

Localisation et routage géographique dans les réseaux MANETs

Mohamed Bakhouya, Ahmed Nait-Sidi-Moh⁵⁴

INTRODUCTION

Les solutions technologiques de géopositionnement par satellites (GPS, Glonass, Galileo) ou encore des réseaux hertziens terrestres, permettent d'aller beaucoup plus loin et d'adapter les techniques de localisation pour des applications autres que celles connues habituellement, telles que la précision (utilisation militaire, espionnage), le transport (véhicules, les individus, traçabilité), le guidage (routes, tourisimes), etc. Il existe un très vaste champ d'applications potentielles des enjeux et des services du géopositionnement. Parmi ces domaines d'application, les techniques du géopositionnement peuvent s'étendre au domaine de l'informatique et en particulier pour la localisation et le routage dans les réseaux mobiles *ad hoc*.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents protocoles de routage dans les réseaux mobiles, en mettant l'accent sur ceux qui utilisent les informations géographiques des nœuds. Les réseaux mobiles sans fil peuvent être classés en deux grandes catégories : les réseaux cellulaires, et les réseaux mobiles *ad hoc* (voir *figure 1*). Les réseaux cellulaires, aussi connus comme réseaux avec infrastructure, se caractérisent par des passerelles fixes (stations de base et points d'accès), qui sont chargés de l'acheminement des paquets entre les nœuds mobiles. En d'autres termes, les nœuds mobiles se connectent à des passerelles qui se situent dans la zone de couverture d'un réseau cellulaire. Ces passerelles s'occupent de router les paquets échangés entre les nœuds mobiles. Les réseaux mobiles *ad hoc* n'ont pas d'infrastructure fixe et tous les nœuds sont mobiles. Plus précisément, un réseau mobile *ad hoc*, est un système composé de sites mobiles.

⁵⁴ Laboratoire SeT/UTBM.

Un site est tout objet mobile capable de communiquer sur un réseau sans fil. Ces objets peuvent être des assistants personnels, des ordinateurs portables, des téléphones mobiles ou des capteurs. Dans ces réseaux, aucune administration centralisée n'est disponible. Ce sont les nœuds mobiles qui forment, d'une manière *ad hoc*, une infrastructure du réseau. De plus, aucune supposition ou limitation n'est faite sur la taille du réseau *ad hoc*, le réseau peut contenir des centaines ou des milliers d'unités mobiles [10]. Ces réseaux peuvent être utilisés dans une gamme d'applications telles que la communication sans fil entre les véhicules, les secours en cas de catastrophe, les missions de sauvetage, les opérations de combat, etc. Dans ce type d'applications, le recours à une administration centralisée ou à des infrastructures filaires n'est pas possible.

Les réseaux mobiles *ad hoc* sont des réseaux entièrement décentralisés et très dynamiques du fait de la mobilité des nœuds; un nœud peut rejoindre ou quitter le réseau fréquemment. Ces nœuds sont donc libres de se déplacer et de s'organiser arbitrairement, impliquant une grande variabilité de la topologie du réseau (voir *figure 2*) [38]. Cependant, la mobilité des nœuds limite l'applicabilité des modèles et des systèmes conçus pour les réseaux filaires. Parmi les défis majeurs dans la conception des applications basées sur des systèmes mobiles *ad hoc* figure le routage des informations entre les nœuds. Ces nœuds ou unités mobiles ne peuvent communiquer directement qu'avec les nœuds qui sont immédiatement dans le rayon de leur portée de transmission comme cela est indiqué dans la *figure 1*. Pour communiquer avec d'autres nœuds hors de cette portée, un ou plusieurs nœuds intermédiaires doivent être utilisés pour acheminer les paquets de la source vers la destination. Le grand nombre des nœuds, la forte mobilité des nœuds, la faible bande passante, et la limitation des batteries des mobiles doivent aussi être pris en compte pendant la conception des protocoles de routage.

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter une classification des protocoles de routage dans les réseaux mobiles *ad hoc* avec comme critère de comparaison leurs modes de fonctionnement. Le principal objectif est de donner une étude synthétique des différentes techniques de routage. Nous détaillerons les principaux problèmes concernant les techniques de chaque classe de protocoles de routage. Ensuite, le reste du chapitre sera consacré à une étude des protocoles de routage géographique dans les réseaux mobiles *ad hoc* et à une présentation des solutions actuellement disponibles.

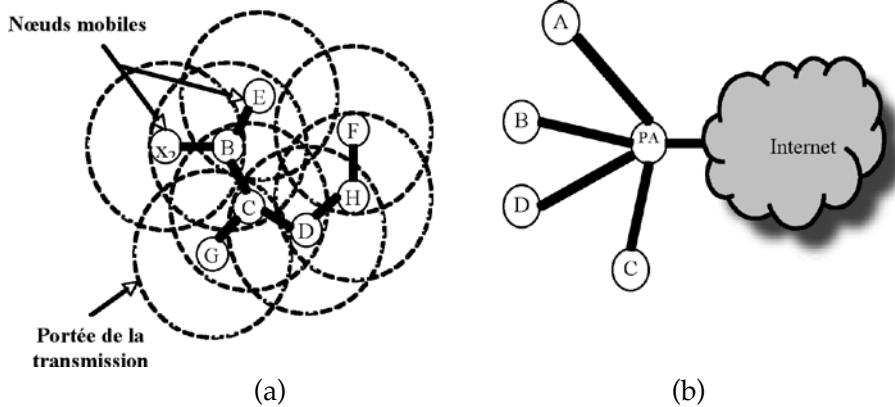


Figure 1. Exemple d'un réseau mobile (a) sans infrastructure et (b) avec infrastructure

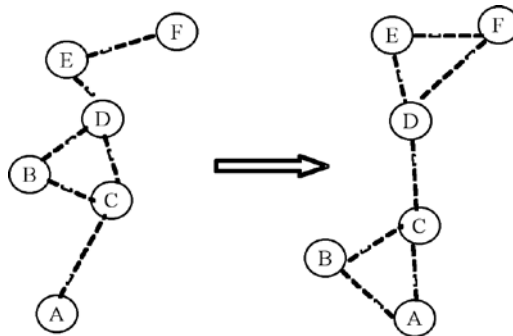


Figure 2. Exemple de changement de la topologie d'un réseau mobile *ad hoc*

Ce chapitre est structuré de la façon suivante : dans une première section, une classification des protocoles de routage dans les réseaux mobiles *ad hoc* est présentée. Ensuite, nous décrivons les différents systèmes de localisation et d'acheminement de paquets existants dans la littérature. Pour terminer, nous présentons une étude comparative de ces protocoles dans le contexte des réseaux à large échelle.

CLASSIFICATION

Les protocoles de routage existants dans la littérature destinés à acheminer les informations entre les nœuds d'un réseau mobile *ad hoc* peuvent être classés en deux grandes familles selon leurs modes de fonctionnement. La première famille regroupe les protocoles qui se basent sur la topologie

du réseau (voir *figure 3*). Plus précisément, ces protocoles utilisent les informations sur les liens du réseau pour la transmission des paquets [9]. Ils peuvent être classés en quatre catégories : les protocoles proactifs, les protocoles réactifs, les protocoles hybrides, et les protocoles hiérarchiques.

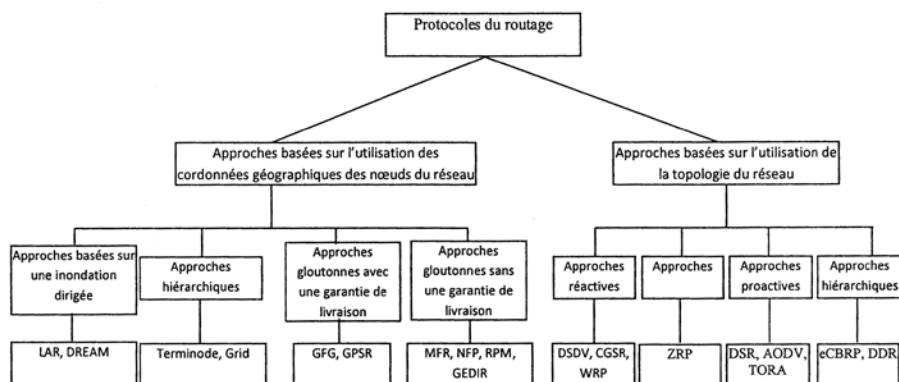


Figure 3. Classification des protocoles de routage selon leurs modes de fonctionnement

Les protocoles proactifs adoptent des algorithmes de routage classiques tels que le routage par vecteur de distance (ex. : DSDV [1]) ou le routage par état des liens (ex. : OLSR [11] et TBRPF [12]). Les nœuds maintiennent des informations sur les différentes routes disponibles dans le réseau. Plus précisément, une table de routage dans chaque nœud du réseau est maintenue. En effet, chaque nœud a toujours une vue consistante de la topologie du réseau. L'avantage majeur de cette approche est que les routes sont préétablies même si la majorité de ces routes ne sont pas utilisées. Dans les protocoles proactifs, les nœuds doivent rafraîchir périodiquement les informations de routage dans le but d'avoir une information cohérente pour atteindre les autres nœuds du réseau. Cependant, maintenir ces routes quand la topologie du réseau est dynamique représente l'inconvénient majeur de cette approche car les paquets envoyés pour la mise à jour peuvent consommer une grande partie de la bande passante disponible [13]. En d'autres termes, ce type de protocoles n'est pas adapté aux réseaux larges et qui ont une topologie très variable. En effet, tous les nœuds seront informés par ces changements, ainsi surchargés par des informations qu'ils n'utiliseront jamais, ce qui représente un gaspillage des ressources.

