

# **Le Routage dans les Réseaux Mobiles Ad Hoc**

Dr Nadjib BADACHE  
Tayeb LEMLOUMA



Les environnements mobiles offrent aujourd'hui une grande flexibilité d'emploi. En particulier, ils permettent la mise en réseau des sites dont le câblage serait trop onéreux à réaliser dans leur totalité, voire même impossible.

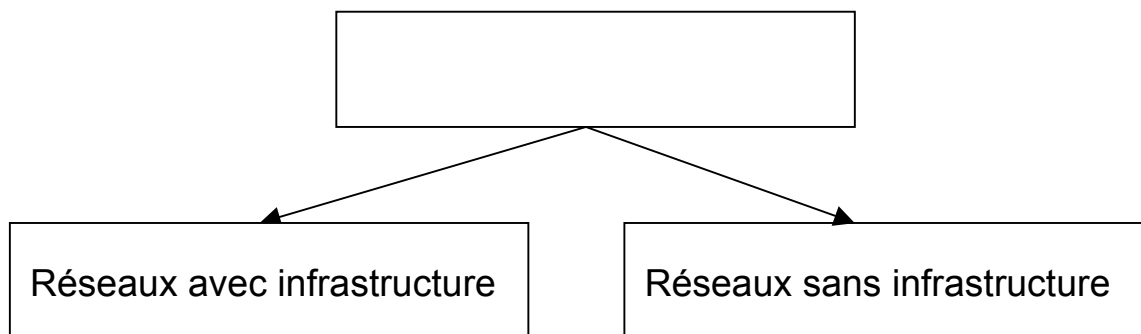
Plusieurs systèmes utilisent déjà le modèle cellulaire de réseaux sans fil, et connaissent une très forte expansion à l'heure actuelle : exemple les réseaux GSM, On cite aussi l'exemple du projet hollandais NAFIN ( Netherlands Armed Forces Integrated Network ), qui a visé d'améliorer les performances des forces militaires de l'air et marines, en intégrant la technologie des réseaux sans fil. L'inconvénient majeur du modèle cellulaire et qu'il requière une importante infrastructure logistique et matérielle fixe.

La contrepartie des réseaux cellulaires sont les réseaux mobiles ad hoc. Un réseau ad hoc est une collection d'entités mobiles interconnectées par une technologie sans fil formant un réseau temporaire sans l'aide de toute administration ou de tout support fixe.

Les applications des réseaux ad hoc sont nombreuses, on cite l'exemple classique de leur application dans le domaine militaire et les autres applications de tactique comme les opérations de secours et les missions d'exploration.

Notre travail entre dans le cadre de l'étude du problème de routage dans les réseaux mobiles ad hoc. Notre étude offre principalement une étude synthétique des travaux de recherche qui ont été fait, et qui se font à l'heure actuelle, dans le but de résoudre le problème d'acheminement de données entre les hôtes mobiles du réseau ad hoc. Comme nous allons voir le problème de routage est très compliqué, cela est dû essentiellement à la propriété qui caractérise les réseaux ad hoc et qui est l'absence d'infrastructure fixe et de toute administration centralisée.

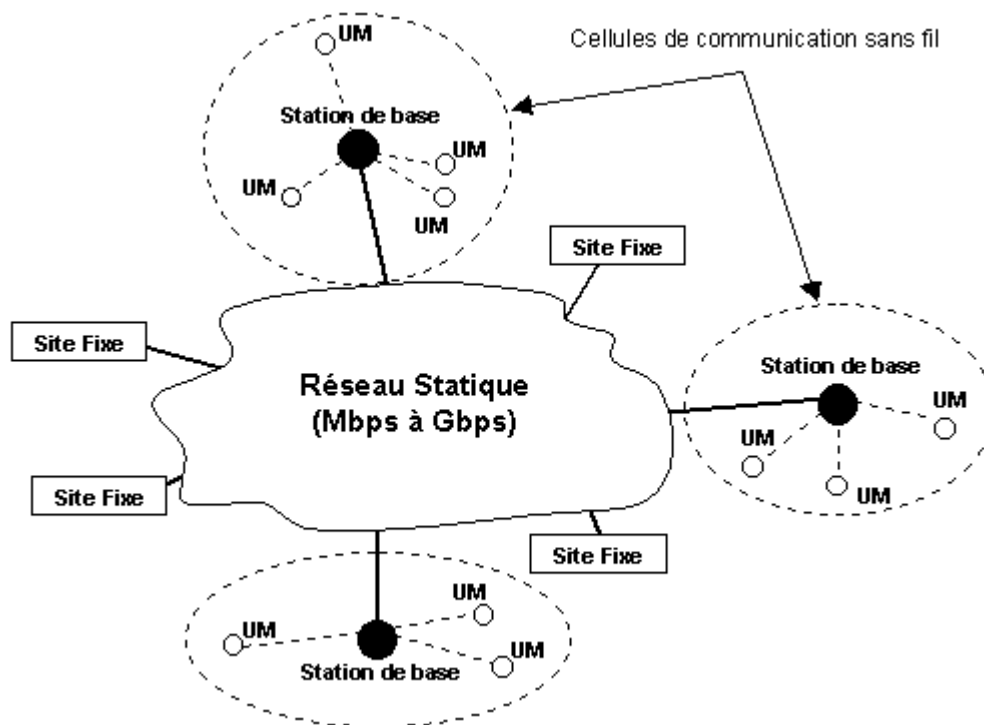
Un environnement mobile est un système composé de sites mobiles et qui permet à ses utilisateurs d'accéder à l'information indépendamment de leurs positions géographiques. Les réseaux mobiles ou sans fil, peuvent être classés en deux classes : les réseaux avec infrastructure et les réseaux sans infrastructure.



