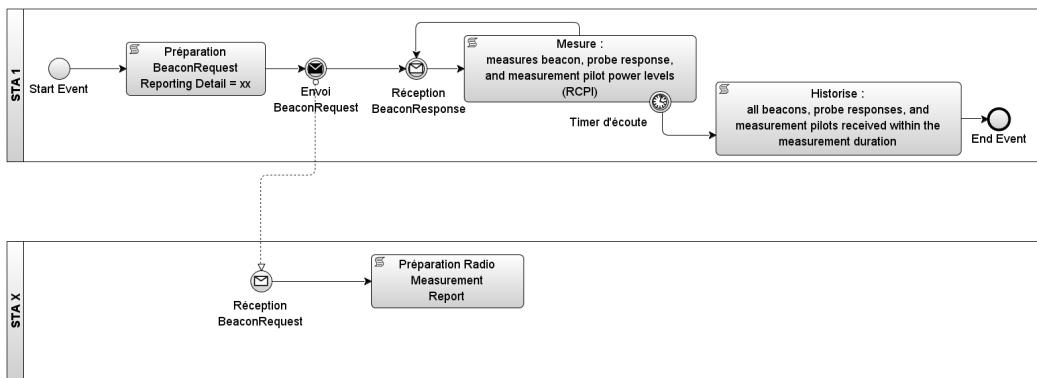


FIGURE 4 – Processus simplifié de mesure active. A partir de : [IEE12]

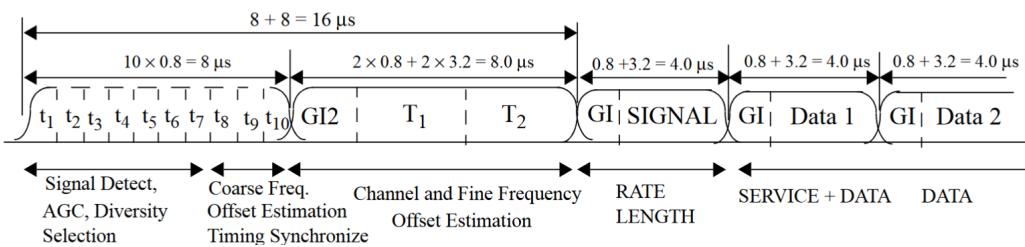


FIGURE 5 – Chronogramme du préambule de synchronisation (*PLCP preamble*) pour une trame OFDM. Les 12 premiers temps sont utilisés pour la mesure de RSSI. Source : [IEE12]

En termes de canaux, IEEE 802.11 découpe la bande ISM¹⁶ des 2,4 GHz en 12 canaux. Chaque STA peut communiquer sur l'un de ces canaux. Une écoute de ces 12 canaux est donc nécessaire pour récupérer les 1 à 3 points de référence utiles pour déterminer une localisation (cf. section 2.1 sur l'importance du nombre de points de référence).

14. Défini dans [IEE12] (par. 8.4.1.19 et 10.11.13). La mesure est en dBm , et s'effectue au niveau du connecteur d'antenne.

15. Mesure avec une tolérance de ± 5 dB.

16. Bande Industriel, Scientifique et Médical ; définie dans la norme EN 55011. Le Wifi utilise la bande des 2,4 GHz ([2400, 2483] MHz) et des 5,8 GHz ([5150, 5350 ; 5470, 5725] MHz).

Supposons une configuration standard des AP avec l'émission d'une trame *Beacon* par période $T_{beacon} = 100[\text{ms}]$; la trame *Beacon*¹⁷ comportant des informations d'identification des AP, ainsi que d'autres séquences (telles que *l'en-tête de synchronisation PLCP* (cf. figure 5) ou le *Measurement Pilot Transmission*) utiles pour les WPS. L'analyse des 12 canaux durera (dans le meilleur des cas s'il n'y a pas de collision de trames) :

$$t_{scan} = 12 \cdot T_{beacon} = 12 \cdot 100[\text{ms}] = 1,2[\text{s}] \quad (1)$$

Selon [Tam], ce temps est majoré par la valeur de *channel switch time*¹⁸ propre à chaque récepteur radio : t_{switch} vaut généralement entre 20 et 60 ms, voire 3 ms dans le meilleur des cas. Tout compris, nous aurons alors :

$$t_{scan} = 12 \cdot (T_{beacon} + \overline{t_{switch}}) = 12 \cdot (100 + 40) = 1,680[\text{s}] \quad (2)$$

On trouve ici une limite de réactivité intrinsèque au système Wifi qui influera sur la mise à jour des données de localisation. Une possibilité d'amélioration pourrait consister en l'utilisation d'un récepteur multi-radio ; or ce type de matériel ne semble pas s'être généralisé sur le marché.

Notons que le changement de canal interrompt temporairement la connexion au réseau, une MS ne pouvant échanger des données via une STA qu'après un processus d'appairage. Cela infère une influence sur les échanges de données entre la MS et un éventuel calculateur de localisation positionné dans le réseau (ce point est élaboré plus en détail en section 3), ainsi que la détection des AP présents sur le canal (cf. figure 6).

A l'instar des paramètres *WLAN Radio Measurement* présentés ci-dessus, notons sans entrer dans les détails quelques autres paramètres proposés dans la norme 802.11 et pouvant être utilisé par les WPS :

Location Configuration Information : champ d'information, de l'ensemble *WLAN Radio Measurement*, renseigné par les couches applicatives (cf. section 3.6) et permettant de transmettre les coordonnées géographique des STA sous forme de latitude et longitude. Ce champ n'est pas forcément renseigné : cela dépend de l'implémentation au niveau du firmware de l'émetteur-récepteur Wifi et des couches applicatives plus hautes.

Civic Location : champ d'information facilitant l'intervention des services de secours en mettant à disposition une information de position de faible granularité.

17. L'ensemble des champs de cette trame de gestion est présenté dans [IEE12], par. 8.3.3.2 *Beacon frame format*.

18. Temps correspondant au délai de commutation d'un canal à un autre. Ce temps est inhérent à l'électronique embarquée.

```
=====
===== AFFICHER SI MODE RESEAU=BSSID =====
=====

Nom de l'interface : Wi-Fi
Actuellement 27 réseaux sont visibles.

SSID 1 : Heroncity.net
    Type de réseau      : Infrastructure
    Authentification   : WPA2 - Personnel
    Chiffrement         : CCMP
    BSSID 1             : 18:62:2c:a0:77:68
        Signal           : 57%
        Type de radio     : 802.11n
        Canal             : 136
        Taux de base (Mbps) : 6 12 24
        Autres taux (Mbps) : 9 18 36 48 54
    BSSID 2             : 18:62:2c:a0:77:67
        Signal           : 67%
        Type de radio     : 802.11n
        Canal             : 6
        Taux de base (Mbps) : 1 2 5.5 11
        Autres taux (Mbps) : 6 9 12 18 24 36 48 54

SSID 2 : NEUF_7674
    Type de réseau      : Infrastructure
    Authentification   : WPA-Personnel
    Chiffrement         : CCMP
    BSSID 1             : 00:17:33:92:76:78
        Signal           : 31%
        Type de radio     : 802.11g
        Canal             : 1
        Taux de base (Mbps) : 1 2 5.5 11
        Autres taux (Mbps) : 6 9 12 18 24 36 48 54

SSID 3 : SFR WiFi FON
    Type de réseau      : Infrastructure
    Authentification   : Ouvrir
    Chiffrement         : Aucun
    BSSID 1             : 62:17:33:92:76:79
        Signal           : 30%
        Type de radio     : 802.11g
        Canal             : 1
        Taux de base (Mbps) : 1 2 5.5 11
        Autres taux (Mbps) : 6 9 12 18 24 36 48 54
    BSSID 2             : d2:25:15:1f:ab:2d
        Signal           : 71%
        Type de radio     : 802.11g
        Canal             : 11
        Taux de base (Mbps) : 1 2 5.5 11
        Autres taux (Mbps) : 6 9 12 18 24 36 48 54

SSID 4 : SFR WiFi Mobile
    Type de réseau      : Infrastructure
    Authentification   : WPA2 - Entreprise
    Chiffrement         : CCMP
```

FIGURE 6 – Résultat de la commande Windows *netsh wlan show all* en période de scan actif : l'ensemble des AP à portée sont affichés. Une fois l'association au réseau réalisé, et avec la STA monoradio de l'ordinateur, seul l'AP de rattachement devient visible.

MLME-TIMINGADVERTISEMENT : primitive permettant de transmettre des informations de temps.

Block Ack : mécanisme permettant de forcer l'émission d'accusés de réception pour chaque trame reçue. Les trames portant toutes un horodatage il devient ainsi possible de mesurer le temps d'aller-retour entre un AP et une MS, et donc d'en déduire une distance (plus de détails sur le sujet seront présentés en section 3).

Pour finir sur les caractéristiques du Wifi, 802.11 propose 2 modes d'utilisation du spectre radiofréquence ; chacun ayant ses intérêts par rapport à la transmission de données, mais apportant aussi des contraintes sur les WPS :

DSSS¹⁹ : est utilisé dans la version *b* de la norme. Il s'agit de la technique historique utilisée en Wifi. Cette technique permet de lutter

contre les interférences en utilisant un code de saut de fréquence répartissant l'énergie de transmission au sein du canal. A la différence de l'OFDM (cf. ci-après), seul l'indicateur de RSSI est présent dans cette technique.

OFDM²⁰ : est un principe de transmission multiporteuse utilisé dans les versions *a*, *g*, *n*, *ac* de la norme. Cette technique permet de lutter contre la sélectivité en fréquence des canaux à l'aide d'un système d'égalisation utilisant l'indicateur CSI²¹ (décrivant les atténuations en amplitude de chaque sous porteuse). Nous verrons plus loin (cf. sections 2.3 et 3.2) comment le CSI peut compléter l'information de RSSI pour la mise en œuvre des WPS.

2.3 Propagation : pathloss, multipath, fading

Afin de répondre à la question de la distance, nous pouvons nous appuyer sur le modèle de propagation en espace libre : connaissant la puissance d'émission, la distance peut être déduite de la puissance reçue en suivant une loi d'affaiblissement. Mais le milieu de propagation est complexe de par sa géométrie, ses caractéristiques physiques, et les événements s'y déroulant. La table 2 résume ces éléments. En reprenant les termes de [MMS15], l'environnement est dynamique et *s'approche par des modèles statistiques*.

Réflexions simples et multiples par les sols, murs et objets
Diffraction autour des obstacles et objets
Personnes et objets présentes et en mouvement
Hygrométrie et ensoleillement lié au climat et au cycle diurne
Affaiblissement sortant des modèles de pathloss
Variations temporelles et spatiales du pathloss
Polarisation
Changement, planifié ou non, de l'infrastructure Wifi (réingénierie ; panne)

TABLE 2 – Particularités de l'environnement et effets potentiels sur le signal.
Partiellement tiré de [ITU15].

Afin de ne pas introduire trop de complexité, on retiendra donc dans premier temps un modèle normalisé général (*site-general model*), quitte à l'ajuster pour de plus amples performances (ce que nous verrons par la suite dans les *site-specific models*) : les équations 3 et 4 constituent un modèle

21. Channel State Information

d'affaiblissement *indoor site-general* par recommandation [ITU15 ; BP00] qui servira comme point de départ à de nombreuses études.

$$L_{total} = L(d_0) + N \log_{10}(d/d_0) + L_f(n) \quad (3)$$

$$L(d_0) = 20 \log_{10}(f) - 28 \quad (4)$$

Les variables en jeu dans les équations 3 et 4 sont :

- L : Affaiblissement [dB]
- L_f : Facteur d'affaiblissement par mur ou plancher [dB]
- f : Fréquence [MHz]
- d : Distance de mesure [m]
- d_0 : Distance de référence, communément 1 mètre
- N : Coefficient de perte selon l'environnement (cf. table 5, page 46).

Il devient possible d'aboutir à une évaluation de la distance en connaissant les puissances d'émission Wifi. La puissance est fournie par réception de l'indicateur *Transmit Power Used* (cf. section 2.2), ou par défaut à partir des limites légales. Les limites légales sont données par :

- [IEE12] indique dans son annexe D.2.2 les puissances par classe d'émetteurs et fréquence, et renvoie vers les décrets locaux pour les limites légales,
- L'ARCEP²² fixe dans [arc13] une limite de PIRE²³ en France à 100 mW pour les STA en intérieur comme en extérieur.

Afin de fixer les ordres de grandeur, posons quelques hypothèses et calculons la distance maximale jusqu'à la limite de sensibilité d'un récepteur :

Puissance d'émission à 2,4 GHz	: $P_e = 100$ [mW] = 20 [dBm]
Puissance cutoff ²⁴	: $RSSI_{cutoff} = -75$ [dBm]
Antennes omnidirectionnelles	: $G_e = G_r = 0$ [dBi]
Environnement de bureau	: $N = 28$
Facteur de perte par mur	: $L_f = 14$ [dB]
Affaiblissement de référence	: $L_{(d_0=1,f=2400)} = 39,6042$ [dB]
Affaiblissement admissible	: $L_{total} = P_e - RSSI_{cutoff} = 20 - (-75) = 95$ [dB]
Distance jusqu'au $RSSI_{cutoff}$: $d_{(n=0)} = 95$ [m], $d_{(n=1)} = 30$ [m], $d_{(n=2)} = 9$ [m]

Les valeurs calculées pour d montrent que les puissances reçues tombent rapidement en deça du niveau de précision souhaitable (cf. section 2.4) pour des configurations avec plus de 2 murs traversés. La figure 7 synthétise les tendances d'affaiblissement en reprenant ces hypothèses. Ces tendances indiquent que :

22. Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes

23. Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente

- Le déploiement de nombreux AP sera nécessaire pour un fonctionnement *indoor* d'un WPS,
- Un WPS sera susceptible de fonctionner en *indoor* sous réserve de prendre en compte un fonctionnement différent du modèle en fonction du nombre de murs traversés.

Ce second point oblige l'introduction d'un concept associant distance et visibilité. Il s'agit du concept *LoS*²⁵ et *non-LoS*, illustré par la figure 8.

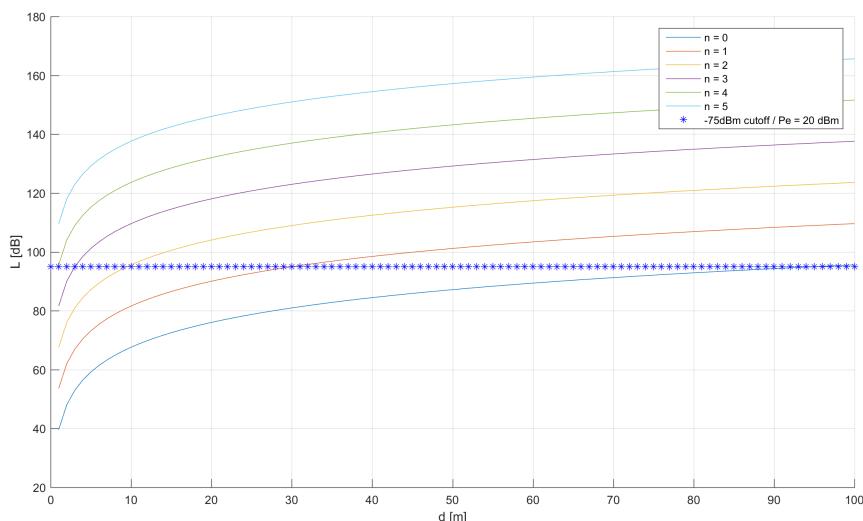


FIGURE 7 – Affaiblissement en fonction de la distance et du nombre n de murs traversés, en utilisant l'équation 3 ($f = 2.4e3$, $N = 28$, $L_f = 14$)

Cela nous amène à considérer les multitrajets (en Anglais : *multipath*), les réflexions multiples (*multibound*), et phénomènes d'évanouissement (*fading*) de signal associés...

L'influence de l'environnement pourrait être intégrée par des méthodes de *raytracing*²⁶, en adaptant le modèle de propagation à la localisation pronostiquée. [Nor13 ; Sab13] montrent qu'il s'agit de méthodes accessibles mais lourdes en puissance de calcul, et ne permettant donc pas d'aborder le sujet selon l'exigence de temps-réel. Il s'en dégage néanmoins les concepts de *fingerprint* et *radiomap* que nous retouverons dans des systèmes statiques²⁷ (cf. section 3.4).