Afin de remédier à ce problème, les protocoles réactifs ont été développés (ex. DSR [4], TORA [6], AODV [5,14], ABR [7], SSA [8]). Ils adoptent des algorithmes classiques tels que le routage par vecteur de distance ou le routage à la source. Dans ces protocoles, les routes sont établies à la

demande, ce qui réduit la charge du réseau. Plus précisément, les informations de routage ne se propagent d'un nœud à l'autre que lorsque cela est nécessaire, c'est-à-dire, lorsqu'un nœud désire envoyer des informations à un autre nœud. Aucun échange de paquets de contrôle n'est nécessaire pour construire les tables de routage. Cependant, puisque les routes sont seulement maintenues à la demande, une étape de découverte d'un chemin par le nœud source est nécessaire avant que les paquets puissent être acheminés au nœud destinataire. Cette exploration utilise le principe d'inondation qui se termine une fois que la route est trouvée ou une fois que toutes les possibilités sont examinées. L'intérêt majeur de ce genre de protocoles réside dans le fait que le trafic dans le réseau est réduit par rapport à l'approche proactive. Le réseau n'investit ces ressources qu'en cas de besoin pour éviter tout type de gaspillage. Cependant, dans ce type de protocoles la procédure de recherche de celle-ci induit un délai supplémentaire et imprévisible; un délai avant que le premier paquet soit transmis. Un autre problème que posent les protocoles réactifs est le fait qu'à chaque fois qu'une procédure de découverte de route est lancée, le réseau est inondé par un trafic important qui s'avère aussi coûteux. Les protocoles réactifs utilisent souvent des caches au niveau des nœuds pour éviter de relancer à chaque fois un mécanisme de découverte de routes. Ces caches peuvent dégrader les performances du réseau quand ils contiennent des informations qui ne sont plus valides. Une comparaison de ces deux approches, réactive et proactive, peut être trouvée dans [16, 17, 41].

Les protocoles hybrides, tels que le protocole de routage ZRP [15], ont été proposés dans le but de profiter au maximum des avantages de chacune des deux solutions proactive et réactive. Cette approche consiste à utiliser une stratégie proactive au niveau local (sur un petit rayon autour d'un nœud) et une stratégie réactive au niveau global. Cela peut améliorer les performances du réseau en minimisant à la fois le temps de la latence et le trafic du contrôle. Néanmoins, dans le cas où deux nœuds voudraient communiquer, on retrouve le même problème de délai résultant de l'utilisation d'une approche réactive. En conclusion, dans les protocoles réactifs, proactifs et hybrides, le routage doit être réalisable sans organisation fixée au préalable (hiérarchie). Ils utilisent le mécanisme d'inondation pour la découverte de routes ce qui limite leur passage à l'échelle. D'autres protocoles basés sur l'organisation des nœuds du réseau sous forme d'une structure connue dont le but de faciliter le routage dans les réseaux *ad hoc* mobiles à large échelle ont été proposés dans [29, 47, 48, 49, 50, 51]. Par exemple, dans CBRP [47] les nœuds du réseau sont organisés en *clusters* où des nœuds sont élus pour coordonner le routage dans ces *clusters*.

Récemment, avec l'apparition de petits récepteurs GPS (Global Positioning System), qui représentent une classe des systèmes de navigation par satellite la plus utilisée jusqu'à présent – et qui est destinée à fournir des informations sur la position d'une unité mobile en temps réel et à assurer l'intégrité de ces informations, ainsi que les techniques de localisation [19, 20] –, un certain nombre de protocoles ont été développés [9]. Ces protocoles, communément appelés protocoles de routage géographiques, représentent la seconde famille que nous décrivons dans ce chapitre. La localisation et le routage géographique sont entendus comme toute solution ou fonction qui permet de positionner, de localiser et de produire des informations géographiques liées aux nœuds dans un réseau mobile, afin d'augmenter l'efficacité de la procédure de découverte d'itinéraires.

Les protocoles géographiques répondent à certaines limitations des protocoles basés sur la topologie en utilisant des informations supplémentaires qui concernent les positions géographiques des nœuds. Plus précisément, les changements fréquents de la topologie, conséquence de la mobilité des nœuds, implique de grands problèmes de passage à l'échelle des protocoles de routage traditionnels, basés sur l'utilisation de la topologie [18]. Dans ces protocoles, chaque nœud a seulement besoin de connaître les coordonnées géographiques de ses voisins immédiats et du nœud destinataire pour prendre une décision d'acheminement des paquets. Chaque nœud peut déterminer sa propre position grâce à l'utilisation des données GPS ou d'un autre système de positionnement [20]. Un service de localisation est utilisé par l'expéditeur d'un paquet pour déterminer la position du nœud destinataire et pour l'inclure dans les paquets à transmettre. La décision de routage dans chaque nœud est alors basée sur la position du nœud destinataire et de la position des voisins immédiats. Par conséquent, ces protocoles ne nécessitent pas la création ou le maintien d'itinéraires et les nœuds n'ont pas besoin de stocker et de maintenir à jour les tables de routage. L'avantage majeur de cette approche est que les paquets peuvent être acheminés à tous les nœuds disponibles dans une région géographique donnée.

Dans le reste de ce chapitre, nous présentons une étude des protocoles de routage géographiques dans les réseaux mobiles *ad hoc*, avec comme critère de comparaison leurs modes de fonctionnement.

LES PROTOCOLES DE ROUTAGE GÉOGRAPHIQUE

Les protocoles de routage géographiques ont comme caractéristique commune deux étapes distinctes : la localisation d'un nœud destinataire et l'acheminement ou le routage des paquets vers ce nœud. Dans la pre-

mière étape, il est nécessaire que le nœud source détermine la position géographique du nœud destinataire avant d'envoyer des paquets d'information. Pour cette opération de découverte de la position géographique, un service de localisation doit être utilisé [9]. Dans le contexte des réseaux *ad hoc* mobiles à large échelle, la fourniture d'un service de localisation efficace est un problème difficile vu l'absence d'une infrastructure fixe.

L'acheminement ou le routage d'un message par un nœud est essentiellement basé sur la position de ses voisins immédiats et la position du nœud destinataire. Dans un protocole de routage géographique, un nœud est supposé aussi connaître sa position géographique en utilisant les données GPS. Les positions des voisins sont généralement connues puisque chaque nœud envoie périodiquement sa position à ses voisins immédiats. En d'autres termes, la connaissance du voisinage est périodiquement mise à jour à l'aide de messages échangés entre les nœuds voisins.

Dans ce qui suit, nous décrivons les différentes techniques de localisation. Ensuite, nous présentons les différentes stratégies de routage. Enfin, nous effectuons une comparaison entre les différentes techniques de localisation ainsi que les différentes stratégies d'acheminement.

Les techniques de localisation

Le routage géographique dans un réseau mobile *ad hoc* nécessite la connaissance *a priori* des coordonnées géographiques des nœuds. Les nœuds mobiles enregistrent leurs positions actuelles en utilisant le mécanisme du système de localisation (ex. : GPS, Galileo). Un nœud désirant envoyer un paquet à un autre nœud doit connaître les coordonnées géographiques de ce nœud avant tout échange d'information. Quand un nœud ne dispose pas des coordonnées géographiques d'un autre nœud destinataire, il envoie une requête de positionnement au service de localisation en demandant ces informations.

Rappelons que dans les réseaux cellulaires classiques, il existe des nœuds fixes (avec des adresses connues *a priori*) qui maintiennent des informations concernant la position de tous les nœuds du réseau. Cependant, dans les réseaux mobiles *ad hoc*, il serait difficile d'obtenir la position d'un nœud jouant le rôle du serveur (*i.e.*, nœud stockant des informations concernant la position des autres nœuds) s'il faisait partie du réseau *ad hoc*. En d'autres termes, dans un réseau dynamique il est difficile d'obtenir des informations concernant les coordonnées géographiques d'un nœud, sans connaître celles des serveurs (nœuds mobiles).

Plusieurs systèmes de localisation ont été proposés récemment dans la littérature. Ils peuvent être classés en deux grandes familles selon leur

architecture ou leur mode de fonctionnement (voir *figure 4*) : les systèmes structurés et les systèmes non structurés. La première famille regroupe les systèmes qui mettent en œuvre une organisation structurée pour permettre la localisation des nœuds dans le réseau. Plus précisément, il s'agit des systèmes utilisant des mécanismes d'indexation centralisée ou décentralisée. La seconde famille regroupe les systèmes qui ne se basent sur aucune organisation ou structure particulière (ex. : *clusters*), mais qui utilisent un mécanisme d'inondation permettant à un nœud de diffuser ses coordonnées géographiques. Dans ce qui suit, nous détaillons ces deux grandes familles.