Le modèle de système intégrant des sites mobiles et qui a tendance à se généraliser, est composé de deux ensembles d'entités distinctes :

- 1- Les "sites fixes" du réseau filaire ( wired network ).
- 2- Les "sites mobiles" ( wireless network ).

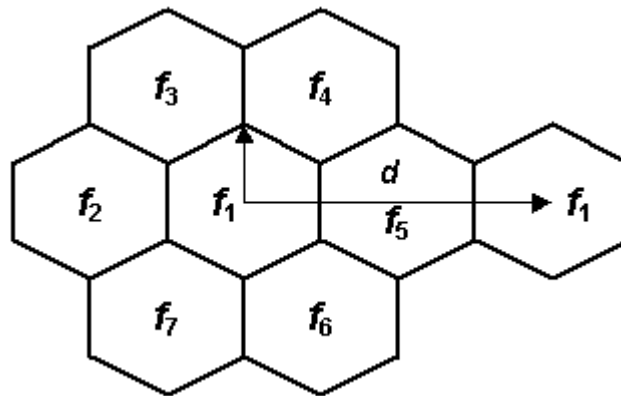
Certains sites fixes, appelés stations de base ( SB ) sont munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec les sites mobiles localisés dans une zone géographique limitée, appelée cellule comme le montre la figure suivante:



- A chaque station de base correspond une cellule à partir de laquelle des unités mobiles peuvent émettre et recevoir des messages. Alors que les sites fixes sont interconnectés entre eux à travers un réseau de communication filaire.
- Une unité mobile ne peut être, à un instant donné, directement connectée qu'à une seule station de base. Elle peut communiquer avec les autres sites à travers la station à laquelle elle est directement rattachée.
- Dans Le modèle de réseau SANS INFRASTRUCTURE PREEXISTANTE l'entité "site fixe" n'existe pas, tous les sites du réseau sont mobiles et se communiquent d'une manière directe en utilisant leurs interfaces de communication sans fil.
- L'absence de l'infrastructure ou du réseau filaire composé des stations de base, oblige les unités mobiles à se comporter comme des routeurs qui participent à la découverte et la maintenance des chemins pour les autres hôtes du réseau.

La configuration standard d'un système de communication cellulaire est un maillage de cellules hexagonales :

Initialement, une région peut être couverte uniquement par une seule cellule. Quand la compétition devient importante pour l'allocation des canaux, la cellule est généralement divisée en sept cellules plus petites



Les cellules adjacentes dans le maillage doivent utiliser des fréquences différentes, contrairement à celles qui sont situées sur les côtés opposés du maillage et qui peuvent utiliser la même fréquence sans risque d'interférence.

L'évolution récente de la technologie dans le domaine de la communication sans fil et l'apparition des unités de calculs portables ( les *laptops* par exemple ), poussent aujourd'hui les chercheurs à faire des efforts afin de réaliser le but des réseaux :



*"L'accès à l'information n'importe où et n'importe quand".*

- Le concept des *réseaux mobiles ad hoc* essaie d'étendre les notions de la mobilité à toutes les composantes de l'environnement. Ici, contrairement aux réseaux basés sur la communication cellulaire :
  - Aucune administration centralisée n'est disponible  
⇒ Ce sont les hôtes mobiles elles-mêmes qui forment, d'une manière *ad hoc*, une infrastructure du réseau.
  - 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.

Les réseaux *ad hoc* sont idéals pour les applications caractérisées par une absence ( ou la non-fiabilité ) d'une infrastructure préexistante, tel que :

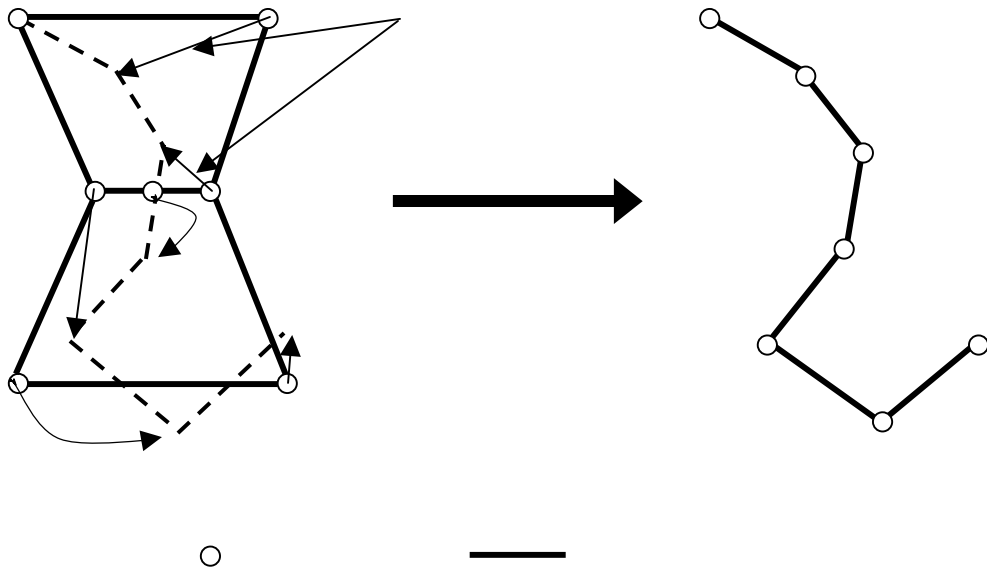
- Les applications militaires.
- Les autres applications de tactique comme les opérations de secours (incendies, tremblement de terre.. ) et les missions d'exploration.

