Estimation de positions dans des réseaux sans-fil hybrides

Erwan Ermel[1,2], Anne Fladenmuller[2], Guy Pujolle[2], André Cotton[1]

[1] *Thales Communications*
BGCOM/TCF/TSS/TAI
Gennevilliers, France
{erwan.ermel, andre.cotton}@fr.thalesgroup.com

[2] *Laboratoire Informatique de Paris 6*
Université de Pierre et Marie Curie
Paris, France
{erwan.ermel, anne.fladenmuller, guy.pujolle}@lip6.fr

RÉSUMÉ. *Cet article adresse le problème de la localisation de nœuds pour des protocoles de routage géographique dans les réseaux adhoc sans fil. Un réseau basé seulement sur des nœuds auto localisés, comme des nœuds possédant un GPS (Global Positioning System), conviendrait pour un tel usage. Néanmoins, pour des raisons pratiques telles que des contraintes de coût et d'énergie, seulement une petite partie des nœuds d'un tel réseau pourra être des nœuds auto localisés. Déterminer la position physique d'un nœud est une tâche difficile. Nous proposons dans cet article une solution simple pour employer des protocoles de routage géographique même si une grande majorité des nœuds ne sont pas pourvus nativement de capacité de localisation. Ceci exige d'inférer une information de position aux nœuds qui ne sont pas dotés de systèmes d'auto localisation comme le GPS. Nous présentons une solution réaliste et simple pour estimer une position et évaluer sa précision.*

ABSTRACT. *This paper addresses the problem of nodes localization for geographical routing protocols in wireless ad hoc networks. A network based only on self-locating nodes, like GPS-compliant nodes (Global Positioning System), would be suitable for such a use. Nevertheless, for practical reasons such as cost and power constraints, only few nodes will be embedded with self-locating chips. Determining the physical location of a node is a challenging task. In this article we propose a solution to use such geographical routing protocols whether or not nodes have self-locating position capabilities. This requires to infer a position information to nodes which don't have GPS type equipments. We present a realistic and simple solution to estimate a position and an evaluation of its accuracy.*

MOTS-CLÉS : *réseau adhoc, localisation, position, réseau sans-fil*

KEYWORDS: *ad hoc network, localization, positioning, wireless network, self-locating.*

1. Introduction

Avec l'émergence des dispositifs sans fil, de multiples recherches ont été faites dans des communications mobiles et sans fil. Ces nouvelles recherches se concentrent en particulier sur les façons d'employer et de traiter simultanément tous ces dispositifs hétérogènes afin de les organiser en réseaux. De tels réseaux n'exigeant aucune configuration ni d'infrastructure préétablie sont appelés réseaux adhoc. Pour rendre ces réseaux autonomes, chaque nœud doit collaborer avec ses voisins pour échanger des informations. Ainsi les nœuds peuvent être à la fois routeur et nœuds d'extrémité.

En raison de la mobilité des nœuds, la topologie d'un réseau adhoc est susceptible de fréquents changements. Router dans de telles conditions devient une tâche complexe. De plus le passage à l'échelle dans les réseaux adhoc semble être une question préoccupante quand le nombre de nœuds mobiles augmente. Chaque nœud mobile joignant un réseau adhoc garde son adresse IP attribuée par son réseau mère, afin de maintenir la communication, et de rester compatible avec les applications existantes. De plus l'adresse IP reste un moyen d'identifier un nœud. Ainsi l'adresse IP ne reflétera plus l'appartenance d'un nœud à un réseau déterminé.

Des protocoles de routage basés sur la topologie sont proposés pour de tels réseaux mais il semble intéressant de regarder des solutions alternatives afin d'améliorer le routage et le passage à l'échelle.

En parallèle au développement des algorithmes de routage adhoc, de nouveaux protocoles de routage sont développés pour faciliter un routage à grande échelle : les protocoles de routage géographique en sont un exemple. La métrique de routage est ici la plus courte distance entre le prochain noeud et la destination. On route donc l'information "au plus près" et en "direction" de la destination. Il semble intéressant d'étudier cette approche combinée à d'autres des protocoles de routage.

Néanmoins, la plupart des propositions utilisant un routage géographique, supposent que des réseaux adhoc se composent de nœuds homogènes (nœuds possédant un GPS pour GPSR [KAR 00] ou de nœuds simples pour GPSfree [CAP 02]).

Nous proposons d'étudier un protocole de routage géographique dans une topologie en gruyère dans laquelle les nœuds simples (nœud ne possédant pas de capacité native de localisation) composent les trous, alors que les nœuds auto localisés occupent la partie restante. Dans cet article, nous prolongeons les travaux de [JAI 01, KAR 00] qui permettent un routage géographique, en fournissant une estimation de position aux nœuds simples.

Nous présentons d'abord un bref état de l'art des méthodes d'évaluation de positions existantes. Dans la section 4, nous présentons deux manières d'approximer la position d'un nœud. La section 5 traite de plusieurs techniques d'estimation de la précision d'une position approximée, suivie dans la section 6 de la présentation de notre environnement de simulation et de nos résultats. La section 7 conclut le papier.

