

## Chapitre 2

# Les réseaux mobiles ad-hoc et le problème de routage

### 2.1 Introduction

Les systèmes de communication cellulaire sont basés essentiellement sur l'utilisation des réseaux filaires ( tel que Internet ou ATM ) et la présence des stations de base qui couvrent les différentes unités mobiles du système. Les réseaux mobiles "ad hoc" sont à l'inverse, des réseaux qui s'organisent automatiquement de façon à être déployable rapidement, sans infrastructure fixe, et qui doivent pouvoir s'adapter aux conditions de propagation, aux trafics et aux différents mouvements pouvant intervenir au sein des nœuds mobiles.

Les réseaux mobiles présentent une architecture originale. En effet, l'atténuation des signaux avec la distance, fait que le médium peut être réutilisé simultanément en plusieurs endroits différents sans pour autant provoquer de collisions, ce phénomène est appelé *la réutilisation spatiale* ( Spatial Reuse ) [BAD 98, AL 2000] et il sert de base au concept de la communication cellulaire.

La contrepartie de la réutilisation spatiale est que certaines paires de nœuds peuvent alors être hors de portée mutuelle, ce qui nécessite l'emploi d'un routage interne par des nœuds intermédiaires. La gestion de ce routage consiste à établir une sorte d'architecture globale où l'on doit tenir compte de la mobilité des nœuds et de la versatilité du médium physique. Pour parvenir à des protocoles efficaces d'accès, de communication, d'allocation de ressources et de routage, ces nouvelles approches doivent faire appel à de l'algorithmique de pointe.

Le problème de routage est loin d'être évident dans les réseaux ad hoc, où c'est difficile de localiser la destination à un instant donné, la conception des stratégies de routages doit tenir compte de tous les facteurs et limitations physiques imposés par l'environnement afin que les protocoles de routage résultant ne dégradent pas les performances du système.

## 2.2 Les réseaux mobiles Ad Hoc

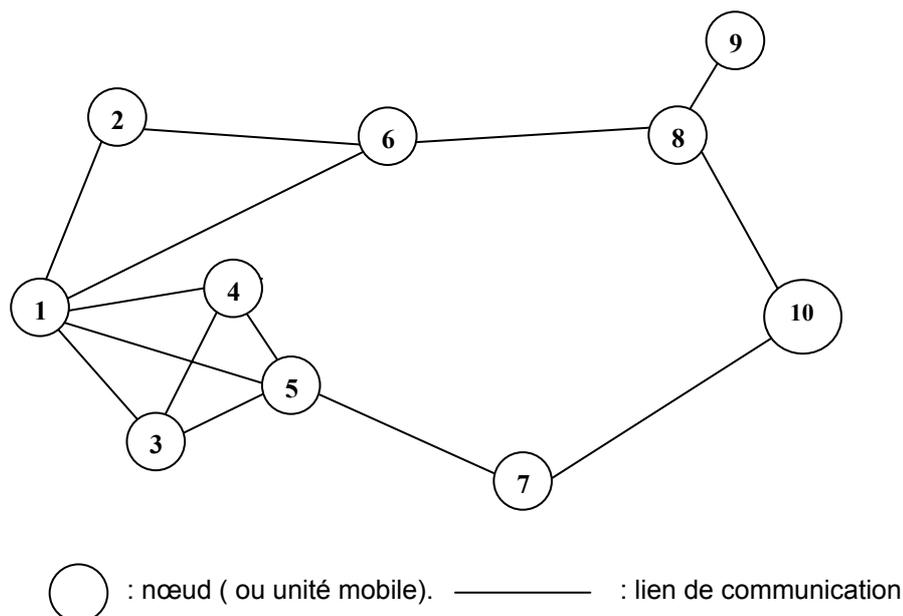
L'évolution récente de la technologie dans le domaine de la communication sans fil et l'apparition des unités de calculs portables ( les *laptops* par exemple ), poussent aujourd'hui les chercheurs à faire des efforts afin de réaliser le but des réseaux : "l'accès à l'information n'importe où et n'importe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

Le concept des *réseaux mobiles ad hoc* essaie d'étendre les notions de la mobilité ( vues dans le chapitre précédent ) 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 et les autres applications de tactique comme les opérations de secours ( incendies, tremblement de terre.. ) et les missions d'exploration.