25. Line of Sight : en visée directe

26. Technique du *lancé de rayon* permettant de simuler le cheminement d'ondes singulières et d'estimer les champs de puissance par combinaison linéaire

27. dont l'infrastructure de réseau Wifi est fixe, et dont les caractéristiques de propagation sont stables dans le temps par rapport à un bâtiment dont l'influence aura été

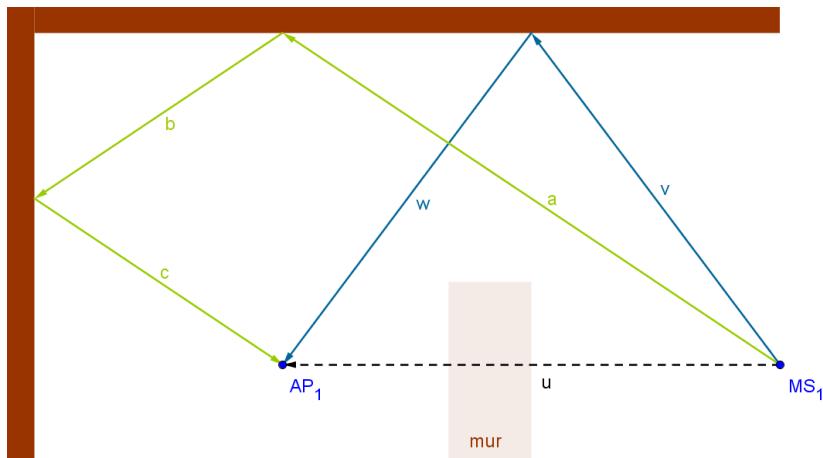


FIGURE 8 – Modèle géométrique *LoS* versus *non-LoS* : le chemin direct u ($AP_1 \rightarrow MS_1$) n'est pas possible du fait de la présence d'un mur. Les chemins indirects (v,w) et (a,b,c) existent mais présentent un affaiblissement et une distance perçue différente, notamment par rapport au trajet en chemin direct.

[ITU13] prend le contrepied de ce type d'approche systématique et cadre l'ensemble de ces phénomènes par une approche statistique. En termes de champ de puissance rayonnée, les évanouissements lents (*slow fading*) y sont distingués des rapides (*fast fading*). [ITU15] indique que le mouvement de personnes ou d'objets influence la mesure de puissance, mais avant tout dans les situations LoS ; le corps humain provoquant une perte de 6 à 8 dB sur la puissance reçue. Utilisée dans l'équation 3, cette valeur de *shadowing* induirait une erreur de 2 à 10 mètres (selon la distance à l'antenne tel que précisé en section 3.6) en retournant une distance au point de référence supérieure à la réalité. Toujours dans [ITU15], une étude statistique des mouvements de personnes indique que ces variations d'affaiblissement peuvent être considérées comme un *slow fading*, et peuvent même être négligées en situation non-LoS. Le modèle *Yaesu underground mall* qui y est présenté tente d'affiner l'équation de pathloss à l'aide de considérations statistiques sous forme de coefficients de peuplement, mais il n'est pas généralisable puisqu'il a été établit pour une géométrie spécifique de bâtiment. [DAB12] nous fait remarquer un phénomène d'évanouissement complémentaire indépendant des mouvements humains et lié au mouvement diurne. La variation apportée aux mesures n'est pas significative, mais le phénomène est identifié et explique la variabilité sur des périodes de 12 heures.

En alternative à l'affaiblissement comme marqueur de distance à travers
mesurée en phase de déploiement du réseau.

les *path loss models*, nous pouvons utiliser le temps via les *delay spread models*. Les phénomènes de propagation influencent les *delay spread models* car les trajets multiples modifient la réponse impulsionale du canal de transmission en étalant la durée du front d'onde. Or il faut pouvoir identifier ce dernier de façon univoque afin d'horodater précisément l'arrivée des paquets de données. [ITU13] étudie le phénomène et propose 2 modèles sans toutefois trancher en faveur ni de l'un ni de l'autre, ce choix étant laissé à la décision du concepteur de la solution :

- Modèle *impulse response* dans lequel le récepteur établit un profil temporel moyen pour la puissance reçue, puis déclenche la détection à partir d'un percentile sur l'évolution du signal instantanné,
- Par prise de décision sur l'instant correspondant à la moyenne quadratique de la période de cohérence (*delay spread*).

Le concepteur de WPS devra donc considérer l'approche algorithmique et statistique la plus intéressante pour faire ressortir cette information. Dans tous les cas, [ITU13] recommande de déterminer le temps le plus précisément possible car, selon l'équation 5 avec c la vitesse de la lumière, une imprécision d'une nano seconde correspond à une erreur en distance de 30 cm.

$$d_{err} = c \cdot t = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-9} = 0,3 \text{ [m]} \quad (5)$$

Toutefois, [MMS15] discute le *multibound* de façon théorique (à travers une approche géométrique), et démontre que la technique de ToA n'est pas viable après un rebond.

2.4 Sur la précision attendue

L'ensemble des applications relevées au cours de cette recherche montre des attendus d'ordres de grandeur variés. La table 3 synthétise les environnements dans lesquels un WPS est susceptible d'être déployé. La variété de taille entre chacun des cas y étant présenté oblige chaque système à avoir son propre cahier des charges en termes de précision. Selon [Wik16a], la surface minimale des pièces de logements doit être comprise entre $1m^2$ (toilettes) et $12m^2$ (pièce de vie). La moyenne constatée en 2006 dans [INS08] est de $22,75m^2$. Pour aborder un design de solution standard, il faut donc être capable d'adresser typiquement ce genre de surfaces.

Quitte à ne pas être toujours en capacité de déterminer précisément la localisation, il semble nécessaire de faire ressortir l'erreur dans le compte rendu fait à l'utilisateur. [Micd] introduit pour ce faire la notion de *bandes de précision* qui correspond à ce qu'il est convenu d'attendre de chaque technolo-

Présence	Position
Dans l'environnement de l'AP	Distance à l'AP
Dans une pièce	Dans une pièce
-	Dans un étage de bâtiment
-	Dans un immeuble
-	Dans une ville

TABLE 3 – Environnements et applications potentielles.

gie employée. Au niveau applicatif, l'API²⁸ Microsoft *Windows.Devices.Geolocation* propose d'utiliser les paramètres *desiredaccuracy* et *Geocoordinate.accuracy* pour faire ressortir les niveaux d'erreur vers les couches plus hautes du système (p.ex. : logiques de décision ; IHM²⁹).

On distinguera 2 types d'imprécision, la première influençant la seconde :

1. Sur les références géographiques des points de référence : on a ici l'influence du modèle géométrique utilisé pour représenter la Terre, et l'éventuelle erreur de précision apportée par l'opérateur renseignant les coordonnées dans les AP lors de la mise en place d'un WPS. [2015 ; Wik] discutent les divers modèles géométriques ; [Aki+09] explore l'importance de références exactes dans les WPS.
2. Sur la mesure : on touche ici divers sujets de conception questionnant, p.ex., le caractère non normalisé des mesures ; l'influence d'un éventuel contrôle de gain automatique ; la mesure par bande / par sous-porteuse / par sous-porteuses allouées ; le positionnement du point de mesure dans la chaîne de réception ; etc. Ces sujets sont discutés de façon plus ou moins détaillée sur l'ensemble des articles de recherche rencontrés.

Notons que, jusque-là, nous avons discuté de variabilité dûe à la propagation des signaux ; et donc de phénomènes physiques. [DAB12] rapporte que le matériel utilisé apporte de même une variabilité (jusqu'à 10 dB sur des mesures de RSSI), et classe cet apport en 3 origines :

1. par conception
2. par marque
3. par environnement

Nous pourrions utiliser le modèle de [Yan+15] qui va jusqu'à introduire une métrique de sensibilité des matériels à détecter un changement du milieu de type *amplitude* à partir des CSI. La difficulté toutefois de cette

28. Application Programming Interface

29. Interface Homme-Machine

approche est qu'elle est spécifique à chaque matériel, et contraindrait ainsi tout déploiement de système sous prétexte d'en maîtriser les performances.

Au delà des mesures, [Aki+09] montre que l'algorithme utilisé influence largement la précision à cause d'une implémentation trop légère liée à des considérations économiques et de ressource de puissance de calcul disponible. Ce dernier point peut toutefois être levé vu que les terminaux modernes (p.ex. iPhone) disposent de processeurs puissants.

2.5 Sur l'architecture système, la puissance de calcul, le temps-réel

La facilité de connexion à l'Internet apportée par le Wifi fait qu'un usage de LBS doit être perçu comme tout aussi évidente.

[Phi14] propose un découpage des architectures LBS en 2 grandes catégories :

User based : le terminal effectue les tâches de localisation, quitte à s'appuyer sur un serveur de calcul dans le réseau,

Network based : le réseau est à l'origine des informations de localisation.

Le concepteur de WPS se retrouve donc face à un choix technologique critique déterminant toute la suite de son projet. En résumé : la géolocalisation se fait-elle au niveau des AP ou de la MS ?

Dans le cas *Network based*, une première approche des exigences déduites pour un WPS voudrait que :

1. les AP disposent d'une information de géolocalisation les concernant, et pouvant être transmise,
2. les AP voisins se connaissent,
3. les AP disposent d'une ressource de calcul pour des calculs de géolocalisation,
4. les AP voisins échangent entre eux sur la mobilité des MS.

[PSL04] propose un protocole DHCP³⁰ enrichi permettant de répondre au premier point en utilisant un champ *GeoConf*. [IEE08] ouvre une dynamique sur les points 2 et 3, et cite [PSL04]. Mais il n'y a malheureusement pas d'approche standard en dehors de ces références, et les seules architectures *Network based* rencontrées lors de cette recherche bibliographique se retrouvent dans des solutions propriétaires (cf. section 3).

Dans le cas *User based*, la question soulevée précédemment repose sur le ressenti de l'utilisateur : doit-il charger sur son terminal une application

30. Dynamic Host Configuration Protocol

spécifique à chaque situation rencontrée, ou peut-il s'appuyer sur des architectures standardisées pour profiter des LBS ? [Gor+11] indique qu'il faut charger une application pour satisfaire la localisation au sein du bâtiment. Au passage il rapporte qu'il est nécessaire que la MS ne soit pas associée à un AP, car il n'y a plus d'écoute des autres AP à partir de ce moment là (ce comportement a été détaillé en section 2.2). Il préconise donc de charger une base de donnée dans la MS qui permettra à l'application de géolocaliser la MS par écoute passive. On se rend compte alors qu'aucune association n'est en place, et donc que l'utilisation du réseau n'est pas possible sauf à envisager des timers enchainant des phases associé/non-associé. [GAN11] insiste sur la difficulté de l'écoute passive car généralement *BeaconPeriod* = 100 [ms], on introduit donc de la complexité dans le code de la MS afin qu'elle change de canal d'écoute au moment où le signal de balise *est susceptible* d'arriver.

Cette complexité nous amène à 2 conséquences :

1. Sur la réactivité du système,
2. Sur la consommation énergétique.

Dans le cadre d'une étude comparative entre les solutions de géolocalisation WPS et de téléphonie mobile par Cell-ID, [Wil11] fait remarquer qu'une implémentation de l'algorithme de localisation dans le U-Plane (équivalent du *User based*) est moins performante en terme de temps de calcul car il passe par les couches hautes, mais moins cher qu'une implémentation dans le C-Plane (équivalent du *Network based*) car il ne nécessite pas de déployer du matériel spécifique. La démarche [Hal+11] va dans ce sens puisqu'il y est montré qu'une modification volontaire du microcode est nécessaire pour faire ressortir les CSI vers les couches applicatives plus hautes.

On retiendra donc en première approximation que les raffinements algorithmiques dégradent la capacité de temps-réel et nécessitent potentiellement l'ajout de composants (matériels et/ou logiciels).

[Micd] incite les développeurs à maîtriser cette complexité sous l'angle de la consommation énergétique. Le modèle de consommation présenté se décline en 3 composantes :

1. Utilisation du Wifi,
2. Complexité des algorithmes,
3. Approche multicapteurs pour améliorer la précision.

Les préconisations faites reposent sur :

- Mettre à jour les informations seulement quand l'application fournisant le LBS dispose du focus de l'utilisateur,
- Utiliser des événements, tel que *PositionChanged*, pour enclencher des calculs complexes et des mises à jour de l'affichage,

- Réduire la fréquence de mesure par les capteurs secondaires, voire regrouper les actualisations à l'aide d'un paramètre tel que *ReportTime*.

On remarquera que la conception d'un WPS oblige à adopter une approche transverse, dite *cross-layer*. Dans cet ordre d'idée, [GAN11] nous oblige à nous questionner sur les paramétrages standard au niveau système en indiquant que les délais de réponses d'AP sur des requêtes *Probe Request* sont variables (de 1 ms à 40 ms) ce qui joue sur la réactivité du processus de découverte des AP, et incidemment sur l'association des MS au réseau et la mise à jour des données de géolocalisation. Il y est proposé, à travers une étude sur la réactivité du handover reposant sur le processus d'association par découverte rapide des AP, d'adapter dynamiquement les paramètres *MinCT* et *MaxCT* afin de parcourir plus rapidement les canaux Wifi. Le gain moyen observé est une amélioration de 20% du nombre d'AP découverts en une phase d'analyse, tout en maintenant un délai court de découverte (434 ms pour 13 AP). On notera au passage que cette approche est consommatrice de ressource de calcul.

3 Solutions proposées

3.1 Vue d'ensemble des principes : démarche et types d'approches

Des grandes thématiques vues dans les sections précédentes, nous pouvons retenir une démarche de localisation en 4 étapes (cf. figure 9 et liste ci-dessous), applicable quelque soit le principe ou l'architecture technique utilisé :

1. Mesure multiple de distance,
2. Correction de la distance,
3. Calcul de position,
4. Mise à disposition de la position calculée.

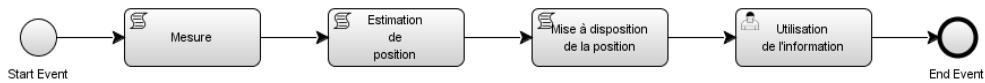


FIGURE 9 – Processus générique de détermination de la localisation

C'est au niveau des étapes 1 (mesure), 2 (correction) et 3 (calcul) que la précision souhaitée et les spécificités techniques des solutions de WPS orientent la conception. [Cis14] nous propose la classification suivante des systèmes :

Cell of origin (nearest cell) : par rapport à la cellule de puissance reçue la plus élevée, nous sommes dans une logique de présence dans une zone,

Distance (lateration) : par rapport à la distance à (au moins) 3 points, nous pouvons obtenir une localisation absolue,

Angle (angulation) : par triangulation, nous pouvons de même obtenir une localisation absolue,

Location patterning (pattern recognition) : par comparaison à une radiomap³¹, nous pouvons là aussi obtenir une localisation absolue.

Le principe **Cell of Origin** est facile à mettre en œuvre car il suffit de considérer la cellule de puissance reçue la plus élevée comme point de référence géographique. La localisation est déduite de l'information de localisation de l'antenne de la cellule : émise par la cellule elle-même, ou par

31. Référentiel de la signature des puissances radio reçues. Voir la section 3.4 pour plus de détails.

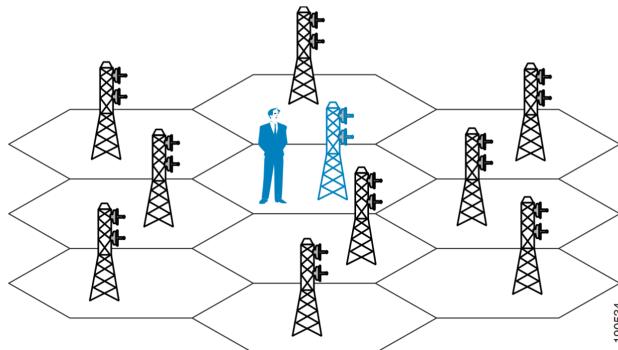


FIGURE 10 – Principe *Cell of origin* où l'utilisateur est localisé par appartenance à une zone en fonction de l'identifiant de la cellule dont il reçoit le maximum de puissance. Source : [Cis14]

comparaison de l'identifiant de la cellule à une base de données disposant des informations de position de chaque antenne. Le niveau de précision n'est toutefois pas intéressant pour toutes les applications car il n'y a pas d'estimation possible de position absolue. Il faudrait de même disposer d'un maillage régulier des cellules pour pouvoir préciser la localisation en se bornant à l'espace quotient de la cellule par rapport à l'ensemble des cellules. La figure 10 précise ce dernier point. Cette méthode ne sera pas approfondie ici du fait de ces imprécisions ; mais sera aisément considérée pour des applications de roaming, ainsi qu'en détection de présence.

