

# Étude pour la réalisation de cartes de visibilité satellitaire GNSS

■ Guillaume BIZOUARD

*Les systèmes de positionnement par satellites sont en plein essor actuellement mais ils sont toujours limités par la présence d'obstacles qui masquent la visibilité des satellites. Cependant, la récente technique d'acquisition qu'est le levé par laser aéroporté laisse augurer de nouvelles applications pour prévoir la visibilité satellitaire. Il permettrait effectivement de modéliser les masques par l'intermédiaire d'un Modèle Numérique de Surface. Allié à un puissant logiciel d'analyse spatiale, il est alors possible d'envisager la création d'une application permettant de générer des cartes prévisionnelles de visibilité satellitaire. C'est l'objet de ce projet : créer un prototype réalisant de telles cartes, le tester, le valider, l'analyser et imaginer ses perspectives.*

## ■ mots-clés

Visibilité, satellite, GNSS, géotraitements, LiDAR

## Contexte et problématique

La visibilité satellitaire a toujours été une préoccupation majeure pour tout utilisateur des systèmes de positionnement par satellites, qu'il soit du milieu de la topographie ou du milieu des transports. De la quantité de satellites visibles dépend en premier lieu la capacité à effectuer ou non des mesures GNSS, puis la qualité de ces mesures. Or cette visibilité satellitaire dépend de la présence de masques faisant obstacles entre l'antenne réceptrice du système de positionnement et les satellites dans le ciel. Ces masques sont évidemment très présents en environnement urbain ou forestier et c'est la raison pour laquelle l'utilisation de tels systèmes à des fins topographiques est très difficile dans ces environnements. Néanmoins, leur emploi n'y est pas totalement à proscrire : il s'agit en fait de connaître les horaires auxquels les bonnes fenêtres de visibilité surviennent. Actuellement, les logiciels permettant de déterminer ces fenêtres sont les logiciels dits "de planification de mission" développés par les fabricants de matériel topographique (Leica, Trimble, Topcon...). Leur inconvénient majeur est la prise en compte des masques qui s'avère être assez contraignante puisqu'il faut se déplacer sur le terrain pour effectuer un levé de masques relativement sommaire pour l'intégrer ensuite dans le logiciel. D'où une perte de temps et de rendement.

Néanmoins, l'apparition et le développement rapide de la nouvelle technique d'acquisition de masse qu'est le laser aéroporté (ou levé LiDAR) permet d'envisager alors de nouvelles perspectives. Elle apporte effectivement exhaustivité,

précision et homogénéité à l'ensemble des informations collectées, le tout sur une très grande zone géographique. La modélisation des masques devient donc bien meilleure, sans déplacement sur le terrain pour l'utilisateur. Si on rajoute à cette technique de puissants logiciels d'analyse spatiale, la prévision de visibilité satellitaire peut alors prendre une nouvelle dimension.

A la vue de ces constatations, la Direction Cantonale de la Mensuration Officielle (DCMO) de Genève a mandaté l'entreprise GeoDataNetwork, spécialisée dans les services géoinformatiques, pour analyser en profondeur ce sujet. Celle-ci a alors confié l'étude à un étudiant topographe de l'INSA de Strasbourg comme sujet de Projet de Fin d'Etudes.

Cette nouvelle orientation autour de la prévision de visibilité satellitaire est donc assez récente ; elle a suscité quelques études et même le développement de logiciel tel Ergospace (T. Tirtaine & J. Marais [2005]). Seulement, les conditions énoncées par la DCMO ne permettaient pas d'étudier ou d'employer ce logiciel car il fallait concevoir une application compatible avec les logiciels standards et les données utilisés à la DCMO, soit la plate-forme logicielle ArcGIS (ESRI) et ses différents formats propriétaires de données.

Dès lors, l'objectif principal de ce projet a été de créer un prototype d'application de toutes pièces sous ArcGIS qui permet de générer des cartes de visibilité satellitaire prévisionnelles. L'étude de M. Germroth [2005] à ce sujet s'avère être extrêmement intéressante puisqu'elle apporte l'idée principale pour parvenir au dessein du projet : exploiter le géotraitement

- d'ombrage de l'extension Spatial Analyst pour analyser la visibilité des satellites par rapport à un Modèle Numérique de Surface (MNS). L'article exposera donc tout d'abord la conception de ce prototype, puis il traitera des tests de validation, et enfin il s'avancera sur le futur d'une éventuelle application.

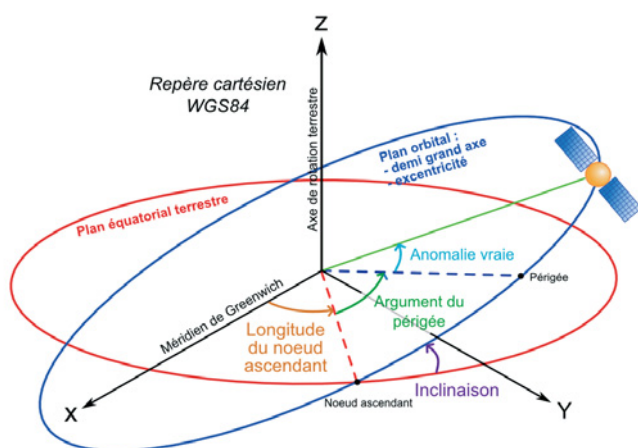
## Le prototype

Son élaboration constitue le cœur du projet ; elle s'est effectuée en trois parties. La première s'attache à la localisation des satellites à l'heure souhaitée, soit l'heure de prévision, et dans un repère approprié. Puis la seconde partie étudie la création d'un MNS optimal à partir d'un semis de points LiDAR. Enfin, la dernière traite de la conception d'une séquence de géotraitements permettant d'analyser la visibilité des satellites, pour générer à terme la carte de visibilité satellitaire.