2. Etat de l'art

Pour répondre à la question "Où suis-je ?" il faut des éléments indispensables tels que des nœuds voisins connaissant leur position réelle ou estimée, un processus de communication pour partager ces informations de position et des algorithmes pour estimer ma position en fonction des informations récoltées.

La plupart des procédés employés pour déterminer une position sont basés sur des calculs géométriques comme la triangulation (en mesurant des angles par rapport à des points fixes ou des nœuds connaissant leur position) et la trilatération (en mesurant la distance entre les nœuds). Pour connaître la distance entre deux nœuds, plusieurs techniques peuvent être utilisées, comme la synchronisation, la puissance de signal reçu, les caractéristiques physiques de l'onde porteuse. D'autres approches, comme les caractéristiques du signal radio reçu et l'angle de l'arrivée peuvent également être appliquées pour le calcul de position. Nous présentons ici certaines de ces méthodes.

2.1. *Timing*

La distance entre les nœuds peut être évaluée à partir du temps de propagation d'un signal ou d'un paquet. Deux approches principales peuvent être définies pour ces méthodes : l'heure d'arrivée et la différence de temps de l'arrivée.

2.1.1. *Heure d'arrivée - Time of Arrival (TOA)*

Quand des nœuds sont synchronisés, un seul paquet aller-simple est nécessaire (si l'environnement radio n'est pas trop perturbé) pour connaître le temps de propagation et estimer la distance entre les nœuds. Le système GPS emploie cette méthode pour fournir des informations de position aux utilisateurs [gps97]. Toutefois, si des nœuds ne sont pas synchronisés, deux paquets doivent être utilisés pour estimer le temps aller-retour du signal entre les nœuds. Pin-Point's Local Positioning System (LPS) [WER 98], les radars civils et militaires ou la proposition GPS-free [CAP 02] utilisent cette approche.

Comme nous voulons employer n'importe quel type d'équipements pour effectuer un routage géographique de bout en bout, l'hypothèse de synchronisation des nœuds semble trop forte ou trop contraignante. Aussi, nous ne considérons pas cette solution pour notre algorithme d'évaluation de position.

2.1.2. *Différence de Temps d'Arrivée - Time Difference of Arrival (TDOA)*

Une deuxième approche consiste à évaluer la différence des temps d'arrivée de deux différents signaux. Ces signaux peuvent provenir de deux nœuds de référence distincts ou peuvent être de natures différentes, comme les *ultrasons* et les signaux, *radio* qui peuvent être émis par une même source. Plusieurs articles traitent de cette thématique comme dans [SAV 01b] ou dans l'approche *Active Bat* [WAR 97].

Néanmoins, les ultrasons ne peuvent être utilisés qu'à l'intérieur d'un bâtiment : une pièce, un hall, en raison de leurs limitations physiques comme le rayon de propagation réduit, le faible pouvoir pénétrateur des obstacles et la faible résistance aux interférences provenant d'autres sources d'ultrasons. Ceci limite grandement le cadre d'utilisation d'une telle technologie.

2.2. *Direction - Angle d'Arrivée (AoA)*

Une autre méthode de positionnement consiste à déterminer l'angle d'arrivée (AoA) de tous les signaux reçus de chaque nœud du voisinage [NIC 03]. La position peut être alors estimée par triangulation. Cette technique, appelée VOR (VHF Omni-directional Range) est largement répandue pour la navigation aérienne et permet aux avions de déterminer leur direction. L'AoA est également employée dans tous les systèmes de radar et GSM.

2.3. *Puissance du signal*

Une autre manière d'estimer une position est de baser le calcul sur la caractéristique physique du canal radio : l'indicateur de puissance du signal reçu (RSSI). Dès que la distance entre deux nœuds augmente, l'atténuation de signal est d'autant plus importante c-à-d. que le RSSI diminue. Un certain nombre de travaux permettent d'estimer la puissance moyenne d'un signal pour une distance donnée, aussi bien que la variabilité du signal. Cette approche est détaillée dans [SAV 01a, BEU 99] et dans la proposition RADAR [BAH 00].

Dans un environnement bruité avec un grand nombre d'interférences, il est difficile d'employer une telle information. Nous ne considérerons donc pas cette approche.

2.4. *Motif de signaux*

Des cartes de la puissance de signal reçu peuvent être employées pour déterminer la distance entre les nœuds. Elles sont obtenues par des mesures sur le terrain ou par la mise en œuvre de modèles théoriques. Pour une position donnée, une signature de signal unique est obtenue, qui est la résultante des multiples trajets suivis par les composantes d'un signal qui se superposent au niveau du récepteur. Ces signatures sont stockées dans une base de données sur un serveur ou dans les nœuds. RADAR [BAH 00] utilise cette approche.