Un réseau mobile ad hoc, appelé généralement MANET ( Mobile Ad hoc NETWORK ), consiste en une grande population, relativement dense, d'unités mobiles qui se déplacent dans un territoire quelconque et dont le seul moyen de communication est l'utilisation des interfaces sans fil, sans l'aide d'une infrastructure préexistante ou administration centralisée.

Un groupe d'unités portables reliées



La topologie du réseau peut changer à tout moment, elle est donc dynamique et imprévisible ce qui fait que la déconnexion des unités soit très fréquente.

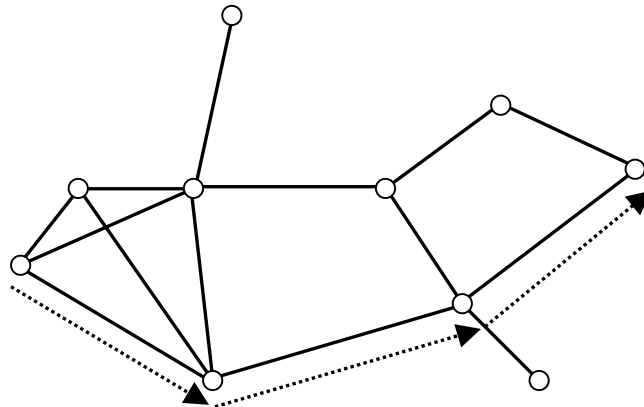


Les réseaux mobiles ad hoc sont caractérisés par ce qui suit :

- 1-
- 2-
- 3-
- 4-
- 5-

Le routage est une méthode d'acheminement des informations à la bonne destination à travers un réseau de connexion donné. Le problème de routage consiste à déterminer un acheminement optimal des paquets à travers le réseau au sens d'un certain critère de performance. Le problème consiste à trouver l'investissement de moindre coût en capacités nominales et de réserves qui assure le routage du trafic nominal et garantit sa survabilité en cas de n'importe quelle panne d'arc ou de nœud.

Si on suppose que les coûts des liens sont identiques, le chemin indiqué dans la figure suivante est le chemin optimal reliant la station source et la station destination. Une bonne stratégie de routage utilise ce chemin dans le transfert des données entre les deux stations.

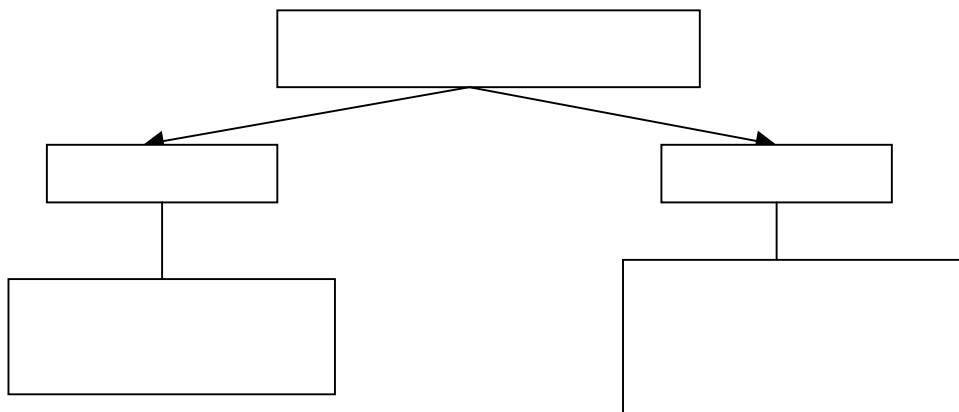


Le problème qui se pose dans le contexte des réseaux ad hoc est l'adaptation de la méthode d'acheminement utilisée avec le grand nombre d'unités existant dans un environnement caractérisé par de modestes capacités de calcul et de sauvegarde et de changements rapides de topologies.

Il semble donc important que toute conception de protocole de routage doive étudier les problèmes suivants :

- 1- *La minimisation de la charge du réseau*
- 2- *Offrir un support pour pouvoir effectuer des communications multi-points fiables*
- 3- *Assurer un routage optimal*
- 4- *Offrir une bonne qualité concernant le temps de latence*

Suivant la manière de création et de maintenance de routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en deux catégories, les protocoles pro-actifs et les protocoles réactifs. Les protocoles pro-actifs établissent les routes à l'avance en se basant sur l'échange périodique des tables de routage, alors que les protocoles réactifs cherchent les routes à la demande.



Les protocoles de routage pro-actifs pour les réseaux mobiles ad-hoc, sont basés sur la même philosophie des protocoles de routage utilisés dans les réseaux filaires conventionnels. Les deux principales méthodes utilisées sont :

- La méthode *Etat de Lien* ("*Link State*") et
- La méthode du *Vecteur de Distance* ("*Distance Vector*").

Les deux méthodes exigent une mise à jour périodique des données de routage qui doit être diffusée par les différents nœuds de routage du réseau.

Nous allons décrire dans ce qui suit, les protocoles les plus importants de cette classe :

- Basé sur l'idée classique de l'algorithme distribué de Bellman-Ford en rajoutant quelques améliorations.