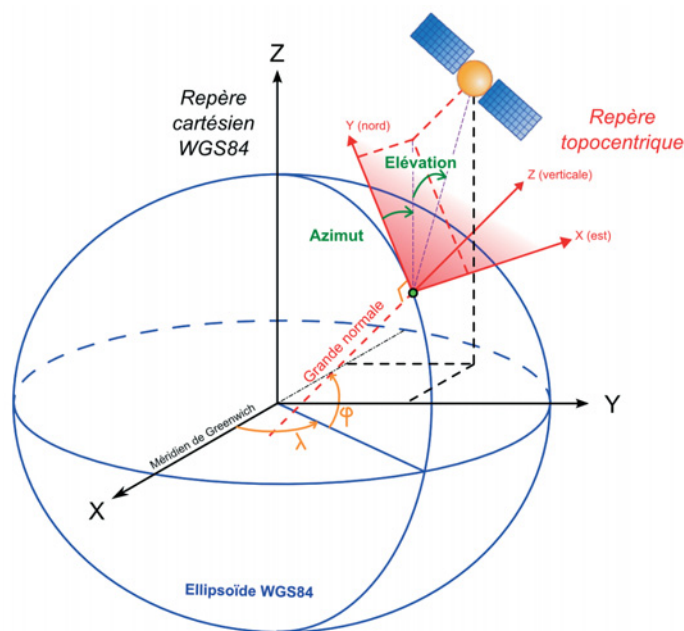
### ■ Localisation des satellites

Pour pouvoir réaliser une carte de visibilité, il faut tout d'abord savoir où se situent les satellites dans l'espace et à quel moment. C'est l'enjeu de cette partie initiale qui fait appel aux domaines de la mécanique céleste et de la géodésie spatiale. Les almanachs des constellations de satellites constituent la source de données principale pour pouvoir calculer la position des satellites. On y trouve effectivement les paramètres képlériens/orbitaux de chaque satellite d'une constellation qui définissent leur position (cf. figure 1). A partir de ces éléments, un algorithme est établi calculant les coordonnées de ces satellites dans un système de référence pertinent à l'heure de prévision souhaitée. Cet algorithme se décompose en plusieurs étapes :

- extrapolation des paramètres orbitaux à la date de prévision ; ces calculs sont un classique de mécanique céleste tirés, entre autres, de l'Interface Control Document [2004].



**Figure 1.** Localisation d'un satellite par ses paramètres orbitaux.



**Figure 2.** Localisation d'un satellite dans un repère topocentrique.

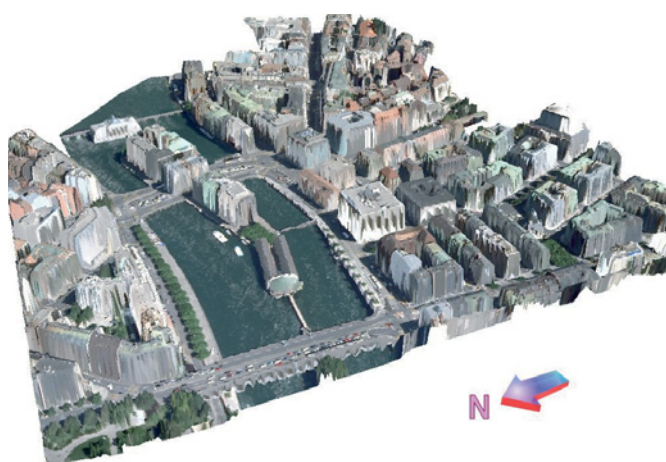
Puis interviennent divers changements de repères :

- passage aux coordonnées cartésiennes orbitales,
- passage aux coordonnées cartésiennes WGS84,
- passage aux coordonnées cartésiennes topocentriques,
- passage aux coordonnées topocentriques (azimut ; élévation).

En définitive, on obtient ainsi pour chaque satellite de la constellation ses coordonnées topocentriques (azimut ; élévation) qui sont relatives à un lieu d'observation sur Terre (cf. figure 2). Le problème de la visibilité se résout effectivement d'un point de vue local puisque suivant où l'on se trouve sur Terre, la visibilité des satellites n'est pas la même. L'ensemble de l'algorithme a été contrôlé en comparant ses résultats à ceux donnés par les logiciels de planification de mission. Il a été intégré dans un fichier XLS en grande partie automatisé : l'utilisateur charge l'almanach, saisit sa date et son heure de prévision souhaitées, ainsi que les coordonnées du lieu d'observation, puis lance les quelques macros Visual Basic pour obtenir instantanément les résultats. Ce fichier correspond à la première composante du prototype. A partir de là, on est en mesure de déterminer la visibilité des satellites par rapport au lieu d'observation en comparant leur angle d'élévation à un angle de référence ( $0^\circ$  ou un angle de coupure), mais sans prendre en compte les masques. D'où les deux composantes suivantes qui vont apporter la véritable innovation du projet : la prise en compte des masques de manière exhaustive, précise et homogène, sans déplacement sur le terrain.

### ■ Génération d'un Modèle Numérique de Surface

Pour analyser la visibilité satellitaire d'un lieu en fonction de ses obstacles environnants, il faut nécessairement disposer



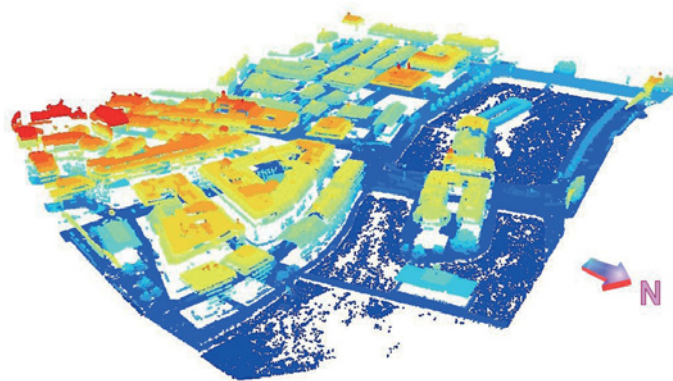
**Figure 3.** Zone test du centre-ville de Genève - Quartier de l'Île (orthophoto drapée sur le MNS)

de géodonnées décrivant l'espace autour de ce lieu. Pour le projet, la DCMO a fourni un semis de point LiDAR couvrant deux zones tests au profil différent: la première en plein centre-ville de Genève avec donc de nombreux bâtiments (cf. figures 3 et 4) et la seconde dans un lotissement en périphérie de la ville avec un fort couvert végétal.

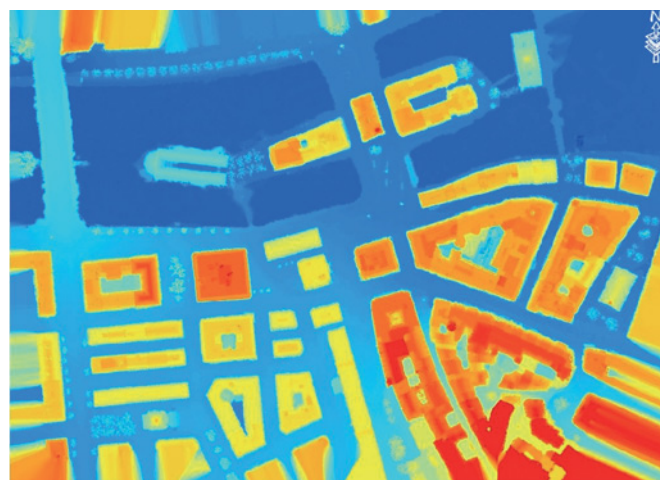
Seulement, un semis de points LiDAR n'est pas directement exploitable pour effectuer des analyses poussées du fait de son volume de données important et de son format peu commode (vecteur ponctuel). Il faut ainsi forcément transformer le semis en un raster (une image numérique), pour générer alors un Modèle Numérique de Surface pour être plus précis car on souhaite modéliser les masques hors-sol: bâtiments, végétation... Ce choix est aussi dicté par le format nécessaire à l'utilisation du géotraitement d'ombrage. C'est une partie importante car on peut intuitivement penser que de la qualité de la modélisation de l'espace dépend la qualité de la prévision de la visibilité des satellites.