La génération de cette base de données est très contraignante et demande de parcourir le terrain pour en effectuer de multiples mesures. Cette solution n'est donc absolument pas appropriée et utilisable pour un réseau sans fil adhoc.

2.5. *Les autres approches*

2.5.1. *Active Badges [WAN 00]*

Cette approche a été celle choisie pour les premiers systèmes de localisation d'intérieur. Des badges *infrarouge* (IR) avec un numéro d'indentification unique (ID-Tag), sont portés par les personnes travaillant dans les locaux. Des capteurs IR muraux relaient les ID-Tag à un serveur qui calcule les positions de tous les badges détectés.

2.5.2. *Approche Convexe*

Doherty et a.l. décrivent dans [DOH 01] une manière d'estimer une position d'un nœud donné en ne considérant que la connectivité des nœuds. Tous les nœuds doivent communiquer leur information de connectivité à un ordinateur central qui résout le problème d'optimisation et estime alors la position de chaque nœud. Le calcul centralisé n'est pas approprié aux réseaux adhoc.

2.5.3. *Solutions géométriques pures*

La position est obtenue avec plus ou moins d'exactitude à partir des autres nœuds qui connaissent déjà leur position et l'ont annoncée au voisinage. L'exactitude de cette solution dépend de la configuration géométrique.

2.5.4. *Approche triviale*

Bulusu et a.l. [BUL 00] basent leur approche d'évaluation de position sur la connectivité des nœuds. Ils utilisent les balises fixes comme points de référence pour déterminer des positions relatives. Mais au contraire de [DOH 01], l'évaluation est calculée pour chaque nœud en employant un barycentre simple.

Nous avons retenu cette approche pour sa simplicité et nous allons nous en inspirer.

3. Processus de localisation

Comme indiqué dans la section précédente, plusieurs propositions d'estimation de position ont déjà été étudiées. Nous avons basé nos travaux sur [BUL 00], [DOH 01]. Nous considérons la connectivité entre les nœuds comme la clef pour calculée la position d'un nœud. Dans cette approche, la position est uniquement estimée localement. Nous introduisons par ailleurs une métrique simple C_{acc} qui correspond à l'estimation de la précision d'une position estimée.

Au lieu d'employer une solution de positionnement coûteuse comme le GPS, nous considérons un réseau hétérogène où seulement quelques nœuds sont auto localisés. Les autres nœuds doivent alors estimer leur position.

Trois étapes distinctes, mais connexes, sont nécessaires pour évaluer la position d'un nœud :

1) Acquisition des positions des nœuds voisins,

2) Un algorithme d'estimation de position qui calcule la position du nœud,

3) Une estimation de la précision de la position précédemment calculée.

Nous focalisons toute notre attention sur les algorithmes de calcul de position et d'estimation de la précision des positions ainsi obtenues. Nous ne développerons pas ici les protocoles permettant l'échange des informations de position. De plus les réseaux en trois dimensions seront considérés dans de futurs travaux.

4. Estimation de la position

Deux suppositions ont été faites :

1) Les liens entre les nœuds sont symétriques c'est-à-dire si un nœud S entend des voisins alors ceux-ci sont nécessairement dans la couverture radio de S.

2) Le rayon de couverture radio maximum théorique est connu de tous et est identique pour tous les nœuds du réseau.

Soit $G = (N, L)$ le graphe correspondant à notre réseau sans fil avec N le nombre de nœuds, L le nombre de liens.

Fondés sur l'hypothèse 1, nous pouvons conclure que si i et j sont voisins, alors ils peuvent communiquer directement entre eux.

Nous considérons qu'à un instant t, un nœud peut découvrir et connaître l'ensemble des nœuds de son voisinage. Le nœud S constitue alors une *table de voisinage*, contenant une liste d'éléments (S_i, pos_i) où S_i est un voisin de S et pos_i sa position géographique.

Soit R le rayon de transmission du nœud S, (X_{est}, Y_{est}) la position estimée de la position réelle (X_r, Y_r) du nœud S. Il est à noter que la position réelle n'est disponible que par l'intermédiaire de l'outil de simulation. En réalité, les nœuds ne possèdent pas cette information mais tentent de la déterminer.

4.1. *Barycentre simple*

Les algorithmes simples d'estimation de position sont basés sur un calcul de barycentre. Pour simplifier le problème, nous considérerons dans un premier temps que plus un nœud a d'informations sur la position de ses voisins, meilleure sera sa position estimée. Donc, pour un nœud S donné, chaque nœud dans sa couverture radio peut être utile pour estimer sa position et la position finale estimée de S est donnée par le barycentre des positions de ses voisins :

$$(X_{est}, Y_{est}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i}{n} \right). \quad (1)$$

Nous caractérisons dans cette section la précision d'une estimation de position par l'erreur de localisation LE, définie dans [BUL 00] comme la distance euclidienne entre deux points :

$$LE = \sqrt{(X_{est} - X_r)^2 + (Y_{est} - Y_r)^2}. \quad (2)$$

Nous définissons également un coefficient d'exactitude de position C_{acc} :

$$C_{acc} = 1 - \frac{LE}{R} \text{ avec } 0 \leq C_{acc} \leq 1. \quad (3)$$

Nous supposons que pour tous $LE > R$, les informations de position sont éliminées du processus d'estimation de position. Cette contrainte a été définie par l'hypothèse 2. Cette métrique C_{acc} donne un pourcentage de la précision de notre évaluation de localisation. Pour les nœuds auto localisés, comme les GPS, $C_{acc} = 1$, car la plus grande confiance quant à l'exactitude des positions est donnée à ce type de nœuds.

