



**HAL**  
open science

# Localisation distribuée pour routage en environnement bruité dans les réseaux de capteurs

Karel Heurtefeux, Fabrice Valois

## ► To cite this version:

Karel Heurtefeux, Fabrice Valois. Localisation distribuée pour routage en environnement bruité dans les réseaux de capteurs. CFIP'2009, Oct 2009, Strasbourg, France. inria-00419468

**HAL Id: inria-00419468**

**<https://inria.hal.science/inria-00419468>**

Submitted on 23 Sep 2009

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

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

---

# Localisation distribuée pour routage en environnement bruité dans les réseaux de capteurs

**Karel Heurtefeux— Fabrice Valois**

*INRIA SWING / CITI, INSA-Lyon, , France*

*Bâtiment Claude Chappe*

*6, rue des arts*

*F-69621 Villeurbanne Cedex*

*{karel.heurtefeux, fabrice.valois}@insa-lyon.fr*

---

*RÉSUMÉ. Pour être efficace, les protocoles de routage dans les réseaux de capteurs doivent prendre en compte les interactions locales, le bruit et les collisions. Dans cet article, nous proposons d'utiliser le protocole de localisation QLoP (Qualitative Location Protocol [HEU 08]) afin de fournir un routage plus efficace en environnement bruité. QLoP sélectionne les voisins les plus proches (et donc les noeuds avec un meilleur rapport signal-à-bruit) pour construire une topologie logique sur laquelle le routage s'applique. QLoP n'utilise aucune spécificité matérielle particulière ou mesures de RSSI mais se base uniquement sur les informations topologiques de son voisinage à 2 sauts. Ainsi cet algorithme permet de classer les voisins d'un capteur dans 3 classes de proximité : le 1-voisinage logique, le 2-voisinage logique et le 3-voisinage logique. Nous mettons en évidence l'amélioration des performances de routage sur notre topologie logique par rapport au routage à plat : le taux de livraison et la distance moyenne atteignable dans ces conditions extrêmes sont améliorés de façon significative. La consommation énergétique complète ces résultats.*

*ABSTRACT. To be efficient, routing protocols in wireless sensor networks suppose to take into account local interactions, noise and collisions. In this work, we propose a routing protocol suitable for noisy environments. Using the Qualitative Localization Algorithm (QLoP [HEU 08]) in order to select sensors with a better signal-to-noise ratio, we build a logical topology on which we apply a routing protocol. QLoP does not use neither any anchor nor dedicated hardware like GPS nor signal strength measurement. Each node builds a Qualitative Distance according to the physical 2-hop neighborhood informations (i.e. topological informations). Thus, this algorithm allows to determine coarsely the relative location of the neighbors which are classified as logical 1-hop, logical 2-hop and logical 3-hop. We highlight the routing performances in a noisy environment and compare it to a classical routing protocol on a flat topology. Delivery ratio, throughput and average distance reachable in those extremes conditions are appreciably enhanced. Energy consumption completes these results.*

*MOTS-CLÉS: contrôle de topologie, localisation, réseaux de capteurs, distance qualitative, interférences, routage*

*KEY WORDS: topology control, localisation, sensor networks, GPS-free, qualitative distance, routing*

---

## 1. Introduction

Les réseaux de capteurs sont constitués de quelques centaines à plusieurs milliers de nœuds à faible coût et dont la consommation électrique est faible. Le routage des données dans ce type de réseau est un enjeu important. Cependant, comme le montre les recherches actuelles ([PL 09]), les protocoles de routage classiques ne sont pas, en l'état, applicables aux réseaux de capteurs dans un environnement réel, notamment à cause des conditions radio particulières. Le bruit, les interférences, les collisions et la volatilité du voisinage conduit à une chute importante des performances. Dans cet article, nous proposons d'utiliser QLoP pour construire une topologie logique basée sur l'algorithme Relative Neighborhood Graph (RNG[TOU 80]) afin de fournir un routage qui favorisera les voisins les plus proches comme relais. Cette stratégie permet de sélectionner en moyenne des liens plus courts et donc plus robustes au bruit et à l'instabilité du canal radio.

De nombreuses applications pour les réseaux de capteurs comme la surveillance de feu de forêt, la télé-relève, etc... ont besoin d'avoir une information géographique pour fonctionner efficacement. Les protocoles de contrôle de topologie où chaque capteur doit ajuster sa puissance de transmission pour minimiser sa consommation énergétique, les algorithmes ont le plus souvent besoin d'information sur la position de leurs voisins.

QLoP est un algorithme localisé qui permet à chaque nœud de localiser *qualitativement* ses voisins en utilisant uniquement des informations locales sans ancre ni spécificité matérielle particulière. L'algorithme déployé sur un nœud utilise seulement des informations obtenues par l'échange de table de voisinage à l'aide de paquets hello classique pour calculer un **indice de proximité** pour chaque voisin à un saut. Les voisins à un saut du nœud étudié sont classés en 3 catégories : *1-voisinage logique*, *2-voisinage logique* et *3-voisinage logique*.