Outre les quelques traitements préliminaires classiques qu'il a fallu réaliser sur le semis, le point sensible de cette étude s'est porté sur le choix de la méthode d'interpolation en raster à employer. Pour ce faire, on s'est appuyé sur les travaux réalisés par le Laboratoire des SIG de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne [2005]. Le rapport montre effectivement que la méthode TIN (*Triangulated Irregular Network*) passant par la triangulation de Delaunay est la plus à même de modéliser fidèlement l'espace bâti: façades de bâtiments plus verticales, base des bâtiments moins évasée, plan des toits mieux modélisé. Ce sont des caractéristiques clés pour avoir la meilleure modélisation des masques possible.

Un autre paramètre important pour la génération du MNS est sa résolution pixellaire, c'est-à-dire la taille des pixels dans la réalité. Selon les travaux de SL. Smith et al. [2003], elle doit être équivalente voire légèrement inférieure à la densité de points du semis LiDAR. Compte tenu de la densité du semis fourni par la DCMO, une résolution de 50 cm a été retenue.



**Figure 4.** Semis de points LiDAR couvrant la zone test du centre-ville



**Figure 5.** MNS raster de la zone test du centre-ville.

Au final, un MNS raster a été généré pour chacune des deux zones tests selon les conditions précédentes, ce qui constitue la seconde composante du prototype (cf. figure 5).

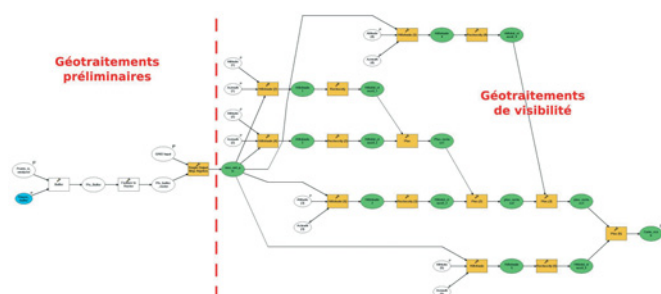
## ■ Séquence de géotraitements

Tout ce qui a été fait auparavant a été guidé en grande partie par un seul objectif, en plus de celui d'avoir les données optimales pour une analyse de visibilité: aboutir au type et au format de donnée nécessaire à l'usage du géotraitement d'ombrage de Spatial Analyst (MNS raster et coordonnées azimut/élévation des satellites). Car ce traitement, au but initial anodin, s'avère être la pièce maîtresse de tout le projet. Dans le cas normal, il permet, comme son nom l'indique, d'ombrer une surface suivant la position du soleil, en déterminant la luminosité de chaque pixel d'un MNS raster et en analysant si un pixel est dans l'ombre d'un autre ou non. Dans le cadre du projet, il va permettre de déterminer si un satellite est visible ou non depuis chaque pixel du MNS.

Pour simplifier grandement la tâche, une séquence de géotraitements a été développée via l'interface ModelBuilder d'ArcGIS 9 qui permet de créer des modèles, eux-mêmes

■■■





**Figure 6. Séquence de géotraitements ModelBuilder employée pour analyser la visibilité satellitaire.**

■ ■ ■ contenant plusieurs géotraitements (cf. figure 6). Son principal avantage est de pouvoir combiner et enchaîner les géotraitements les uns à la suite des autres de manière automatique. Enfin, grâce à cet outil, aucune programmation ArcObjects n'a été réalisée pour le projet.

Le modèle développé pour analyser la visibilité, qui est la troisième composante du prototype, comprend donc plusieurs géotraitements, à commencer par une petite série préliminaire permettant de tenir compte de la hauteur d'antenne du récepteur GPS/GNSS. L'idée est de surélever le MNS généré au préalable de la hauteur d'antenne spécifiée. Mais cette surélévation n'est que locale, aux endroits souhaités par l'utilisateur, celui-ci devant les matérialiser sous forme d'entités ponctuelles, linéaires ou surfaciques.

S'ensuit les géotraitements de visibilité avec d'abord le traitement d'ombrage par rapport au MNS localement surélevé et à un satellite a priori visible, dont les coordonnées entrées sont l'élévation et l'azimut calculées dans le fichier XLS. Ensuite l'image résultante est reclassifiée selon deux classes pour simplifier l'image (zones où le satellite est visible, zones où il ne l'est pas). Ces deux traitements sont à répéter autant de fois qu'il y a de satellites potentiellement visibles. Les images classifiées obtenues sont finalement additionnées entre elles pour avoir le raster de visi-

bilité. Au final, à l'aide d'une mise en page adéquate, on a alors la carte de visibilité satellitaire prévisionnelle, valable à une heure et une date données (cf. figure 7) et qui indique le nombre de satellites visibles depuis chaque pixel du MNS.

Pour résumer, le prototype qui a été conçu comporte trois composantes :

- un fichier XLS qui permet de calculer les coordonnées topocentriques de tous les satellites d'une constellation et d'en déduire les satellites a priori visibles ;
- un MNS au format raster couvrant la zone d'études, accompagné d'un fichier d'entités des lieux à analyser ;
- un modèle de géotraitements réalisant les analyses de visibilité par rapport au MNS et aboutissant à la carte de visibilité.

## Tests de validation

C'est une partie très importante car elle permet de valider le prototype, ses composantes et ses prévisions. Le principe des tests est le suivant : confronter les prévisions du prototype à des observations réelles faites sur le terrain. Ainsi, des observations sont effectuées sur les deux zones tests, des points étant levés et le Nombre de Satellites Visibles (NSV) noté. Ensuite, on réalise pour chacun des points levés une prévision grâce au prototype en intégrant les paramètres de date, d'heure et de lieu du levé. Enfin, on compare les observations et les prévisions au niveau du NSV.