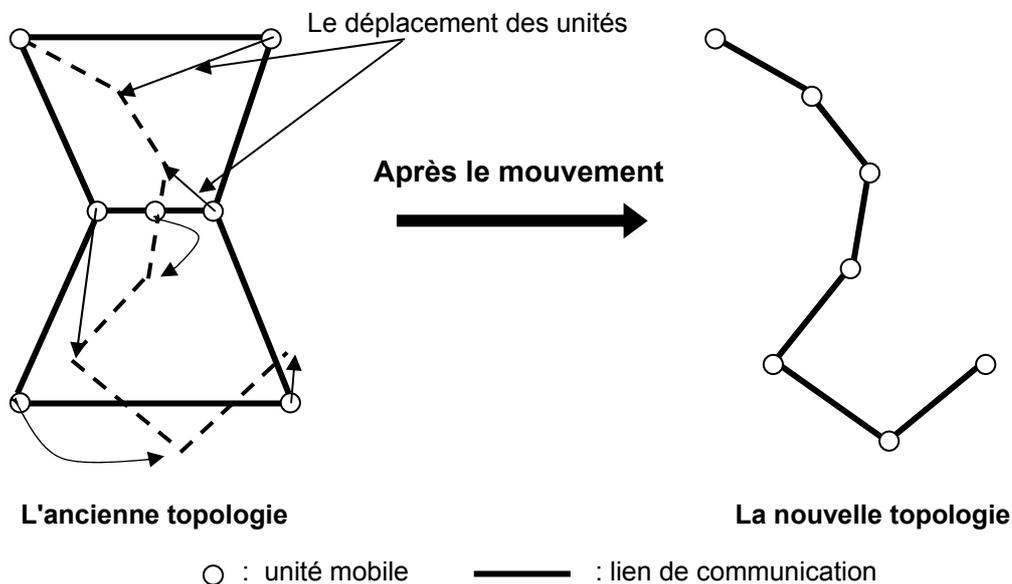
### 2.2.1 Définition

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 réseau ad hoc peut être modéliser par un graphe  $G_t = (V_t, E_t)$  où  $V_t$  représente l'ensemble des nœuds ( i.e. les unités ou les hôtes mobiles ) du réseau et  $E_t$  modélise l'ensemble les connexions qui existent entre ces nœuds ( voir la figure 2.1 ). Si  $e = (u, v) \in E_t$ , cela veut dire que les nœuds  $u$  et  $v$  sont en mesure de communiquer directement à l'instant  $t$ .



**Figure 2.1** : La modélisation d'un réseau ad hoc.

La topologie du réseau peut changer à tout moment ( voir la figure 2.2 ), elle est donc dynamique et imprévisible ce qui fait que la déconnexion des unités soit très fréquente



**Figure 2.2** : Le changement de la topologie des réseaux ad hoc.

Un exemple d'un réseau ad hoc : un groupe d'unités portables reliées par des cartes HIPERLAN. Les réseaux appelés GSM ne représentent pas des réseaux ad hoc, car la communication entre les unités passe obligatoirement par des stations de base (chapitre 1) du réseau filaire.

## 2.2.2 Les applications des réseaux mobiles ad hoc

Les applications ayant recours aux réseaux ad hoc couvrent un très large spectre, incluant les applications militaires et de tactique, les bases de données parallèles, l'enseignement à distance, les systèmes de fichiers répartis, la simulation distribuée interactive et plus simplement les applications de calcul distribué ou méta-computing.

D'une façon générale, les réseaux ad hoc sont utilisés dans toute application où le déploiement d'une infrastructure réseau filaire est trop contraignant, soit parce que difficile à mettre en place, soit parce que la durée d'installation du réseau ne justifie pas de câblage à demeure.