- Chaque station mobile maintient une table de routage qui contient :

- *Toutes les destinations possibles.*
- *Le nombre de nœud (ou de sauts) nécessaire pour atteindre la destination.*
- *Le numéro de séquences (SN : sequence number) qui correspond à un nœud destination.*

- Le NS est utilisé pour faire la distinction entre les anciennes et les nouvelles routes, ce qui évite la formation des boucles de routage.

- La mise à jour dépend donc de deux paramètres : Le temps, c'est à dire la période de transmission, et Les événements

- Un paquet de mise à jour contient :

*1- Le nouveau numéro de séquence incrémenté, du nœud émetteur.*

*Et pour chaque nouvelle route :*

*2- L'adresse de la destination.*

*3- Le nombre de nœuds (ou de sauts) séparant le nœud de la destination.*

*4- Le numéro de séquence (des données reçues de la destination) tel qu'il a été estampillé par la destination.*

- Le DSDV élimine les deux problèmes de boucle de routage "routing loop", et celui du "counting to infinity".

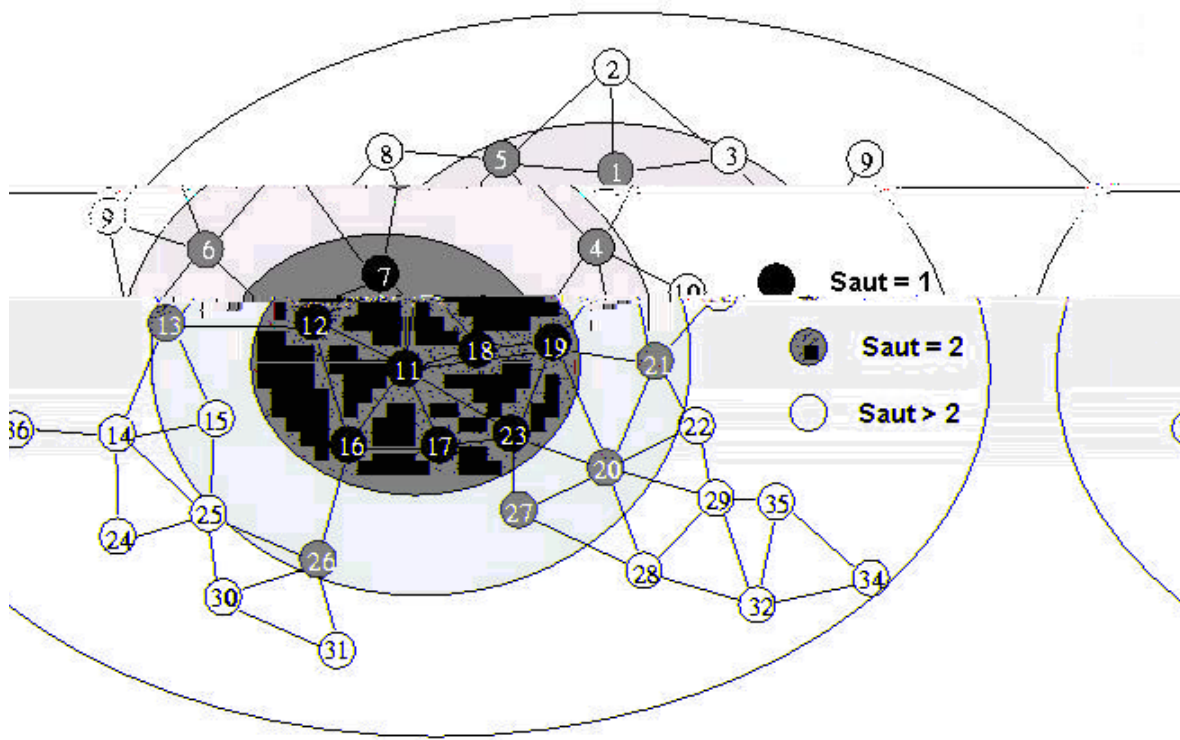
*Cependant :*

- Dans ce protocole, une unité mobile doit attendre jusqu'à ce qu'elle reçoive la prochaine mise à jour initiée par la destination, afin de mettre à jour l'entrée associée à cette destination, dans la table de distance. Ce qui fait que le DSDV est lent.

- Le DSDV utilise une mise à jour périodique et basée sur les événements, ce qui cause un contrôle excessif dans la communication.

- Le protocole FSR est basé sur l'utilisation de la technique "œil de poisson" (fisheye), proposée par Kleinrock et Stevens, qui l'ont utilisé dans le but de réduire le volume d'information nécessaire pour représenter les données graphiques.
- Dans la pratique, l'œil d'un poisson capture avec précision, les points proches du point focal. La précision diminue quand la distance, séparant le point vu et le point focal, augmente.