Au terme de trois séries de tests, les résultats ont été les suivants (sur 57 points levés) :

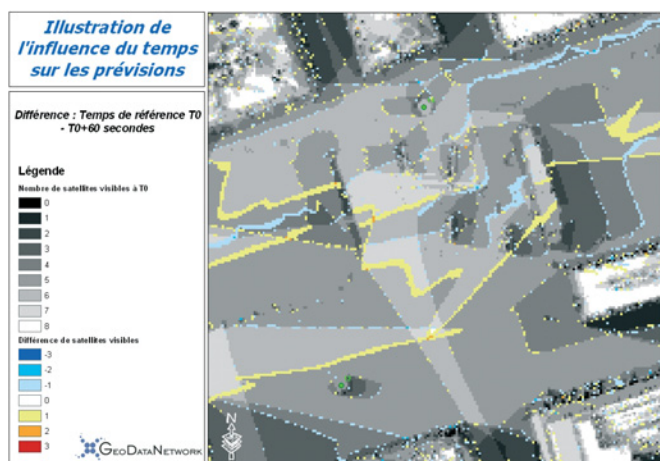
- 42 points où il y a concordance entre les observations et prévisions → 74 % du total,
- 8 points où il y a discordance → 14 %.

Le reste des points (12 %) sont des prévisions incertaines (points levés situés sur une limite entre deux valeurs de NSV sur la carte de visibilité). D'autre part, il est intéressant de noter que le prototype sous-estime toujours le NSV dans le cas de prévisions fausses ou incertaines ; ce qui est sécurisant.

Outre les résultats intrinsèques, ces tests ont permis de mettre en évidence les lacunes du prototype et même plus généralement de la prévision de visibilité satellitaire. En effet, suivant sa densité et son type de feuillage, voire d'autres paramètres, un signal de satellite peut traverser ou non la canopée d'un arbre. La grande majorité des fausses prévisions des tests est d'ailleurs due à des arbres n'ayant pas joué un rôle de masque à cause d'un feuillage transparent vis-à-vis des signaux des satellites. Le comportement de la végétation est donc un paramètre difficile à appréhender, et les tests montrent qu'il y aurait avantage à considérer des MNS fonctions des saisons pour obtenir de bonnes prévisions. On supprimerait de ce fait les arbres à feuilles caduques du MNS pour l'hiver, la fin de l'automne et le début du printemps ; et pour le reste de l'année, on ôterait seulement les arbres à feuillage non dense. C'est une idée



**Figure 7. Carte de visibilité satellitaire analysant les points symbolisés par les points jaunes.**



**Figure 8.** Durée de validité d'une prévision. En niveau de gris : prévision réalisée à une date de référence. En couleur : différence avec une prévision effectuée 60 secondes plus tard (pixel de 50 cm).

qui n'a pas été expérimentée lors du projet mais elle pourrait améliorer nettement les résultats.

Ensuite les tests montrent également la faiblesse du prototype à distinguer les satellites à signal faible, non pris en compte par les récepteurs GNSS dans les calculs de positionnement, des satellites à signal normal. Ce qui est assez handicapant mais difficilement modélisable dans le prototype. On peut aussi constater que le prototype ne prend pas en compte le phénomène de multitrajet, ce qui a peut-être engendré quelques fausses prévisions lors des tests.

Malgré ces points négatifs, les résultats sont tout de même très satisfaisants et permettent de valider le prototype réalisé.

Un bilan des erreurs et des études complémentaires ont conduit aussi à des conclusions intéressantes quant au fonctionnement du prototype :

- ancienneté de l'almanach à employer ;
- précision que l'on peut accorder aux différents paramètres d'entrée ;
- confirmation que l'usage d'almanachs, et non d'éphémérides, est suffisant ;
- répétabilité d'une prévision sur les jours suivants (chaque jour 4 minutes plus tôt) ;
- durée de validité d'une prévision.

Cette dernière information est d'ailleurs très importante car elle va conditionner l'avenir que l'on peut envisager pour ce projet. Les tests effectués montrent ainsi qu'une prévision du prototype ne peut guère être valable plus d'une minute, à cause de la rapidité de mouvement des satellites dans le ciel. Comme on peut le voir sur la figure 8, à partir de 60 secondes, le déplacement au sol des ombres des satellites est assez significatif : 1 m à 1 m 50 en moyenne, voire plus à certains endroits. Dès lors, si l'on veut prévoir la visibilité sur une période de temps, il va falloir de nombreux traitements assez longs à réaliser.

Exemple numérique : sur une demi-journée de 4 heures, avec des prévisions toutes les 2 minutes, cela représente 120 prévisions ; sachant qu'une seule prévision avec le prototype met environ 2 mn 15 s avec une assez puissante station de travail, une éventuelle application automatisant toutes les phases du prototype pourrait mettre au mieux 4 h 30 mn pour réaliser l'ensemble des prévisions. Nous tenons là le facteur le plus limitant de la prévision de visibilité satellitaire avec le prototype développé.

## Perspectives

Le dernier objectif du projet fut d'anticiper l'avenir, à la vue des divers tests et études menés, d'une éventuelle application finale qui serait développée pour des clients. Dans un premier temps, on s'est penché sur les produits envisageables pour l'application. Pour l'instant, le prototype fournit une carte de visibilité fixe qui indique le nombre de satellites visibles à une date et une heure précise. Ce type de carte est assez limité dans l'usage qu'on peut en faire et ce d'autant plus que la prévision est plutôt éphémère. En effet, un géomètre ne va pas utiliser ce prototype pour connaître la visibilité satellitaire à un moment exact mais plutôt sur une plage horaire comme une matinée ou une après-midi. L'idéal serait même que le prototype détermine le meilleur moment pour avoir une visibilité optimale. Dès lors, d'autres types de cartes doivent être créés pour répondre aux besoins réels des utilisateurs potentiels de l'application finale.

On peut ainsi réaliser d'abord une carte dynamique de visibilité qui permet d'avoir l'évolution de la visibilité des satellites sur une plage horaire, à raison d'une certaine fréquence d'analyse. C'est ici à l'utilisateur d'analyser lui-même les horaires et lieux optimaux. D'où l'autre type de carte qui présente un début d'analyse : une carte de visibilité minimale/maximale qui donnerait alors la pire ou la meilleure visibilité que l'on puisse avoir sur une période de temps. Une carte des horaires auxquels cette pire/meilleure visibilité survient peut être aussi associée. Des prototypes de ces nouveaux genres de cartes ont été réalisés durant le projet et d'autres sont aussi possibles.

Dans un deuxième temps, ce sont les perspectives de développement de l'application qui ont retenu l'attention. Les domaines qui pourraient être déjà intéressés sont évidemment la topographie (levés, implantations...) mais aussi les transports pour qui l'information de la visibilité satellitaire est de plus en plus importante. Quelques exemples d'applications : gestion des passages à niveaux, guidage de véhicules, gestion de réseaux routiers en fonction des transports collectifs, etc.