Soit N_i un simple nœud . Tous les nœuds dans sa couverture par radio peuvent être utilisés par l'algorithme d'évaluation de position indépendamment de l'exactitude de leur position C_{acc}.

4.2. *Barycentre Pondéré*

Comme expliqué précédemment, tous les nœuds du voisinage sont susceptibles d'être utilisés dans le processus d'estimation de position et cela quelque soit la précision de leur information de position. On peut avoir d'avantage confiance dans des nœuds auto localisés GPS que dans des nœuds simples. Ainsi pour améliorer l'estimation de position des nœuds simples, nous voulons prendre en compte ce coefficient de précision de l'information de localisation C_{acc}. Cette solution simple peut en effet permettre d'affiner les positions estimées. Donc un poids plus important sera donné aux nœuds possédant une bonne précision au détriment des nœuds de plus faible précision.

Nous allons ainsi utiliser une version pondérée du barycentre pour prendre en compte ces coefficients de précision :

$$(X_{est}, Y_{est}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} C_{acc_i} X_i}{\sum_{i=1}^{n} C_{acc_i}}, \frac{\sum_{i=1}^{n} C_{acc_i} Y_i}{\sum_{i=1}^{n} C_{acc_i}} \right). \quad (4)$$

Nous concentrons maintenant notre travail sur la définition de méthodes appropriées pour estimer l'exactitude d'une position.

5. Estimation de la précision d'une position estimée

L'exactitude de la précision de position théorique LE donnée par (2) n'est utilisable que lorsque la position réelle est connue, ce qui n'est naturellement pas réaliste. Donc un autre estimateur d'exactitude de position doit être défini.

Deux approches peuvent être adoptées : La première est basée sur la définition de classes et des résultats statistiques issus de simulations. La seconde se base sur le calcul d'aires en général et d'aires de recouvrements en particulier.

5.1. *Approches statistiques et définition de classes*

Nous introduisons ici la notion de *classes de précision* $AC_{[\lambda,\Lambda]}$ comme étant :

$$AC_{[\lambda,\Lambda]} \equiv \{C_{acc} \in [\lambda, \Lambda]\,, 0 \leq \lambda \leq \Lambda \leq 1\}.$$

Ainsi une classe d'exactitude $AC_{[\lambda,\Lambda]}$ confine le coefficient d'exactitude C_{acc} dans l'intervale $[\lambda, \Lambda] \in [0, 1]$.

À un moment donné t, un nœud S connaît tous les nœuds de son voisinage. Nous définissons un *vecteur de voisinage* $(N_1, ..., N_k)$ où chaque élément N_i est le nombre de nœuds voisins ayant la même classe d'exactitude $AC_i \equiv AC_{[\lambda_i,\Lambda_i]}$. Notons $classe$-$i \equiv AC_i$.

5.1.1. *2-classes*

Dans ce cas, seulement deux classes sont définies c.-à-d. $k = 2$. La première classe AC_1 représente les nœuds auto localisés (SLN) et la seconde AC_2, tous les autres nœuds, aussi appelés *nœuds simples* (SN) et cela quelque soit leur degré de précision :

$$classe\text{-}1 \text{ (SLN) : } C_{acc} = 1 \text{ avec } \begin{cases} \lambda = 1, \\ \Lambda = 1. \end{cases}$$

$$classe\text{-}2 \text{ (SN) : } C_{acc} \in [0, 1[\text{ avec } \begin{cases} \lambda = 0, \\ \Lambda < 1. \end{cases}$$

La méthode du barycentre pondéré est employée pour estimer la position. C_{acc} défini par (3) est également utilisé en tant qu'estimateur de référence de précision de position. Des détails sur les différents aspects liés aux simulations sont donnés dans la section 6. Les précisions moyennes de position estimée sont montrées par la figure. 1.