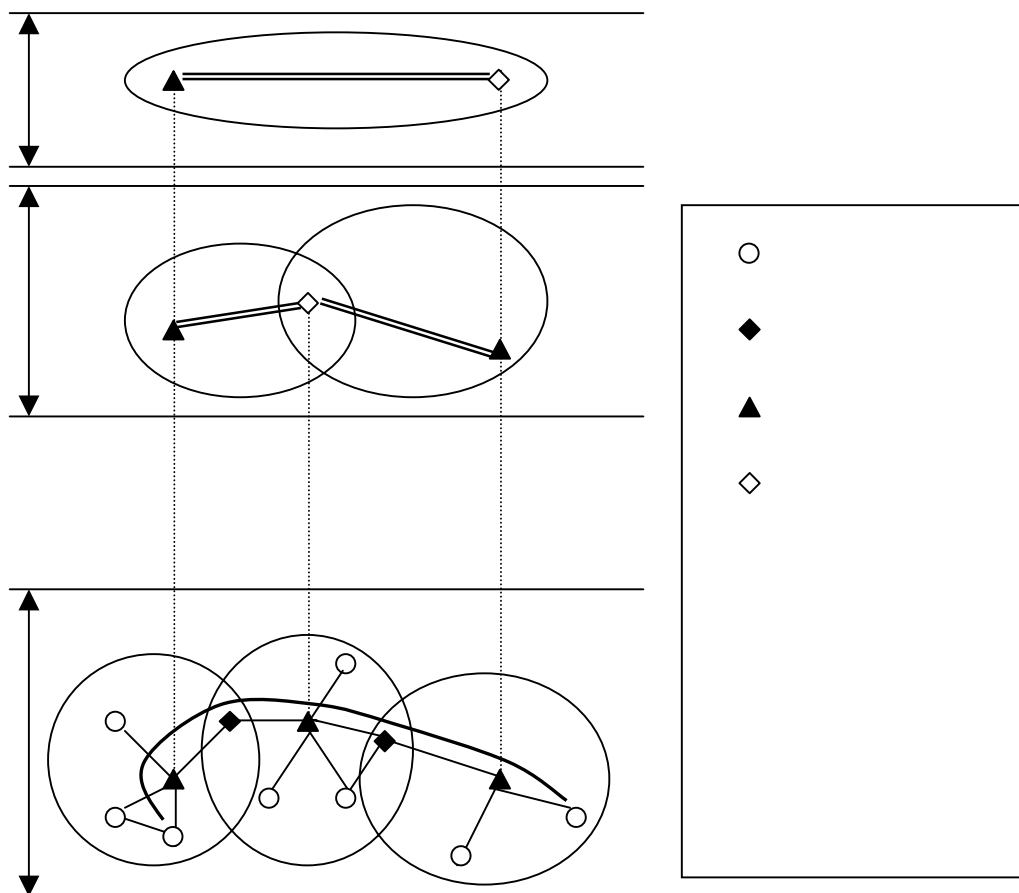
La figure suivante illustre la technique FE utilisée par le protocole :



- Dans le contexte du routage, l'approche du "fisheye" matérialise, pour un nœud, le maintien des données concernant la précision de la distance et la qualité du chemin d'un voisin direct, avec une diminution progressive, du détail et de précision, quand la distance augmente.
- La diminution de fréquence est assurée en changeant les fréquences de mise à jour, et cela en utilisant des périodes d'échanges différentes pour les différentes entrées de la table de routage. Les entrées qui correspondent aux nœuds les plus proches, sont envoyés aux voisins avec une fréquence élevée (donc avec une période d'échange relativement petite).

- Le protocole HSR combine les notions de groupes dynamiques, niveaux hiérarchiques avec une gestion efficace de localisation.
- Dans le HSR, l'image de la topologie du réseau, est sauvegardée sous forme hiérarchique. Le réseau est partitionné en un ensemble de groupes :
- Dans un groupe, un nœud doit être élu pour représenter le reste des membres. Les représentants des groupes dans un niveau  $l$ , deviennent des membres dans le niveau  $l + 1$ . Ces nouveaux membres, s'organisent en un ensemble de groupes de la même manière du niveau bas, et ainsi de suite pour le reste des niveaux.

La figure suivante illustre l'application du mécanisme de partitionnement hiérarchique :



- L'adresse hiérarchique, suffit pour délivrer les paquets de données à une destination, indépendamment de la localisation de la source, et cela en utilisant la table HSR.

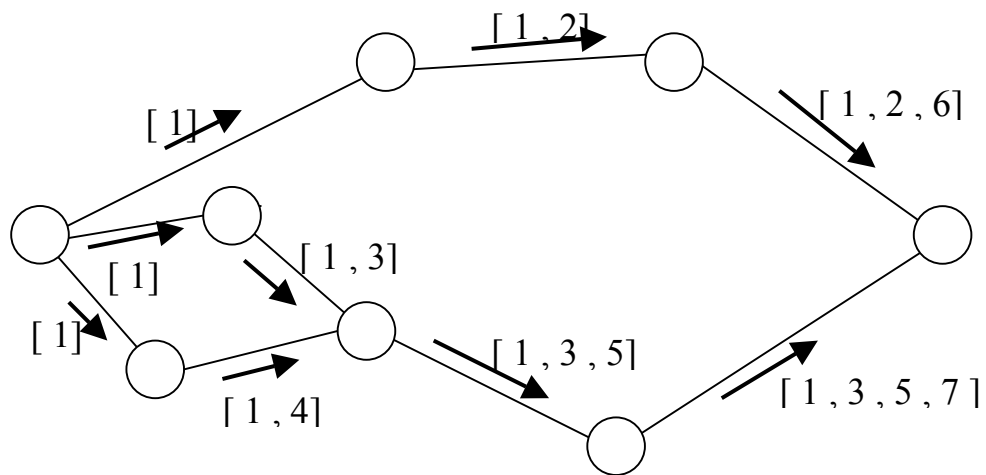
Exemple : l'acheminement des données entre le nœud 6 et le nœud 3 (figure précédente).