L'objectif est de fournir un algorithme de routage efficace pour ce type de réseau, résistant aux interférences, aux collisions et au bruit. Dans cette optique, la topologie virtuelle va favoriser les liens les plus courts et ainsi, construire des routes plus longues en termes de sauts mais plus efficace en termes de taux de livraison et de distance atteignable. Nous montrons qu'en favorisant les voisins les plus proches, nous sélectionnons les nœuds avec un rapport signal sur bruit plus important ce qui va accroître les performances face aux interférences et aux collisions.

Le papier est organisé de la façon suivante : en section 2 nous présenterons l'algorithme de distance qualitative et la topologie logique en section 3. Les hypothèses que nous avons prises ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans le chapitre 4. Dans le chapitre 5 nous discutons la consommation énergétique de QLoP et nous présentons les travaux les plus proches dans le chapitre 6. Enfin, nous concluons et présentons les perspectives de ce travail.

## 2. QLoP : présentation de l'algorithme

De nombreuses techniques sont proposées pour permettre aux nœuds d'estimer la distance entre eux et leurs voisins. Des techniques précises : temps de propagation d'un signal (ToA) [CAP 01], de deux signaux de différentes natures (TDoA) [WAR 97], [NAW 07], de l'angle d'arrivée du signal (AoA) [NIC 03], [AKC 06], ou la combinaison de TDoA et de AoA [MAG 07]. Cependant toutes ces études appliquées principalement dans le cas de réseaux ad-hoc, ne prennent pas en compte

la consommation énergétique (besoin de synchronisation) ou considère des spécificités techniques (groupes d'antennes, horloge interne très précise, gestion de plusieurs type de signaux) incompatible avec le faible coût et la petite taille des capteurs. La puissance du signal reçu (RSSI) est prise par de nombreux articles comme mesure pour estimer la distance. En effet, cette mesure est intuitive : plus le signal reçu est fort, plus le voisin est proche, moins ce signal est puissant plus le voisin est éloigné. De plus cette mesure est disponible sur la plupart des antennes. Cependant, de nombreuses études montrent que cette métrique reste très volatile. Même [RAM 09], constate que, malgré un environnement particulièrement favorable (pas d'interférences en radio-fréquence externes), des "caprices" matériels ou la mobilité d'objets à l'intérieur du réseau fera varier le RSSI de manière imprédictible. Une solution serait alors de moyenniser cette mesure pour en affaiblir les variations. Mais non seulement cela augmentera le temps nécessaire pour la localisation mais la simple modification non temporaire de l'environnement physique du réseau, faussera la métrique. Sélectionner uniquement les liens avec une puissance de réception du signal supérieure à un certain seuil n'est donc pas une solution efficace.

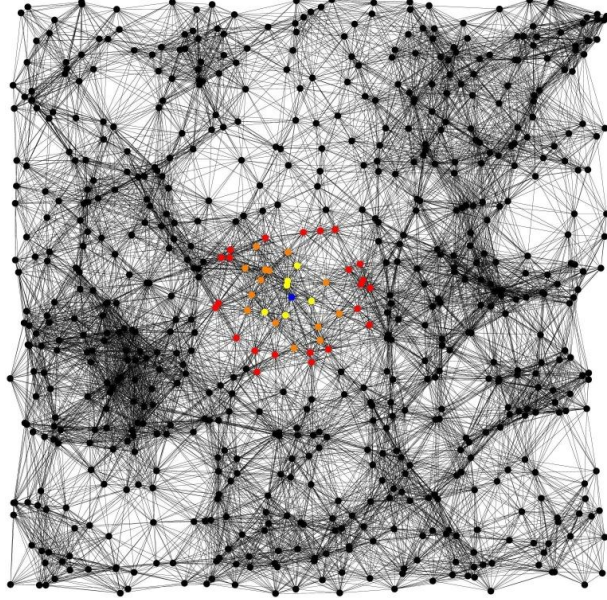
L'idée de QLoP est d'arriver à fournir une estimation de la proximité en se basant sur les informations topologiques localisées et contourner ainsi l'instabilité du canal radio, inévitable dans un réseau de capteurs déployé dans un environnement réel. Ces informations proviennent de l'échange des tables de voisinage entre voisins directs via des paquets hello. Chaque noeud du réseau a donc une information topologique limitée à son voisinage à 2 sauts et nous montrerons qu'il est capable de déterminer, avec une forte probabilité, trois classes de proximité pour ses voisins : le 1-voisinage logique, le 2-voisinage logique et le 3-voisinage logique. Une telle localisation servira à construire un protocole de routage unicast efficace dans un environnement sans fil dégradé avec un haut niveau d'interférences : en privilégiant comme relais les noeuds du 1-voisinage logique ce routage privilégiera les noeuds avec un rapport signal-sur-bruit plus favorable.

Le noeud  $y$  calcule l'indice de proximité d'un voisin  $x$  de la façon suivante :

$$PI_y(x) = (|V(y) \cap V(x)|) - \frac{\max(|V(y)|, |V(x)|)}{2}$$

avec  $V(y)$  et  $V(x)$  le voisinage de  $y$  et  $x$  respectivement.