Le principe **Distance** se compose des approches :

- Time of Arrival (ToA) : la distance est déduite du temps de vol d'un signal de référence horodaté selon une relation du type $distance = c \cdot (date_{reception} - date_{emission})$, avec c la vitesse de la lumière,
- Time Difference of Arrival (TDoA) : nous utiliserons les différences de temps d'arrivée aux AP (synchronisées entre elles) d'un signal de référence issu de la MS,
- Received Signal Strength (RSS) : la distance est estimée à partir de la puissance reçue via une loi de propagation, nous sommes dans la logique *path loss model* évoquée en section 2.3.

L'approche *ToA* fournit une mesure de distance qui sera utilisée dans un algorithme de trilateration pour le calcul de la localisation absolue (cf. section 3.2). Bien que maîtrisée mathématiquement (cf. [Pra+14]) cette approche subit quelques revers d'importance : elle nécessite des horloges de précision pour l'horodatage (l'équation 5 en page 19 nous rappelle l'importance d'un biais), et est sensible au nombre de réflexions du signal ([MMS15] déconseille son utilisation). Indépendamment de ces sources d'erreur, cette approche ne

sera pas étudiée en tant que telle dans ce document, mais le sera à travers l'équivalence temps-distance dans la section 3.2.

L'approche *TDoA* est proche de la ToA mais fonctionne dans le sens MS vers AP, avec un service de calcul de localisation dans le réseau. A la différence de la ToA, le temps est ici une mesure relative ; il faut alors employer une géométrie hyperbolique pour déterminer une position absolue. Cette approche ayant peu été documentée dans le cadre des WPS, nous ne l'aborderons qu'en principe (cf. section 3.3).

L'approche *RSS* suppose que la distance est proportionnelle à l'affaiblissement du signal. Relativement simple à mettre en œuvre, nous l'étudierons plus en détail dans la section 3.2.

Le cas **Angle** est un cas particulier de triangulation (*resection*, en Anglais) reposant sur l'utilisation d'antennes de réception directives pour déterminer l'azimuth des sources, et utilisant l'approche RSS pour déterminer la distance. [KMR09] fait une étude détaillée de cette technique pour un WPS en programmant la rotation d'une antenne ayant un gain de 15 dBi. Bien que l'étude montre la robustesse de cette approche, nous ne l'explorerons pas ici plus en détail du fait de son caractère anecdotique et des similitudes avec d'autres approches discutées.

Le cas **Location patterning** s'associe au cas *Distance*, et le raffine à l'aide de techniques mathématiques liées à une phase de calibrage (préalable à la mise en œuvre du WPS) en cherchant un vecteur de position correspondant au mieux à la signature radio perçue (cf. section 3.4). Les trois grandes catégories de techniques employées sont de type :

- Algorithmes déterministes : on cherche à minimiser la distance évaluée à l'aide de normes, au sens mathématique, telle que la distance Euclidienne,
- Algorithmes probabiliste : on considère que la position actuelle est fortement corrélée à la position précédemment estimée. On utilisera donc le principe de MAP³², et donc le fond théorique de l'inférence Bayésienne,
- Algorithmes de classification : afin de maîtriser la complexité d'analyse en utilisant les réseaux de neurones et SVM³³ selon un principe de minimisation du risque par espace quotient.

32. Maximum A Priori

33. Machines à Vecteur Support

3.2 Approche en *distance* : RSS et trilateration

L'approche RSS part du principe que la distance est proportionnelle à l'affaiblissement du signal. A l'aide des paramètres de la norme 802.11 vus en section 2.2, parmi lesquels l'indicateur clé *RSSI*, il est possible de localiser une STA par rapport à une autre STA sur un cercle de rayon r . La valeur de r est calculée par l'équation simplifiée 6, équation qui s'apparente à l'équation 3 (cf. p. 16) :

$$r \approx 10^{(P_{\text{emission}} - P_{\text{reception}})/20} \approx 10^{(\text{TransmitPowerUsed} - \text{RSSI})/20} \quad (6)$$

Vu en section 2.1 (p. 7), un minimum de 3 points de référence sont nécessaires. Il s'agit donc de résoudre le système d'équations suivant pour en tirer les coordonnées (x, y) du point d'intersection des 3 cercles représentatifs des distances aux points de référence $P1, P2, P3$:

$$\begin{aligned} (x - x_{P1})^2 + (y - y_{P1})^2 &= r_{P1}^2 \\ (x - x_{P2})^2 + (y - y_{P2})^2 &= r_{P2}^2 \\ (x - x_{P3})^2 + (y - y_{P3})^2 &= r_{P3}^2 \end{aligned}$$

La difficulté de l'approche RSS se divise ainsi en 2 parties :

1. Maîtriser l'influence de l'environnement sur l'évaluation de r (cf. les sections 2.3 et 2.4 décrivant ces facteurs d'influence),
2. Résoudre simplement le système d'équation précédent.

La résolution du système d'équation peut s'aborder par la méthode de *trilateration* (cf. [Wik]), décrite par la figure 11 pour un calcul en 2 dimensions, et consistant basiquement à projeter tour à tour le rayon d'un cercle sur le segment reliant les cercles opposés. La figure 12 illustre cette technique à partir d'un exemple fictif de WPS décrit en section A.5 (p. 52).

La trilateration est applicable en 3 dimensions : il s'agit de la *trilateration 3D*. Pour ce cas, [SM10] propose une réduction des besoins en ressource de calcul en effectuant une régression en 2D. La précision semble acceptable eu égard à la réduction des ressources nécessaires, et permet ainsi de faire porter l'algorithme par des terminaux dont la consommation énergétique est contrainte.

Parmis les techniques d'optimisation, [SQN09] propose une logique de réduction de l'espace de recherche en combinant trilateration et loi de Bayes. Un gain de 89% sur l'espace de recherche est mis en avant, ce qui permet de déterminer rapidement les points de référence à utiliser dans le calcul lorsqu'un grand nombre de ces points est découvert durant la phase de d'écoute

du réseau. Notons au passage que l'approche SVM³⁴ y est considérée, mais mise de côté car apparemment plus lente.

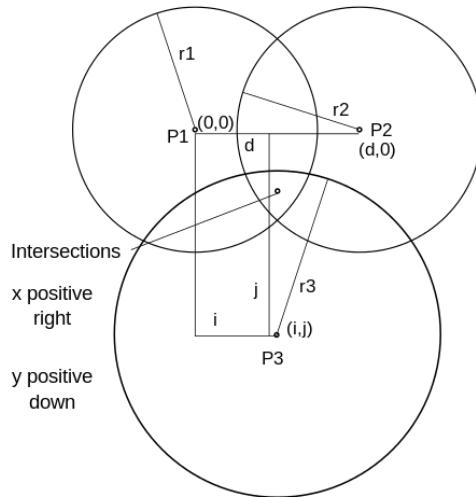


FIGURE 11 – Principe géométrique de la trilateration 2D. Source : [B J16]

[AR15] nous rappelle que la technique de trilateration, simple et efficace en apparence, est elle même source d'erreur en cas d'imprécision sur les distances ou de colinéarité des sources. La précision peut en être améliorée en ajoutant une fonction de probabilité de position des points de référence afin d'éviter d'utiliser des faux-positifs dans le calcul.

On repensera, par l'entremise de ces problèmes de précision, à l'utilisation de la notion de *bandes de précision* discutée en section 2.4. De même, dans le cas des modulations OFDM, on élaborera des stratégies d'analyse des réflexions de signal afin d'envisager ou non l'utilisation brute des valeurs de RSSI dans les calculs. Le RSSI est en effet l'équivalent d'une puissance composite ; or la réponse impulsionale du canal (*CIR*³⁵, en Anglais), correspondant aux multitrajets et réflexions, va influencer la mesure du RSSI et donnera un équivalent en distance erroné. Le processus FILA présenté dans [YZL14] tire parti des infos de CSI pour identifier de telles situations, et ainsi enclencher un ajustement en conséquence. L'essence de ce processus (synthétisé en figure 13) est d'utiliser les valeurs de CSI comme représentants de la réponse en fréquence du canal (*CFR*³⁶), et d'en déduire la réponse impulsionale. On notera, à travers l'étude [Xuy15], que ce processus extrêmement récursif est adaptable sur des techniques récentes de

34. Machine à Vecteur Support

35. Channel Impulse Response

36. Channel Frequency Response

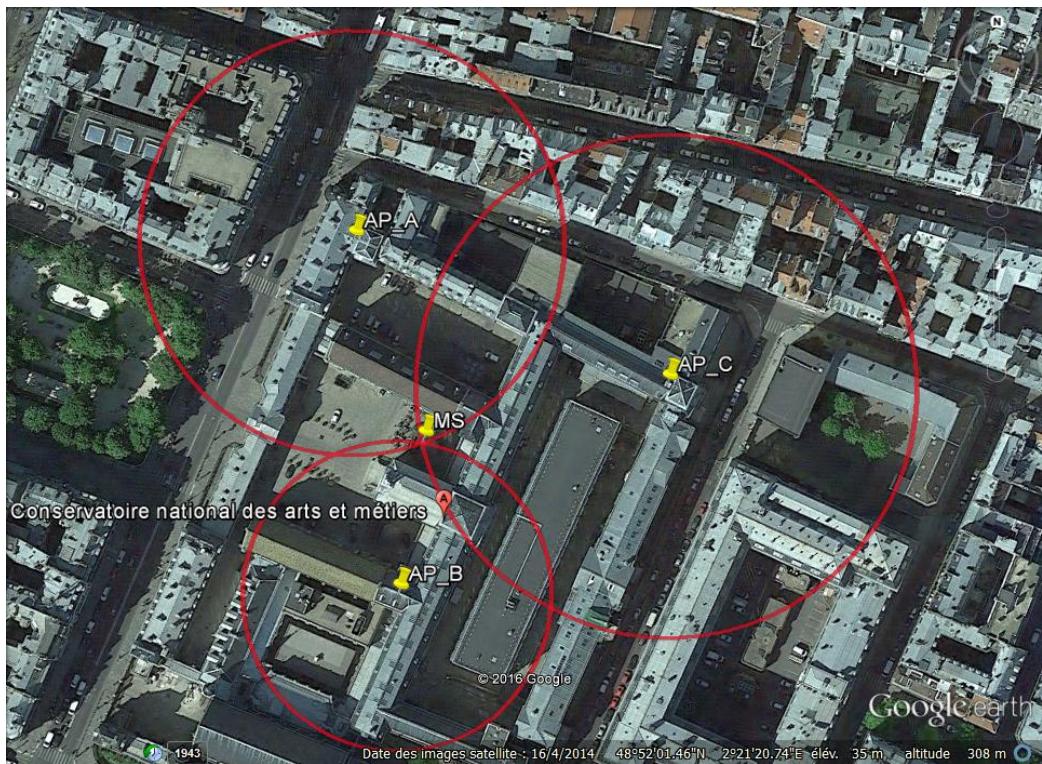


FIGURE 12 – Localisation d'une MS à partir de 3 AP par application de l'étude *etude_trilateration.m* sur une situation fictive au CNAM (cf. section A.5)

traitement de données telles que les réseaux de neurone. Alors que FILA annonce un système efficace avec une erreur moyenne de 1,8[m], l'alternative avec réseau de neurone promet une réduction de 20% de l'erreur moyenne (soit environ 1,4[m]).

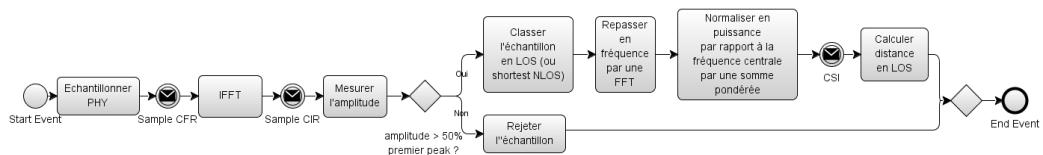


FIGURE 13 – Processus FILA d'ajustement de la mesure de puissance reçue en fonction de la réponse en fréquence du canal . A partir de [YZL14]

3.3 Approche en *temps* : TDoA et multilatération

En toute généralité, en partant de \vec{x} l'émetteur à localiser, avec une vitesse v de propagation des ondes, la distance séparant x d'un capteur p_i est fournie par l'équation 7, avec t la date d'émission du signal, et t_i la date de réception au capteur p_i :

$$|\vec{x} - \vec{p}_i| = v(t_i - t) \quad (7)$$

Or \vec{x} et t sont inconnues. Mais nous pouvons éventuellement utiliser le premier capteur d'un ensemble de capteurs comme référence temporelle. Les dates d'arrivée du signal aux autres capteurs nous permettent d'avoir une information de distance via l'équation 8, avec p_1 et p_2 , le premier et le second à recevoir le signal, respectivement :

$$|\vec{p}_2 - \vec{p}_1| = v(t_2 - t_1) \quad (8)$$

L'équation 8 constraint les positions possibles de x sur une hyperbole (cf. figure 14).

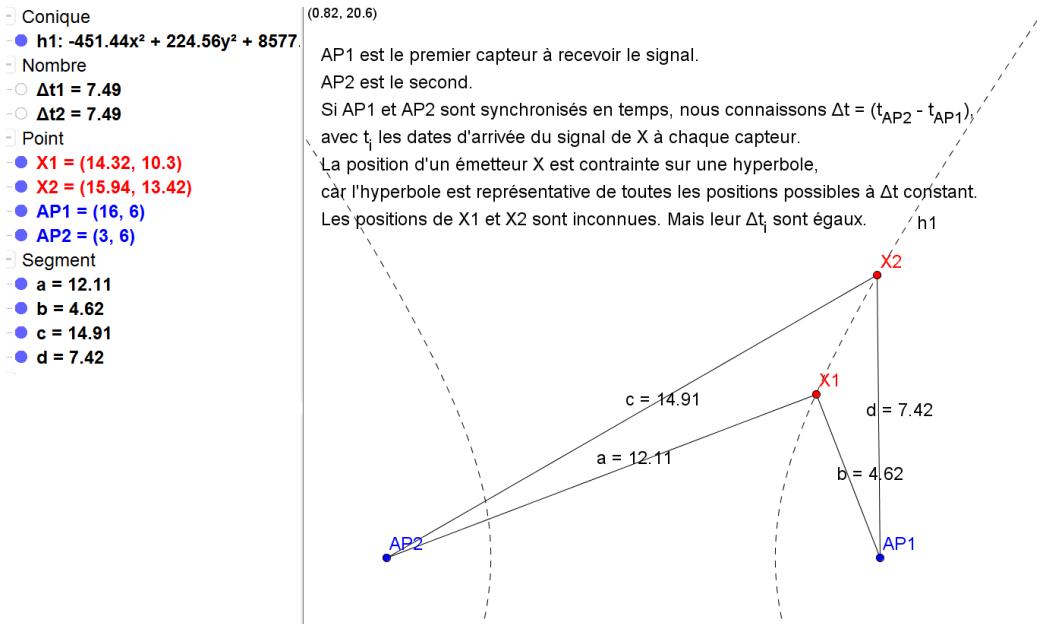


FIGURE 14 – Principe de contrainte d'une position d'émetteur sur une hyperbole en TDoA

Pour une localisation dans le plan (2 dimensions), il reste à composer un système de capteurs permettant d'obtenir au moins 3 hyperboles ; le point d'intersection des 3 hyperboles sera l'estimation de la localisation de l'émetteur. On parlera alors de 3 couples de capteurs, soit 4 capteurs au total.