- Ce protocole est basé sur les informations des localisations des unités mobiles.
- Le protocole diffuse les données destinées à une certaine destination en effectuant une inondation ( propagation ) partielle et en utilisant *les données de localisations* et cela afin de minimiser la charge du réseau.
- Chaque nœud du réseau mobile ad hoc, échange périodiquement des messages de contrôle afin d'informer tous les autres nœuds de sa localisation.
- Lors de l'envoi des données :
  - Si la source possède des informations récentes sur la localisation du nœud destination,
    - 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 de tels nœuds existeraient, une liste qui contient leurs identificateurs, est insérée à la tête du paquet de données avant la transmission. Seulement les nœuds qui sont spécifiés dans la liste de tête, traitent le paquet.

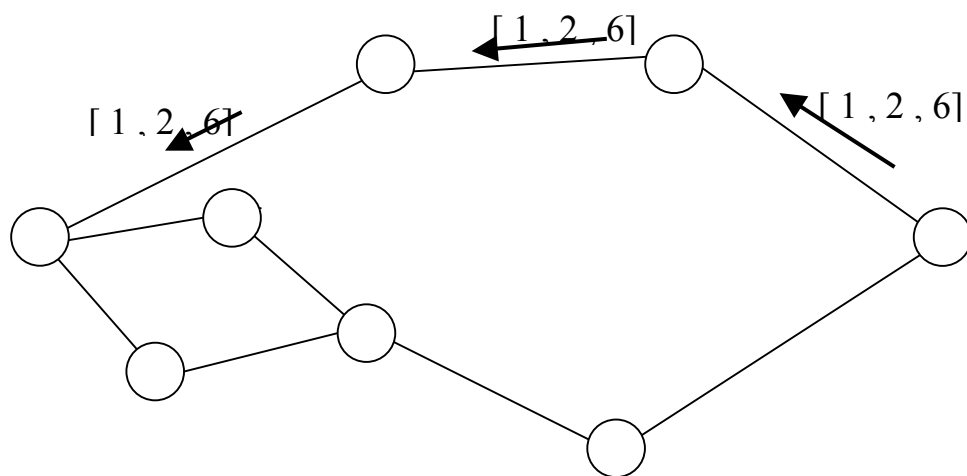
Les protocoles de routage appartenants à cette catégorie, créent et maintiennent les routes selon les besoins. Lorsque le réseau a besoin d'une route, une procédure de découverte globale de routes est lancée, et cela dans le but d'obtenir une information spécifiée, inconnue au préalable.

Dans ce qui suit nous allons décrire les protocoles les plus importants de cette classe :

- Le protocole "Routage à Source Dynamique" (DSR), est basé sur l'utilisation de la technique "routage source". Dans cette technique : la source des données détermine la séquence complète des nœuds à travers lesquelles, les paquets de données seront envoyés.
- Un site initiateur de l'opération de « découverte de routes », diffuse un paquet *requête de route*. Si l'opération de découverte est réussite, l'initiateur reçoit un paquet *réponse de route* qui liste la séquence de nœuds à travers lesquels la destination peut être atteinte. Le paquet *requête de route* contient donc un champ *enregistrement de route*, dans lequel sera accumulée la séquence des nœuds visités durant la propagation de la requête dans le réseau, comme le montre la figure suivante :