## 2.2.3 Les caractéristiques des réseaux ad hoc

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

Une topologie dynamique : Les unités mobiles du réseau, se déplacent d'une façon libre et arbitraire. Par conséquent la topologie du réseau peut changer, à des instants imprévisibles, d'une manière rapide et aléatoire. Les liens de la topologie peuvent être unis ou bidirectionnels.

Une bande passante limitée : Une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé. Ce partage fait que la bande passante réservée à un hôte soit modeste.

Des contraintes d'énergie : Les hôtes mobiles sont alimentés par des sources d'énergie autonomes comme les batteries ou les autres sources consommables. Le paramètre d'énergie doit être pris en considération dans tout contrôle fait par le système.

Une sécurité physique limitée : Les réseaux mobiles ad hoc sont plus touchés par le paramètre de sécurité, que les réseaux filaires classiques. Cela se justifie par les contraintes et limitations physiques qui font que le contrôle des données transférées doit être minimisé.

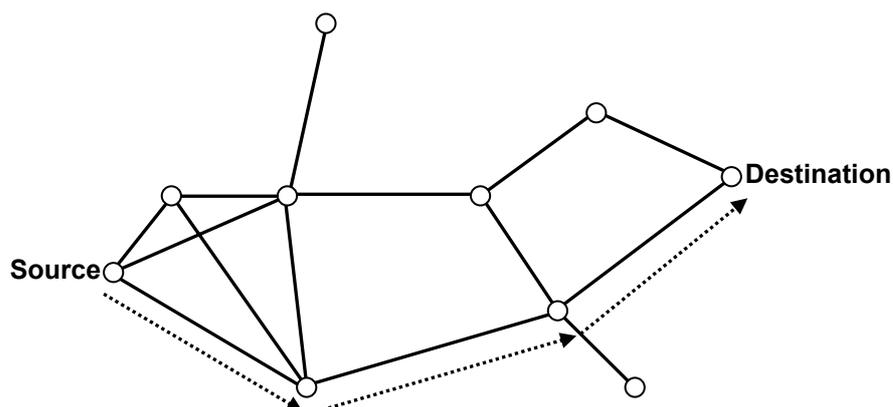
L'absence d'infrastructure : Les réseaux ad hoc se distinguent des autres réseaux mobiles par la propriété d'absence d'infrastructures préexistante et de tout genre d'administration centralisée. Les hôtes mobiles sont responsables d'établir et de maintenir la connectivité du réseau d'une manière continue.

## 2.3 Le problème de routage dans les réseaux ad hoc

### 2.3.1 Définition

Généralement, 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 pour un réseau dont les arcs, les nœuds et les capacités sur les arcs sont fixés à déterminer un acheminement optimal des paquets ( de messages, de produits ...etc. ) 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.

Par exemple 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.



**Figure 2.3** : Le chemin utilisé dans le routage entre la source et la destination.

### 2.3.2 La difficulté du routage dans les réseaux ad hoc

Comme nous avons déjà vu, l'architecture d'un réseau mobile ad hoc est caractérisée par une absence d'infrastructure fixe préexistante, à l'inverse des réseaux de télécommunication classiques. Un réseau ad hoc doit s'organiser automatiquement de façon à être déployable rapidement et pouvoir s'adapter aux conditions de propagation, au trafic et aux différents mouvements pouvant intervenir au sein des unités mobiles.

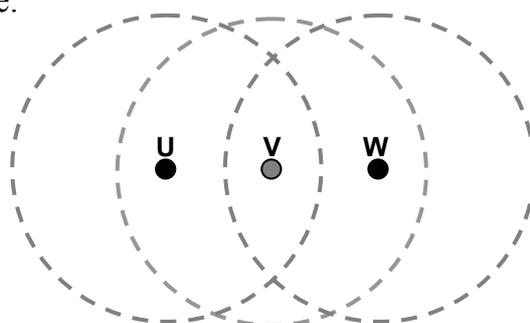
Dans le but d'assurer la connectivité du réseau, malgré l'absence d'infrastructure fixe et la mobilité des stations, chaque nœud est susceptible d'être mis à contribution pour

participer au routage et pour retransmettre les paquets d'un nœud qui n'est pas en mesure d'atteindre sa destination; tout nœud joue ainsi le rôle de station et de routeur.