L'idée générale est d'attribuer un indice fort aux voisins ayant à la fois un voisinage commun important et un voisinage distinct faible. L'indice de proximité va ainsi évaluer la similarité des voisinages. Ainsi, nous prenons en compte dans l'algorithme le rapport entre le nombre de voisins communs et le nombre de voisins disjoints. Il semble en effet logique que des voisins proches géographiquement aient un voisinage fortement semblable alors que deux voisins éloignés vont avoir un voisinage assez dissemblable. L'indice de proximité va représenter la distance **qualitative** d'un voisin. Nous allons voir que cette proximité qualitative va de paire avec la proximité géographique dans le cas des réseaux de capteurs dense. Ce mécanisme permet d'établir trois classe distinctes parmi les voisins : le 1-voisinage logique (ou 1), le 2-voisinage logique (ou 2) et le 3-voisinage logique (ou 3). Pour un noeud particulier, nous déterminons les classes de ces noeuds voisins de la façon suivante :



**Figure 1.** Application de l'algorithme sur une topologie aléatoire

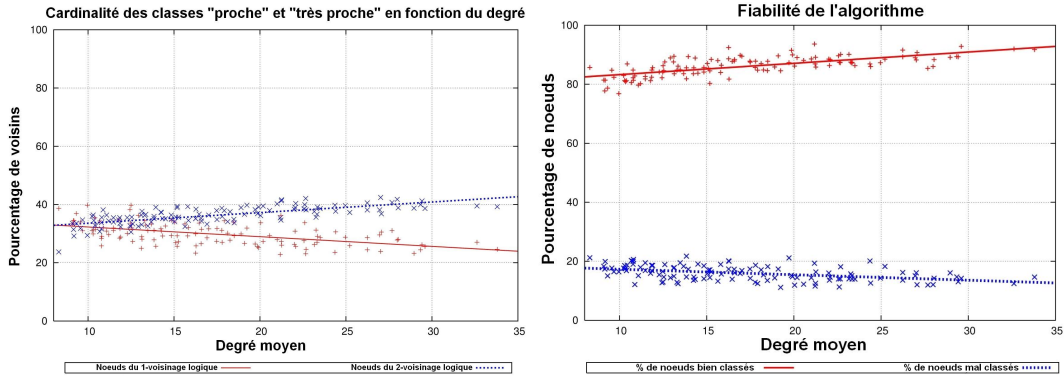
Soient  $PI_y(x)$  l'indice de proximité du voisin  $x$  d'un nœud  $y$ ,  $PI_y(x_i)$  la liste des indices de proximité de tous les voisins  $x_i$  de  $y$  et  $classe_y(x)$  la classe de  $x$  pour  $y$  :

$$\Delta = \frac{|max(PI_y(x_i)) - min(PI_y(x_i))|}{3}$$

$$classe_y(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } PI_y(x) \geq max(PI_y(x_i)) - \Delta \\ 2 & \text{si } max(PI_y(x_i)) - inter > PI_y(x) \geq max(PI_y(x_i)) - 2\Delta \\ 3 & \text{si } PI_y(x) < max(PI_y(x_i)) - 2\Delta \end{cases}$$

Chaque nœud du réseau calcule l'indice de proximité de chacun de ses voisins en fonction des informations reçues de son voisinage à 1 saut. Chaque nœud maintient une table de voisinage à 1 et 2 sauts et diffuse celle à 1 saut avec des paquets hello périodiques.

Le protocole est peu consommateur en énergie car il utilise seulement des informations nécessaires à beaucoup d'autres protocoles déployés dans les réseaux de capteurs : auto-organisation et contrôle de topologie (CDS-rule  $k$  [WU 99], CDS-MIS [WAN 02], etc.) et protocoles de routages pro-actifs (OLSR [CLA 03], etc.). De plus, si le réseau est peu dynamique (faible mobilité, peu de naissance ou de mort de nœuds dans le réseau [HEU 07b]) l'échange de paquets peut être réduit voire limité simplement à la phase de déploiement du réseau. On peut également utiliser l'*overhearing*, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de paquets dédiés mais que les capteurs découvrent leur voisinage grâce au trafic de données.



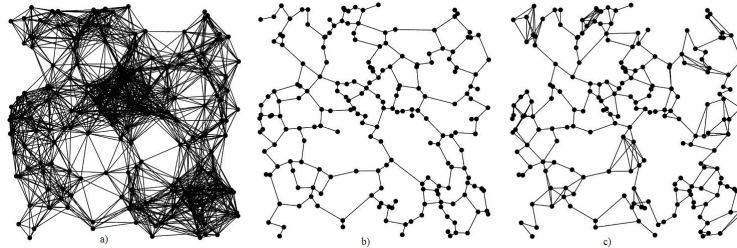
**Figure 2.** Cardinalité des classes en fonction du degré moyen

**Figure 3.** Fiabilité de l'algorithme

Dans le cas d'une topologie dense (700 nœuds, degré moyen : 40), la localisation est très efficace. Nous pouvons voir le classement en trois classes par un nœud de son voisinage sur la figure 1. Les nœuds jaunes appartiennent au *1-voisinage logique*, les oranges au *2-voisinage logique* et les rouges au *3-voisinage logique*. Plus la densité d'un réseau est forte et moins les incohérences de voisinage influent sur le classement des voisins.