*enregistrement de route*



**(b) Le renvoi du chemin.**

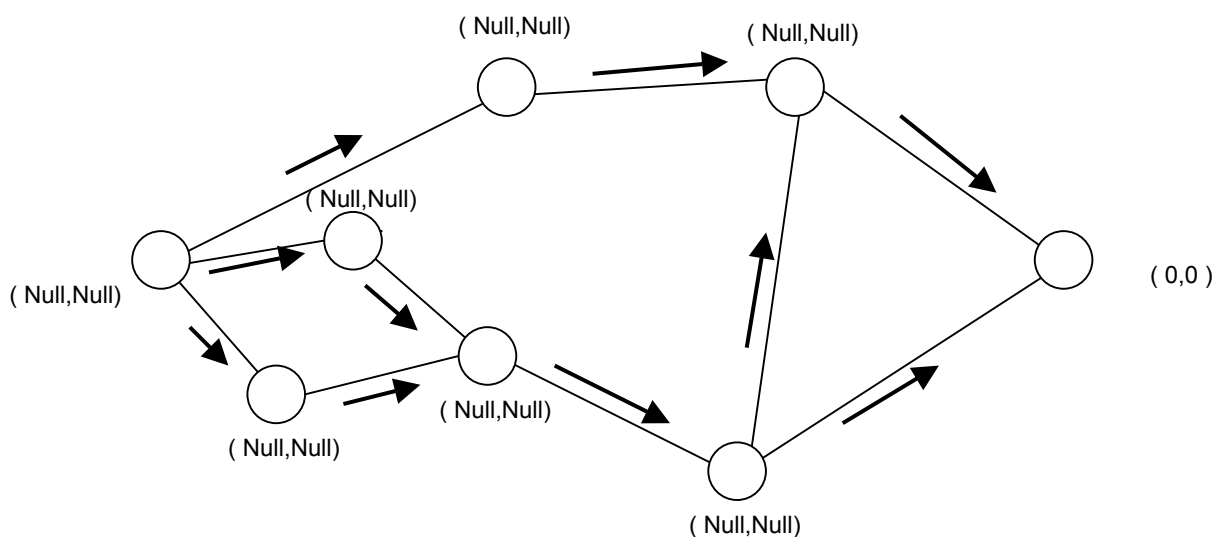


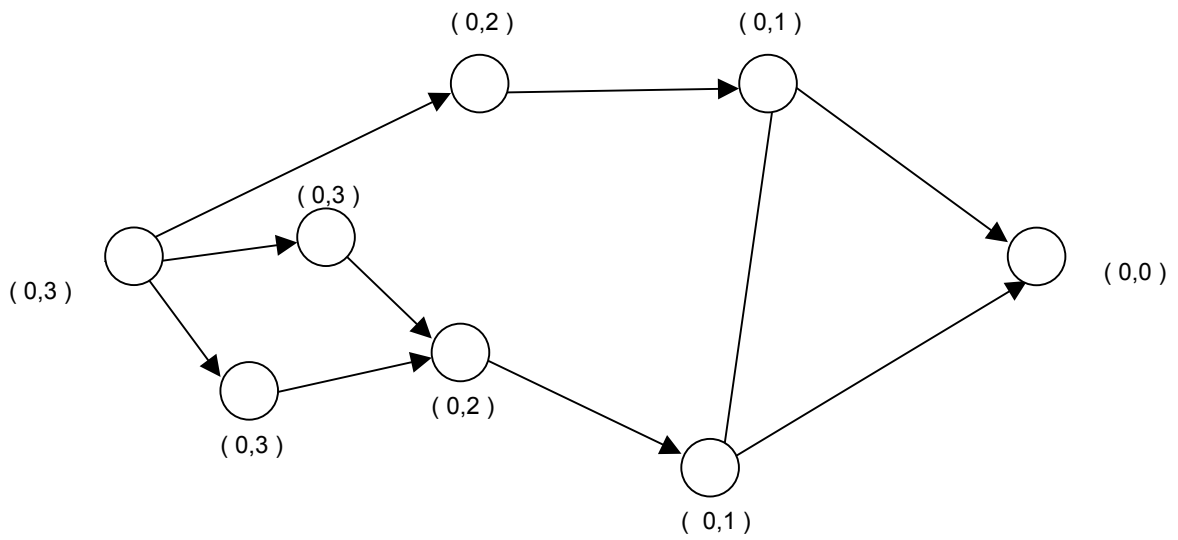
- Afin d'assurer la validité des chemins utilisés, le DSR exécute *une procédure de maintenance de routes* :
  - Quand un nœud détecte un problème fatal de transmission, à l'aide de sa couche de liaison, un message *erreur de route* ( route error ) est envoyé à l'émetteur original du paquet.
  - Le message d'erreur contient l'adresse du nœud qui a détecté l'erreur et celle du nœud qui le suit dans le chemin.
  - Lors de la réception du paquet *erreur de route* par l'hôte source, le nœud concerné par l'erreur est supprimé du chemin sauvegardé, et tous les chemins qui contiennent ce nœud sont tronqués à ce point là. Par la suite, une nouvelle opération de découverte de routes vers la destination, est initiée par l'émetteur.
- L'utilisation de la technique "routage source", fait que les nœuds de transit n'aient pas besoin de maintenir les informations de mise à jour pour envoyer les paquets de données, puisque ces derniers contiennent toutes les décisions de routage.
- Dans ce protocole, il y a une absence totale de boucle de routage, car le chemin source-destination fait partie des paquets de données envoyés.
- Le protocole AODV représente essentiellement une amélioration de l'algorithme DSDV discuté déjà, dans le contexte réactif. Le protocole AODV, réduit le nombre de diffusions de messages, et cela en créant les routes lors du besoin, contrairement au DSDV, qui maintient la totalité des routes.
- L'AODV utilise les principes des numéros de séquence à fin de maintenir la consistance des informations de routage.
- A cause de la mobilité des nœuds dans les réseaux ad hoc, les routes changent fréquemment ce qui fait que les routes maintenues par certains nœuds, deviennent invalides. Les numéros de séquence permettent d'utiliser les routes les plus nouvelles ( fresh routes ).

- De la même manière que dans le DSR, l'AODV utilise une *requête de route* dans le but de créer un chemin vers une certaine destination. Cependant, l'AODV maintient les chemins d'une façon distribuée en gardant une table de routage, au niveau de chaque nœud de transit appartenant au chemin cherché.
- Un nœud diffuse une *requête de route* dans le cas où il aurait besoin de connaître une route vers une certaine destination et qu'une telle route n'est pas disponible. Cela peut arriver :
  - si la destination n'est pas connue au préalable, ou
  - si le chemin existant vers la destination a expiré sa durée de vie ou il est devenu défaillant
- Le champ *numéro de séquence destination* du paquet RREQ, contient la dernière valeur connue du numéro de séquence, associé au nœud destination. Cette valeur est recopiée de la table de routage. Si le numéro de séquence n'est pas connu, la valeur nulle sera prise par défaut. Le *numéro de séquence source* du paquet RREQ contient la valeur du numéro de séquence du nœud source.
- Afin de maintenir des routes consistantes, une transmission périodique du message "HELLO" est effectuée. Si trois messages "HELLO" ne sont pas reçus consécutivement à partir d'un nœud voisin, le lien en question est considéré défaillant.
- Le protocole AODV ne présente pas de boucle de routage, en outre il évite le problème "counting to infinity" de Bellman-Ford, ce qui offre une convergence rapide quand la topologie du réseau ad hoc change.
- Ce protocole a été conçu principalement pour minimiser l'effet des changements de la topologie qui sont fréquents dans les réseaux ad hoc.
- Afin de s'adapter à la mobilité des réseaux ad hoc, le protocole stocke plusieurs chemins vers une même destination, ce qui fait que beaucoup de changements de topologie n'auront pas d'effets sur le routage des données, à moins que tous les chemins qui mènent vers la destination seront perdus (rompus).