Chaque nœud participe donc à un protocole de routage qui lui permet de découvrir les chemins existants, afin d'atteindre les autres nœuds du réseau. Le fait que la taille d'un réseau ad hoc peut être énorme, souligne que la gestion de routage de l'environnement doit être complètement différente des approches utilisées dans le routage classique. 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.

Dans la pratique, il est impossible qu'un hôte puisse garder les informations de routage concernant tous les autres nœuds, dans le cas où le réseau serait volumineux. Certains protocoles, comme le DSR et le AODV ( chapitre 3 ), utilisent la sauvegarde des données de routage concernant une destination donnée ( dans le cas où la source ne possède pas déjà de telles informations ). Cependant, ces protocoles ne spécifient pas les destinations que les nœuds doivent garder leurs données de routage. Le problème ne se pose pas dans le cas de réseaux de petites tailles, car l'inondation ( la diffusion pure ) faite dans ces réseaux n'est pas coûteuse; par contre dans un réseau volumineux, le manque de données de routage concernant les destinations peut impliquer une diffusion énorme dans le réseau, et cela si on considère seulement la phase de découverte de routes. Le trafic causé par la diffusion, dans ce cas, est rajouté au trafic déjà existant dans le réseau ce qui peut dégrader considérablement les performances de transmission du système caractérisé principalement par un faible bande passante.

Dans le cas où le nœud destination se trouve dans la portée de communication du nœud source le routage de vient évident et aucun protocole de routage n'est initié. Malheureusement, ce cas est généralement rare dans les réseaux ad hoc. Une station source peut avoir besoin de transférer des données à une autre station qui ne se trouve pas dans sa portée de communication, par exemple dans le réseau illustré par la figure 2.4 l'unité mobile W n'est pas dans la portée de communication de l'unité U ( indiquée par le cercle d'origine U ) et vice versa. Dans le cas où l'unité U veut transférer des paquets à W, elle doit utiliser les services de l'unité V dans l'envoi des paquets, puisque l'unité V contient dans sa portée de communication les unités U et W. Dans la pratique, le problème de routage est plus compliqué à cause de la non-uniformité de la transmission sans fil et de la possibilité du déplacement imprévisible de tous les nœuds concernés par le routage.



**Figure 2.4 :** Un simple réseau ad hoc constitué de trois unités mobiles.

### 2.3.3 La conception des stratégies de routage

L'étude et la mise en œuvre d'algorithmes de routage pour assurer la connexion des réseaux ad hoc au sens classique du terme ( tout sommet peut atteindre tout autre ), est un problème complexe. L'environnement est dynamique et évolue donc au cours du temps, la topologie du réseau peut changer fréquemment. Il semble donc important que toute conception de protocole de routage doive étudier les problèmes suivants :

1- *La minimisation de la charge du réseau* : l'optimisation des ressources du réseau renferme deux autres sous problèmes qui sont l'évitement des boucles de routage, et l'empêchement de la concentration du trafic autour de certains nœuds ou liens.

2- *Offrir un support pour pouvoir effectuer des communications multi-points fiables* : le fait que les chemins utilisés pour router les paquets de données puissent évoluer, ne doit pas avoir d'incident sur le bon acheminement des données. L'élimination d'un lien, pour cause de panne ou pour cause de mobilité devrait, idéalement, augmenter le moins possible les temps de latence.

3- *Assurer un routage optimal* : la stratégie de routage doit créer des chemins optimaux et pouvoir prendre en compte différentes métriques de coûts ( bande passante, nombre de liens, ressources du réseau, délais de bout en bout,...etc. ). Si la construction des chemins optimaux est un problème dur, la maintenance de tels chemins peut devenir encore plus complexe, la stratégie de routage doit assurer une maintenance efficace de routes avec le moindre coût possible.