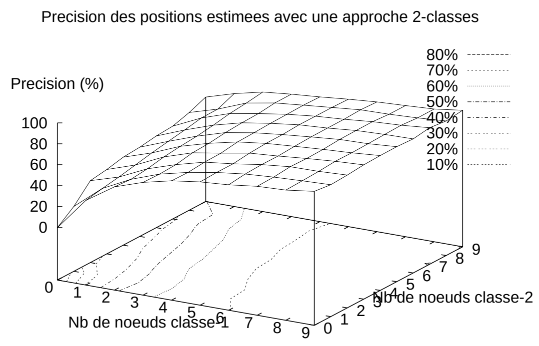


Figure 1. *Moyenne de la précision d'une position $\overline{c_{acc}}$ d'un nœud simple donné, en fonction du nombre de nœuds auto localisés (classe-1) et du nombre de nœuds simples (classe-2) présents dans son voisinage. Les points de la courbe sont obtenus par l'évaluation du maximum de vraisemblance de la moyenne d'une distribution-β.*

De ces résultats, nous avons défini une matrice statique de dimensions $n \times m$:

$$AM = \begin{bmatrix} C_{acc}(1,1) & \dots & C_{acc}(1,m) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{acc}(n,1) & \dots & C_{acc}(n,m) \end{bmatrix}$$

avec n le nombre maximum des nœuds auto localisés et m le nombre maximum des nœuds simples dans le voisinage d'un nœud quelconque.

La matrice AM fournit une base de données statistique utilisée par tous les nœuds simples pour estimer la précision de leur information de position. Il est à noter que cet ensemble de valeurs est invariant dans le temps puisqu'il ne s'agit que d'une évaluation statistique de la précision d'une position estimée. La matrice AM est connue par chaque nœud simple du réseau. Aussi quand un nœud S possède v nœuds auto localisés et w nœuds simples dans son voisinage, la précision de sa position estimée est donnée par :

$$C_{acc} = AM[v, w].$$

Si le nombre v nœuds SLN ou/et le nombre w de nœuds SN sont plus grands que respectivement n ou m, alors le minimum des deux est choisi :

$$C_{acc} = AM[\min(n, v), \min(m, w)].$$

La figure Fig. 1 tend à montrer que la précision des estimations de position converge à partir d'un nombre fini de voisins. Il est alors inutile de considérer ou de prendre en compte un nombre de voisins au delà de ce seuil.

5.1.2. *n-classes*

Dans la définition 2-classes, nous avons seulement défini la classe des nœuds auto localisés (SLN) et la classe des nœuds simples (SN). Il est alors possible de penser à étendre le modèle 2-classes à n-classes. Toutefois cette extension est complexe.

Une définition arbitraire de plusieurs classes, comme on pourrait l'obtenir à partir de lignes de niveaux, ne semble pas être une solution adéquate. Une définition "gloutonne" des classes n'est pas non plus envisageable car un nombre fini et limité de classes doit être défini. Ce choix sur le nombre pertinent de classes à retenir reste délicat car déterminer les bons seuils définissant l'intervalle d'une classe n'est pas trivial.

Nous nous limiterons au cas de deux classes dans cet article.

5.2. *Estimation de surfaces*

Une autre manière d'estimer la finesse des estimations de position est de considérer la méthode de calcul de surfaces. Nous étudions ici l'aire de recouvrement de la couverture radio d'un nœud.

La couverture radio d'un nœud est idéalement représentée par un disque de rayon constant R (Hypothèse 2).

Quand un nœud a plus d'un voisin, ce nœud appartient nécessairement à l'intersection des couvertures radio de ces voisins c.-à-d. dans la zone de recouvrement radio.

Nous normalisons cette aire de recouvrement S_{rec} par la surface radio maximale théorique S_{th} du nœud désirant estimer sa position. C_{acc} est alors défini comme :

$$C_{acc} = 1 - \frac{\min(S_{rec}, S_{th})}{S_{th}}. \tag{5}$$

En raison de l'effet cumulatif des erreurs de position dans le processus d'estimation de position, l'aire de recouvrement peut être plus grande que l'aire de la couverture radio théorique. Bien évidemment, l'estimation de C_{acc} sera obtenue en prenant le minimum entre S_{rec} et S_{th}. Plus grande sera l'aire de recouvrement, moins précise sera l'estimation de position.

Dans le cas où uniquement deux nœuds sont présents dans la zone de couverture radio du nœud S, C_{acc} peut être également défini :

$$C_{acc} = 1 - \frac{\min(2R, Dist)}{2R}. \tag{6}$$

avec $Dist$ la distance entre les deux voisins de S et R le rayon théorique de la zone de couverture radio de S.

Quand S a un unique voisin, la méthode de calcul d'aire pour estimer la précision d'une position n'est plus appropriée. Nous employons donc les valeurs statistiques déterminées dans la section 5.1 :

$$C_{acc} = \begin{cases} 0.3 & \text{si sln,} \\ 0.1 & \text{si sn.} \end{cases}$$

D'autres méthodes de calcul de surfaces peuvent également être employées pour résoudre le problème d'estimation de la précision d'une position. La plupart de ces méthodes sont basées sur la géométrie informatique (Computational Geometry), telles que l'aire d'une cellule de Voronoï et la surface d'une enveloppe convexe. Nous concentrons dorénavant notre attention uniquement sur l'aire de recouvrement radio.