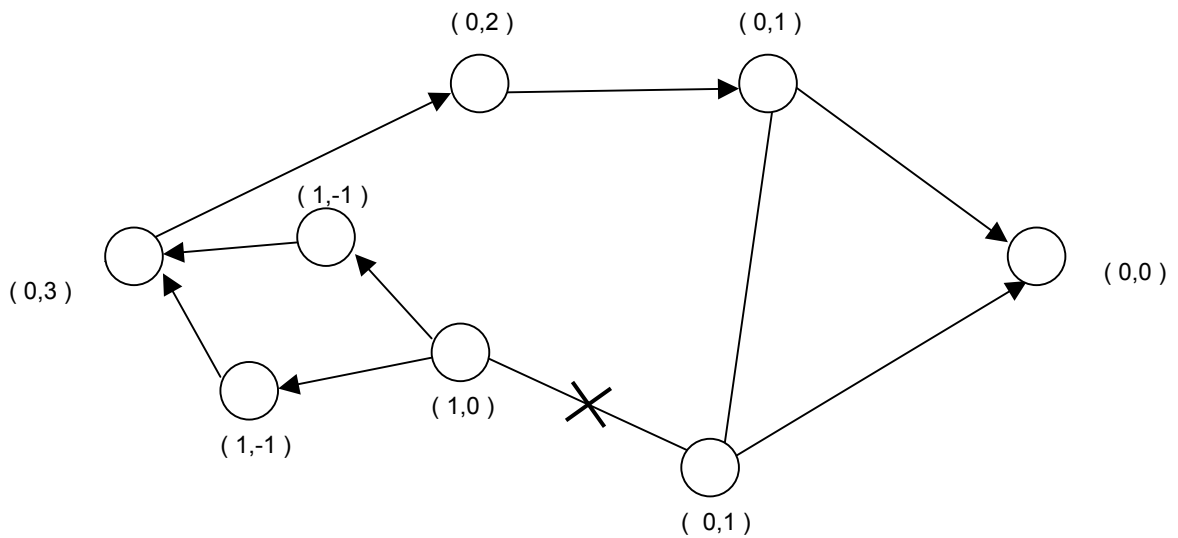
- TORA est caractérisé essentiellement par le fait que les messages de contrôle sont limités à l'ensemble des nœuds proches du lieu de l'occurrence du changement de la topologie.
- Dans ce protocole, l'utilisation des meilleurs chemins a une importance secondaire, les longs chemins peuvent être utilisés afin d'éviter le contrôle induit par le processus de découverte de nouveaux chemins.
- TORA est basé sur l'utilisation de la propriété appelée "orientation destination" des graphes acycliques orientés. Un graphe acyclique orienté (DAG) est *orienté destination* s'il y a toujours un chemin possible vers une destination spécifiée.
- Le graphe devient *non orienté destination*, si un lien ( ou plus ) devient défaillant. Dans ce cas, les algorithmes utilisent le concept d'*inversion de liens*. Ce concept assure la transformation du graphe précédent, en un graphe orienté destination durant un temps fini.
- Afin de maintenir le DAG orienté destination, l'algorithme TORA utilise la notion de *taille* de nœud. Chaque nœud possède une taille qui l'échange avec l'ensemble de ses voisins directs. Un lien est toujours orienté du nœud qui a la plus grande taille, vers le nœud qui la plus petite taille.

La figure suivante montre la création du DAG dans le protocole TORA :





- Quand un nœud  $i$  détecte une défaillance, i.e. invalidité d'un lien ( sachant qu'il ne possède pas de suivants valides vers la destination ), il lance un *nouveau niveau de référence*. L'objectif du nouveau niveau de référence est d'indiquer à la source l'invalidité des chemins rompus. La figure suivante donne un exemple de ce processus :



( x,y ) : ( le niveau de référence, la taille du nœud )

- Le protocole de Routage basé sur la Micro découverte des Distances Relatives ou RDMAR a été conçu principalement pour minimiser la charge induite par les changements rapides des réseaux ad hoc.
- Le protocole utilise un nouveau mécanisme de découverte de routes, appelé *la Micro-découverte de Distance Relative* ou RDM ( Relative Distance Micro-discovery ). L'idée de base du RDM est que la diffusion des requêtes, peut se faire en se basant sur une distance relative ( RD ) entre les paires des unités mobiles.
- Un algorithme itératif est utilisé pour estimer la RD qui sépare les deux nœuds, et cela en utilisant les informations concernant la mobilité des nœuds, le temps écoulé depuis la dernière communication et l'ancienne valeur de la distance RD. Sur la base de la nouvelle distance calculée, la diffusion de requête est limitée à une certaine région du réseau dans laquelle la destination peut être trouvée. Cette limitation de diffusion, peut minimiser énormément le contrôle du routage, ce qui améliore les performances de la communication.
- Dans le protocole RDMAR, la décision du choix de chemin est prise au niveau du nœud destination. Seulement le meilleur chemin choisi sera valide, les autres chemins reste passifs.
- Dans le cas où un nœud détecte la défaillance d'un lien, il exécute une *phase d'avertissement de défaillance* afin d'avertir la source de l'invalidité du lien.

La figure suivante illustre le mécanisme des Distances Relatives utilisé par le RDMAR :