4- *Le temps de latence* : la qualité des temps de latence et de chemins doit augmenter dans le cas où la connectivité du réseau augmente.

### 2.3.4 L'évaluation des protocoles de routage

Les protocoles de routage doivent être évalués afin de mesurer les performances de la stratégie utilisée et de tester sa fiabilité. L'utilisation d'un réseau ad hoc réel dans une évaluation est difficile et coûteuse, en outre de telles évaluations ne donnent pas généralement des résultats significatifs. Le réseau réel n'offre pas la souplesse de varier les différents paramètres de l'environnement et pose en plus le problème d'extraction de résultats; c'est pour cela la majorité des travaux d'évaluation de performances utilisent le principe de simulation vu les avantages qu'il offre.

En effet, la simulation permet de tester les protocoles sous une variété de conditions. Le simulateur, qui constitue une plate-forme construite avec un certain langage ( Maisie/PARSEC [ZEN 98] par exemple ), permet de varier les différents facteurs de l'environnement tel que le nombre d'unités mobiles, l'ensemble des unités en mouvement, les vitesses des mouvements, le territoire du réseau et la distribution des unités dans ce territoire. Initialement, chaque unité est placée aléatoirement dans l'espace de simulation. Une unité reste dans sa position courante pendant une certaine

durée ( *pause time* ), par la suite elle choisit une nouvelle vitesse et une nouvelle localisation vers laquelle elle se déplace. Chaque unité répète ce même comportement jusqu'à la fin de la simulation.

Les paramètres mesurés dans une évaluation dépendent de la stratégie de routage appliquée ( par exemple dans le cas où on veut comparer deux versions d'un même protocole ), mais généralement tout simulateur doit être en mesure d'évaluer : (a) le contrôle utilisé dans le mécanisme de mise à jour de routage. (b) les délais moyens du transfert des paquets et (c) le nombre moyen de nœuds traversés par les paquets de données.

## 2.3.5 Autres notions

### 2.3.5.1 La notion de "*multihopping*"

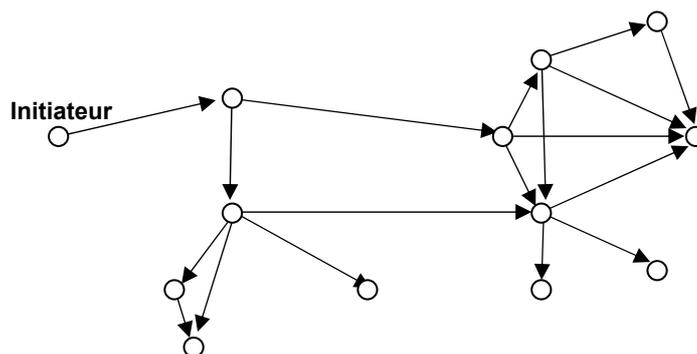
Les stratégies de routage utilisées dans les réseaux ad hoc sont caractérisées par le fait de pouvoir acheminer les paquets de données sans l'aide des stations de base utilisées dans la communication cellulaire.

Dans le modèle cellulaire, la communication entre deux nœuds est faite en utilisant les stations de base et le réseau filaire, par conséquent aucune unité mobile n'est utilisée comme routeur intermédiaire, le modèle cellulaire est dit alors "*single hop*" ( i.e. le nombre de routeurs mobiles intermédiaires est nul ). La contrepartie de ce modèle est le modèle de communication sans infrastructure. Dans ce modèle plusieurs nœuds peuvent participer au routage c'est pour cela l'environnement des réseaux ad hoc est dit "*multihop*" ( i.e. le nombre de stations mobiles qui peuvent être utilisées comme routeurs intermédiaires peut dépasser le un ).

### 2.3.5.2 L'inondation

L'inondation ou la diffusion pure, consiste à faire propager un paquet ( de données ou de contrôle ) dans le réseau entier. Un nœud qui initie l'inondation envoie le paquet à tous ses voisins directs. De même, si un nœud quelconque du réseau reçoit le paquet, il le rediffuse à tous ses voisins. Ce comportement se répète jusqu'à ce que le paquet atteigne tous les nœuds du réseau ( voir la figure 2.5 ). Notons que les nœuds peuvent être amenés à appliquer - durant l'inondation - certains traitements de contrôle, dans le but d'éviter certains problèmes, tel que le bouclage et la duplication des messages.