Chaque nœud alloue une classe à ses voisins en fonction de son indice de proximité. Comment évoluent ces classes quand le degré moyen augmente ? Le *1-voisinage logique* va-t-il croître proportionnellement au nombre de voisins ? Nous étudions le pourcentage moyen de nœuds sélectionnés dans le *1-voisinage logique* et le *2-voisinage logique* (Fig. 2). Nous pouvons souligner que le pourcentage des nœuds du *1-voisinage logique* diminue alors que, dans le même temps, le *2-voisinage logique* augmente. La cardinalité du *3-voisinage logique* reste constante. Cela indique que plus la densité est importante et plus l'indice de proximité est capable de distinguer les nœuds réellement proches.

Quand l'algorithme détermine une classe de proximité pour un voisin, il est primordial de savoir si ce nœud sélectionné comme proche, l'est effectivement dans le monde réel. Pour répondre à cette interrogation, nous avons déterminé le nombre de nœuds appartenant au *1-voisinage logique* et au *2-voisinage logique* sélectionnés par l'algorithme appartenant effectivement à ces classes géographiquement. Ensuite nous regardons le nombre de nœuds réellement dans ces deux classes et non sélectionnés par l'algorithme. Nous avons ainsi la fiabilité de l'algorithme en répondant à ces deux questions : quelle probabilité qu'un voisin classé comme proche ou très proche le soit effectivement et quelle probabilité qu'un nœud proche ou très proche soit manqué par l'algorithme. Nous observons une fiabilité de plus de 80% même pour des topologies de faible degré (Fig 3). Il est à noter que la prise en compte du voisinage au-delà de 2 sauts pour le calcul de l'indice de proximité dégrade la précision.



**Figure 4.** a) *Topologie physique*, b) *Contrôle de topologie(RNG, GPS)* c) *Contrôle de topologie(RNG, QLoP)*

### 3. Contrôle de topologie : QLoP-RNG

Dans le cas de réseaux de capteurs denses il est parfois souhaitable de limiter le voisinage aux plus proches voisins : pour stabiliser le voisinage et sélectionner les noeuds avec le moins important niveau de bruit ou d'interférences. Il existe dans cette optique, de nombreux algorithmes de contrôle de topologie :

- Gabriel Graph [GAB 69] : une arête entre deux sommets  $u$  et  $v$  est sélectionnée si et seulement si  $disque(u, v)$  ne contient pas d'autres sommets à l'intérieur.

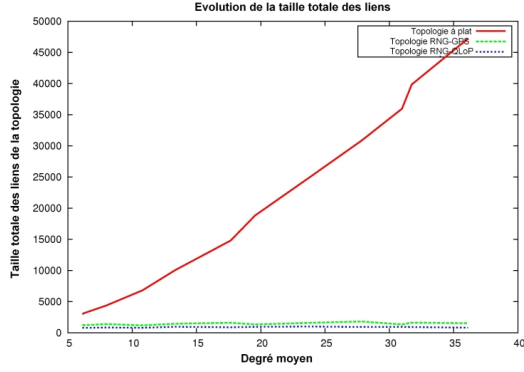
- LMST [LI 03] : Chaque noeud connaît sa position et celle de son voisinage à 1 saut. Chaque noeud calcule un arbre couvrant minimum local (LMST) parmi ses voisins directs. La construction de la topologie est basée sur l'arbre local de chaque noeud : une arête  $(u, v)$  appartient au LMST final si et seulement si  $v$  est dans LMST( $u$ ) et  $u$  est dans LMST( $v$ ).

- RNG [TOU 80] : Grâce à la position de son 1-voisinage physique, un noeud enlève les liens les plus longs de cette façon : soit deux noeuds voisins  $u$  et  $v$ , s'il existe un noeud  $w$  tel que  $d(u, v) > d(u, w)$  et  $d(v, u) > d(v, w)$  alors le lien  $(u, v)$  est désélectionné et n'appartiendra pas à la topologie logique finale.