Dans l'espace (3 dimensions), on utilisera l'intersection d'au moins 4 hyperboles. On parlera alors de *4 couples de capteurs*, soit 5 capteurs au total. La figure 15 donne l'explication géométrique dans le plan. Dans notre cas de WPS : les capteurs sont des AP ; l'émetteur sera une MS ; la vitesse v de propagation sera c , la vitesse de la lumière ; et la base de temps des AP sera fournie par une horloge GPS³⁷ ou une référence NTP³⁸.

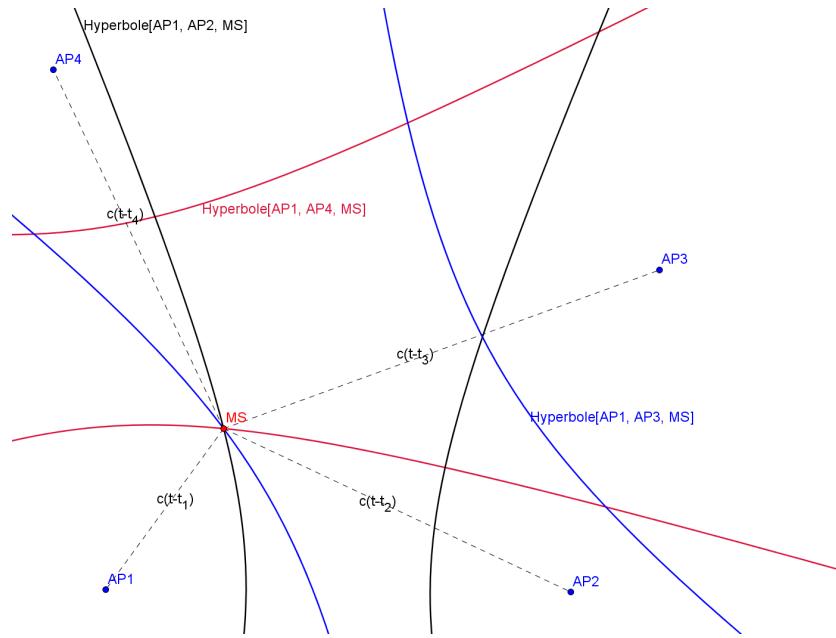


FIGURE 15 – Localisation d'une MS par la TDoA entre 3 couples d'AP. La localisation est le point de croisement des 3 hyperboles, au niveau de chaque feuillet le plus proche de l'AP ayant reçu le signal en premier (AP1 en l'occurrence).

Du point de vue mathématique, quelques difficultés sont à envisager pour le calcul de l'intersection des hyperboles. Travailler avec des hyperboles fait que le système d'équation à résoudre n'est pas linéaire. Dans le plan, utiliser 3 couples de capteurs est une façon de linéariser le problème. Nous pouvons ensuite résoudre le système d'équation à l'aide de la programmation linéaire et de la méthode des moindres carrés, tel que présenté dans [And12]. Mais considérer 3 couples oblige à une infrastructure réseau minimum que tout le monde n'est pas forcément prêt à déployer. De plus, la programmation linéaire est une méthode itérative qui, bien que facile à mettre en place, risque de consommer de la puissance de calcul là où l'autonomie

37. Global Positioning System

38. Network Time Protocol

COMPARISON OF MSE FOR THE SI, TAYLOR-SERIES AND PROPOSED METHODS; ARBITRARY ARRAY AND NEAR SOURCE								
MSE	M = 3	M = 4	M = 5	M = 6	M = 7	M = 8	M = 9	M = 10
A	no sol.	1.5768	0.1597	0.1480	0.1229	0.1164	0.1148	0.1103
B	2.1726	0.7061	0.1460	0.1341	0.1144	0.1057	0.1034	0.09462
C	2.1726	0.7282	0.1456	0.1359	0.1159	0.1077	0.1055	0.09697
D	2.1726	0.6986	0.1451	0.1337	0.1141	0.1055	0.1034	0.09480
E	1.9794	0.6884	0.1451	0.1334	0.1143	0.1054	0.1032	0.09432

A: SI method. B: Taylor series method. C: proposed method, l (14b), (22b), (24)]. D: proposed method, l (14b), (14a), (22a), (24)]. E: theoretical MSE of the new method = CRLB.

FIGURE 16 – Comparaison de l'erreur quadratique moyenne de divers algorithmes employés en TDoA, pour une disposition arbitraire des capteurs, et selon un nombre variable de capteurs. Source : [CH94].

énergétique est à prendre en compte. [CH94] indique que les dispositions linéaires des capteurs permettent globalement de simplifier la résolution de la localisation. Or, comme cela n'est pas toujours possible (disposition arbitraire des AP), les modèles mathématiques doivent être polyvalent. Toujours dans [CH94], sont référencés diverses approches plus ou moins complexes, plus ou moins souples, pour résoudre ce système. Une approche itérative, utilisant le développement de Taylor, et convergeant progressivement par la méthode des moindres carrés locaux y est évoquée. Mais l'estimation d'un locus permettant d'initier la convergence est mentionnée comme difficile, en plus d'autres inconvénients tels que : convergence pas toujours garantie ; complexité importante du calcul au sens informatique du terme. [CH94] propose d'introduire une variable intermédiaire pour linéariser le système d'équations avant d'employer la méthode des moindres carrés pour estimer la position en une seule passe de calculs. Cette méthode offre une précision accrue (cf. figure 16) eu égard à l'erreur quadratique moyenne observée par rapport à d'autres algorithmes, ainsi que par rapport à la complexité du calcul.

Bien que la TDoA soit une technique étudiée et maîtrisée depuis 1935 (cf. [Pau86], par. 4.3), je n'ai pas trouvé de référence directe de travaux pour des applications en WPS. La TDoA est référencée dans les domaines des réseaux de capteurs, des sonars, et des radars. Cette absence en WPS pourrait être attribuée au fait que le Wifi possède nativement des primitives informatique permettant l'étude des distances par RSS. La facilité mène ainsi à l'utilisation de ce qui est déjà en place plutôt qu'à la création d'une surcouche applicative. Un autre point de vue pourrait être que la TDoA n'est possible que du côté des AP. C'est donc une solution de type *network based* qui implique une mise à jour et une standardisation des AP, ce qui en soi est un frein économique à sa généralisation.

On retiendra de la TDoA :

- Le besoin d'un nombre minimum de capteurs (3),

- La nécessité d'une base de temps commune aux capteurs,
- Une estimation de localisation absolue,
- Une solution de type *network based*,
- Un domaine à explorer pour le WPS.

3.4 Approche par comparaison de *pattern* : fingerprint

Supposons un instant que nous ayons en notre possession :

- Un ensemble fixe d'AP dont nous connaissons les coordonnées et les caractéristiques,
- La carte des valeurs de RSSI en tout point d'un bâtiment pour ces AP.

De même, supposons que le n-uplet formé par ces valeurs en chaque point de l'espace soit *unique* et *stable*. Alors nous pouvons déduire les coordonnées de géolocalisation d'une MS à partir des RSSI relevés par cette MS.

Le démarche correspondrait donc à :

1. Calibrer le système en établissant une *radiomap*³⁹, à l'aide d'un robot ou d'un humain dans une démarche systématique,
2. Mettre à disposition un système informatique assurant la collecte des RSSI relevés par les MS, ainsi que la comparaison de ces valeurs à une base de données.

Etablir la radiomap et collecter les RSSI équivalent à la création d'un *location vector* pour chaque position ; (x, y) représente les coordonnées, r la moyenne du RSSI pour chaque AP en ce point :

$$(x, y) = (r_{AP1}, r_{AP2}, r_{AP3}, r_{AP4}) \quad (9)$$

En relation à la figure 17 (p. 34), *enregistrer ou relever* un vecteur de RSSI $(-49, -45, -58, -57)$ correspond aux coordonnées $(7, 6)$. C'est la *signature* (*fingerprint*, en Anglais) de cette position.

[Cis14] propose l'architecture réseau de la figure 18 (p. 35) dans laquelle les étapes de requête des RSSI et de comparaison à la base de données sont piloté côté réseau. Le modèle ressemble à une situation *network based*, mais la mesure de RSSI reste bien au niveau des MS. La spécificité de l'architecture est que la performance de l'ensemble est maîtrisée par l'utilisation de contrôleurs de réseau assurant eux-mêmes la collecte des *location vector* par rapport aux AP sous-jacents (un exemple détaillé de rapport de collecte est disponible en figure 28, p. 48).

39. cartographie des puissances radio

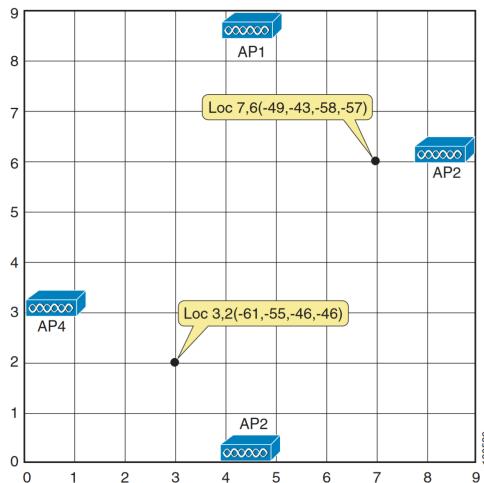


FIGURE 17 – Principe du fingerprinting et de l'étape de calibration pour 2 MS rapportant un vecteur de RSSI pour 4 AP. Source : [Cis14]

Au delà de la performance, il reste à maîtriser les aléas probables sur le signal mentionnés dans les sections précédentes ; ces aléas remettant en cause les hypothèses d'unicité et de stabilité évoquées ci-avant. Nous entrons alors dans les raffinements possibles de l'approche par comparaison de *pattern*, l'objectif étant de minimiser l'erreur de localisation tout en restant efficient. Parmis les solutions :

- Gérer l'influence du CFR sur les valeurs de RSSI (discuté en section 3.2) en utilisant un *location vector* composé des CSI de chaque AP,
- Evaluer la pertinence d'une variation de RSSI à l'aide d'un algorithme discriminant les variations dues aux réflexions par rapport aux variations dues au mouvement de la MS (cf. figure 29, p. 49),
- Amortir les variations de position affichée (cf. figure 31, p. 49),
- Indiquer un niveau de confiance sur les estimées de position (cf. figure 30, p. 49),
- Utiliser un modèle comportemental pour invalider des déplacements aberrants, en utilisant p. ex. un modèle en logique floue (cf. [Alv+10]).

L'architecture logique comprenant la base fonctionnelle pour la comparaison de pattern, ainsi que les mécanismes de correction, peut se résumer par le schéma présenté en figure 19.

On retiendra, comme inconvénients pour cette approche :

- La lourdeur de la démarche à la mise en place du fait de l'étape de calibrage,
- La rigidité du principe car il faut mettre à jour la radiomap à chaque modification de la topologie Wifi du site.

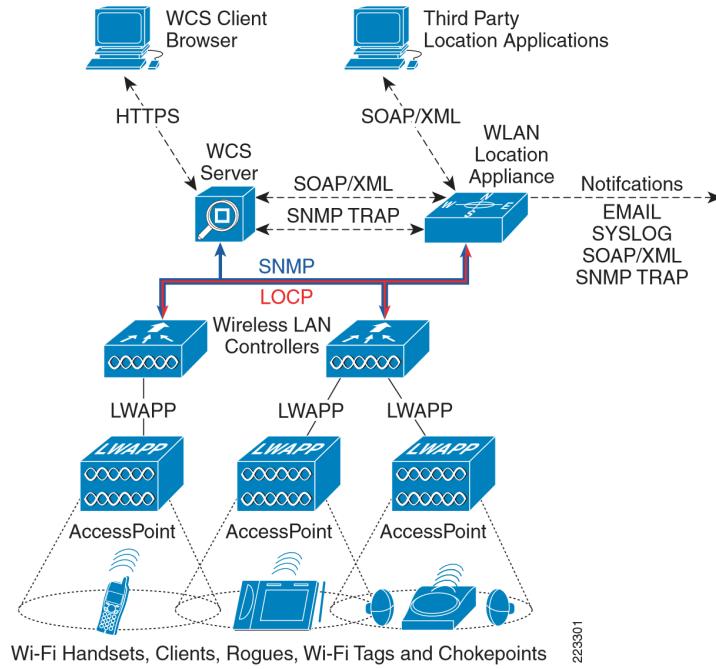


FIGURE 18 – Architecture réseau proposée par CISCO pour un WPS par comparaison de *pattern*. Source : [Cis14]

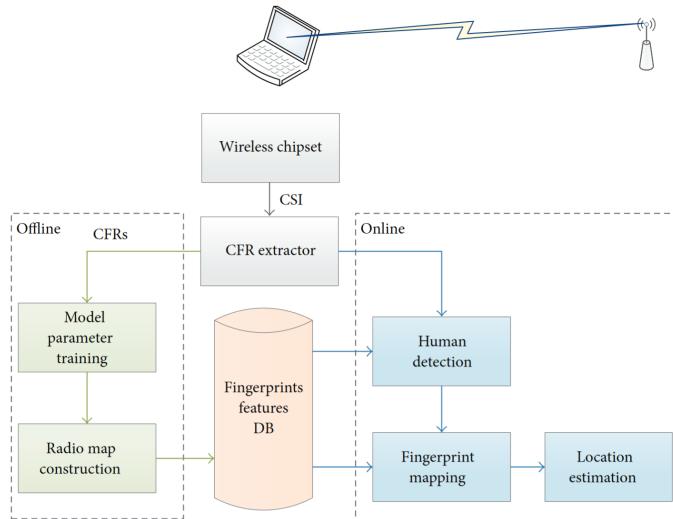


FIGURE 19 – Architecture logique pour la localisation par fingerprint. Source : [Yan+15]

3.5 Approche *hybride* : dead-reckoning et map-matching

Le DR⁴⁰ est une technique de localisation reposant sur la connaissance d'une position absolue récente, et de données de cinématique de l'objet mobile à localiser. Elle ne viendra pas se substituer aux autres approches vues précédemment, mais les complètera. De façon générale, d'une localisation initiale \vec{x}_0 connue à un instant t_0 , une position intermédiaire à l'instant t_1 peut être estimée à partir de la distance D parcourue à la vitesse v durant l'intervalle de temps avec la relation $D = v \cdot (t_1 - t_0)$ et une information d'azimuth Az . Les données élémentaires nécessaires peuvent donc se résumer par le n-uplet :

$$(\vec{x}_0, Az, v, \Delta t) \quad (10)$$

La figure 20 synthétise l'approche DR.

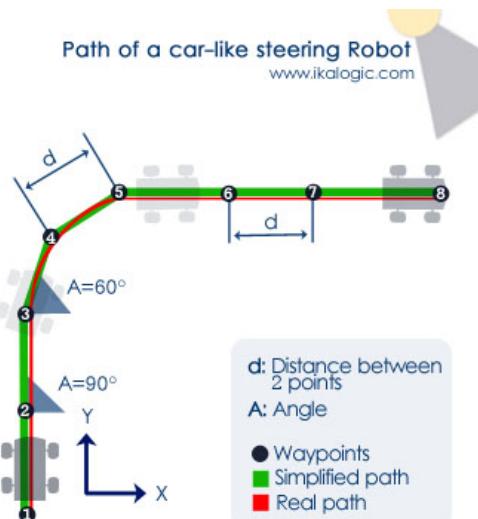


FIGURE 20 – Principe du *dead-reckoning* pour un robot mobile : les positions aux points d'étape 2 à 8 sont déduites de la position au point 1 en utilisant les distances d parcourues et les rotations d'angles A effectuées. Source : [ika08]

La question de l'intérêt de cette approche peut se poser : pourquoi utiliser une estimation alors que les approches en *distance* et en *temps* fonctionnent déjà pour le WPS ? L'idée est d'utiliser le DR pour localiser le mobile dans les situations intermédiaires où il y a :

- Perte complète de signal de référence (il n'y a plus aucun émetteur pour fournir les données de localisation),

40. Dead-Reckoning, ou *navigation à l'estime*.

- Perte partielle de signal de référence (il n'y a plus suffisamment d'émetteurs pour utiliser la trilateration ou la multilateration),
- Données de référence incohérentes (p. ex. : les multitrajets induisent des données de localisation incohérentes avec ce qu'il est possible d'imaginer),
- Besoin de réduire la consommation énergétique (on substitue temporairement les données des capteurs de cinématique à l'analyse du réseau Wifi),
- Latence excessive de réponse du calculateur de localisation (qu'il soit embarqué, ou côté réseau tel qu'évoqué dans [Yah01]),
- Indisponibilité temporaire des informations de RSSI du fait d'une STA monoradio ou d'une durée de découverte supérieure au taux d'actualisation attendu pour la localisation (cf. les limites du processus d'attachement en section 2.2).