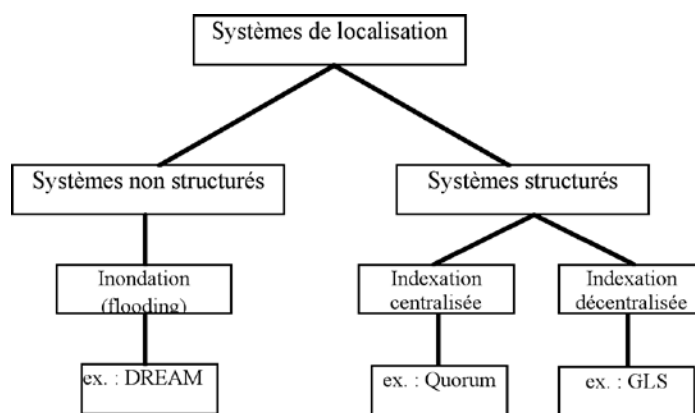


Figure 4. Classification des systèmes de localisation selon leur architecture

Les systèmes non structurés

Les systèmes non structurés utilisent une technique de localisation où chaque nœud du réseau échange périodiquement des messages de contrôle afin d'informer les autres nœuds de sa localisation géographique. DREAM⁵⁵ est l'un de ces systèmes. Chaque nœud maintient une base de données (*lookup table*) qui contient des informations sur la position des autres nœuds du réseau [35]. Chaque entrée dans la base de données contient l'identifiant du nœud, la direction et la distance pour atteindre ce nœud, et une valeur indiquant le moment de réception de cette information.

Chaque nœud diffuse régulièrement des paquets de mise à jour concernant sa position aux autres nœuds du réseau. En se basant sur les informations incluses dans le paquet, un nœud peut contrôler la précision concernant la position des autres nœuds par :

⁵⁵ DREAM : Distance Routing Effect Algorithm for Mobility.

- la fréquence d’envoi des mises à jour (appelée résolution temporelle);
- et la distance que le paquet de mise à jour peut parcourir avant d’être rejetée (résolution spatiale) [9].

La résolution temporelle est associée au taux de mobilité d’un nœud (c’est-à-dire, plus la vitesse est élevée, plus les mises à jour sont fréquentes). La résolution spatiale est utilisée pour fournir des informations exactes sur la position des voisins proches les uns des autres, et moins d’informations exactes concernant les nœuds trop éloignés. Le coût associé à l’obtention des informations exactes sur la position des nœuds très éloignés peut être réduit puisque, comme l’affirme l’expression : « plus la distance séparant deux nœuds est grande, plus le mouvement d’un nœud devient minime à l’égard de l’autre nœud ». Cette notion est appelée l’effet de distance (*distance effect*) [37]. Un exemple montrant cette notion d’effet de distance est donné dans la *figure 5*. Supposons par exemple, que le nœud A n’est pas en mouvement, tandis que les nœuds B et C se déplacent avec la même vitesse et dans la même direction. Du point de vue du nœud A, le déplacement du nœud B sera plus remarquable par rapport au déplacement du nœud C. L’effet de distance permet d’avoir une faible résolution spatiale dans les zones qui sont trop loin du nœud cible, à condition que les nœuds intermédiaires soient en mesure de mettre à jour les informations, concernant la position, qui sont incluses dans le paquet.

Lors de l’envoi des données, si la source possède des informations récentes sur la localisation du nœud destinataire, elle choisit un ensemble de nœuds voisins qui sont localisés dans la direction source / destination. Si un tel ensemble n’existe pas, les données sont inondées dans le réseau entier. Dans le cas où une liste contenant les identifiants de tels nœuds, est insérée dans l’en-tête du paquet avant sa transmission, seuls ces nœuds examinent le paquet. Lors de la réception du paquet, le nœud de transit détermine sa propre liste des nœuds prochains, et envoie le paquet avec la nouvelle liste. Si aucun voisin n’est localisé dans la direction de la destination, le paquet reçu sera ignoré. Quand le nœud destinataire reçoit les données, il envoie un acquittement au nœud source. Cependant, dans le cas de réception par inondation, les acquittements ne sont pas envoyés. Dans le cas où la source envoie les données en spécifiant les nœuds suivants (en se basant sur leur localisation), un TTL⁵⁶ associé à la réception des acquittements est activé. Si aucun acquittement n’est reçu avant l’expiration du TTL, les données seront retransmises.

⁵⁶ TTL : Time-to-Live.

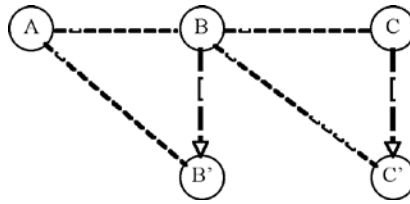


Figure 5. L'effet de distance : du point de vue de A $\hat{BAB}' > \hat{CAC}'$
même B et C se déplacent avec la même vitesse [37]

Les systèmes structurés

Ces systèmes sont basés sur l'utilisation d'un mécanisme similaire de celui utilisé dans les systèmes de découverte de services [52]. Il s'agit de l'utilisation d'un annuaire ou d'une base de données pour stocker les informations concernant les coordonnées géographiques des nœuds du réseau. Ils peuvent être classés en deux familles. La première regroupe les systèmes qui utilisent un mécanisme d'indexation centralisée. Ils sont proposés pour localiser des nœuds dans les réseaux de petite taille. La seconde famille regroupe les systèmes qui se basent sur un mécanisme d'indexation décentralisée. Ils sont proposés pour la localisation des nœuds dans les réseaux à grande échelle.

Le système de localisation appelé Quorum System [18] utilise un mécanisme d'indexation centralisée. Dans l'exemple de la figure 6, un sous-ensemble des nœuds (*backbone*), nœuds 1-6, est choisi pour héberger la base de données, concernant les informations sur la position des autres nœuds du réseau. Un réseau virtuel est construit entre les nœuds de cet ensemble. Un nœud envoie des messages de mise à jour de sa position au plus proche nœud (*backbone*) appartenant au réseau virtuel, qui choisit alors un quorum de nœuds pour enregistrer cette information. Par exemple, le nœud D envoie une requête de mise à jour au nœud 6, qui pourrait ensuite sélectionner le quorum A constitué des nœuds 1, 2, et 6, d'enregistrer la position du nœud D. Quand un nœud S veut obtenir la position du nœud D, il envoie une requête au *backbone* le plus proche, qui à son tour contacte les nœuds d'un quorum. Par exemple, le nœud 4 pourrait, par exemple, choisir le quorum B, composé des nœuds 4, 5 et 6. Puisque par définition l'intersection de deux quorums est non vide, au moins une réponse est garantie pour obtenir la position du nœud désiré.

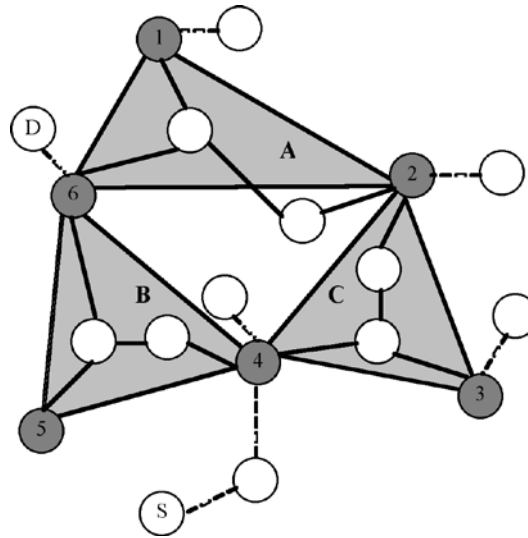


Figure 6. Exemple de quorums [9]

Il est important d'horodater les mises à jour effectuées, car certains nœuds du quorum interrogés auraient pu être dans le quorum des précédentes mises à jour, et envoient alors des informations erronées. Si plusieurs réponses sont reçues, celle qui représente la plus récente mise à jour doit être choisie.

Un aspect très important des services de localisation basés sur la notion du quorum, est le suivant : plus la taille de quorum est grande et plus le coût des mises à jour est élevé. En effet, plus le nombre de nœuds inclus dans l'intersection de deux quorums est grand, plus la résilience augmente contre les nœuds inaccessibles. Dans [18] plusieurs méthodes de construction de quorums sont présentées. D'autres travaux basés sur la construction de quorums sont présentés dans [19].