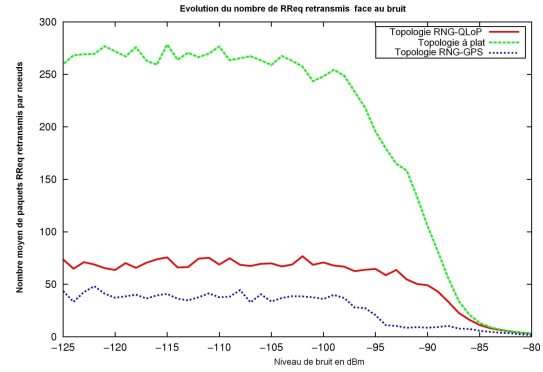
A notre connaissance et à l'exception de [CAR 03], l'ensemble des protocoles d'auto-organisation orientés élagage de liens se basent sur la connaissance des informations géographiques pour sélectionner les liens les plus courts. Les études prennent comme hypothèse la facilité d'obtenir une mesure de distance entre deux nœuds d'un réseau en s'appuyant sur l'hypothèse de capteurs sur-équipés : GPS, ensemble d'antennes pour calculer l'angle d'un signal reçu, synchronisation précise entre les capteurs, horloge interne extrêmement précise et stable, etc. Nous avons vu précédemment que ces hypothèses ne correspondaient pas aux équipements disponibles dans le domaine des réseaux de capteurs.

La pseudo-distance développée par [CAR 03] est appliquée pour la construction d'un RNG et la diffusion de paquets d'inondation dans un réseau ad hoc. Cependant, l'auteur considère une densité strictement uniforme et le réseau est modélisé sous la forme d'UDG. En outre, aucune étude sur les caractéristiques de la structure formée n'est proposée.

Nous montrons par la suite qu'il est possible de construire une topologie logique efficace sans connaissance de la position exacte, sans triangulation et sans mesure de RSSI. Nous appliquons notre



**Figure 5.** Evolution de la longueur moyenne des liens de la topologie



**Figure 6.** Evolution du nombre de paquets RReq retransmis par noeuds

protocole de localisation qualitative pour construire une topologie Relative Neighborhood Graph (Figure 4). Le protocole RNG garanti la connectivité du réseau. De plus, [HEU 07a] montre que RNG est robuste et que les conséquences de la mort d'un ou plusieurs noeuds sont limitées et restent localisées.

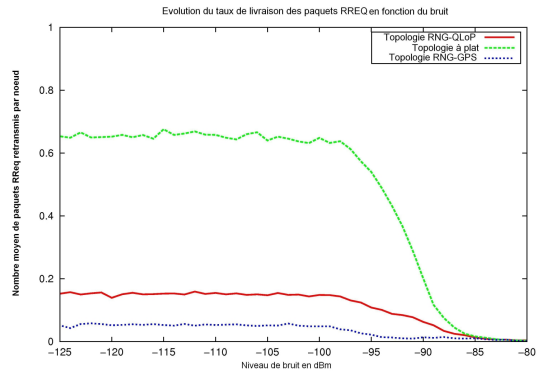
Grâce à l'indice de proximité du voisinage à 1 et 2 sauts, un noeud élague les liens les plus longs de la façon suivante : soit deux noeuds voisins  $u$  et  $v$ , s'il existe un noeud  $w$  tel que  $PI_u(w) > PI_u(v)$  et  $PI_v(w) > PI_v(u)$  alors le lien  $(u, v)$  est désélectionné. Sur la figure 5, nous observons l'efficacité de l'élagage de liens effectué pour construire la structure logique en étudiant la longueur totale des liens sélectionnés : en effet plus les liens sélectionnés sont courts, meilleur est l'algorithme. Cette analyse met en évidence deux points : les performances de l'algorithme RNG-QLoP est très proche d'un RNG utilisant le positionnement GPS et plus la densité est importante et meilleures sont les performances de RNG-QLoP. Cela est dû aux propriétés de QLoP : plus d'information de voisinage conduit à une amélioration de sa précision.

## 4. Routage pseudo-DSR sur topologie logique

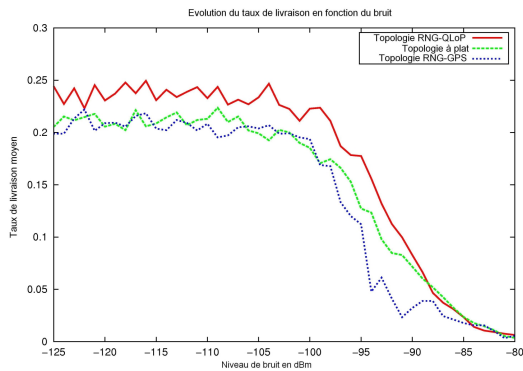
### 4.1. Routage pseudo-DSR

Dynamic source routing (DSR) est un protocole de routage pour réseaux mobiles et ad hoc qui peut être utilisé dans les réseaux de capteurs. C'est un protocole réactif, c'est à dire que les routes d'un noeud source à une destination sont calculées à la demande. Une source va inonder le réseau avec un paquet de requête de route (RREQ) et construire la route demandée en fonction du paquet de réponse renvoyé par le noeud destination (RREP). Dans notre environnement de simulation, les routes ont une date d'expiration et doivent être rafraichit de façon périodique.