C'est à l'aide des capteurs embarqués que les données de cinématique sont collectées. [Mica] propose une liste des capteurs traditionnellement présents dans les smartphones modernes. Nous retiendrons globalement les capteurs suivants :

- Accéléromètre : vitesse,
- Magnétomètre : azimuth,
- Compte-tour sur les roues d'un robot : distance.

[Gor+11] rapporte, en conclusion du compte-rendu d'étude pour le système iDOCENT, que la précision d'iDOCENT pourrait être améliorée en le complétant avec des routines informatique utilisant le DR. Le sujet de la *précision* est le sujet prédominant dans la mise en œuvre du DR car l'erreur est cumulative avec le temps. La figure 21 précise l'effet de cette erreur connue sous le nom de *fix expansion*. Diverses idées peuvent être mises en place afin de maîtriser cette expansion :

- Fixer la période d'analyse Wifi en deça de la durée induisant une erreur inacceptable (proposition reprise dans [Jeo+14]),
- Utiliser des marqueurs d'étape (cf. infra : utilisation des tags RFID et QRcode),
- Contraindre les estimées par une carte géographique du site (technique de *map-matching* et concept de *GeoFence*⁴¹).

Les données de localisation initiales et intermédiaires peuvent être complétées par des tags RFID⁴² ou QRcode⁴³ tel que présenté dans [SCM10]. Cette

41. Selon [Micb] : terme désignant une barrière géographique virtuelle qui permet de fournir à la couche applicative de plus haut niveau une information du type *objet mobile hors des limites géographique permises*.

42. Radio Frequency IDentification, ou *radio-identification*.

43. Code barre à 2 dimensions ; cf. ISO/CEI 18004.

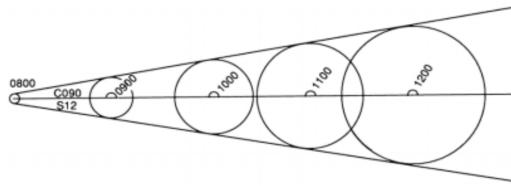


FIGURE 21 – Principe du *fix expansion* : cercles de position probable après une course de 100 ; 200 ; 300 ; 400 nautiques, pour un navire avançant à la vitesse 12 noeuds. Source : [Nat95]

méthode purement passive est fournie en exemple car elle précise le principe sur un smartphone moderne pour les étapes intermédiaires de localisation par l'estime. Mais elle ne sera retenue que pour le principe car elle n'utilise pas de captation de signal Wifi pour les points de localisation.

Nous utiliserons plutôt des techniques d'intégration de données multiples selon le modèle présenté dans [krakiwsky1988] et [Jeo+14] : l'information de localisation issue du WPS mettra à jour les données issues du DR et du map-matching à l'aide d'un filtre de Kalman qui lissera les données de localisation. Le *map-matching* consiste fondamentalement à faire coller un *fix*⁴⁴ avec un graphe représentatif de l'environnement géographique (cf. figure 22).

[krakiwsky1988] indique que ce type d'implémentation permet globalement de maintenir l'erreur de localisation dans une enveloppe de 1σ dans le cas d'un système *GPS + DR + map-matching* utilisé en navigation automobile. [Jeo+14] rapporte un gain de 50% en précision pour un système *RSSI + PDR*⁴⁵ + *map-matching* par rapport à une implémentation en RSSI seule qui n'offrirait, sinon, qu'une précision de 8 mètres due aux fluctuations de RSSI.

Le cas des WPS-PDR est particulièrement intéressante du fait des particularités des déplacements pédestres. Le PDR oblige à implémenter un *moteur de routage* pour gérer les déplacements non-linéaires et les activités de l'utilisateur du terminal mobile : un PDR doit prendre en compte les changements rapides d'orientation (bifurcation dans un couloir) et le contexte (les mesures d'accélération seront différentes selon que l'utilisateur porte son smartphone à l'oreille pour téléphoner, ou le cas où il suit les instructions de son écran). De façon générale, le moteur de routage maintient la cohérence du positionnement à l'aide d'un modèle de *cheminement le plus probable*. [Jeo+14] associe ainsi pleinement le fonctionnement du PDR au

44. Point de coordonnées de localisation.

45. Pedestrian Dead-Reckoning, ou *estime en contexte de déplacement pédestre*.

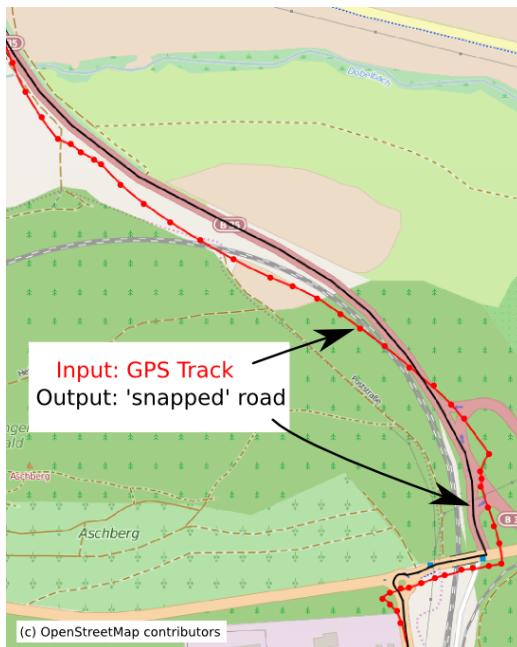


FIGURE 22 – Principe du *map-matching*. Les coordonnées estimées à partir des données issues du système GPS sont mise en correspondance avec la description d'une route. Source : [kar00]

map-matching pour maîtriser les estimées par rapport au contexte topologique ; la figure 23 (p. 40) précise l'articulation des blocs fonctionnels d'un tel système.

On voit alors à quel point l'introduction du map-matching devient important à cause :

- Des fluctuations du RSSI induisant une erreur de localisation,
- De la précision court-terme du DR,
- D'un besoin de connaissance du contexte topologique.

Les approches hybrides seront donc souvent associées à un GIS⁴⁶ pour intégrer les informations de topologie dans leur modèle. [PT06] utilise une carte de bâtiment pour mettre une contrainte de dimension sur l'algorithme de localisation. La précision de l'estimation est ainsi améliorée de 50% par rapport à un système en RSSI seul, et permet d'atteindre une précision moyenne de 5 mètres.

De façon générale, les GIS utiliseront une carte chargée en mémoire au démarrage du système ou feront des mises à jour dynamiques en s'appuyant sur le réseau. Dans le cas des mises à jour via le réseau, l'utilisation d'API est

46. Geographical Information System

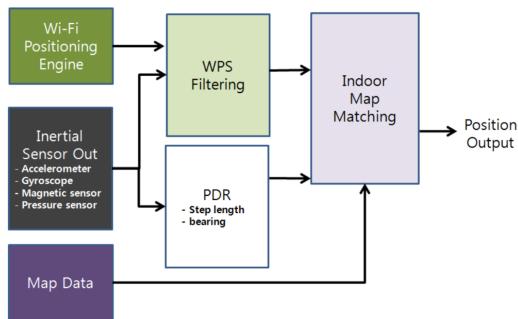


FIGURE 23 – Blocs fonctionnels pour un système *WPS-PDR*. Source : [Jeo+14]

souvent proposée (p. ex. : [Goob ; kar00]) ; l'ampleur du travail de collecte et maintien des cartes jouant en faveur de la standardisation et de l'accès aux données sous forme d'offres de services. On notera divers niveaux d'offres, en partant de la simple mise à disposition d'un fond de plan (cf. [Goob]), jusqu'à l'externalisation complète du calcul de localisation (cf. [Gooa]).

3.6 Eléments d'architecture réseau et système

Afin de fournir le service de WPS, les éléments nécessaires sont :

- AP (3 ou plus),
- MS (1),
- Calculateur (1),
- GIS (1),
- Applicatif de gestion des échanges et présentation de l'information (1),
- Réseau d'échange (Wifi, et filaire dans certains cas).

La stratégie *user-based* ou *network-based* abordée en section 2.5 détermine le sens et les porteurs des flux d'information.

Dans le cas *user-based* :

- La MS est le capteur des informations de temps ou de distance,
- Le calculateur peut être embarqué dans la MS, voire dans le réseau,
- Le GIS est dans la MS, voire dans le réseau,
- Le réseau d'échange n'est pas nécessaire si le calculateur et le GIS sont dans la MS. On utilisera, sinon, la liaison Wifi entre la MS et le réseau pour joindre le calculateur et le GIS.

Dans le cas *network-based* :

- Les AP sont les capteurs des informations de temps ou de distance,
- Le calculateur est dans le réseau,
- Le GIS est dans le réseau,

- Le réseau d'échange est nécessaire entre les AP et le calculateur, ainsi qu'entre la MS et le calculateur et le GIS.

Un certain nombre de spécificités technologiques par approche ont été discutées en section 3.1 et suivantes. Notons quelques tendances clés pour chaque approche...

L'approche *RSS* peut être *network-based* comme *user-based*, avec une prédominance⁴⁷ des architectures *user-based* pour :

- La facilité de déploiement du concept en ce qui concerne la mesure et l'algorithme de calcul,
- L'indépendance du GIS par rapport au réseau dès lors que la MS se détache d'un AP pour analyser les bandes Wifi.

En *ToA* et *TDoA*, nous verrons avant tout le principe *network-based* du fait :

- D'un besoin de synchronisation précise en temps des récepteurs,
- L'impossibilité d'effectuer une mesure simultanée de plusieurs sources dans le sens AP vers MS.

L'approche *pattern recognition* force vers le principe *network-based* pour des considérations de :

- Puissance de calcul nécessaire, plus intensif et donc mieux géré par un calculateur dédié dans le réseau,
- Maitrise de la performance du système par un étalonnage périodique, plus efficace lorsqu'il mené de façon centralisée.

Au niveau *applicatif*, le modèle adopté est un modèle en couches :

1. Calcul,
2. Interprétation,
3. Présentation et traitements spécifiques.

Nous avons abordé divers blocs fonctionnels propres au calculateur dans la section 3.5. Il n'est pas évident de distinguer nettement les parties *calcul* et *interprétation* dans les schémas bloc proposés par les divers auteurs. Nous pouvons toutefois retenir de [Micd] un élément de distinction entre les couches 1 et 2 : la métrique *geolocaccuracy* permet de vérifier que les données retournées par la couche calcul sont en conformité avec les attentes de la couche interprétation, et de gérer les cas où il y a écart. La couche 3 tirera parti du fonctionnement des couches inférieures en mode client-serveur selon un processus tel que présenté en figure 24 (p. 42).

Cette couche de plus haut niveau, généralement exécuté par le terminal mobile, gèrera :

- La présentation des informations de localisation à l'utilisateur,

47. comme en témoigne de nombreux articles tels que [Gor+11]

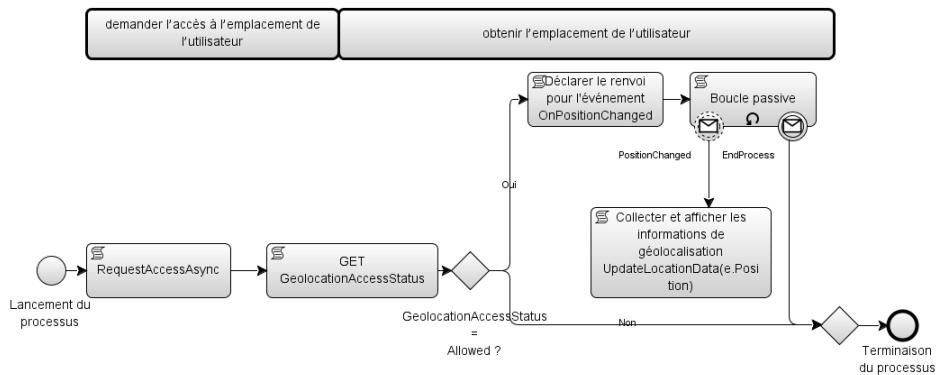


FIGURE 24 – Processus générique, côté terminal mobile, pour obtenir l'emplacement de l'utilisateur. A partir de : [Micc].

- Le traitement spécifique lié à des alertes et besoins définis par l'utilisateur.

En complément des considérations de flux de données et d'algorithmes, [Cis14] recommande d'inclure une réflexion sur les AP dans la conception des systèmes WPS reposant sur une approche *RSS* ...

Les AP sont classiquement disposés de façon à maximiser le débit et la couverture du Wifi, notamment au centre des bureaux pour distribuer le signal à un maximum d'utilisateurs. Mais pour un système Wifi *location-ready*⁴⁸ il faut compléter ou adapter l'installation en plaçant des AP aux coins de la zone à couvrir de façon à délimiter le champ de localisation⁴⁹. La figure 25 résume cette recommandation qui permet de maîtriser la précision du WPS : [Cis14] rapporte une dégradation d'environ 10% de la précision pour une MS à localiser dans un rayon de 6 mètres hors de cet espace.

L'écartement inter-AP est une autre facette du sujet car un compromis entre les situations de *haut débit à courte distance* versus *large couverture en écartant les AP* versus *précision du WPS* entre en jeu. À grande distance des AP, la mesure de variation de distance d'une MS sera moins sensible à cause du phénomène d'atténuation non linéaire de la puissance (cf. équation 3 et figure 7). À l'opposé, des AP rapprochés apporteront des ambiguïtés de position à courte distance lorsque les diagrammes de rayonnement combinés induiront des champs de RSS semblables. [Cis14] préconise un écartement inter-AP de l'ordre de 20 mètres en environnement de bureau afin de maîtriser ces problématiques de précision tout en maintenant un débit de réseau

48. Expression signifiant que le système dispose, par conception, des caractéristiques adéquates qui permettront de fournir un service de localisation.

49. L'espace de recherche est dit *convexe* (ou *convexe-hull*, en Anglais)

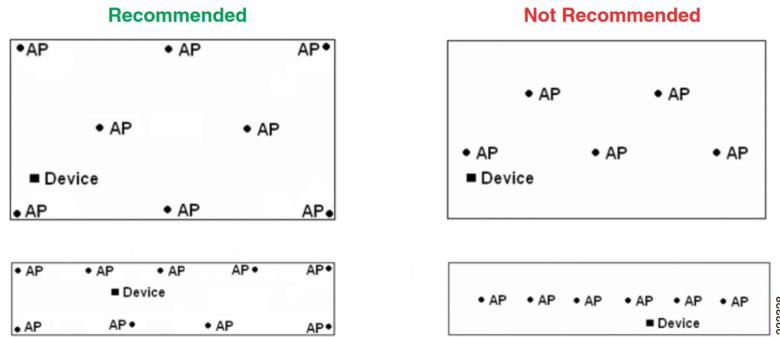


FIGURE 25 – Recommandation de placement des AP au sein d'un bâtiment.
Source : [Cis14]

satisfaisant pour des applications de transmission de données.

4 Analyse et conclusions

Le parcours de l'ensemble des solutions indique que les WPS sont dans une phase de jeune maturité. Concernant le choix de la technique à employer, il semble que le concepteur ou le chargé de déploiement d'un WPS pourrait se trouver dans l'indécision tant il n'y a pas de critère de performance différenciant nettement une solution ou une autre. Pour ajouter à la confusion, l'étude de l'état de l'art rapporte une diversité de solutions plus ou moins liées. En détaillant [YZL14], nous pouvons déduire la filiation entre les solutions (cf. figure 32, p. 50) et relever que les choix technologiques se font très tôt dans la phase de conception, le reste étant raffinement sur les performances en précision et en temps de calcul.