Le système de localisation GLS⁵⁷ [33] est un autre système basé sur l'utilisation d'indexation décentralisée. Dans GLS, l'espace contenant le réseau est partagé d'une manière récursive en suivant le principe des *quadtree*. Plus précisément, l'espace est découpé en quatre zones carrées, puis à nouveau ces zones sont segmentées de manière récursive jusqu'à arriver à la taille minimale souhaitée. Le niveau 0 correspond au carré de taille minimale. Un carré de niveau n est composé de quatre carrés de niveau $n-1$. Le principe de localisation dans le système GLS est le suivant. Chaque nœud doit choisir un nœud pour jouer le rôle de serveur de locali-

⁵⁷ GLS : Grid Location Service.

sation dans chacune des trois zones conduisant ainsi à la formation d'une zone de niveau supérieur. Comme le groupe de serveurs de localisation pour chaque nœud est différent de ceux des autres nœuds, l'information de localisation est distribuée à travers les nœuds du réseau. Le choix des serveurs de localisation peut être fait selon plusieurs stratégies (ex. : l'élection). Dans GLS, un nœud ayant comme identifiant ID va choisir comme serveurs de localisation des nœuds dont les identifiants sont proches du ID. Le nœud le plus proche d'un nœud A, par exemple, est le nœud dont l'identifiant (ID) est le plus petit ID supérieur à celui de A. Pour effectuer ce choix, un espace d'adressage acyclique est utilisé. Par exemple, si l'on considère l'espace d'adressage compris entre 1 et 20, le nœud 18 est plus proche de 1 que de 14.

La *figure 7* montre dans quelles zones le nœud 10 devra choisir ses serveurs de localisation. Quand le nœud 10 désire distribuer les informations sur sa position, il envoie un message de mises à jour aux nœuds ayant un ID plus proche dans chacun des trois carrés de premier ordre qui l'entoureraient. Ainsi, l'information de position est disponible sur les nœuds 15, 18, 73 et à tous les nœuds qui sont dans le carré du même ordre que 10. À nouveau, les nœuds situés dans les carrés de deuxième ordre et leurs identifiants qui sont plus proches du 10 sont choisis pour accueillir la position du nœud 10; dans l'exemple, ce sont les nœuds 14, 25, et 29. Ce processus est répété jusqu'à ce que la zone du réseau *ad hoc* soit couverte. En suivant cette stratégie de dissémination, la densité d'information sur la position d'un nœud décroît d'une manière logarithmique avec la distance à partir de ce nœud. En d'autres termes, comme le nombre de serveurs de localisation associés à un nœud diminue avec la distance, le nombre total de nœuds mémorisant l'information tend à être minimisé [18].

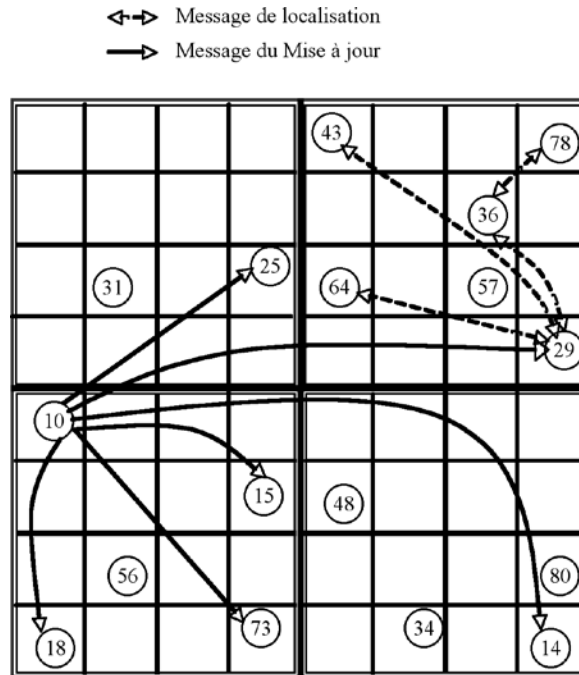


Figure 7. Exemple de Grid Location Service (GLS)

Un nœud A désirant contacter le nœud B, suivra la même démarche. Il enverra sa requête au nœud le plus proche de B. Ce nœud transmettra la requête de la même manière et ainsi de suite jusqu'à atteindre un serveur de localisation contenant des informations sur la position du nœud B. Supposons maintenant que le nœud 78 veuille obtenir la position du nœud 10. Il doit d'abord trouver un nœud de sa proximité qui connaît la position du nœud 10. Dans l'exemple, ce nœud est 29. Le nœud 78 ne sait pas *a priori* que le nœud 29 détient des informations concernant la position du nœud 10, mais il possède des informations locales lui permettant de découvrir ces informations. La position de ce nœud (le nœud 29) est stockée dans les trois nœuds 36, 43, et 64 (voir figure 7). La requête de découverte de la position du nœud 10 peut maintenant être dirigée vers le nœud ayant l'identifiant le plus proche. Dans l'exemple de la figure 7, c'est le nœud 36. Ce nœud ne possède pas forcément les informations nécessaires sur la localisation du nœud recherché, mais il connaît le positionnement d'un nœud avec un ID proche. Ce dernier est le nœud 29, qui possède la position du nœud recherché. Ce processus continue jusqu'à ce qu'un nœud ayant des informations désirées soit localisé.

Les approches de routage

Dans cette section, nous présentons les différentes stratégies utilisées dans les protocoles géographiques pour l'acheminement des paquets dans les réseaux mobiles *ad hoc*. Quatre classes ont été identifiées [9, 22] : approches gloutonnes sans garantie de livraison, approches gloutonnes avec garantie de livraison, approches hiérarchiques, approches basées sur une inondation dirigée (voir *figure 1*).

Approches basées sur une inondation dirigée

Les approches basées sur l'inondation dirigée ont été proposées dans le but de limiter la diffusion des requêtes de découverte d'itinéraire. Les requêtes sont diffusées seulement aux nœuds se trouvant dans la zone du nœud destinataire. Parmi les protocoles utilisant ces approches, on trouve le protocole LAR⁵⁸ [32] et le protocole DREAM [31].

Pendant la découverte d'un itinéraire, le protocole LAR ne définit pas un mécanisme de localisation des nœuds, mais il utilise des informations sur la position, considérée connue à l'avance, des nœuds. L'objectif est de limiter la diffusion des paquets de découverte de routes. Deux approches ont été proposées. Dans la première approche, deux types de zones ont été définis (voir *figure 8(a)*) : *expected zone* (EZ) et *request zone* (RZ). L'EZ est définie comme la zone où devrait se trouver le nœud du point de vue de la source. Cette zone, à l'instant t_1 , est calculée sur la base de sa position antérieure connue par le nœud source à l'instant t_0 et de la vitesse moyenne v du mouvement du nœud destinataire. En se basant sur ces informations, le nœud source définit cette zone comme un cercle du centre (X_d, Y_d) et de rayon $R=(t_1-t_0)v$. La RZ est définie comme étant le plus petit rectangle comprenant la position actuelle du nœud source et de la zone EZ. La RZ contient généralement la zone EZ. Dans cette approche, lorsqu'un nœud S souhaite échanger des informations avec un nœud D, il calcule la zone EZ dans laquelle le nœud D peut être localisé. Si aucune information n'est disponible, LAR est réduite à des simples inondations. Si des informations de localisation sont disponibles, la zone RZ est définie. Durant la phase de découverte d'une route, les informations concernant la RZ sont jointes à la requête et seuls les nœuds appartenant à cette zone la diffuseront (ex. : les nœuds I et K dans la *figure 8(a)*). Cela permet de diminuer la charge des paquets de contrôles diffusés dans le réseau. À la réception du paquet, par le nœud destinataire, il génère une réponse en indiquant sa position actuelle, l'heure et sa vitesse moyenne.

⁵⁸ LAR : Location-Aided Routing.

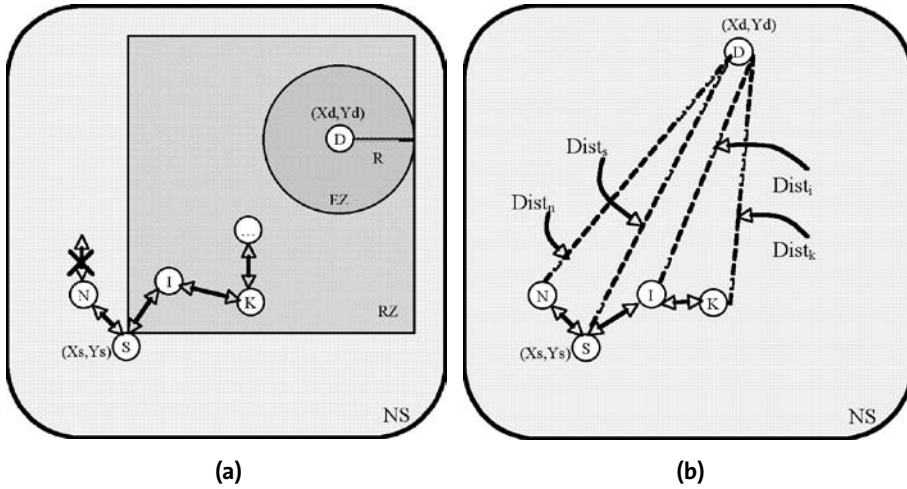


Figure 8. (a) Exemple de RZ et EZ dans l'espace du réseau (network space, NS), (b) sans l'utilisation du RZ et E

Dans la deuxième approche, le nœud source calcule la distance $dist_s$ qui le sépare du nœud destinataire. Cette distance ainsi que les coordonnées (X_d, Y_d) de la destination D sont ensuite incluses dans le paquet de découverte d'itinéraires. Ce dernier est envoyé par la suite aux nœuds voisins (voir figure 8 (b)). Quand le nœud I reçoit ce paquet, il calcule la distance $dist_i$ qui le sépare de la destination D, et la compare avec la distance $\alpha \times dist_s + \beta$, où $dist_s$ est la distance contenue dans le paquet, les paramètres α et β sont des paramètres du système. Dans le cas où la distance calculée est inférieure ou égale à la distance $dist_i$, le nœud I envoie le paquet reçu. Lors de l'envoi, le nœud met à jour le champ de distance, $dist_i$, avec sa propre distance qui le sépare du nœud destination. Dans le cas contraire, le nœud I ne rediffuse pas le paquet. Quand un nœud J reçoit le paquet du nœud I pour la première fois, il procède de la même manière que le nœud I. Si aucune réponse de route n'est reçue après un certain temps (*TTL* par exemple), le nœud source rediffuse une nouvelle requête de découverte de route.