**Figure 7.** Evolution du taux de livraison des paquets RREQ



**Figure 8.** Taux de livraison en fonction du niveau de bruit

#### 4.2. Resultats

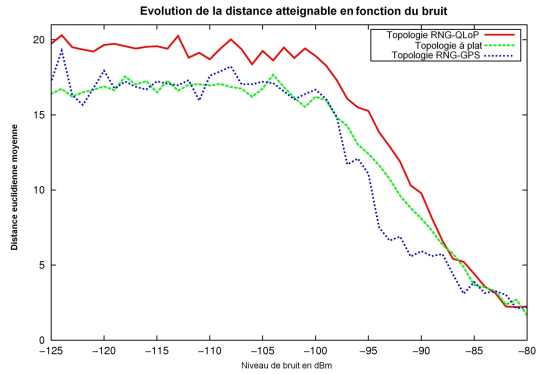
Les résultats sont obtenus avec une puissance de transmission constante et une variation du bruit ambiant. Nous relevons une rupture de la connectivité du réseau à partir d'un bruit de  $-90\text{dBm}$ . Les capteurs s'échangent des paquets hello comprenant la table de voisinage du capteur et son identifiant, des paquets RREQ/RREP comprenant la source du paquet, la destination, le chemin emprunté par le paquet et un numéro de séquence. Les paquets de données contiennent le capteur source et destination, le chemin à emprunter et une place pour les données. La taille totale d'une trame de données est de 1ko. Nous comparons les performances des différentes topologies suivantes :

- Topologie physique (ou à plat) i.e. les noeuds communiquent avec leurs voisins physiques
- QLoP-RNG i.e. chaque noeud construit localement une structure RNG en utilisant QLoP pour déterminer la localisation de ses voisins
- GPS-RNG i.e. chaque noeud construit localement une structure RNG en utilisant la position réelle de ses voisins.

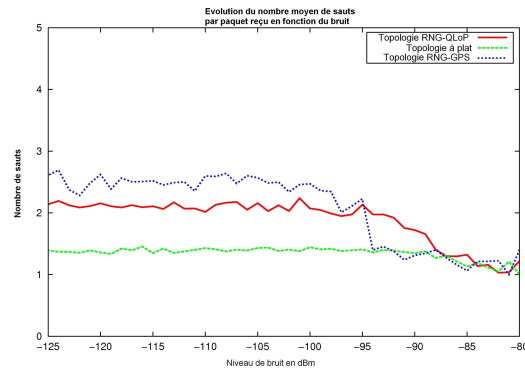
Il est important de souligner que QLoP-RNG et GPS-RNG ne modifie pas la connectivité intrinsèque du réseau.

La figure 6 montre le nombre de retransmission de paquets RREQ. Ces paquets sont essentiels pour la découverte de route d'une source à une destination. Dans un routage de type DSR, le réseau est inondé. Nous observons une grande disparité entre le flooding sur une topologie logique et celui sur une topologie à plat. Dans le cas d'une topologie à plat et quand le bruit ambiant est faible presque 3 fois plus de paquets sont relayés par chaque noeud à travers le réseau. Il en résulte une surcharge du réseau et donc une augmentation de la probabilité de collisions. La seconde conséquence est le gaspillage d'énergie. Dans ce cas, les topologies QLoP-RNG et QLoP-GPS réduisent fortement le nombre de retransmissions de paquets RREQ.

Cependant, cette réduction de trafic a un impact sur la probabilité d'atteindre une destination (voir Fig. 7). Nous observons un taux de livraison des paquets RREQ plus bas pour le routage sur



**Figure 9.** La distance face au bruit



**Figure 10.** Average number of hops per packet against noise

les topologies logiques QLoP-RNG et GPS-RNG. Quand un noeud destination reçoit un paquet RREQ, il retourne, en unicast, un paquet de réponse (RREP). Ce paquet est également sensible aux interférences et aux collisions. Cela signifie que seules quelques routes sont construites. Sur une topologie à plat, un nombre plus important de routes est construit mais elles sont moins robustes. Ces routes sont basées sur des liens opportunistes, non robustes dans le temps. Sur les topologies QLoP-RNG et GPS-RNG la construction des routes est basée sur des liens radio moins volatiles.

Pour les résultats suivants, les noeuds envoient des données de façon périodique à un noeud destination choisi aléatoirement. Nous observons à la Fig. 8 le taux de livraison. Nous avons vu précédemment que le processus de découverte de routes était différent selon la topologie : alors que de nombreuses routes sont construites sur une topologie à plat, le protocole de routage sur QLoP-RNG et GPS-RNG construit une route seulement si elle est stable. La topologie QLoP-RNG obtient le meilleur taux de livraison. Même dans le cas d'un fort bruit parasite, le routage sur cette topologie, permet de transmettre des paquets à la destination. Ici, la taille des paquets (1ko) ne permet que très peu de transmissions opportunistes. Le routage sur la topologie à plat est donc peu efficace. Concernant la topologie GPS-RNG, l'élagage trop sévère des liens empêche les communications au lieu de les renforcer.