Les personnes intéressées par le sujet trouveront sur le Web une littérature abondante qui leur permettra de s'orienter et d'approfondir selon les thématiques :

- Généralités et applications,
- Propagation et modèles de propagation,
- Algorithmique,
- Design et maîtrise du design,
- Etat de l'art et tendances de recherche.

Sans aborder les questions de coût, nous pouvons retenir que :

- La résolution temporelle est déterminée par l'application en couche la plus haute,
- Le RSSI est nativement présent dans la norme 802.11 et permet d'obtenir simplement un WPS (en plus d'être conceptuellement l'approche la plus abordable),
- Toute solution nécessite l'utilisation de logiques complémentaires pour sécuriser l'information de position,
- Toute solution présente des conditions d'utilisation qui orientent les applications possibles.

La figure 26 synthétise les performances actuelles en termes de précision et de conditions d'usages. La précision moyenne de 4 mètres qu'on en calcule indique que nous sommes dans le niveau d'exigence présenté en section 2.4 (p. 19).

Du point de vue de la recherche, l'ensemble des démarches de R&D se rejoignent sur la méthode : mesure→modèle→implémentation→recherche de performance→proposition d'indicateur(s)→proposition d'application(s). De nombreux domaines d'expertise s'y expriment tant le sujet est riche en connexités : Internet of Everything ; réseaux de capteurs ; réseaux MESH ; routage ; transmission et protocoles ; électronique ; traitement de signal ; algorithmique ; optimisation ; géométrie et matériaux.

A travers [Vah+13], on se rend compte que les technologies du *big data*

Table 2 Wi-Fi positioning system analysis. A stands for accuracy, ST for setup time, R for positioning rate, D for dynamicity, T for measurements by terminal and AP for measurement by AP

Designation	Accuracy (m)	Advantages	Drawbacks	Measurements
RADAR [5]	2 to 3 m	A	$\overline{ST}, \overline{D}$	AP
PNM [22]	5% total distance	A	Cumulative error, dedicated, cost	n/a
IN [15]	3 m	R, D	\overline{A}	AP
HORUS [34]	2.5 m	A, few calculation	$\overline{D}, \overline{ST}$	T
CMU-PM [29]	1.52 m	A	$\overline{D}, \overline{ST}$	T
CMU-TMI [29]	4 to 5 m	A, continuous	$\overline{D}, \overline{ST}$	T
Fingerprinting [3]	1.78 m	A	$\overline{ST}, \overline{D}$	T
Ekahau [27]	2.76 to 5.37 m	A	$\overline{D}, \overline{ST}$	T
GPS [31]	5 m (outdoor)	Standard, A, ST	Dedicated, outdoors	n/a
SNAP-WPS [33]	1 to 3 m	R, A	$\overline{D}, \overline{ST}$	T
FBCM (cf. 3.1)	15.86 m	ST, D	\overline{A}	T
FRBHM (cf. 3.3)	1.07 m	A, ST, D	Requires (few) data	T/AP
UWB [24]	0.3 m (by simulation)	A, ST	\overline{D} , coverage	T

FIGURE 26 – Méthodes, précision, et contraintes pour divers WPS. Source : [Las+09]

et de *machine learning* prennent du sens pour les volumes de données que peuvent devoir gérer les approches par *comparaison de pattern* et par *map-matching*. L'étude semble dire que la précision n'en est pas forcément améliorée, mais que le processus global gagne en rapidité d'exécution. C'est confirmé par [SQN09] où les auteurs proposent une logique de réduction de l'espace de recherche à partir de la trilateration et de la loi de Bayes (un gain de 89% de temps d'analyse de l'espace de recherche est mis en avant). L'approche SVM est considérée mais mise de côté car apparemment plus lente.

Le manque d'homogénéité entre toutes les approches (présentées dans cette synthèse bibliographique) forme un frein à la standardisation nécessaire à la banalisation des WPS. L'amélioration de la précision des WPS semble atteindre ses limites. Mais le *machine learning* et ses affiliés semblent pouvoir jouer le rôle d'arbitre face à cette diversité, et ainsi encenser un nouveau cycle d'amélioration des performances. Le domaine des applications s'en trouverait pérennisé en levant les réserves faites sur les fausses indications de localisation et les conséquences économiques ou vitales associées. Certains points liés aux applications devront être abordé avec sagesse dans cette phase de croissance, car le sujet des LBS peut déranger selon d'autres points de vue tels que la protection de la vie privée (voir [Wan+14] pour exemple d'application négative dans ce domaine).

A Annexes

A.1 Tables complémentaires

Type	Gain
Isotrope	0 dBi
Colinéaire	7 à 15 dBi
Directionnelles	selon

TABLE 4 – Gain d'antenne selon le type. Source : [Wik16b]

f	Residential	Office
2,4 GHz	28	30

TABLE 5 – Coefficients de perte de puissance selon l'environnement. Source : [ITU15]

A.2 Figures complémentaires

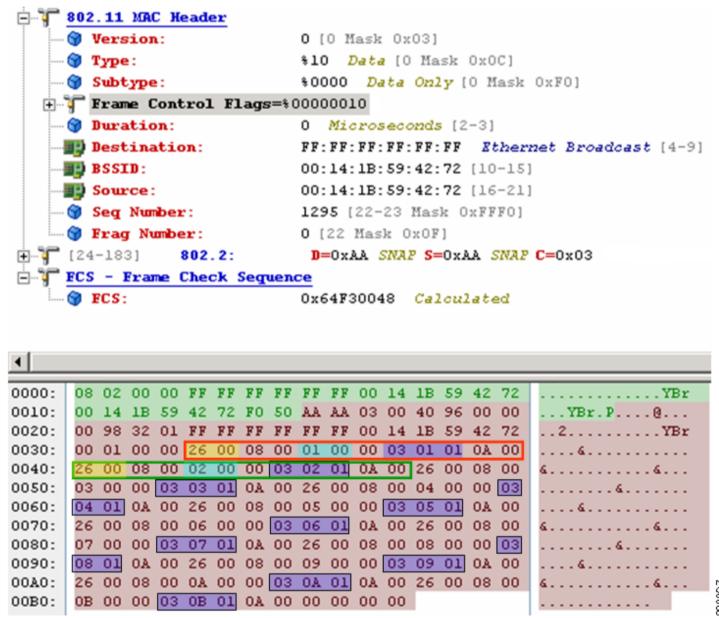


FIGURE 27 – Analyse de trame 802.11 Radio Measurement Request Element avec Beacon Request pour scan actif sur le canal 1. Source : [Cis14]

```
(Cisco Controller) >show client detail 00:07:50:d5:e4:77
Client MAC Address..... 00:07:50:d5:e4:77
Client Username .. N/A
AP MAC Address..... 00:14:1b:59:41:f0
Client State..... Associated
Wireless LAN Id..... 1
BSSID..... 00:14:1b:59:41:f0
Channel..... 1
IP Address..... 10.1.67.252
Association Id..... 1
Authentication Algorithm..... Open System
Reason Code..... 0
Status Code..... 0
Session Timeout..... 0
Client CCX version..... 2
Mirroring..... Disabled
QoS Level..... Silver
Diff Serv Code Point (DSCP)..... disabled
802.1P Priority Tag..... disabled
WMM Support..... Disabled
Mobility State..... Local
Mobility Move Count..... 0
Security Policy Completed..... Yes
Policy Manager State..... RUN
Policy Manager Rule Created..... Yes
NPU Fast Fast Notified..... Yes
Policy Type..... N/A
Management Frame Protection..... No
EAP Type..... Unknown
Interface..... vland64
VLAN..... 64
Client Capabilities:
    CF Pollable..... Not implemented
    CF Poll Request..... Not implemented
    Short Preamble..... Implemented
    PBCC..... Not implemented
    Channel Agility..... Not implemented
    Listen Interval..... 0
Client Statistics:
    Number of Bytes Received..... 2816
    Number of Bytes Sent..... 872
    Number of Packets Received..... 19
    Number of Packets Sent..... 6
    Number of Policy Errors..... 0
    Radio Signal Strength Indicator..... -45 dBm
    Signal to Noise Ratio..... 55 dB
Nearby AP Statistics:
    TxExcessiveRetries: 0
    TxRetries: 0
    RtsSuccessCnt: 0
    RtsFailCnt: 0
    TxFiltered: 0
    TxRateProfile: [0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0]
    AP1242#1(slot 0) ..... antenna0: 82 seconds ago -63 dBm..... antenna1: 82 seconds ago -68 dBm
    AP1242#2(slot 0) ..... antenna0: 82 seconds ago -54 dBm..... antenna1: 82 seconds ago -59 dBm
    AP1242#3(slot 0) ..... antenna0: 82 seconds ago -45 dBm..... antenna1: 82 seconds ago -41 dBm
    AP1242#4(slot 0) ..... antenna0: 82 seconds ago -65 dBm..... antenna1: 82 seconds ago -68 dBm
    AP1242#5(slot 0) ..... antenna0: 82 seconds ago -64 dBm..... antenna1: 82 seconds ago -66 dBm
223326
```

FIGURE 28 – Compte rendu de puissance reçue pour un client 802.11 par un contrôleur de réseau CISCO. Source : [Cis14]

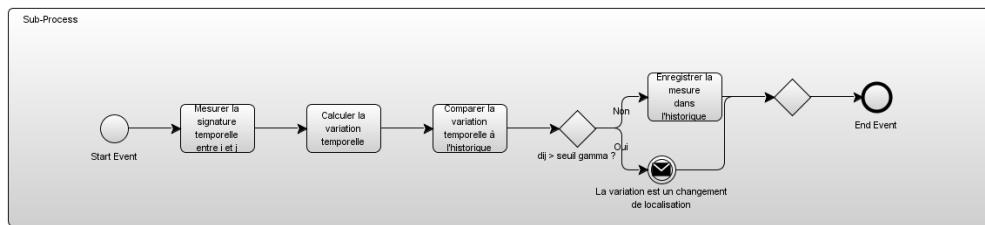


FIGURE 29 – Processus de classification d'une réponse impulsionale entre une situation LoS et non-LoS. A partir de [YZL14]

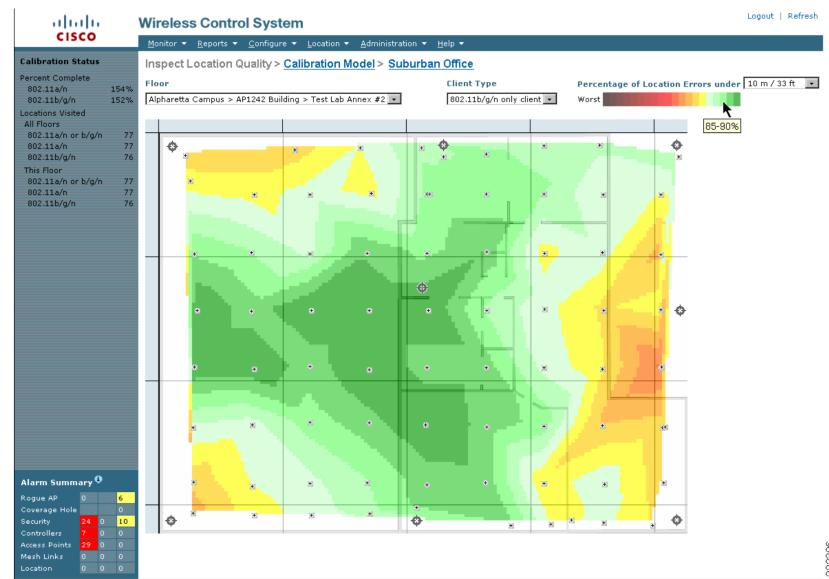


FIGURE 30 – Analyse de précision pour un WPS par comparaison de *pattern* après l'étape de calibration. Source : [Cis14]

Smooth Location Positions Value	Weight Assigned to Previous Position	Weight Assigned to New Position
Off (no smoothing)	0%	100%
Less smoothing	25%	75%
Average smoothing	50%	50%
More smoothing (default)	75%	25%
Maximum smoothing	90%	10%

FIGURE 31 – Coefficients d'amortissement pour éviter le phénomène de Location Display Jitter. Source : [Cis14]

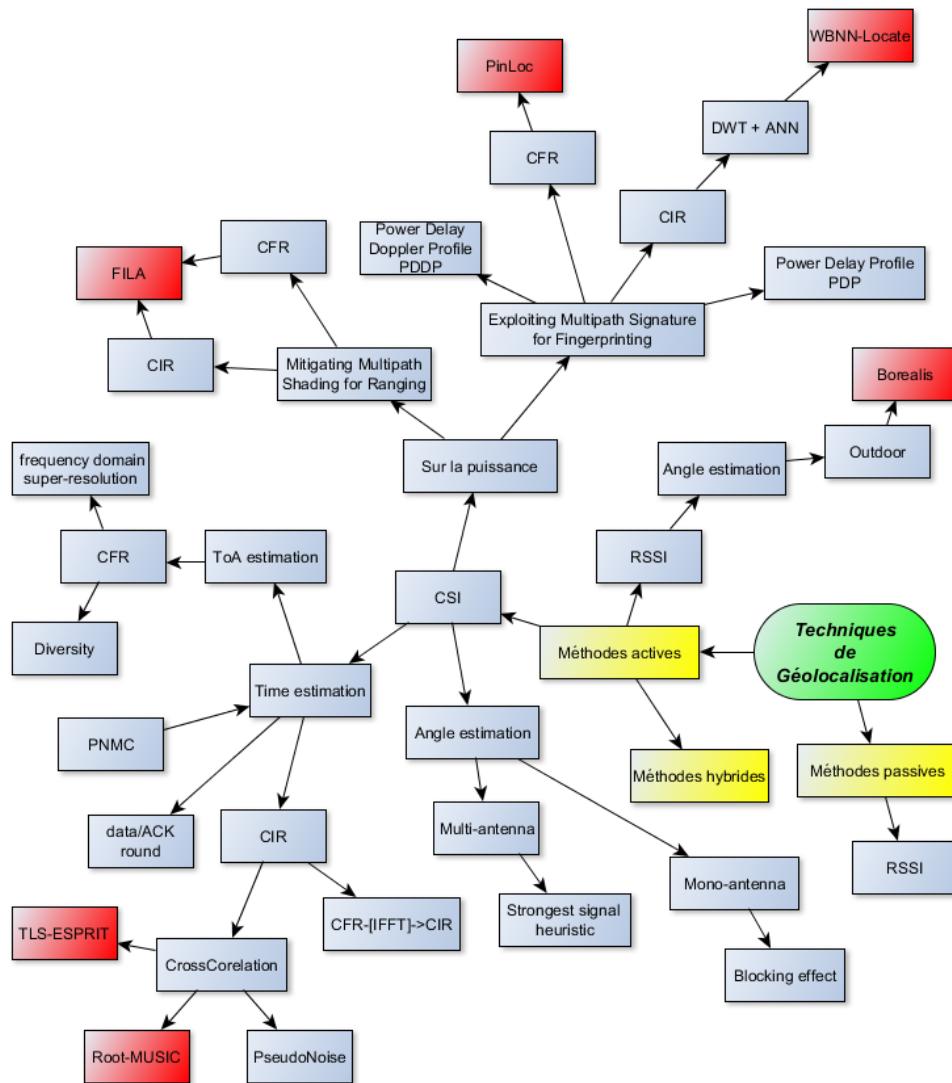


FIGURE 32 – Filiation des solutions. Les éléments en rouge sont des noms d’algorithmes. A partir de [YZL14]

A.3 MatLab - pathloss.m

```

function [ L_total ] = pathloss(d, f, N, Lf, n)
%pathloss - selon ITU-R P.1238-8
%   d : distance à la source [m]
%   f : fréquence [MHz] (p. ex. f = 2.4e3)
%   N : coefficient d'affaiblissement (p. ex. N = 28)
%   Lf: LossFactor environnement (p. ex. Lf = 14)
%   n : nombre de murs traversés (p. ex. n >= 0)

% affaiblissement de référence, hyp. espace libre
% distance de référence, d0 = 1 mètre