6. Simulations et Résultats

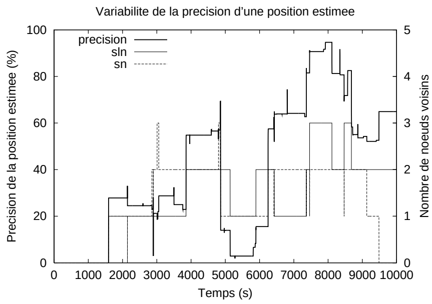
6.1. *Modèle de simulation*

Toutes les simulations ont été effectuées à l'aide d'un simulateur écrit en Java et développé au sein du laboratoire LIP6. 50 nœuds ont été aléatoirement placés dans un carré de 1000m $\times$ 1000m. Des nœuds auto localisés sont également aléatoirement distribués parmi ces 50 nœuds. Nous avons défini le rayon de couverture radio à $R = 170$m. Un générateur de mobilité a été utilisé pour gérer le déplacement des nœuds, en utilisant l'algorithme *way-points* avec une gestion *marche-arrêt* de la vitesse. En mode *marche* le nœud se déplace tandis que pendant une période *arrêt*, il demeure statique. Nous avons limité notre approche dans cet article à une faible mobilité (mobilité piétonne) c.-à-d. avec une vitesse maximum égale à 2m/s. Différentes mobilités feront l'objet de prochaines recherches. Le générateur aléatoire utilisé est celui fournit en standard par le JDK de Java. Les moyennes ainsi que les écarts type ont été obtenus par une évaluation du maximum de vraisemblance de la moyenne d'une distribution-β. $Matlab$ a été utilisé pour résoudre cette distribution.

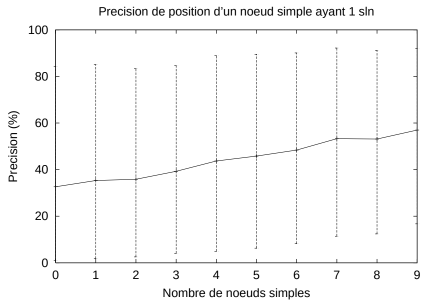
6.2. *Considérations sur la moyenne de la précision d'une position estimée*

En raison de la variabilité élevée de la précision d'une position par rapport au temps et au nombre de voisins, comme montré par la figure Fig. 2(a), la précision instantanée ne peut pas être utilisée dans nos calculs statistiques.

Deplus, la Fig. 2(b) montre la précision moyenne d'une position ainsi que son écart type. Comme les nœuds sont aléatoirement générés, toutes les topologies et configurations sont envisageables et possibles. Les écarts type résultants montrent bien la grande variété de scénarios possibles. Nous aussi pouvons dire que l'écart type dans



(a) Evolution de la précision d'une position estimée en fonction du nombre de nœuds voisins.



(b) $\overline{c_{acc}}$ et son écart type dans d'un nœud simple ayant un seul SLN dans son voisinage.

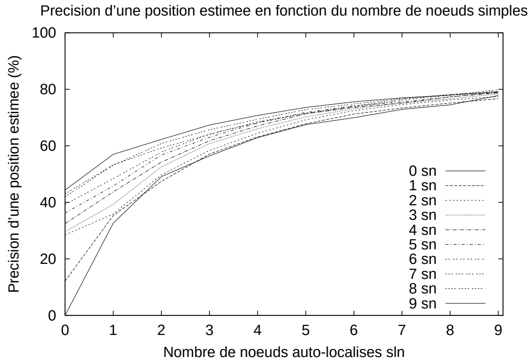
Figure 2. *Considérations sur la moyenne de la précision d'une position estimée.*

une telle situation, ne peut pas être employé comme critère de sélection pour déterminer si une valeur est meilleure qu'une autre. Ainsi, nous ne considérons dorénavant que la moyenne de la précision de positions comme élément de comparaison entre différents nœuds.

6.3. *Estimation de position*

Comme indiqué précédemment, seulement deux classes de précision ont été définies : la classe-1 pour les nœuds auto localisés (SLN) et la classe-2 pour les nœuds simples (SN). Une vue d'ensemble des résultats obtenus en utilisant un barycentre simple a déjà été montré par Fig. 1. La figure Fig. 3 détaille d'avantage ces résultats. Elle représente une projection selon les deux axes de la Fig. 1.

La position est calculée avec un barycentre simple et la précision de l'information de localisation $\overline{c_{acc}}$ est obtenue en utilisant (3). D'une part, ces figures montrent bien que la précision dépend fortement du nombre de voisins : plus un nœud possède de voisins, plus la précision moyenne de sa position estimée est élevée. Et d'autre part, plus le nombre de nœuds auto localisés présents dans le voisinage est grand, plus les positions résultantes sont fiables. A nombre égal de voisins, il est ainsi préférable d'avoir plus de SLN voisins que de SN. On remarque qu'après un seuil de 5-6 nœuds SLN dans un voisinage, les écarts entre les précisions deviennent de plus en plus réduits et les moyennes semblent converger vers 80%. Or les différences entre ces valeurs à partir de ce seuil nous semblent minimes et peu significatives. De plus nous ne cherchons une information de localisation que pour effectuer un routage géographique que bout en bout ; ces estimations de position et de précision nous conviennent pour cet usage.