Quant au contexte d'utilisation, il est à l'heure actuelle difficilement envisageable de commercialiser un tel produit à des entreprises privées comme des bureaux de géomètres à cause des temps de traitement trop longs. Un géomètre ne peut pas attendre quelques heures pour

- ■ ■ avoir une prévision sur une demi-journée. On pourrait penser alors à la création d'un service web prévoyant la visibilité sur l'ensemble du Canton de Genève mais finalement, la perspective d'emploi la plus plausible serait plutôt comme outil d'aide à la décision dans des projets importants et de ce fait, il serait plutôt diffusé pour des bureaux d'études de grosses entreprises ou des institutions publiques. De la même manière que l'on réalise des études d'impacts sur l'environnement ou sur le paysage, des études d'ensoleillement ou des sondages géologiques pour un projet de construction, on pourrait faire ainsi des études de visibilité satellitaire en vue d'avoir la meilleure sécurité.

## Conclusion

Cette étude pour la réalisation de cartes de visibilité satellitaire a permis de répondre à de nombreuses interrogations que pouvait soulever le projet, en premier lieu sur sa pertinence. La problématique posée et le recensement des études et logiciels existants qui traitaient du sujet ont ainsi confirmé le bien-fondé de ce projet qui répond à un problème actuel. C'est d'autant plus certain que les diverses questions qu'a suscitées le projet lors des quelques présentations publiques montrent tout l'intérêt que portent les utilisateurs potentiels à ce genre de projet. Et pour répondre à la question qui revenait le plus souvent, ce projet de carte de visibilité est toujours d'actualité même avec l'intégration des diverses constellations GPS, GLONASS et bientôt Galileo. Certes, la visibilité sera meilleure et il sera bien plus aisé d'effectuer des mesures en milieux très masqués, mais il restera toujours des endroits où la visibilité sera difficilement appréhendable. Et cette application permettrait aussi d'avoir l'assurance d'obtenir une bonne visibilité en toutes circonstances.

Ensuite, la conception du prototype a montré que le projet était réalisable puisque celui-là arrive à générer des cartes de visibilité, objectif principal du projet. Puis des séries de tests pour le valider ont été menées avec des résultats satisfaisants : 74 % de bonnes prévisions contre 14 % de fausses, le reste étant des prévisions incertaines ; ils témoignent de la pérennité du projet. Cependant, les études complémentaires du prototype ont également mis en évidence des informations sur son fonctionnement, ses sources d'erreurs et ses limites. On voit à travers elles que le projet mériterait d'autres études complémentaires pour améliorer le prototype et ses prévisions. Elles montrent aussi que des progrès informatiques sont plus que nécessaires pour diminuer de façon significative les temps de traitements.

Enfin, des pistes ont été apportées pour l'avenir du projet : ses produits potentiels et ses perspectives. Si ces dernières paraissent assez limitées pour l'instant vis-à-vis de son contexte d'utilisation, elles pourraient s'élargir quand les performances informatiques auront augmenté et si d'autres études sont menées. ●

## Contacts

**Guillaume BIZOUARD**

guillaume.bizouard@gmail.com

GeoDataNetwork SA

www.geodatanetwork.ch

info@geodatanetwork.ch

Direction Cantonale de la Mensuration Officielle de Genève

Tél. : +41 (0)22 327 45 61

dcmo@etat.ge.ch

## Références

**ARINC Engineering Services [2004]**, *Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces* – Interface Control Document.

**CARTSTENSEN L. & GERMROTH M. [2005]**, *GIS and Satellite Visibility: viewsheds from space* ; ESRI International User Conference, San Diego (USA), 25-29 juillet 2005.

**CHEVALIER P.A. [2002]**, *Une introduction didactique à la géométrie du GPS: 3ème partie – Fondements mathématiques du positionnement par GPS*, Haute Ecole Technique et Informatique de Bienne.

**GACHET G. [2005]**, *Etude comparative de différentes méthodes d'interpolation pour générer des Modèles Numériques d'Altitude raster à partir de points bruts LiDAR*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – Laboratoire des SIG.

**Navigation Center@ [2006]**, *US Coast Guard – Navigation Center*.

URL : <http://www.navcen.uscg.gov/>

**SMITH S.L. et al. [2003]**, *The effect of changing Grid size in the creation of laser scanner digital surface models* ; Geocomputation '03, University of Southampton, 8-10 septembre 2003.

**TIRTAINE T. & MARAIS J. [2005]**, *Validation expérimentale du logiciel de lancer de rayons Ergospace et estimation de la précision du MNE requise pour son utilisation* ; XYZ n°102, Association Française de Topographie, p.50 à 54/82.

## ABSTRACT

**Keywords:** visibility, satellite, GNSS, geoprocessing, LiDAR

*Nowadays, satellite-positioning technologies have a rapid development but they are still limited by low penetration factors that are weakening the strength of the signal received in "shadowed" places, like dense urban areas. However, airborne laser technologies foresee a new kind of applications to forecast satellite visibility by the modelling of masks in 3D with a Digital Elevation Model. Coupled to spatial analysis software, it could be possible to imagine the conception of an application, which could generate estimated maps of satellite visibility. This is the aim of this project: to create a prototype, to verify it, to analyse it, and to imagine its outlooks.*



# Le Wi-Fi pour le positionnement et la navigation en intérieur

■ Arnaud BÉTRÉMIEUX

*Cet article présente les recherches menées à l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal sur le positionnement d'un appareil Wi-Fi à l'intérieur des bâtiments. On utilise la technique dite du "RF fingerprinting", qui consiste à relever les caractéristiques (fingerprint) des signaux aux différents endroits du bâtiment lors d'une phase de calibration, puis à les enregistrer dans une base de données qui permettra par la suite d'associer caractéristiques du signal et lieu. Une nouvelle approche du RF fingerprinting est introduite, fondée sur l'utilisation de "stations de scan" Linux, approche qui permet la localisation de tout appareil Wi-Fi sans l'utilisation d'un logiciel particulier sur l'appareil, et avec une latence très faible.*

## ■ mots-clés

Wi-Fi, 802.11, positionnement en intérieur, "RF Fingerprinting", Réseaux de neurones artificiels, Modèles de Markov à états cachés

**L**es systèmes GNSS (navigation par satellite) sont de plus en plus efficaces et précis, mais ils ne peuvent malheureusement pas fonctionner en intérieur : les structures des bâtiments font obstacle à la propagation des ondes provenant des satellites, et les faibles signaux qui parviendraient tout de même jusqu'au récepteur seraient difficiles à distinguer du bruit électromagnétique créé par les appareils électroniques environnants. Par ailleurs, la grande quantité d'obstacles de formes et de natures diverses rend la propagation des ondes dans les bâtiments très complexe (effets multi-trajet très importants) ; l'utilisation de tout système de positionnement radio en intérieur est donc difficile et de nombreuses recherches sont en cours dans ce domaine.