Nous pouvons remarquer que dans un réseau où les communications sont nombreuses et où le bruit est important, seulement un nombre limité de paquets de données arrive effectivement à destination. La distance euclidienne qui sépare la source de la destination influe beaucoup sur cette probabilité de succès : plus la distance est importante plus le taux de livraison est faible. Nous voyons sur la Figure 9 quelle distance couvrent les paquets reçus et l'évolution de cette distance en fonction du bruit. L'impact du bruit et des interférences influe, de manière très importante, sur la diffusion des paquets de données. Il est très difficile pour un noeud d'envoyer ses données à une distance plus grande que 20m dans le cas d'une topologie QLoP-RNG (le diamètre du graphe est de 140m environ). Cela signifie que même quand le réseau est considéré connexe, les paquets ne parviennent pas à franchir, en moyenne, une certaine distance. Ici, la topologie logique, même si elle réduit la possibilité de longs sauts, augmente au final, la distance moyenne franchissable par un paquet.

Cela confirme le fait que la probabilité de transmissions opportunistes utilisant des liens longs est négligeable.

Une des différences entre le routage sur topologie logique et sur topologie classique est la longueur des routes construites en termes de nombre de sauts entre la source et la destination. Les topologies QLoP-RNG diminuent le nombre de liens dans le réseau, pour s'appuyer majoritairement sur les liens les plus courts et donc, nous l'avons vu, sur les liens les moins sensibles au bruit. Dans le cas des liens les plus longs, la probabilité de succès d'une transmission est extrêmement faible et il est donc souhaitable de contourner un lien fragile par plusieurs liens plus courts et plus robustes. C'est ce que réalise QLoP-RNG (voir Fig.10).

## 5. Consommation énergétique

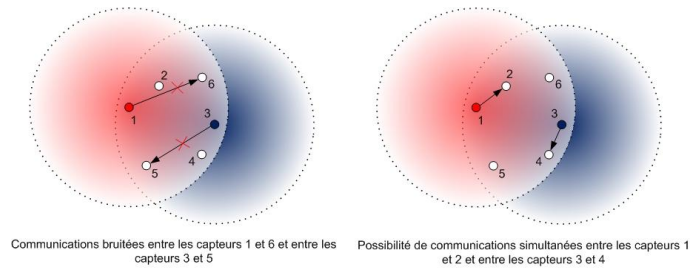
QLoP n'utilise ni GPS, ni aucune spécificité matérielle particulière. La consommation d'un récepteur GPS n'est pas négligeable au regard de la consommation d'un capteur et si la recherche pour réduire la consommation des puces GPS existe, cela nécessite un équipement et des protocoles supplémentaires [RAS 07]. QLoP utilise uniquement des paquets hello ou "beacon" pour informer son voisinage de sa présence et pour transmettre son voisinage direct. En cela, QLoP est compatible avec les protocoles d'endormissement et d'auto-organisation qui sont également basés sur ce type de mécanisme. Il est donc important de souligner que dans la plupart des cas, QLoP utilise une information déjà disponible sans consommer d'énergie supplémentaire. Le calcul de  $PI_A(B)$  (indice de proximité du noeud  $B$  calculé par le noeud  $A$ ) est une simple intersection de 2 ensembles. La complexité de cet algorithme est donc en  $O(n + m)$  où  $n$  est la cardinalité du voisinage de  $A$  et  $m$  la cardinalité du voisinage de  $B$ . QLoP est donc extrêmement peu consommateur en énergie même lorsque la densité est très importante.

## 6. Etat de l'art

Le routage en environnement bruité est peu traité. A notre connaissance, il n'existe aucun papier qui traite de routage sur topologie logique, sans information géographique et dans un environnement physique réaliste.

[HAE 05] donne 18 raisons pour expliquer le compromis entre utiliser beaucoup de petits sauts et utiliser peu de grands sauts pour le routage. Cet article admet le besoin de routes stable dans le routage pro-actif mais ne traite que des liens opportunistes dans le cas d'un routage géographique. Il élude ainsi le problème de découverte de routes et le problème de l'inondation.

[ZHA 08] explore également le compromis entre les stratégies de routage : grands sauts ou petits sauts en regardant l'aspect énergétique. Il détermine à quelle distance il est souhaitable de faire un saut supplémentaire au regard de la consommation énergétique. Ce papier ne se concentre cependant uniquement sur le lien physique et quand les noeuds sont capables d'ajuster leur puissance d'émission.



**Figure 11.** *Communications concurrentes*

Dans ces deux papiers, le cas de communications concurrentes n'est pas traité. Dans le cas de communications simultanées, quatre noeuds proches pourront échanger leur données avec succès (voir Fig.11).

## 7. Conclusion et perspectives

Dans ce travail, nous proposons une stratégie de routage dans le cas d'un environnement radio bruité. Elle est basée sur un protocole de localisation qualitative (QLoP) utilisant uniquement des informations localisées sans GPS. Nous appliquons ce protocole pour contrôler la topologie du réseau (QLoP-RNG). Un RNG est calculé en utilisant les indices de proximité de QLoP : les performances sont proches de celles obtenues avec un positionnement absolu (RNG-GPS).