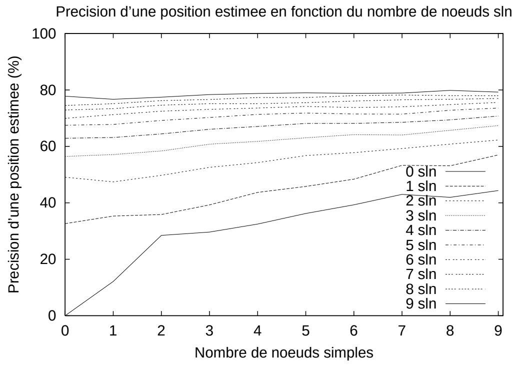
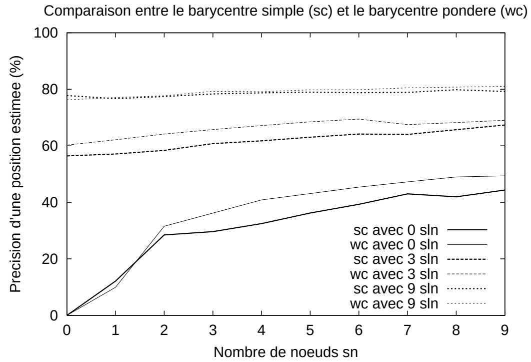


Figure 3. *Moyenne de la précision de position* $\overline{c_{acc}}$ *d'un nœud en fonction du nombre de nœuds dans son voisinage.*

La figure Fig. 4 montre les différences existantes entre l'utilisation d'un barycentre simple et l'utilisation d'un barycentre pondéré avec un estimateur de précision fin LE définit en (3). La méthode utilisant le barycentre pondéré apporte un gain dans la précision des positions estimées.

L'introduction d'une pondération dans le calcul d'une position permet une amélioration de la précision de la position estimée. Ces gains de précision sont d'autant plus importants que le nombre de noeuds voisins est faible. On observe par exemple un gain de 15% dans le cas où un noeud possède 0 SLN et 4 SN.

Ce cas est particulièrement intéressant dans notre approche car il montre qu'une amélioration est possible même si le nombre de SLN est faible. Ce type de situation nous semble plus réaliste si un tel réseau hybride existait. En deçà de 2 voisins et quelque soit le type de voisins, les écarts constatés entre le barycentre simple et pon-



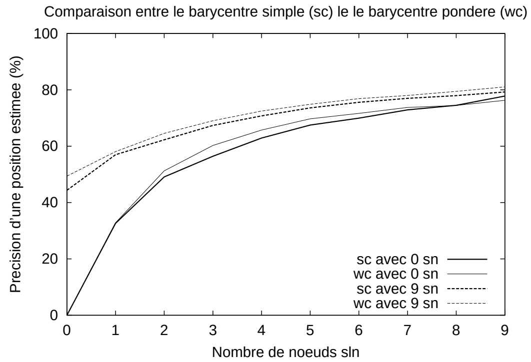


Figure 4. *Comparaison de la précision moyenne de position entre un calcul barycentrique simple (sc) et un calcul barycentrique pondéré (wc) utilisant comme coefficient de précision C_{acc} définit en (3).*

déré sont minimes. Il est en effet bien difficile d'estimer une position avec uniquement deux voisins.

6.4. *Estimation de précision*

La Figure 5 montre les différentes précisions obtenues en utilisant une estimation de précision d'une position calculée autre que LE. Alors que l'introduction d'une pondération fiable LE dans le calcul barycentrique pondéré engendre une nette amélioration de la précision résultante, l'utilisation d'une autre métrique de précision de la position calculée engendre quant à elle des erreurs en chaînes, avec un effet "boule de neige". Les erreurs d'estimation d'une position estimée sont répercutées et ajou-

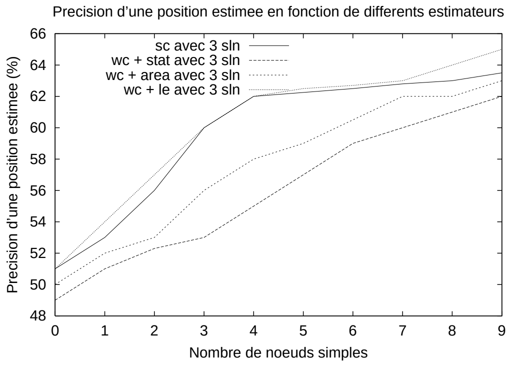


Figure 5. $\overline{c_{acc}}$ *avec l'utilisation de plusieurs estimateurs de précision dans le cas où un nœud simple possède 3 nœuds SLN.*

tées durant tout le processus d'estimation de positions et d'estimation des précisions résultantes suivants.