Le protocole LBM⁵⁹ [36] est une extension du protocole LAR pour permettre à un nœud de diffuser des messages à tous les nœuds inclus dans une zone spécifiée. Ce mécanisme est appelé le *Geocasting* [36,42].

Dans le protocole DREAM, le nœud source S diffuse le paquet de découverte à tous les voisins immédiats (se trouvant à un seul saut) qui se trouve dans la direction du nœud destinataire D. Pour déterminer cette

59 LBM : Location-Based Multicast.

direction, le nœud S calcule la région susceptible d'englober le nœud D, appelée EZ, *expected zone* (voir figure 9). L'EZ est délimitée par un cercle autour de la position du nœud D. Puisque l'information à propos de cette position peut changer, le rayon r de cette région est calculé de la manière suivante : $r = (t_i - t_0)v_{\max}$, où t_i est le temps actuel ; t_0 est le temps associé à la dernière information que S possède à propos du nœud D, et v_{\max} est la vitesse maximale d'un nœud dans le réseau. Rappelons que la position concernant le nœud D est déjà connue et stockée dans sa base de données à travers le processus de localisation utilisé par DREAM (voir section *Les systèmes non structurés*). Étant donné la région EZ, la direction vers le nœud D est définie par la ligne entre S et D et de l'angle φ (voir figure 9). Les nœuds voisins répètent cette procédure en utilisant les informations sur la position de D. Si un nœud ne dispose pas d'un voisin situé à un seul saut dans la direction du nœud destinataire, une procédure de recouvrement doit être démarrée.

Approches hiérarchiques

Les protocoles basés sur l'utilisation d'un mécanisme hiérarchique sont proposés typiquement pour le routage des messages dans les réseaux mobiles *ad hoc* à large échelle. Parmi les protocoles utilisant ce principe, on trouve Terminode [30, 31, 32] et GLS [33]. Tous ces protocoles sont basés sur un service distribué de localisation permettant la diffusion des informations concernant la position sur plusieurs nœuds. Par exemple, GLS forme une hiérarchie des carrés, afin que l'ordre de n carrés contienne exactement quatre-ordre $(n-1)$ carrés. Quand un nœud désire envoyer des informations à un nœud destinataire, il envoie une requête au nœud jouant le rôle du serveur pour déterminer la position du nœud destinataire comme cela a été décrit dans la section *Les systèmes structurés*.

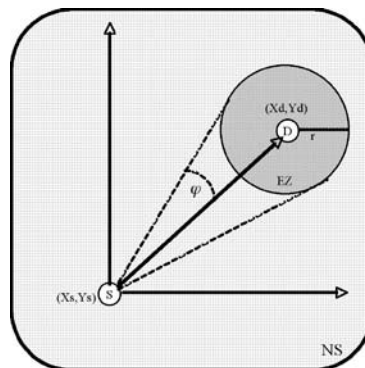


Figure 9. Un exemple d'*expected zone* dans DREAM

Dans le protocole Terminode deux techniques ont été proposées dans [33, 46] : TLR⁶⁰ et TRR⁶¹. Les paquets sont acheminés en utilisant la technique TLR si la destination est proche (en termes de nombre de sauts) au nœud source. Pour les longues distances, la technique TRR est utilisée. Une fois qu'un paquet arrive à la zone proche du destinataire, il continue d'être transmis par le biais du protocole de routage local. En d'autres termes, TRR est active quand le nœud destinataire est éloigné. La technique TLR est active quand un paquet arrive à proximité de la destination et utilise des tables de routage construites par les terminodes proches [46]. TRR est similaire à la technique utilisée dans ZRP pour l'acheminement des paquets entre les zones (*intrazone routing protocol*). L'utilisation de ces deux techniques permet d'améliorer considérablement le taux de succès des paquets délivrés et de réduire la consommation des ressources par rapport à l'utilisation des protocoles réactifs.

Afin de prévenir la transmission des paquets de longue distance de tomber sur un maximum local, le nœud expéditeur inclut une liste de positions dans l'en-tête du paquet. Le paquet doit alors traverser les zones de ces positions durant son trajet vers le nœud destinataire. La transmission de paquets entre ces zones est effectuée en utilisant une stratégie « gloutonne ».

Dans le protocole GLS une technique de routage proactif à base de vecteur distance est utilisée au niveau local, tandis qu'une technique basée sur l'utilisation des coordonnées géographiques est employée pour la transmission à longue distance des paquets. Cependant, dans le protocole GLS, la hiérarchie n'est pas introduite seulement pour le passage à l'échelle, mais aussi pour permettre à des nœuds qui ne connaissent pas leur propre position de participer au routage. L'idée principale est d'avoir au moins un nœud PAN⁶² dans chaque zone où le protocole proactif peut être utilisé. Ces nœuds dans ce domaine peuvent alors être utilisés comme *proxies* : un autre nœud PUN⁶³ utilise la position d'un nœud PAN comme sa propre position. Les paquets qui sont adressés à un nœud PUN – donc arrivent à un nœud PAN – sont ensuite transmis selon les informations du protocole proactif utilisé localement.

Dans GLS, pour le routage à longue distance, un mécanisme appelé INF⁶⁴ a été proposé. La technique utilisée est similaire à celle utilisée dans Terminode, si un nœud n'a pas de voisin dans la direction *forward progress*, il supprime le paquet et envoie une notification à l'expéditeur du paquet. L'expéditeur du paquet choisit aléatoirement une seule position intermé-

60 TLR : Terminode Local Routing.

61 TRR : Terminode Remote Routing.

62 PAN : Position-Aware Node.

63 PUN : Position-Unaware Node.

64 INF : Intermediate Forwarding Node.

diaire dans un cercle autour du point médian de la ligne entre l'émetteur et le récepteur. Les paquets devront parcourir cette position intermédiaire. Si le paquet est encore rejeté, le rayon du cercle est augmenté et une autre position aléatoire est choisie. Ce processus est répété jusqu'à ce que les paquets soient transférés à la destination ou jusqu'à atteindre une valeur prédéfinie, dans ce cas l'expéditeur suppose que la destination est inaccessible.

Approches gloutonnes sans aucune garantie de livraison

Dans ces approches, le nœud source doit inclure la position approximative du nœud destinataire dans le paquet de découverte d'itinéraire. Cette information est déterminée en utilisant un service de localisation. Différentes stratégies ont été proposées pour sélectionner le nœud voisin auquel le paquet devra être transmis en se basant sur la notion du progrès et de direction. Étant donné un nœud source *S* et un nœud receveur *C*, la progression est définie comme la projection de la ligne reliant *S* et *C* sur la ligne reliant *S* et le nœud destinataire *D*. Le nœud *C* est considéré vers l'avant si le progrès est positif (par exemple, pour le nœud *S* et le nœud *C*, ce sont les nœuds *A* et *B* dans la *figure 10*), sinon il est considéré en arrière (par exemple, les nœuds *I* et *E* dans la *figure 10*). En utilisant la notion de direction, quand un nœud intermédiaire reçoit un paquet, il le transmet à un voisin localisé dans la direction du nœud destinataire (le nœud *B* dans la *figure 10*). Ce processus doit être répété jusqu'à ce que le nœud destinataire soit localisé.

La première stratégie utilisant cette notion a été proposée dans [25]. Dans cette stratégie, le nœud expéditeur choisi aléatoirement un des nœuds les plus proches de la destination et lui transmet le paquet. Cette stratégie permet de réduire le nombre d'opérations nécessaires pour transmettre un paquet, car elle ne nécessite pas la possession des informations exactes sur la position du nœud destinataire.

La deuxième stratégie, MFR⁶⁵ [23], a été proposée pour minimiser le nombre de sauts qu'un paquet doit traverser afin d'atteindre la destination. Dans cette stratégie, le nœud le plus proche de la destination – parmi les nœuds voisins – est choisi comme prochain nœud à visiter, c'est le nœud *C* dans la *figure 10*, où les nœuds *S* et *D* désignent la source et la destination respectivement, et le cercle de rayon *r* indique la portée maximale de transmission du nœud *S*. Comme métrique de proximité, il est possible d'utiliser par exemple la distance euclidienne. MFR est une stratégie applicable dans des situations où l'expéditeur d'un paquet ne peut pas adapter la puissance de transmission du signal à la distance entre l'expéditeur

65 MFR : Most Forward Within Radius.

et le récepteur [46]. Pour résoudre ce problème, les auteurs ont proposé, dans [24], une stratégie, NFP⁶⁶, où l'expéditeur peut adapter la puissance de son signal de transmission. Dans NFP, le paquet est transmis au voisin le plus proche de la destination; c'est le nœud A dans la *figure 10*. Si tous les nœuds utilisent cette stratégie, la probabilité de collisions de paquets est réduite de manière significative [46]. Par conséquent, la moyenne des progrès du paquet, lorsqu'il est transmis avec succès, est plus élevée.