```

```
d0 = 1;
L_d0 = 20 * log10(f) - 28;

L_total = L_d0 + N * log10(d./d0) + n * Lf

end
```

A.4 MatLab - trilateration.m

```
function [lat, lon] = trilateration( LatA, LonA, DistA, LatB, LonB, DistB, LatC, LonC, DistC )
%trilateration : retourne les coordonnées d'un point par trilateration sur la distance à 3 points de référence
%   Fournir les coordonnées [degrés] des points de référence,
%   et les distances [km] aux points de référence,
%   pour obtenir les coordonnées sur le globe terrestre modélisé par une sphère authalique.
%
% Example :
%   format long
%   [lat, lon] = trilateration(37.418436, -121.963477, 0.265710701754, 37.417243, -121.961889, ...
%   0.234592423446, 37.418692, -121.960194, 0.0548954278262)
%   lat =
%       37.419102373825389
%   lon =
%       -1.219605792083924e+02
%
%   Code d'origine =
%   http://gis.stackexchange.com/questions/66/trilateration-using-3-latitude-and-longitude-points-and-3-distances,
%   cmeeren - 28/07/2010
%   Conversion MatLab = L. Tailhardat - 06/04/2016

% assuming elevation = 0
earthR = 6371;

%% ECEF des points de référence
% using authalic sphere
% if using an ellipsoid this step is slightly different
% Convert geodetic Lat/Long to ECEF xyz
% 1. Convert Lat/Long to radians
% 2. Convert Lat/Long(radians) to ECEF
xA = earthR *(cos(deg2rad(LatA)) * cos(deg2rad(LonA)));
yA = earthR *(cos(deg2rad(LatA)) * sin(deg2rad(LonA)));
zA = earthR *(sin(deg2rad(LatA)));

xB = earthR *(cos(deg2rad(LatB)) * cos(deg2rad(LonB)));
yB = earthR *(cos(deg2rad(LatB)) * sin(deg2rad(LonB)));
zB = earthR *(sin(deg2rad(LatB)));

xC = earthR *(cos(deg2rad(LatC)) * cos(deg2rad(LonC)));
yC = earthR *(cos(deg2rad(LatC)) * sin(deg2rad(LonC)));
zC = earthR *(sin(deg2rad(LatC)));

P1 = [xA; yA; zA];
P2 = [xB; yB; zB];
P3 = [xC; yC; zC];

%% Transformation
% from wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Trilateration
% transform to get circle 1 at origin
% transform to get circle 2 on x axis
ex = (P2 - P1) / (norm(P2 - P1));
i = dot(ex, (P3 - P1));
```

```

ey = (P3 - P1 - i*ex) / (norm(P3 - P1 - i*ex));
ez = cross(ex, ey);
d = norm(P2 - P1);
j = dot(ey, (P3 - P1));

%% Estimation
% from wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Trilateration
% plug and chug using above values
x = ((DistA^2) - (DistB^2) + (d^2))/(2*d);
y = (((DistA^2) - (DistC^2) + (i^2) + (j^2))/(2*j)) - ((i/j)*x);

% only one case shown here
z = sqrt((DistA^2) - (x^2) - (y^2));

% triPt is an array with ECEF x,y,z of trilateration point
triPt = P1 + x*ex + y*ey + z*ez;

%% Conversion finale
% convert back to lat/long from ECEF
% convert to degrees
lat = rad2deg(asin(triPt(3) / earthR));
lon = rad2deg(atan2(triPt(2),triPt(1)));

end

```

A.5 MatLab - etude_trilateration.m

```

% Script d'étude de la trilatération
% L. Tailhardat - Avril 2016
% Nécessite les packages :
%   MATLAB - Mapping Toolbox
%   Scott Lee Davis - Google Earth Toolbox
%   (http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12954-google-earth-toolbox)
%
% Le script :
% 1) initialise les coordonnées de 3 AP, en degrés,
% 2) définit les distances AP<=>MS, en km,
% 3) estime les coordonnées de la MS par trilatération,
% 4) génère le fichier .kml permettant de visualiser le résultat dans
%   Google Earth
%
% La partie 3) peut servir de base pour recevoir les relevés de mesures ou
% de simulation de distance AP<=>MS.

%% Initialisation des coordonnées et distances
% Généralités
clear
format long
earthRadiusInMeters = 6371000;

% Coordonnées de l'AP A : angle Nord Ouest du CNAM
LatA = 48.8674546593467;
LonA = 2.355035664087364;

% Coordonnées de l'AP C : angle Nord Est du CNAM
LatB = 48.86649526947721;
LonB = 2.355244287413478;

% Coordonnées de l'AP B : Bibliothèque du CNAM
LatC = 48.8670763004335;

```

```

LonC = 2.356347186129253;

% Coordonnées théorique de la MS
LatD_th = 48.86691223210363;
LonD_th = 2.355337952126204;

% Distances mesurées des AP à la MS [km]
DistA = 64.2402 / 1000;
DistB = 46.8676 / 1000;
DistC = 76.0414 / 1000;

% Distance théorique pour référence [m]
DistA_th = distance(LatA, LonA, LatD_th, LonD_th, earthRadiusInMeters);
DistB_th = distance(LatB, LonB, LatD_th, LonD_th, earthRadiusInMeters);
DistC_th = distance(LatC, LonC, LatD_th, LonD_th, earthRadiusInMeters);

%% Calcul de la position de la MS
% Coordonnées estimées par trilateration [degrés]
[LatD, LonD] = trilateration(LatA, LonA, DistA, LatB, LonB, DistB, LatC, LonC, DistC);

% Distance estimée pour référence [m]
DistA_est = distance(LatA, LonA, LatD, LonD, earthRadiusInMeters);
DistB_est = distance(LatB, LonB, LatD, LonD, earthRadiusInMeters);
DistC_est = distance(LatC, LonC, LatD, LonD, earthRadiusInMeters);

%% Génération du fichier GoogleEarth
% Généralités
kmlFileName = 'etude_trilateration.kml';
circle_lineWidth = 5.0;

% Création des points AP
kmlStr_A = ge_point(LonA, LatA, 0, 'name', 'AP_A');
kmlStr_B = ge_point(LonB, LatB, 0, 'name', 'AP_B');
kmlStr_C = ge_point(LonC, LatC, 0, 'name', 'AP_C');

% Création des cercles de centre AP et de distance mesurée
kmlStr_CircA = ge_circle(LonA, LatA, DistA * 1000, 'name', 'CircA', 'lineWidth', circle_lineWidth, ...
    'lineColor', 'b8ff0b20', 'polyColor', '00000000');
kmlStr_CircB = ge_circle(LonB, LatB, DistB * 1000, 'name', 'CircB', 'lineWidth', circle_lineWidth, ...
    'lineColor', 'b8ff0b20', 'polyColor', '00000000');
kmlStr_CircC = ge_circle(LonC, LatC, DistC * 1000, 'name', 'CircC', 'lineWidth', circle_lineWidth, ...
    'lineColor', 'b8ff0b20', 'polyColor', '00000000');

% Création du point MS
kmlStr_D = ge_point(LonD, LatD, 0, 'name', 'MS');

% Formatage et création du fichier
kmlStr = [kmlStr_A, kmlStr_B, kmlStr_C, kmlStr_CircA, kmlStr_CircB, kmlStr_CircC, kmlStr_D];
ge_output(kmlFileName, kmlStr, 'name', kmlFileName)

```

B Bibliographie, liste des figures et tables

Références

- [08] *SCYP Wifi Localization Tool Demo*. Avec la coll. de JAMONATION. 11 déc. 2008. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=nTd-mCzlwYM> (visité le 17/02/2016).
- [10a] *Geopard - Géolocalisation wifi intra-bâtiment - PFE ECE Paris Ecole d'Ingénieurs*. Avec la coll. d'ECE PARIS. 2 fév. 2010. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=0gy5F7pYNAw> (visité le 17/02/2016).
- [10b] *Naissance d'un système de localisation Indoor*. Avec la coll. de TLT - TÉLÉTOULOUSE. 8 juil. 2010. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=4I8i7kc5hTU> (visité le 17/02/2016).
- [13] *Indoor location tracking of people and assets using Navizon WiFi tags*. Avec la coll. de NAVIZONINC. 16 avr. 2013. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=Sw7gc8ic5vM> (visité le 17/02/2016).
- [15] *Cartographie et Localisation par WiFi*. Avec la coll. de LUC FABRESSE, SUZANNE SHOARA et MAX MATTONE. 10 sept. 2015. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=R7WvLWz5ym4> (visité le 17/02/2016).
- [Aki+09] T. AKIYAMA et al. “A Consideration of the Precision Improvement in WiFi Positioning System”. In : IEEE, mar. 2009, p. 1112–1117. ISBN : 978-1-4244-3569-2. DOI : [10.1109/CISIS.2009.148](https://doi.org/10.1109/CISIS.2009.148). (Visité le 29/02/2016).
- [alp13] ALPHEGA. *Histoire : du premier ordinateur portable aux PC et tablettes d'aujourd'hui*. 8 juin 2013. URL : <http://forums.cnetfrance.fr/topic/1204463-histoire--du--premier-ordinateur-portable-aux-pc--et--tablettes-d--aujourd-hui/> (visité le 29/02/2016).
- [Alv+10] A. ALVAREZ-ALVAREZ et al. “Human activity recognition applying computational intelligence techniques for fusing information related to WiFi positioning and body posture”. In : *2010 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ)*. IEEE, 2010, p. 1–8. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5584187 (visité le 29/02/2016).

- [And12] ANDRÉ CHR. ANDERSEN. *Signal Emitter Positioning Using Multilateration*. 1^{er} juil. 2012. URL : <http://blog.andersen.im/2012/07/signal-emitter-positioning-using-multilateration/> (visité le 11/04/2016).
- [AR15] ANABEL PINEDA-BRISEÑO et ROLANDO MENCHACA-MENDEZ. “An Experimental Study on the Effectiveness of Trilateration and Probabilistic Multilateration for Position Estimation in MANETs”. In : 2015 XLI Latin American Computing Conference (CLEI). IEEE, 2015.
- [arc13] ARCEP. *Réseaux locaux radioélectriques ou RLAN (Wi-Fi) : les puissances d'émissions autorisées*. 29 avr. 2013. URL : <http://www.art-telecom.fr/index.php?id=9272> (visité le 09/03/2016).
- [B J16] B. JANKULOSKI. *Trilateration-3spheres.jpg*. In : *Wikipedia, the free encyclopedia*. Page Version ID : 702761500. 1^{er} fév. 2016. URL : <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Trilateration&oldid=702761500> (visité le 09/04/2016).
- [BF07] A. BOSE et C. H. FOH. “A practical path loss model for indoor WiFi positioning enhancement”. In : *2007 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing*. IEEE, 2007, p. 1–5. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4449717 (visité le 29/02/2016).
- [BP00] P. BAHL et V. N. PADMANABHAN. “RADAR : An in-building RF-based user location and tracking system”. In : *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. T. 2. IEEE, 2000, p. 775–784. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=832252 (visité le 29/02/2016).
- [CH94] CHAN et HO. “A simple and efficient estimator for hyperbolic location - Signal Processing, IEEE Transactions on - estimator_hyperbolic_location.pdf”. In : *IEEE Transactions on Signal Processing* 42.8 (août 1994), p. 1905–1915. URL : http://www.vtvt.ece.vt.edu/research/references/uwb/ranging_mobile_location/estimator_hyperbolic_location.pdf (visité le 16/04/2016).
- [Cis] CISCO SYSTEMS. *Connected Mobile Experiences*. URL : <http://cisco.com/c/en/us/solutions/enterprise-networks/connected-mobile-experiences/index.html> (visité le 01/03/2016).

- [Cis14] CISCO SYSTEMS, éd. *Cisco Systems, Inc. Wi-Fi Location-Based Services 4.1 Design Guide*. 30 jan. 2014. URL : <http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Mobility/WiFiLBS-DG.pdf> (visité le 01/03/2016).
- [DAB12] D. C. DIMITROVA, I. ALYAFAWI et T. BRAUN. “Experimental comparison of bluetooth and wifi signal propagation for indoor localisation”. In : *Wired/Wireless Internet Communication*. Springer, 2012, p. 126–137. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-30630-3_11 (visité le 29/02/2016).
- [GAN11] GERMAN CASTIGNANI, ANDRES EMILIO ARCIA MORET et NICOLAS MONTAVONT. “A study of the discovery process in 802.11 networks”. In : *ACM Sigmobile - Mobile computing and communications review* 15 (1) (2011), p. 25–36. DOI : [10.1145/1978622.1978626](https://doi.org/10.1145/1978622.1978626). (Visité le 12/02/2016).
- [Gooa] GOOGLE. *Google Maps Geolocation API*. URL : <https://developers.google.com/maps/documentation/geolocation/intro> (visité le 06/04/2016).
- [Goob] GOOGLE. *Google Static Maps API*. URL : <https://developers.google.com/maps/documentation/static-maps/?hl=fr> (visité le 06/04/2016).
- [Gor+11] GORDON STEIN et al. *iDOCENT (Indoor Directional Orientation Communication and Enabling Navigational Technology)*. 2011. URL : <http://www.egr.msu.edu/classes/ece480/capstone/spring11/group02/index.html> (visité le 17/02/2016).
- [Hal+10] D. HALPERIN et al. “Predictable 802.11 Packet Delivery from Wireless Channel Measurements”. In : *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* (2010). SIGCOMM’10, August 30–September 3, 2010, New Delhi, India. Copyright 2010 ACM 978-1-4503-0201-2/10/0.
- [Hal+11] D. HALPERIN et al. *Linux 802.11n CSI Tool*. 2011. URL : <https://dhalperi.github.io/linux-80211n-csitooll/> (visité le 10/02/2016).
- [IEE08] “IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC)and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 1 : Radio Resource Measurement of Wireless LANs”. In : *IEEE Std 802.11k-2008 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007)*.

- IEEE Std 802.11-2007)* (juin 2008). Sous la dir. d'IEEE, p. 1–244. DOI : [10.1109/IEEESTD.2008.4544755](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2008.4544755).
- [IEE12] “IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Redline”. In : *IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007) - Redline* (mar. 2012). Sous la dir. d'IEEE, p. 1–5229.
- [IEE97] “IEEE Standard for Information Technology- Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”. In : *IEEE Std 802.11-1997* (1997). Sous la dir. d'IEEE, p. i–445. DOI : [10.1109/IEEESTD.1997.85951](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1997.85951).
- [ika08] IKALOGIC. *WFR, a Dead Reckoning Robot*. 15 avr. 2008. URL : <https://www.ikalogic.com/wfr-a-dead-reckoning-robot/> (visité le 20/04/2016).
- [INS08] INSEE. *Insee - Conditions de vie-Société - Les logements en 2006 - Le confort s'améliore mais pas pour tous*. Juil. 2008. URL : http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=ip1202 (visité le 12/03/2016).
- [ITU13] ITU. *Multipath propagation and parameterization of its characteristics*. R-REC-P.1407-5. Question ITU-R 203/3. ITU, sept. 2013.
- [ITU15] ITU. *Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz*. Recommandation ITU-R P.1238-8. Question ITU-R 211/3. ITU, juil. 2015. URL : https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-6-200910-S!!PDF-E.pdf (visité le 29/02/2016).
- [Jeo+14] S. JEON et al. “Indoor WPS/PDR performance enhancement using map matching algorithm with mobile phone”. In : *2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS 2014*. 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS 2014. Mai 2014, p. 385–392. DOI : [10.1109/PLANS.2014.6851396](https://doi.org/10.1109/PLANS.2014.6851396).