Ce résultat est intéressant car il met en évidence que plus un nœud simple à un nombre important de voisins simples, plus son estimation de position et sa précision résultante seront décevantes. Ainsi prendre en compte tous ses voisins, et cela quelque soient leur précision, n'est pas une solution appropriée pour estimer une position avec efficacité, surtout quand un modèle barycentrique pondéré est utilisé pour estimer une position.

7. Conclusion et Perspectives

La contribution principale de ce travail est de présenter une méthode simple permettant d'évaluer la position d'un nœud, en vue d'utiliser un protocole de routage géographique de bout en bout dans un réseau sans fil adhoc hybride, où seulement une partie des nœuds possèdent la capacité de s'auto localiser, avec un GPS par exemple.

Nous complétons notre proposition avec une manière d'estimer la précision des positions précédemment calculées. Une courte présentation des méthodes d'estimation de position justifie notre choix pour une méthode basée sur l'utilisation d'un barycentre. Nous étudions et comparons les méthodes du barycentre simple et notre proposition d'utiliser un barycentre pondéré. A partir d'un grand nombre de simulations, nous avons déterminé la précision d'une position estimée. Les résultats montrent que l'utilisation d'un barycentre pondéré par la précision des positions permet un gain par rapport au barycentre simple. Toutefois ce gain n'est valable que lorsque que les estimations de précision de positions sont fiables. Dans le cas contraire, les erreurs de localisation se propagent tout au long du processus d'estimation des positions. Nous pouvons donc conclure que l'utilisation du barycentre pondéré prenant en compte toutes les informations de localisation des nœuds voisins n'est pas une solution adéquate en elle même pour estimer correctement une position quand les précisions de position sont peu pécises. Mais, couplé à un processus de sélection des informations de position, le barycentre pondéré pourra avoir un regain d'intérêt. Toutefois, le fait d'évaluer la précision d'une position est un élement important pour discriminer les noeuds entre eux.

Des études sont donc nécessaires pour selectionner les nœuds voisins possédant les informations de position les plus pertinentes afin d'affiner et d'améliorer les estimations finales. Ces sélections devront prendre en compte les propriétés géographiques de la distribution du voisinage comme la définition de regroupement de nœuds (clusters). Nous intégrerons aussi ce travail dans un schéma de routage géographique de bout en bout dans un réseau à topologie dit de gruyère. Nous en étudierons ces performances et sa faisabilité.

8. Bibliographie

[BAH 00] BAHL P., PADMANABHAN V. N., « RADAR : An In-Building RF-Based User Location and Tracking System », , 2000, p. 775-784.

[BEU 99] BEUTEL J., « Geolocalisation In a PicoRadio Environment », *M.S thesis*, , 1999.

[BUL 00] BULUSU N., HEIDEMANN J., ESTRIN D., « GPS-less Low Cost Outdoor localization For Very Small Devices », *IEEE Personal Communication, Special Issue on Smart Spaces and Environment*, vol. 7, n° 5, 2000, p. 28-34.

[CAP 02] CAPKUN S., HAMDI M., HUBAUX J. P., « GPS-free Positioning in Mobile Ad-Hoc Networks », *Cluster Computing*, vol. 5, n° 2, 2002.

[DOH 01] DOHERTY L., PISTER K. S. J., GHAOUI L. E., « Convex Optimization Methods for Sensor Node Position Estimation », *Proceedings of IEEE INFOCOM'2001*, , 2001.

[gps97] *Global Positioning System : Theory and Practice*, Springer-Verlag, 1997.

[JAI 01] JAIN R., PURI A., SENGUPTA R., « Geographical Routing Using Partial Information for Wireless Ad Hoc Netwokrs », *IEEE Personal Communications*, vol. 8, n° 1, 2001, p. 48–57.

[KAR 00] KARP B., KUNG H. T., « GPSR : Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks », *Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'00*, , 2000.

[NIC 03] NICULESCU D., NATH B., « Ad Hoc Positioning System (APS) using AoA », *IEEE INFOCOM 2003*, , 2003.

[SAV 01a] SAVARESE C., RABAEY J. M., BEUTEL J., « Localization in Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks », *Proceedings of the ICASSP*, , 2001.

[SAV 01b] SAVVIDES A., HAN C.-C., STRIVASTAVA M. B., « Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors », *MobiCom 2001*, , 2001.

[WAN 00] WANT R., HOPPER A., FALCAO V., GIBBONS J., « The Active Badge Location System », *ACM Transaction on Information Systems*, vol. 10, n° 1, 2000, p. 91-102.

[WAR 97] WARD A., JONES A., HOPPER A., « A New Location Technique for the Active Office », *IEEE Personal Communications*, vol. 4, n° 5, 1997, p. 42-47.

[WER 98] WERB J., LANZL C., « A positioning system for finding things indoors », *IEEE Spectrum*, vol. 35, n° 9, 1998, p. 71-78.