Une autre stratégie de transmission des paquets, appelée *compass routing* a été proposée dans [43]. Dans cette stratégie, le voisin le plus proche de la ligne droite entre l'expéditeur et le nœud destinataire est sélectionné. Dans la *figure 10*, c'est le nœud B. L'objectif de cette stratégie est de minimiser la distance spatiale d'acheminement du paquet. La stratégie GEDIR⁶⁷, proposée dans [26], est similaire à la stratégie MFR. Un critère de terminaison a été ajouté pour éviter les situations où le nœud voisin sélectionné est le nœud à partir duquel le message a été envoyé. En d'autres termes, le message ne sera pas acheminé si le meilleur choix pour un nœud courant consiste à retourner le message au nœud dont le message provient.

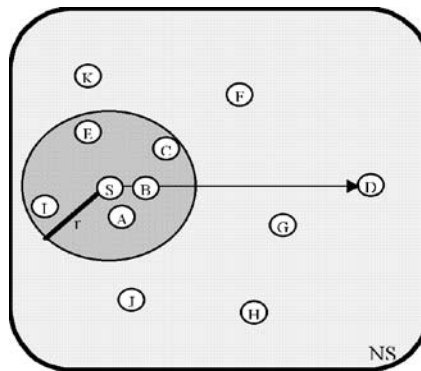


Figure 10. Stratégies gloutonnes

Dans les stratégies décrites ci-dessus, le chemin peut ne pas être trouvé même s'il existe. Cela est dû à la nature d'acheminement basée sur la décision locale. Un exemple de ce problème est illustré dans la *figure 11*. Dans cette figure, le demi-cercle autour de D ayant comme rayon la distance entre S et D, et le cercle autour de S montre la portée de transmission de S. Il faut noter qu'il existe un chemin d'accès ({AGBC}) valide entre S à D. Le problème ici est que S est plus proche de la destination D en comparaison

66 NFP : Nearest With Forward Progress.

67 GEDIR : Geographic Distance Routing.

avec les nœuds se trouvant dans sa portée de transmission. Pour résoudre ce problème, une stratégie basée sur l'utilisation du progrès négatif et positif a été proposée dans [25]. Le paquet doit être transmis au nœud avec moins de progrès (*negative progress*) si aucun nœud avec un progrès positif ne peut être trouvé dans la direction vers S. Cependant, cela peut provoquer des boucles dans le chemin qui ne peuvent se produire que lorsque les paquets sont transmis seulement vers le nœud destinataire avec des progrès positifs.

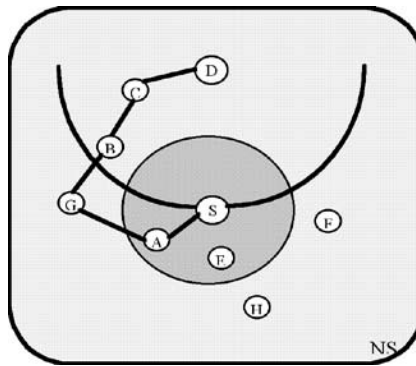


Figure 11. Exemple d'une situation de non-livraison

Approches gloutonnes avec une garantie de livraison

Les protocoles appartenant à cette catégorie ont été proposés principalement pour garantir la livraison des paquets vers la destination même en présence de boucles. Par exemple, les protocoles Face-2 [27] et le protocole GPSR⁶⁸ [28] ont été proposés pour bien acheminer un paquet vers la destination en utilisant un mécanisme permettant de rendre le graphe planaire. Les deux protocoles ne nécessitent pas le stockage des informations complémentaires dans les nœuds. Deux modes sont utilisés : un mode de recouvrement et un mode glouton. Un paquet entre dans le mode de récupération quand il arrive à un maximum local. Il revient au mode glouton quand il arrive à un nœud plus proche de la destination que le nœud où il est entré dans le mode de récupération. Par exemple, dans GPSR, si un tel nœud n'existe pas, le paquet est acheminé le long du périmètre de la zone sans nœud. Pour que le périmètre soit bien emprunté sans boucle, il est nécessaire de rendre au préalable le graphe planaire.

⁶⁸ GPSR : Greedy Perimeter Stateless Routing Protocol.

Un graphe planaire est un graphe sans arêtes d'intersection. Un réseau *ad hoc* peut être modélisé par un graphe où les nœuds sont des sommets. Une arête existe entre deux sommets s'ils sont suffisamment proches pour communiquer directement les uns avec les autres. Le graphe représentant le réseau *ad hoc* n'est pas généralement planaire (voir *figure 12*, où la portée de transmission de chaque nœud contient tous les autres nœuds). Dans le but de construire un sous-graphe planaire connecté au graphe formé par les nœuds du réseau, un mécanisme proposé dans [44], a été utilisé comme suivant : une arête entre deux nœuds A et B est incluse dans le graphe que si l'intersection des deux cercles avec un rayon égal à la distance entre A et B autour de ces deux nœuds ne contient pas d'autres nœuds.

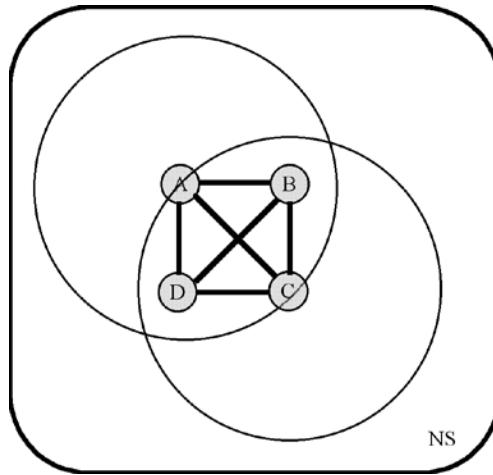


Figure 12. Exemple d'un graphe non planaire

Par exemple, dans la *figure 12*, l'arête entre A et C ne serait pas incluse dans le sous-graphe planaire car B et D se trouvent dans l'intersection des deux cercles. Il est important de réaliser que la décision qu'une arête soit incluse ou non dans le graphe peut être prise localement par chaque nœud, dans la mesure où chaque nœud connaît la position de tous ses voisins.

Après la construction du graphe planaire, le mécanisme suivant doit être utilisé pour trouver un chemin d'un nœud source vers un nœud destinataire. Le concept général est de transmettre progressivement le paquet sur les faces qui sont de plus en plus près de la destination en utilisant la technique *right-hand rule* : transmettre le paquet sur le prochain nœud *counter-clockwise* du nœud dont il vient. La *figure 13* montre comment ce principe est effectué quand un paquet est transmis du nœud S vers le nœud

D dans le mode de recouvrement. Chaque fois que la ligne entre la source et la destination croise le nœud auquel le paquet est sur le point d'être transmis, on vérifie si cette intersection est plus proche de la destination que toutes autres intersections précédemment rencontrées. Par exemple, *figure 13*, dans le nœud A, le paquet est diffusé avec le mode périmètre aux nœuds B et C. Quand il arrive au nœud C, le paquet est diffusé en mode glouton puisqu'il est proche du nœud destinataire. Cet algorithme garantit qu'un chemin sera trouvé à partir de la source vers la destination s'il en existe au moins un dans le graphe non planaire original. Pour qu'un nœud puisse décider localement du choix d'un nœud voisin pour diffuser le paquet, des informations supplémentaires doivent être incluses dans l'en-tête du paquet. Parmi ces informations on trouve la position du nœud, la position de la dernière intersection qui a causé le changement de face, et la première arête parcourue sur la face actuelle. Par conséquent, chaque nœud de routage peut prendre toutes les décisions, basées uniquement sur ces informations et les informations relatives à ses voisins locaux.

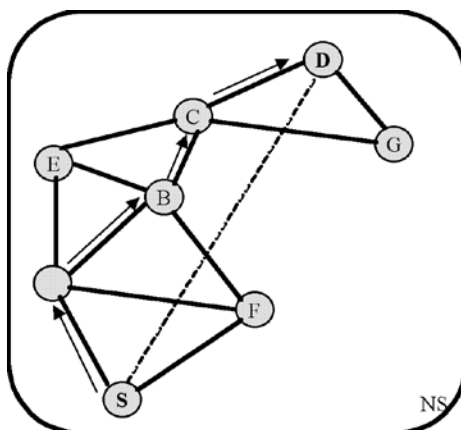


Figure 13. Exemple d'utilisation du graphe planaire pour acheminer les paquets

COMPARAISON

Comme nous l'avons évoqué auparavant, le routage des paquets d'un nœud source vers un nœud destinataire peut être séparé en deux étapes distinctes : une étape de découverte de la position du nœud destinataire et une étape d'acheminement des paquets, en utilisant les informations trouvées lors de la première étape. Dans ce qui suit, nous présentons une brève comparaison des services de localisation et des différentes straté-

gies d'acheminement dans les réseaux *ad hoc*. Un aspect clé de cette comparaison est de savoir comment ces différentes approches supportent le passage à l'échelle.