- [kar00] KARUSSELL. *Digitalizing GPX Points or How to Track Vehicles With GraphHopper*. 2014-07-28T10 :04 :44+00 :00. URL : <https://karussell.wordpress.com/2014/07/28/digitalizing-gpx-points-or-how-to-track-vehicles-with-graphhopper/> (visité le 22/04/2016).
- [KMR09] K. KAWAUCHI, T. MIYAKI et J. REKIMOTO. “Directional beaconing : A robust wifi positioning method using angle-of-emission information”. In : *Location and Context Awareness*. Springer, 2009, p. 103–119. URL : http://link.springer.com/10.1007%2F978-3-642-01721-6_7 (visité le 29/02/2016).
- [Las+09] F. LASSABE et al. “Indoor Wi-Fi positioning : techniques and systems”. In : *annals of telecommunications - annales des télécommunications* 64.9-10 (oct. 2009), p. 651–664. ISSN : 0003-4347, 1958-9395. DOI : <10.1007/s12243-009-0122-1>. (Visité le 29/02/2016).
- [Mica] MICROSOFT CORP. *Capteurs - Windows app development*. URL : <https://msdn.microsoft.com/fr-fr/library/windows/apps/mt187358.aspx> (visité le 09/03/2016).
- [Micb] MICROSOFT CORP. *Configurer une limite géographique - Windows app development*. URL : <https://msdn.microsoft.com/fr-fr/library/windows/apps/mt219702.aspx> (visité le 09/03/2016).
- [Micc] MICROSOFT CORP. *Obtenir l'emplacement de l'utilisateur - Windows app development*. URL : <https://msdn.microsoft.com/fr-fr/library/windows/apps/mt219698.aspx> (visité le 09/03/2016).
- [Micd] MICROSOFT CORP. *Recommandations en matière d'applications prenant en charge la géolocalisation - Windows app development*. URL : <https://msdn.microsoft.com/fr-fr/library/windows/apps/hh465148.aspx> (visité le 09/03/2016).
- [MMS15] K. MONDAL, P. S. MANDAL et B. P. SINHA. “Analysis of Multiple-Bound Signals Towards Localization : A Theoretical Approach”. In : *Wireless Personal Communications* 83.1 (juil. 2015), p. 49–67. ISSN : 0929-6212, 1572-834X. DOI : <10.1007/s11277-015-2379-1>. (Visité le 29/02/2016).
- [Nat95] NATHANIEL BOWDITCH. “DEAD RECKONING”. In : *The American Practical Navigator*. NavList. 1995, p. 113–118. URL : <http://fer3.com/arc/imgx/bowditch1995/chapt07.pdf> (visité le 19/04/2016).

- [Nor13] L. E. S. NORDHUS. “Ray Tracing for Simulation of Wireless Networks in 3D Scenes”. Trondheim : Norwegian University of Science and Technology, juin 2013. URL : <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:655636/FULLTEXT01.pdf> (visité le 10/02/2016).
- [Pat05] A. PATIL. *BlueBot : Asset Tracking via Robotic Location Crawling*. RC23510. IBM, 2 fév. 2005. URL : [http://domino.watson.ibm.com/library/CyberDig.nsf/papers/B4D9990B72EDD72A85256F9C006D70A4/\\$File/rc23510.pdf](http://domino.watson.ibm.com/library/CyberDig.nsf/papers/B4D9990B72EDD72A85256F9C006D70A4/$File/rc23510.pdf) (visité le 17/02/2016).
- [Pau02] PAUL GUYOT. “Introduction aux PDA”. ECE - Systèmes embarqués. 15/11/02. URL : http://www.kallisys.com/files/newton/Waba/ECE-200211/Introduction_aux_PDA.pdf (visité le 29/02/2016).
- [Pau86] PAUL FOMBONNE. *Radiolocation, Radionavigation*. In : *Techniques de l’Ingénieur*. Archives. 10 sept. 1986. URL : <http://www.techniques-ingeneur.fr.proxybib.cnam.fr/res/pdf/encyclopedia/tiaeae6600.pdf> (visité le 17/04/2016).
- [Phi14] PHILIPPE SAINT-MARTIN. *Applications de la géolocalisation - Une technologie qui change le monde*. In : *Techniques de l’Ingénieur*. Techniques de l’Ingénieur. Technologies de l’information — Technologies radars et applications. 10 fév. 2014.
- [Pra+14] S. PRADHAN et al. “Enhanced location detection algorithms based on time of arrival trilateration”. In : *2014 48th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. IEEE, 2014, p. 1179–1183. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7094644 (visité le 29/02/2016).
- [PSL04] J. M. POLK, J. SCHNIZLEIN et M. LINSNER. *RFC 3825 - Dynamic Host Configuration Protocol Option for Coordinate-based Location Configuration Information*. RFC 3825. IETF, juil. 2004. URL : <https://tools.ietf.org/html/rfc3825> (visité le 14/02/2016).
- [PT06] T. PARTHORNRATT et K. TECHAKITTIROJ. “Improving accuracy of WiFi positioning system by using geographical information system (GIS)”. In : *Wireless Telecommunications Symposium, 2006. WTS’06*. IEEE, 2006, p. 1–6. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4135353 (visité le 29/02/2016).

- [RBK13] D. RODIONOV, K. BUSHMINIKIN et G. KOLEV. “A Cooperative Localization Technique for Tracking in Hospitals and Nursing Homes”. In : IEEE, sept. 2013, p. 471–475. ISBN : 978-0-7695-5089-3. DOI : [10.1109/ICHI.2013.63](https://doi.org/10.1109/ICHI.2013.63). (Visité le 29/02/2016).
- [Sab13] K. SABET. *Using a k-d Tree Framework for Fast Ray Tracing of Large Wireless Propagation Scenes*. 35–nov. 2013. URL : <http://www.emagtech.com/content/using-k-d-tree-framework-fast-ray-tracing-large-wireless-propagation-scenes> (visité le 10/02/2016).
- [SCM10] A. SERRA, D. CARBONI et V. MAROTTO. “Indoor pedestrian navigation system using a modern smartphone”. In : *Proceedings of the 12th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*. ACM, 2010, p. 397–398. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1851683> (visité le 17/02/2016).
- [Shi+10] B.-J. SHIN et al. “Indoor WiFi positioning system for Android-based smartphone”. In : *Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technology Convergence*. 2010.
- [SM10] C.-Y. SHIH et P. J. MARRÓN. “COLA : Complexity-Reduced Tri-lateration Approach for 3D Localization in Wireless Sensor Networks”. In : IEEE, juil. 2010, p. 24–32. ISBN : 978-1-4244-7538-4. DOI : [10.1109/SENSORCOMM.2010.11](https://doi.org/10.1109/SENSORCOMM.2010.11). (Visité le 29/02/2016).
- [SQN09] D. SANCHEZ, M. A. QUINTANA et J. L. NAVARRO. “WLAN Location Determination Using Probability Distributions with Search Area Reduction via Trilateration”. In : IEEE, 2009, p. 328–333. ISBN : 978-1-4244-4679-7. DOI : [10.1109/ICWMC.2009.61](https://doi.org/10.1109/ICWMC.2009.61). (Visité le 29/02/2016).
- [Tam] TAMOS. *Multi-Channel Capturing*. URL : http://www.tamos.com/htmlhelp/commwifi/multi-channel_capturing.htm.
- [TAW15] A. TZUR, O. AMRANI et A. WOOL. “Direction Finding of rogue Wi-Fi access points using an off-the-shelf MIMO-OFDM receiver”. In : *Physical Communication* 17 (déc. 2015), p. 149–164. ISSN : 1874-4907. DOI : [10.1016/j.phycom.2015.08.010](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2015.08.010). (Visité le 10/02/2016).
- [tec] TECHNOWEST. *IIDRE AUTOMATE*. URL : <https://technowest.com/entreprises/iidre-automate/> (visité le 17/02/2016).

- [Vah+13] M. H. VAHIDNIA et al. “A Hierarchical Signal-Space Partitioning Technique for Indoor Positioning with WLAN to Support Location-Awareness in Mobile Map Services”. In : *Wireless Personal Communications* 69.2 (mar. 2013), p. 689–719. ISSN : 0929-6212, 1572-834X. DOI : [10.1007/s11277-012-0607-5](https://doi.org/10.1007/s11277-012-0607-5). (Visité le 29/02/2016).
- [Wan+14] G. WANG et al. “We Can Hear You with Wi-Fi!” In : *Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. MobiCom ’14. New York, NY, USA : ACM, 2014, p. 593–604. ISBN : 978-1-4503-2783-1. DOI : [10.1145/2639108.2639112](https://doi.org/10.1145/2639108.2639112). (Visité le 10/02/2016).
- [WCZ16] W. WANG, Y. CHEN et Q. ZHANG. “Privacy-Preserving Location Authentication in Wi-Fi Networks Using Fine-Grained Physical Layer Signatures”. In : *IEEE Transactions on Wireless Communications* 15.2 (fév. 2016), p. 1218–1225. ISSN : 1536-1276. DOI : [10.1109/TWC.2015.2487453](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2487453).
- [Wik] *Trilateration*. In : *Wikipedia, the free encyclopedia*. Sous la dir. de WIKIPEDIA. URL : <https://en.wikipedia.org/wiki/Trilateration>.
- [Wik16a] WIKIPEDIA. *Taille des logements en France*. In : *Wikipédia*. Page Version ID : 124214206. 10 mar. 2016. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Taille_des_logements_en_France&oldid=124214206 (visité le 12/03/2016).
- [Wik16b] *Wi-Fi*. In : *Wikipédia*. Sous la dir. de WIKIPEDIA. Page Version ID : 123453646. 17 fév. 2016. URL : <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Wi-Fi&oldid=123453646> (visité le 02/03/2016).
- [Wil11] J. WILLAREDT. “WiFi and Cell-ID based positioning-protocols, standards and solutions”. In : *SNET Project WT* (2011). URL : http://www.snet.tu-berlin.de/fileadmin/fg220/courses/WS1011/snet-project/wifi-cellid-positioning_willaredt.pdf (visité le 29/02/2016).
- [Xuy15] L. G. XUYU WANG. “DeepFi : Deep learning for indoor finger-printing using channel state information”. In : *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2015* (2015). DOI : [10.1109/WCNC.2015.7127718](https://doi.org/10.1109/WCNC.2015.7127718).

- [Yah01] YAHN W. BERNIER. “Latency Compensating Methods in Client/Server In-game : Protocol Design and Optimization”. In : *Proceedings of the Game Developers Conference*. Jan. 2001. URL : <http://web.cs.wpi.edu/~claypool/courses/4513-B03/papers/games/bernier.pdf> (visité le 19/04/2016).
- [Yan+15] W. YANG et al. “Enhancing the Performance of Indoor Device-Free Passive Localization”. In : *International Journal of Distributed Sensor Networks* 2015 (1^{er} nov. 2015), e256162. ISSN : 1550-1329. DOI : [10.1155/2015/256162](https://doi.org/10.1155/2015/256162). (Visité le 10/02/2016).
- [YZL14] Z. YANG, Z. ZHOU et Y. LIU. “From RSSI to CSI : Indoor Localization via Channel Response”. In : *ACM Computing Surveys* 46.2 (juin 2014). DOI : [10.1145](https://doi.org/10.1145/2591063).

Table des figures

1	Modèle géométrique de localisation avec 1 AP. Les limites de sensibilité des récepteurs et de $RSSI_{cutoff}$ bornent les distances où la localisation est effective : MS_1 est localisable, mais pas MS_2	9
2	Modèle géométrique de localisation avec 2 AP. La détermination de MS_2 est ambiguë sur la droite c du fait de la même distance perçue aux AP pour une position en MS'_2	9
3	Modèle géométrique de localisation avec 3 AP. L'intersection des cercles c_1 , c_2 , et c_3 détermine la localisation de MS . L'aire commune aux surfaces de couverture des 3 AP (surface grisée) restreint la zone où cette détermination est possible.	10
4	Processus simplifié de mesure active. A partir de : [IEE12]	12
5	Chronogramme du préambule de synchronisation (<i>PLCP preamble</i>) pour une trame OFDM. Les 12 premiers temps sont utilisés pour la mesure de RSSI. Source : [IEE12]	12
6	Résultat de la commande Windows <i>netsh wlan show all</i> en période de scan actif : l'ensemble des AP à portée sont affichés. Une fois l'association au réseau réalisé, et avec la STA monoradio de l'ordinateur, seul l'AP de rattachement devient visible.	14
7	Affaiblissement en fonction de la distance et du nombre n de murs traversés, en utilisant l'équation 3 ($f = 2.4e3$, $N = 28$, $L_f = 14$)	17

8	Modèle géométrique <i>LoS</i> versus <i>non-LoS</i> : le chemin direct u ($AP_1 \rightarrow MS_1$) n'est pas possible du fait de la présence d'un mur. Les chemins indirects (v,w) et (a,b,c) existent mais présentent un affaiblissement et une distance perçue différente, notamment par rapport au trajet en chemin direct.	18
9	Processus générique de détermination de la localisation	24
10	Principe <i>Cell of origin</i> où l'utilisateur est localisé par appartenance à une zone en fonction de l'identifiant de la cellule dont il reçoit le maximum de puissance. Source : [Cis14]	25
11	Principe géométrique de la trilateration 2D. Source : [B J16] . .	28
12	Localisation d'une MS à partir de 3 AP par application de l'étude <i>etude_trilateration.m</i> sur une situation fictive au CNAM (cf. section A.5)	29
13	Processus FILA d'ajustement de la mesure de puissance reçue en fonction de la réponse en fréquence du canal . A partir de [YZL14]	29
14	Principe de contrainte d'une position d'émetteur sur une hyperbole en TDoA	30
15	Localisation d'une MS par la TDoA entre 3 couples d'AP. La localisation est le point de croisement des 3 hyperboles, au niveau de chaque feuillet le plus proche de l'AP ayant reçu le signal en premier (AP1 en l'occurrence).	31
16	Comparaison de l'erreur quadratique moyenne de divers algorithmes employés en TDoA, pour une disposition arbitraire des capteurs, et selon un nombre variable de capteurs. Source : [CH94].	32
17	Principe du fingerprinting et de l'étape de calibration pour 2 MS rapportant un vecteur de RSSI pour 4 AP. Source : [Cis14]	34
18	Architecture réseau proposée par CISCO pour un WPS par comparaison de <i>pattern</i> . Source : [Cis14]	35
19	Architecture logique pour la localisation par fingerprint. Source : [Yan+15]	35
20	Principe du <i>dead-reckoning</i> pour un robot mobile : les positions aux points d'étape 2 à 8 sont déduites de la position au point 1 en utilisant les distances d parcourues et les rotations d'angles A effectuées. Source : [ika08]	36
21	Principe du <i>fix expansion</i> : cercles de position probable après une course de 100 ; 200 ; 300 ; 400 nautiques, pour un navire avançant à la vitesse 12 noeuds. Source : [Nat95]	38

22	Principe du <i>map-matching</i> . Les coordonnées estimées à partir des données issues du système GPS sont mise en correspondance avec la description d'une route. Source : [kar00]	39
23	Blocs fonctionnels pour un système <i>WPS-PDR</i> . Source : [Jeo+14]	40
24	Processus générique, côté terminal mobile, pour obtenir l'emplacement de l'utilisateur. A partir de : [Micc].	42
25	Recommandation de placement des AP au sein d'un bâtiment. Source : [Cis14]	43
26	Méthodes, précision, et contraintes pour divers WPS. Source : [Las+09]	45
27	Analyse de trame 802.11 Radio Measurement Request Element avec Beacon Request pour scan actif sur le canal 1. Source : [Cis14]	47
28	Compte rendu de puissance reçu pour un client 802.11 par un contrôleur de réseau CISCO. Source : [Cis14]	48
29	Processus de classification d'une réponse impulsionnelle entre une situation LoS et non-LoS. A partir de [YZL14]	49
30	Analyse de précision pour un WPS par comparaison de <i>pattern</i> après l'étape de calibration. Source : [Cis14]	49
31	Coefficients d'amortissement pour éviter le phénomène de Location Display Jitter. Source : [Cis14]	49
32	Filiation des solutions. Les éléments en rouge sont des noms d'algorithmes. A partir de [YZL14]	50

Liste des tableaux

1	Nombre d'articles par période de référence dans Springer selon le critère <i>Wifi positioning</i> dans la catégorie <i>Computer Science</i>	6
2	Particularités de l'environnement et effets potentiels sur le signal. Partiellement tiré de [ITU15].	15
3	Environnements et applications potentielles.	20
4	Gain d'antenne selon le type. Source : [Wik16b]	46
5	Coefficients de perte de puissance selon l'environnement. Source : [ITU15]	46