Les quelques systèmes radio existant sur le marché et spécifiquement conçus pour un usage en intérieur sont généralement onéreux ou peu précis et peu réactifs. Les systèmes utilisant des lasers sont, quant à eux, limités à une seule pièce, les ondes lumineuses ne pouvant traverser les murs.

Si les applications du positionnement en intérieur ne sont pas toujours évidentes, elles sont pourtant nombreuses. Dans le domaine de la robotique par exemple, la capacité d'un robot à se repérer est indispensable à son autonomie. Pour une entreprise, il peut également être très intéressant de localiser des personnes ou du matériel. Le Wi-Fi, qui a été conçu pour permettre un accès par radio aux réseaux informatiques, est une technologie éprouvée, et pourrait bien être la solution la plus intéressante pour ce type d'applications :

- Le Wi-Fi a été conçu spécifiquement pour une utilisation en intérieur ; Les infrastructures Wi-Fi sont déjà présentes dans la plupart des bâtiments, et le matériel lui-même est très répandu et peu onéreux.
- Le fait d'utiliser pour le positionnement le même composant que pour la communication permet de réduire les coûts.

C'est pour toutes ces raisons que le Wi-Fi a attiré l'attention des chercheurs du laboratoire LACIME, de l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal,

qui travaillent sur le projet WINS (Wireless Indoor Navigation System), de positionnement et de navigation en intérieur.

## Le principe du positionnement par Wi-Fi

Une installation Wi-Fi classique (Figure 1) comprend généralement un ou plusieurs clients, appareils souvent mobiles qui souhaitent accéder au réseau (ordinateurs portables ou de poche par exemple), et un ou plusieurs points d'accès fixes, appareils qui font l'interface entre les clients et le réseau.

Lorsqu'en un endroit, plusieurs points d'accès peuvent être utilisés pour accéder à un même réseau, c'est l'appareil client qui doit décider sur lequel il souhaite se connecter. Pour cette raison, la norme 802.11, qui définit les standards pour les réseaux sans fils, impose que les appareils Wi-Fi soient capables d'indiquer la puissance du signal qu'ils reçoivent d'un point d'accès ou d'un autre appareil. Ainsi, le

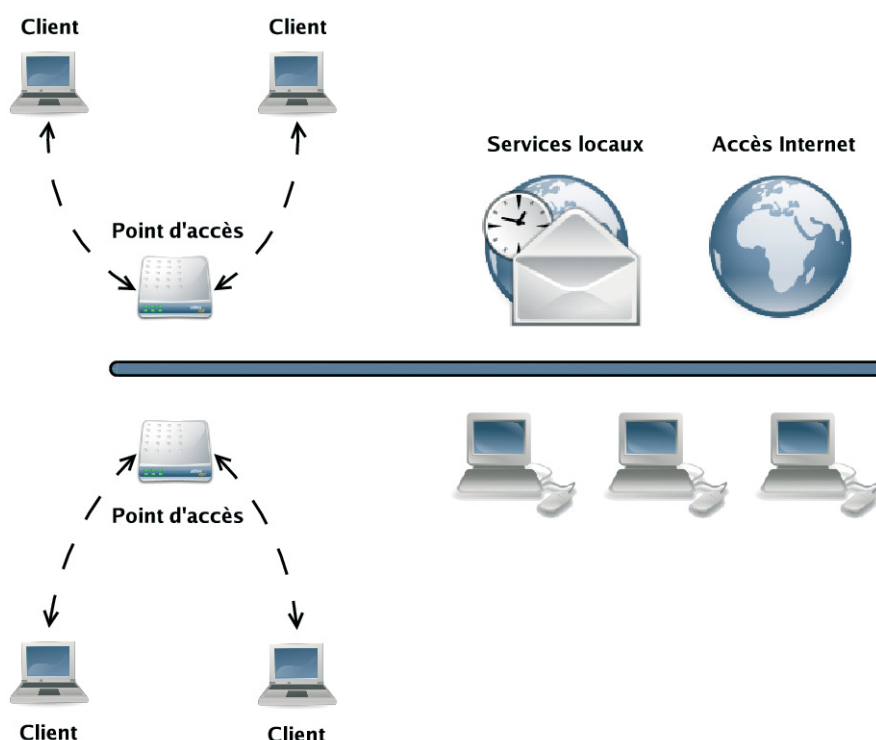


Figure 1. Topologie d'un réseau classique

- client peut sélectionner le point d'accès avec lequel la liaison radio fréquence sera la meilleure.

## ■ La méthode "Signature"

Si suffisamment de points d'accès sont disponibles dans un bâtiment, un appareil client peut calculer sa propre position de la position des points d'accès et des puissances du signal qu'il reçoit de chacun d'entre eux. Cette méthode (Figure 2) a été baptisée "Signature" dans le cadre du projet WINS, en référence à la "signature" du lieu que forment les puissances des signaux provenant des points d'accès. Elle est déjà utilisée dans des solutions commerciales, notamment celle de la société Ekahau: l'EPE ou Ekahau Positionning Engine. Elle a cependant deux inconvénients principaux:

- Il faut que l'appareil localisé soit équipé d'un logiciel adéquat, puisque c'est lui qui transmet les informations de puissance des signaux (il peut aussi éventuellement faire les calculs si sa capacité de traitement le lui permet) ;
- des points d'accès dont les zones de couverture se recoupent ne peuvent utiliser le même canal radio sans se

perturber. Le mobile doit donc scanner les 14 fréquences disponibles pour le Wi-Fi à la recherche des points d'accès, ce qui introduit une latence d'une à deux secondes dans le positionnement.

C'est pour ces raisons qu'une nouvelle méthode (Figure 3), dénommée "Perimeter", a été conçue par les chercheurs du projet WINS.