Pour la découverte des coordonnées géographiques, deux systèmes de localisation ont été examinés. Dans les systèmes non structurés, tels DREAM, les informations concernant la position sont disséminées dans le réseau. Le délai associé à chaque requête de dissémination dépend de la mobilité du nœud, tandis que le rayon (*range*) de chaque inondation est choisi de manière à ce que les nœuds à proximité soient mis à jour beaucoup plus souvent que les nœuds éloignés. Les systèmes non structurés supposent que chaque nœud maintient des informations sur la position des autres nœuds du réseau. La complexité en termes de nombre de messages nécessaires pour la mise à jour des informations sur la position des autres nœuds est linéaire en terme du nombre de nœuds, tandis que la complexité pour la localisation des coordonnées géographiques d'un nœud n'a besoin que d'un nombre fixe de messages. En raison du nombre de messages nécessaires pour les mises à jour des informations sur la position des nœuds du réseau, ces systèmes ne sont donc pas appropriés aux réseaux à grande échelle. En revanche, ces systèmes possèdent des propriétés intéressantes pour des applications spécifiques, telles que les communications véhicule à véhicule (V2V).

Dans les systèmes structurés, une structure entre les nœuds du réseau doit être mise en œuvre. Par exemple, dans le système quorum, les groupes de nœuds participant à la gestion des informations concernant la position des autres nœuds du réseau doivent être identifiés. Les mises à jour sont transmises à l'un de ces groupes et les requêtes de découverte de position sont adressées à un autre groupe. Puisque les groupes se chevauchent, les informations nécessaires sont disponibles dans chaque groupe. Le système quorum nécessite les mêmes opérations pour la mise à jour des informations sur la position des autres nœuds et la localisation d'un nœud. Dans les deux cas, un nombre constant de nœuds (le quorum) doit être contacté. Chacune de ces opérations a une complexité en termes de communication et une complexité en termes de temps, qui dépend du diamètre du réseau. L'état des informations gérées dans les nœuds *backbone* est constant, car un nœud *backbone* est formé par un nombre fixe de nœuds. Cette approche est moins robuste, car les informations concernant la position d'un nœud ne seront plus disponibles, si un nombre significatif de nœuds *backbone* ne sont pas disponibles. Cela peut augmenter considérablement la complexité, la mise en œuvre et l'évolutivité de cette approche.

Les approches proposées dans la littérature pour l'acheminement des paquets ont été classifiées en quatre catégories (voir *figure 3*) : approches

gloutonnes sans aucune garantie de livraison, approches gloutonnes avec une garantie de livraison, approches hiérarchiques, approches basées sur une inondation dirigée.

Dans les approches gloutonnes sans aucune garantie de livraison, les paquets sont transmis vers les nœuds qui sont dans la direction du nœud destinataire en utilisant les coordonnées géographiques. Si un maximum local est rencontré, une stratégie de réparation, telle que celle décrite dans GPSR et Face-2, peut être utilisée pour éviter un abandon des paquets. Rappelons que les approches gloutonnes avec une garantie de livraison ont été proposées principalement pour garantir la livraison des paquets vers la destination, même en présence de boucles. Une approche gloutonne est à la fois efficace et très bien adaptée au routage dans les réseaux *ad hoc* ayant une topologie très dynamique. Dans [17] une évaluation quantitative du GPRS avec DSR dans un environnement dynamique est présentée. Les résultats montrent que GPSR est plus performant que DSR selon presque, tous les critères, y compris la charge du réseau et la fraction des paquets livrés avec succès.

Dans les approches basées sur une inondation dirigée, telles que celles utilisées par LAR et DREAM, les paquets sont diffusés aux nœuds se trouvant géographiquement dans la direction du nœud destinataire. La différence entre LAR et DREAM est que, dans DREAM, les informations, concernant la position du nœud destinataire, qui sont insérées dans les paquets, peuvent être mises à jour si un nœud intermédiaire possède des informations plus précises que l'expéditeur du paquet. Cela ne se fait pas de LAR. Les deux approches sont très simples à mettre en œuvre et sont très robustes contre l'échec des nœuds ayant des informations imprécises. Par conséquent, ces caractéristiques favorisent leur utilisation pour les applications nécessitant un haut niveau de fiabilité et de rapidité de transmission de messages. Cependant, le grand nombre de messages de mise à jour limite leur passage à l'échelle.

Dans les approches hiérarchiques, telles que celles utilisées par Terminodes et GLS, l'acheminement des paquets se fait d'une manière hiérarchique en deux étapes : par le biais d'un protocole indépendant de la position géographique du nœud destinataire à l'échelle locale, et en utilisant une stratégie gloutonne pour les nœuds très éloignés. En raison de l'utilisation d'une approche au niveau local non basée sur l'utilisation de la position, ces approches sont, d'une part, plus tolérantes à l'égard de l'inexactitude des informations sur la position des nœuds, tout en étant beaucoup plus complexes à mettre en œuvre, d'autre part. L'avantage majeur du routage dans GLS est qu'il permet aux nœuds PUN (*Position-Unaware Nodes*) d'utiliser les nœuds PAN (*Position-Aware Nodes*) comme serveur de localisation

en vue de participer au réseau *ad hoc*. Cela favorise leur utilisation dans les réseaux où certains nœuds ne possèdent pas des récepteurs GPS.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans un réseau mobile *ad hoc*, les unités mobiles sont dynamiquement et arbitrairement distribuées, et ce d'une manière permettant aux connexions de changer à tout moment. Assurer la connexion dans ce type de réseau est un problème très complexe vu le dynamisme et l'évolution rapide de la topologie. Le but d'un protocole de routage est d'établir des routes qui soient correctes et efficaces entre une paire quelconque d'unités mobiles. Dans ce chapitre, nous avons présenté les protocoles de routage géographiques existant dans la littérature, permettant d'assurer le service de routage dans les réseaux mobiles *ad hoc*. Nous avons décrit leurs principales caractéristiques et fonctionnalités afin de comprendre les stratégies utilisées pour la localisation ainsi que l'acheminement des données entre les différentes unités mobiles. Contrairement aux protocoles basés sur l'utilisation de la topologie, dans les protocoles géographiques, un nœud sélectionne le prochain nœud vers lequel les paquets seront transférés en utilisant sa position et les positions de ses voisins immédiats et du nœud destinataire. En effet, les nœuds ne doivent pas stocker des tables de routage pour acheminer les paquets vers un autre nœud du réseau. De plus, l'utilisation des informations de localisation dans les réseaux *ad hoc* permet de diminuer la surcharge engendrée par les paquets de contrôle.

En conclusion, la conception d'un protocole de routage géographique pour les réseaux mobiles *ad hoc* doit tenir compte de plusieurs facteurs et limitations physiques imposés par l'application, afin que la stratégie de routage ne dégrade pas les performances du système. Dans ce chapitre, différentes approches de localisation et de routage pour la réalisation de services ont été proposées. De même, une analyse qualitative de ces approches a été présentée. Il existe encore un certain nombre de questions et de problèmes qui doivent être abordés dans les travaux futurs. Il est aussi d'une grande importance de comparer quantitativement ces approches pour le routage dans les réseaux dynamiques à large échelle [53], [54].