Ensuite, nous utilisons cette topologie logique pour proposer un routage pseudo-DSR efficace pour les réseaux de capteurs en environnement bruité. Cette stratégie favorise les chemins utilisant de petits sauts et donc les noeuds relais ayant un rapport signal-sur-bruit plus important. La topologie QLoP-RNG réduit le coût de l'inondation pour la découverte de route, le nombre de communication sur le médium radio et construit de routes plus robustes. Nous croyons que QLoP-RNG est un bon compromis entre l'élagage de lien trop drastique de GPS basé sur des positions réelles (GPS-RNG) et une absence de contrôle de topologie. La prochaine étape de notre travail sera d'explorer les influences de la couche MAC dans les performances de notre topologie. En effet, les méthodes d'accès au canal et notamment les mécanismes d'évitement de collisions peuvent, selon nous, diminuer inutilement la capacité du réseau.

## 8. Bibliographie

- [AKC 06] AKCAN H., KRIAKOV V., BRÖNNIMANN H., DELIS A., « GPS-Free node localization in mobile wireless sensor networks », *ACM MobiDE*, New York, NY, USA, 2006, ACM Press, p. 35–42.
- [CAP 01] CAPKUN S., HAMDI M., HUBAUX J.-P., « GPS-Free Positioning in Mobile ad-hoc Networks », *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, vol. Volume 9, 2001, page 9008, IEEE Computer Society, Location.
- [CAR 03] CARTIGNY J., « Contributions à la diffusion dans les réseaux ad hoc », PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2003.

- [CLA 03] CLAUSEN T., JACQUET P., « Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) », october 2003, RFC 3626.
- [GAB 69] GABRIEL G. R., SOKAL R. R., « A New Statistical Approach to Geographic Variation Analysis », *Systematic Zoology*, vol. 18, 1969, p. 259–278.
- [HAE 05] HAENGGI M., PUCCINELLI D., « Routing in ad hoc networks : a case for long hops », *Communications Magazine, IEEE*, vol. 43, n° 10, 2005, p. 93-101.
- [HEU 07a] HEURTEFEUX K., VALOIS F., « Self-Organisation protocols : Behavior during the sensor network life », *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Athens, Greece, September 2007.
- [HEU 07b] HEURTEFEUX K., VALOIS F., « Topology Control Algorithms : a qualitative study during the sensor networks life », *3rd International Workshop on Localized Communication and Topology Protocols for Ad hoc Networks (LOCAN'07)*, in conjunction with MASS, Pisa, Italy, October 2007.
- [HEU 08] HEURTEFEUX K., VALOIS F., « Distributed Qualitative Localization for Wireless Sensor Networks », *7th International Conference on AD-HOC Networks & Wireless (ADHOC-NOW)*, Sophia Antipolis, France, September 2008.
- [LI 03] LI N., HOU J. C., SHA L., « Design and Analysis of an MST-Based Topology Control Algorithm. », *IEEE INFOCOM*, San Francisco, USA, April 2003.
- [MAG 07] MAGNANI A., LEUNG K., « Self-Organized, Scalable GPS-Free Localization of Wireless Sensors », *IEEE WCNC*, Hong Kong, China, 2007, p. 3798–3803.
- [NAW 07] NAWAZ S., JHA S., « Collaborative localization for wireless sensor networks », *IEEE PIMRC*, Athens, Greece, September 2007.
- [NIC 03] NICULESCU D., NATH B., « Ad Hoc Positioning System (APS) using AOA », *IEEE INFOCOM*, San Francisco, USA, 2003.
- [PL 09] P. LEVIS A. T., DAWSON-HAGGERTY S., « Overview of Existing Routing Protocols for Low Power and Lossy Networks », rapport, 2009, IETF.
- [RAM 09] RAMAN B., CHEBROLU K., GOKHALE D., SEN S., « On the Feasibility of the Link Abstraction in Wireless Mesh Networks », *Transactions on Networking*, vol. 17, n° 2, 2009.
- [RAS 07] RASKOVIC D., GIESSEL D., « Battery-Aware Embedded GPS Receiver Node », *Mobile and Ubiquitous Systems : Networking & Services, 2007. MobiQuitous 2007. Fourth Annual International Conference on*, vol. 1, 2007, p. 1-6.
- [TOU 80] TOUSSAINT G., « The relative neighbourhood graph of a finite planar set », *Pattern Recognition*, vol. 12, 1980, p. 261–268.
- [WAN 02] WAN P., ALZOUBI K., FRIEDER O., « Distributed construction of connected dominating set in wireless ad hoc networks », *INFOCOM*, New York, NY, USA, 2002.
- [WAR 97] WARD A., A.JONES, HOPPER A., « A new location technique for the active office », *IEEE Personal Communications*, vol. 4, 1997, p. 42-47.
- [WU 99] WU J., LI H., « On calculating connected dominating set for efficient routing in ad hoc wireless networks », *ACM DIALM*, New York, NY, USA, 1999, ACM Press, p. 7–14.
- [ZHA 08] ZHANG R., GORCE J.-M., « Optimal Transmission Range for Minimum Energy Consumption in Wireless Sensor Networks », *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*, 2008, p. 757-762.