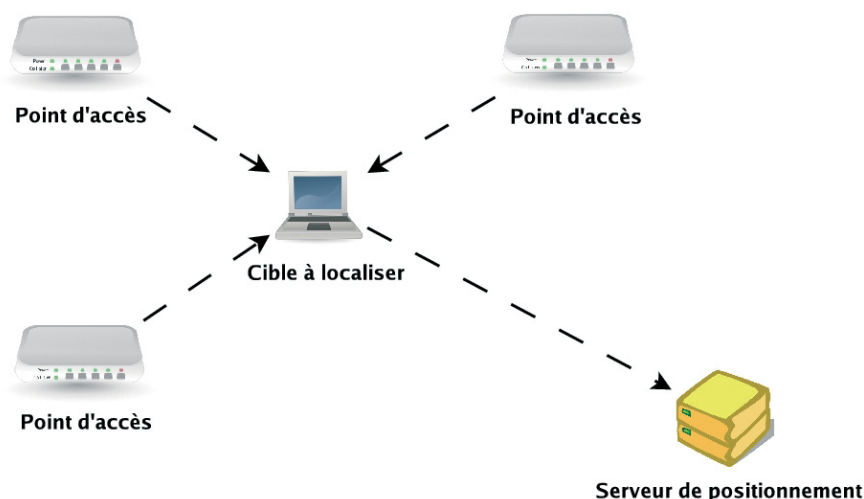


Figure 2. Principe de la méthode "Signature"

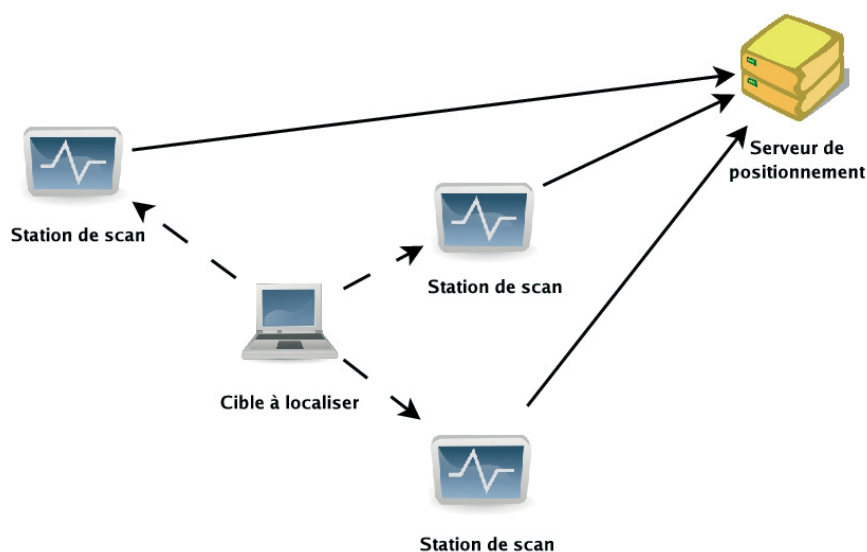
## ■ La méthode "Perimeter"

Cette méthode n'utilise plus les points d'accès, mais se base sur des ordinateurs supplémentaires, appelés "stations de scan". Chacune de ces stations repère les puissances des signaux émis par l'appareil à localiser lors de ses communications réseau. A partir des puissances relevées par plusieurs stations, un serveur de positionnement déduit la position de l'appareil.

Dans cette méthode, il n'y a plus besoin de logiciel sur le dispositif mobile à localiser ; celui-ci devient complètement passif. Par ailleurs, les stations ne faisant que recevoir, elles peuvent toutes opérer à la même fréquence radio que l'appareil à localiser, ce qui évite d'avoir à scanner les canaux et permet d'obtenir des mesures à plus haute cadence et donc d'augmenter la réactivité du système.

Les "stations de scan" s'appuient sur le mode "Monitor" offert par certains pilotes de matériel Wi-Fi du système d'exploitation libre Linux. Dans ce mode, le pilote transmet au système l'ensemble des données reçues, qu'elles soient ou non destinées à l'appareil. De plus, il indique en permanence les caractéristiques du signal. L'inconvénient de la méthode Perimeter est la nécessité d'utiliser des stations de scan. Ces stations peuvent être créées à partir de points d'accès





**Figure 3. Principe de la méthode "Perimeter".**

modifiés et coûteraient sensiblement le même prix (environ 100 €), mais elles viennent s'ajouter à l'infrastructure Wi-Fi existante du bâtiment, un même appareil ne pouvant être à la fois station et point d'accès.

Les méthodes Perimeter et Signature se complètent, car elles ont chacune des avantages et inconvénients différents selon l'application visée. Les chercheurs du LACIME ont donc décidé de développer les deux méthodes dans le cadre du projet WINS. Selon l'application les algorithmes de traitement sont différents ainsi que leurs performances.

## Déduire la position de puissance des signaux

La complexité de la propagation du signal rend plutôt complexe l'utilisation de modèles mathématiques d'où l'utilisation d'une technique dite de Radio Frequency (RF) fingerprinting. Cette technique consiste à relever certaines caractéristiques des signaux (ici la puissance) aux différents endroits du bâtiment lors d'une phase de calibration, puis à les enregistrer dans une base de données qui permettra par la suite d'associer caractéristiques du signal et lieu. Le RF fingerprinting a été développé à l'origine pour localiser les téléphones portables à partir des puissances des signaux transmis entre plusieurs relais

et le téléphone, en particulier pour les appels d'urgence (112 en Europe et 911 en Amérique). Par ailleurs, les variations importantes dans la puissance des signaux à la fois dues au bruit et à la mauvaise qualité des émetteurs rendent trop incertaine l'association directe entre "fingerprint" et la position du mobile. Un système probabiliste s'impose, et on propose ici l'utilisation de l'inférence bayésienne, la plus forte probabilité devant correspondre à la réalité.

### ■ Les automates de Markov à états cachés

Afin d'obtenir une plus grande précision, il est intéressant que le système ne considère pas que le dernier "fingerprint", mais qu'il associe l'ensemble des "fingerprints" relevées jusqu'à l'instant du calcul à l'ensemble de points (trajectoire) correspondant. De cette façon, les erreurs dues à l'imprécision de la mesure et aux variations imprévisibles de la puissance du signal seront compensées par l'obligation d'obtenir une trajectoire probable, à la fois dans l'absolu (continuité) et pour le mobile qui est positionné (sa vitesse maximale, sa probabilité d'être en mouvement, etc.)

Les Modèles de Markov Cachés (MMC) ou automates de Markov à états cachés – en anglais Hidden Markov Models (HMM) –

sont particulièrement adaptés pour modéliser l'association entre "fingerprints" et lieux. Ils permettent une représentation des points de calibration sous la forme d'un réseau nœuds/chemins, tout en associant à chaque chemin une probabilité (celle pour le mobile suivi de passer d'un nœud à un autre) et à chaque nœud ou endroit, les probabilités d'y voir chaque "fingerprint". Un aspect très intéressant des modèles de Markov est que des données ou mesures externes provenant d'autres systèmes de positionnement, ou de capteurs, même simplistes (accéléromètres par exemple) peuvent être prises en compte dans les probabilités pour refléter encore mieux la réalité. Une fois le modèle défini, l'algorithme de Viterbi permet de trouver la séquence la plus probable d'états cachés (trajectoire) ayant conduit à la génération d'une séquence de sortie donnée (fingerprints).