Références

- [1] Perkins C., Bhagwat P. : "Highly Dynamic Destination Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers", *Comp. Commun. Rev.*, Oct. 1994, pp. 234-44.
- [2] Chiang C.-C. : "Routing in Cluster head Multihop, Mobile Wireless Networks with Fading Channel", *Proc. IEEE SICON*, April 1997, 197-211.
- [3] Murphy S., Garcia-Luna-Aceves J. J. : "An Efficient Routing Protocol for Wireless Networks", *ACM Mobile Networks and Applications Journal*, Nov.1996, 183-197.
- [4] Johnson D., Maltz D. : "Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks in Mobile Computing", T. Imielinski and H. Korth eds., Kluwer Academic, 1996, 153-181.
- [5] Perkins C. E. : "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing", *in Proc. MILCOM '97 panel on Ad Hoc Networks*, Nov. 1997.
- [6] Park V. D., Corson M. S. : "A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks", *IEEE Infocom*, 1997.
- [7] Toh C.-K. : "A Novel Distributed Routing Protocol to Support Ad hoc Mobile Computing", *Wireless Personal Communication*, Jan. 1997.
- [8] Dube R. *et al.* : "Signal Stability-based Adaptive Routing (SSA) for ad hoc mobile networks", *IEEE Pers. Commun.*, February 1997.
- [9] Mauve M., Widmer J., Hartenstein H. : "A Survey on Position-based Routing in Mobile Ad hoc Networks". *IEEE Network Magazine*, 15(6):30--39, November 2001.
- [10] Fouail O. : « Découverte et fourniture de services adaptatifs dans les environnements mobiles », thèse de doctorat de l'École nationale supérieure des télécommunications, 2004.
- [11] Jacquet P. *et al.* : "Optimized Link State Routing Protocol". Internet draft, draftietf-manet-olsr-04.txt, work in progress, Sept. 2001.
- [12] Bellur B., Ogier R., Templin F. : "Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)", Internet draft, draft-ietf-manet-tbrpf-01.txt, work in progress, Mar. 2001.
- [13] Das S. R., Castaneda R., Yan J. : "Simulation Based Performance Evaluation of Mobile, Ad Hoc Network Routing Protocols", *ACM/Baltzer MONET J.*, July 2000, pp. 179-89.
- [14] Perkins C., Royer E. : "Ad hoc on-demand Distance Vector Routing," *Proc. 2nd IEEE Wksp. Mobile Comp. Sys. App.*, Feb. 1999, pp. 90-100.
- [15] Haas Z., Pearlman M. : "The Performance of Query Control Schemes for the Zone Routing Protocol," *ACM/IEEE Trans. Net.*, vol. 9, no. 4, Aug. 2001, pp. 427-38.
- [16] Royer E., Toh C.-K. : "A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Wireless Networks," *IEEE Pers. Commun.*, Apr. 1999, pp. 46-55.
- [17] Broch J. *et al.* : "A Performance Comparison of Multi-hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols," *Proc. 4th ACM/IEEE Int'l. Conf. Mobile Computing and Networking MOBICom '98*, Dallas, TX, États-Unis, 1998, pp. 85-97.
- [18] Ziviani A., Fdida S., de Rezende J. F., Otto Carlos, M. B. Duarte : « Une approche TCP pour la gestion de la localisation dans les réseaux ad hoc mobiles », <http://www.Incc.br/~ziviani/papiers/ZFRDo3.pdf>
- [19] Capkun S., Hamdi M., Hubaux J. : "Gps-free Positioning in Mobile Ad Hoc Networks," *Proc. Hawaii Int'l. Conf. System Sciences*, Jan. 2001.
- [20] Hightower J., Borriello G. : "Location Systems for Ubiquitous Computing", *Computer*, vol. 34, n° 8, Aug. 2001, pp. 57-66.
- [21] Navas J. C., Imielinski T. : "Geographic Addressing and Routing," *Proc. 3rd ACM/IEEE Int. Conf. Mobile Comp. Net., MobiCom'97*, Sept. 1997.
- [22] Towards the Design of an Energy-efficient, Location-aware Routing Protocol for Mobile, Ad hoc Sensor Networks, <http://www.doc.ic.ac.uk/~ap7/routing.pdf>
- [23] Takagi H., Kleinrock L. : "Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-32, n° 3, March 1984, 246-257.
- [24] Hou T. C., Li V.O.K. : "Transmission Range Control in Multihop Packet Radio Networks", *IEEE Trans. On Communications COM-34(1)*, 1986, 38-44.
- [25] Nelson R., Kleinrock L. : "The Spatial Capacity of a Slotted ALOHA Multihop Packet Radio Network with Capture", *IEEE Transactions on Communications*, 32, 6, 1984, 684-694.

- [26] Stojmenovic I., Lin X. : "GEDIR: Loop-free Location based Routing in Wireless Networks", IASTED Int. Conf. on Parallel and Distributed Computing and Systems, Nov. 1999.
- [27] Bose P., Morin P., Stojmenovic I., Urrutia J. : "Routing with Guaranteed Delivery in Ad hoc Wireless Networks", 3rd Int. Workshop on Discrete Algorithms and methods for mobile computing and communications, August 20, 1999.
- [28] Karp B., Kung H. T. : "Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) for Wireless Networks", in Proc. ACM/IEEE MOBICOM, 2000.
- [29] Das B., Sivakumar R., Bharghavan V. : "Routing in Ad hoc Networks Using a Spine". In International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), page 64, Las Vegas, États-Unis, September 1997. IEEE.
- [30] Blazevic L., Buttyan L., Capkun S., Giordano S., Hubaux J., Le Boudec J.-Y. : "Self-organization in Mobile Ad hoc Networks: the Approach of Terminodes", IEEE communications Magazine, 2001.
- [31] Blazevic L., Giordano S., Le Boudec J.-Y. : "Self organized Terminode Routing", Technical Report DSC, Swiss Federal Institute of Technology, 2000.
- [32] Blazevic L., Giordano S., Le Boudec J.-Y. : "Self Organized Terminode Routing Simulation", in Proc. ACM International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile systems, MSWiM, 2001.
- [33] De Couto D. S. J., Jannotti J., Karger D., Li J., Morris R. : "A Scalable Location Service for Geographic Ad hoc Routing", in Proc. ACM/IEEE MobiCom, August 2000.
- [34] Young-Bae Ko, Nitin H. Vaidya : "Geocasting in Mobile Ad hoc Networks: Location based Multicast Algorithms", in Proc. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, February 1999.
- [35] Basagni S., Chlamtac I., Syroitiuk V. R., Woodward B. A. : "A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)", MOBICOM'9, 1999.
- [36] Ko Y.-B., Vaidya N. H. : "Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad hoc Networks", in ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom'98), October 1998
- [37] Basagni S., Chlamtac I., Syroitiuk V. : "Geographic Messaging in Wireless Ad Hoc Networks," Proc. 49th IEEE Int'l. Vehic. Tec. Conf., Houston, TX, États-Unis, vol. 3, 1999, pp. 1957-61.
- [38] Van der Meerschen J. : "Hybridation entre les modes ad hoc et infrastructure dans les réseaux de type WiFi", <http://code.ulb.ac.be/dbfiles/Van2006amastersthesis.pdf>
- [39] Viana A. C., Amorim M. D., Fdida S., Rezende J. F. : « Routage basé sur ancre dans les réseaux à large échelle auto-organisables », www.irisa.fr/paris/Biblio/Papers/Viana/ViAmoFdiRezo3Cfip.pdf
- [40] Kasemann M., Hartenstein H., Fuler H. Mauve M. : "Analysis of a Location Service for Position-Based Routing in Mobile Ad Hoc Networks", in Proc. Of the 1st German Workshop on Mobile Ad hoc Networking (WMAN 2002), pp. 121-133.
- [41] Ramanathan S., Steenstrup M. : "A survey of routing techniques for mobile communication networks", Mobile Networks and Applications, 1, 2, 1996, pp. 89-104.
- [42] Elorrieta D. : « Protocoles de routage pour l'interconnexion des réseaux ad hoc et UMTS », <http://cs.ulb.ac.be/publications/MT-07-12.pdf>
- [43] Kranakis E., Singh H., Urrutia J. : "Compass Routing on Geometric Networks," Proc. 11th Canadian Conf. Comp. Geo., Vancouver, Aug. 1999.
- [44] Toussaint G. : "The Relative Neighborhood Graph of a Finite Planar Set", Pattern Recognition, vol. 12, no. 4, 1980, pp. 261-68.
- [45] De Couto D. S. J., Morris R. : "Location Proxies and Intermediate Node Forwarding for Practical Geographic Forwarding", Tech. rep. MIT-LCSTR824, MIT Lab. Comp. Sci., June 2001.
- [46] Blazevic L. : "Scalable Routing Protocols with Applications to Mobility, Thesis N 2517, EPFL, <http://icawwww.epfl.ch/Publications/Blazevic/Blazevico2.pdf>
- [47] Jiang M., Li J., Tay Y. C. : "Cluster Based Routing Protocol (CBRP)". Internet draftversion 01, IETF, July 1999.
- [48] Theoleyre F. : « Une auto-organisation et ses applications pour les réseaux ad hoc et hybrides », Thesis N 2006-ISAL-0061, 2006, l'INSA de Lyon.
- [49] Nikaein N., Bonnet C. : "Topology Management for Improving Routing and Network Performances in Mobile Ad hoc Networks". ACM Monet, 10(2), April 2005.
- [50] Nikaein N., Labiod H., Bonnet C. : "DDR - Distributed Dynamic Routing Algorithm for Mobile Ad hoc Networks". In International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MOBIHOC), Boston, États-Unis, August 2000. IEEE.
- [51] Sinha P., Sivakumar R., Vaduvur B. : "Enhancing Ad hoc Routing with Dynamic Virtual Infrastructures". In INFOCOM, Anchorage, Alaska, États-Unis, April 2001. IEEE.

- [52] Bakhouya M., Gaber J. : « Approches de mise en œuvre de l'ubiquité numérique ». *Traité Réseaux Mobiles Ad hoc et Réseaux de Capteurs Sans Fil*, Ed. H. Labiod, Hermes Science, ISBN 2-7462-1292-7, p. 129-163, Mars 2006.
- [53] Bakhouya M., Gaber J., Wack M. : "Performance Evaluation of DREAM Protocol for Inter-vehicle Communication". *In: Wireless Vitae*'09 IEEE press, to appear.
- [54] Bakhouya M., Cottin N. : "Performance Evaluation of the Location-based Protocol DREAM for Large Mobile Ad hoc Networks". *In: New Technologies, Mobility and Security, NTMS '08* 1-6.