La difficulté principale est ici la complexité (donc la taille des matrices de définition) d'un modèle de Markov qui intégrerait à la fois tous les points du bâtiment nécessaires à un positionnement précis, et pour chaque point, l'ensemble des "fingerprints" probables. Un tel modèle rendrait le traitement par l'algorithme de Viterbi bien trop long. Une solution est de créer un modèle dynamique, dont les matrices de définition sont mises à jour en temps réel en fonction des "fingerprints" observées, de façon à obtenir un bon compromis entre précision du positionnement et temps de traitement.

Selon le mobile qui va être suivi, définir les probabilités du modèle de Markov peut être difficile. On obtient de meilleurs résultats en ne considérant que la dernière "fingerprint" plutôt qu'en tentant d'obtenir une trajectoire cohérente pour une série de "fingerprints" à partir d'un modèle mal défini.

### ■ Interpolation

Le système ainsi conçu ne pouvant positionner un mobile que sur un point auquel il a préalablement été calibré, il faudrait, pour obtenir une bonne granularité, calibrer un nombre important de points, ce qui serait trop fastidieux. Pour résoudre ce problème, on peut utiliser

■■■

■■■ un système d'interpolation pour déduire une carte de référence dense d'un jeu de points de calibration plus espacés. Ne pouvant pas associer de fonctions mathématiques à la répartition des puissances des signaux, il faut une technique d'interpolation susceptible d'interpoler tout type de distribution.

La méthode choisie se base sur des réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks ou ANN). On peut ainsi créer un programme qui "apprend", s'améliorant avec chaque nouveau point de calibration qui serait ensuite capable de prédire par interpolation les puissances des signaux qui seront rencontrées en n'importe quel point. Pour que l'interpolation fonctionne correctement, il faut que les points de calibration soient assez rapprochés dans les zones où les variations de signal sont importantes (en raison de nombreux meubles, objets ou recoins) mais ils peuvent être plus espacés dans les zones telles que les couloirs ou les pièces relativement dégagées.

## Résultats et conclusions

Le système WINS développé à l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal permet de localiser un nombre important d'appareils Wi-Fi. La latence est inférieure à la seconde, et l'erreur est inférieure à un mètre en statique, et à quelques mètres en dynamique, selon la structure, l'aménagement et la fréquentation des locaux. Ces résultats sont d'autant plus encourageants qu'ils ont été obtenus dans un des bâtiments de l'ETS, ancienne brasserie industrielle dont la structure est particulièrement néfaste à ce genre d'expériences, et qui abrite des laboratoires d'électronique et d'informatique, donc un nombre bien supérieur à la normale d'appareils électroniques susceptibles de perturber les liaisons radio. ●

## Contact

### Arnaud BÉTRÉMIEUX

Recherches au laboratoire LACIME de l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal, dans le cadre du projet WINS (Wireless Indoor Location System)  
arnaud.betremieux@arnoo.net

### René Jr. LANDRY

Professeur au laboratoire LACIME associé au département de génie électrique et instigateur du projet WINS  
rlandry@ele.etsmtl.ca

## Références

### Cisco wireless location appliance

<http://www.cisco.com/en/US/products/ps6386/products/datasheet0900aecd80293728.html>

### EkaHau Positioning Engine

<http://www.ekahau.com/?id=4500>

### Yi-Chao Chen, Ji-Rung Chiang, Hao hua Chu, Polly Huang, and Arvin Wen Tsui.

*Sensor assisted Wi-Fi indoor location system for adapting to environmental dynamics.* National Taiwan University, 2005. <http://mll.csie.ntu.edu.tw/papers/MSWiM05.pdf>

### Andreas Haeberlen, Eliot Flannery, Andrew M. Ladd, Algis Rudys, Dan S. Wallach, and Lydia E. Kavraki.

*Practical robust localization over large-scale 802.11 wireless networks.* Rice University, 2004. <http://www.cs.rice.edu/~ahae/papers/mobicom2004.pdf>

### John Krumm and Eric Horvitz.

*Locadio: Inferring motion and location from Wi-Fi signal strengths.* Microsoft Research, Microsoft Corporation, Août 2004. [http://research.microsoft.com/\\_horvitz/locadio.pdf](http://research.microsoft.com/_horvitz/locadio.pdf)

### John Krumm and John Platt.

*802.11 + regression = location.* Microsoft Research, 2003. <http://research.microsoft.com/workshops/MLUI03/platt-poster.pdf>

### Chahé Nerguizian, Charles Despins, and Sofiène Affes.

*A framework for indoor geolocation using an intelligent system.* INRS-Télécommunications, 2001.

### M. Ocaña, L. M. Bergasa, M.A. Sotelo, J. Nuevo, and R. Flores.

*Indoor robot localization system using WiFi signal measure and minimizing calibration effort.* Universidad de Alcalá. Departamento de Electrónica. Madrid. Spain, 2005.

**Julia Letchner** (University of Washington), **Dieter Fox** (University of

Washington), and **Anthony LaMarca** (Intel Research Seattle). *Large-scale localization from wireless signal strength.* University of Washington, 2005. <http://www.cs.washington.edu/homes/lechner/Papers/wifi-location.pdf>

## ABSTRACT

**Keywords:** Wi-Fi, 802.11, indoor geolocation, RF Fingerprinting, Artificial Neural Networks, Hidden Markov Models

*This article outlines our work and our findings in the development of an indoor positioning system based on Wi-Fi: the Wireless Indoor Navigation System (WINS). The author introduces a novel approach to RF fingerprinting based on the use of Linux scanning stations, which allows the location of any Wi-Fi device without the need for dedicated software on the client side, with a very low latency. The positioning algorithm is based on probabilities, and the fingerprint to location relation is considered in the context of a hidden Markov model, in which the reference locations are the possible system states and the fingerprints the resulting observations. To determine the most probable position, the WINS system uses either the Viterbi algorithm with the whole history of recorded fingerprints or a naive Bayes classifier with only the last one, depending on the situation and user preference. To reduce the time needed for calibration, we interpolate between spaced (5 m) calibrated points with an RBF (Radial Basis Function) based artificial neural network, which generates a fine grid (1 m or less) of reference locations. Our system can provide meter-class accuracy for a device which has been static for a few seconds, and can position a moving device within a few meters. Latency is under one second.*