Le mécanisme d'inondation est utilisé généralement dans la première phase du routage plus exactement dans la procédure de découverte des routes, et cela dans le cas où le nœud source ne connaît pas la localisation exacte de la destination. Un paquet de requête de route est inondé par la source afin qu'il atteigne la station destination. Il faut noter que l'inondation est très coûteuse surtout dans le cas où le réseau est volumineux ( latence, surcharge des messages...etc. ), c'est pour cela les protocoles de



**Figure 2.5** : Le mécanisme d'inondation.

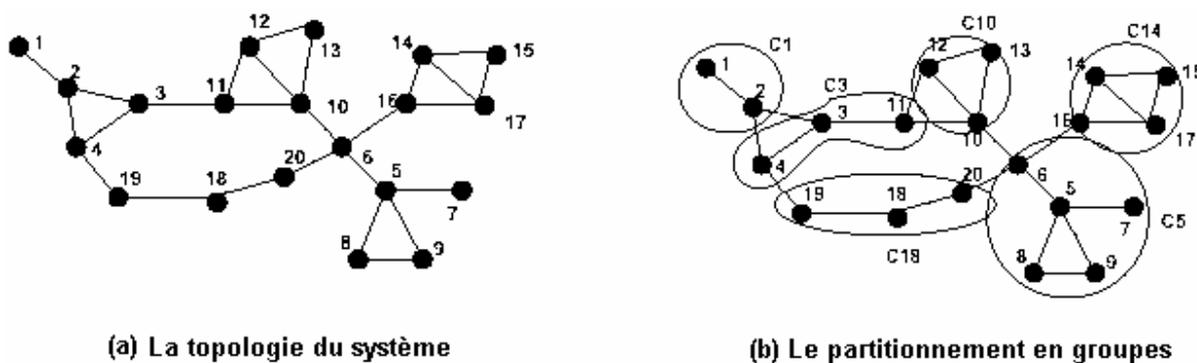
Le routage essaie de minimiser au maximum la propagation des paquets inondés en rajoutant d'autres paramètres de diffusion.

### 2.3.5.3 Le concept de groupe

Dans la communication de groupes, les messages sont transmis à des entités abstraites ou *groupes*, les émetteurs n'ont pas besoin de connaître les membres du groupe destinataire [BAD 98]. La communication de groupe a fait déjà l'objet de nombreux travaux, principalement dans le cadre des projets ISIS, TRANSIS et HORUS [AMI 92, REN 93]. La gestion des membres d'un groupe dynamique permet à un élément de se joindre à un groupe, de quitter ce groupe, se déplacer ailleurs puis rejoindre le même groupe. C'est en ce sens que la communication de groupe assure une indépendance de la localisation; ce qui la rend parfaitement adaptée à des topologies de réseaux reconfigurables, telles que les architectures avec sites mobiles [BAD 98].

Le concept de groupe de communication dans un environnement mobile a été utilisé dans [ACH 94] pour améliorer les performances du protocole de diffusion sélective, et dans [CHO 94] pour adapter les canaux de communication de l'environnement ISIS à des sites mobiles. Dans le contexte de routage dans les réseaux ad hoc, certains protocoles (comme nous allons voir dans le chapitre 3) utilisent des stratégies d'acheminement basées sur les groupes. Le concept de groupe facilite les tâches de la gestion du routage (telles que les transmissions des paquets, l'allocation de la bande passante, la réutilisation spatiale,...etc.) et cela en décomposant le réseau en un ensemble de groupes connectés mais indépendants du point de vue contrôle.

Lin et Gerla proposent dans [LIN 97] un algorithme de décomposition en groupes pour les réseaux mobiles sans fil. L'algorithme partitionne le réseau en un ensemble de groupes de telle sorte que tout nœud du réseau peut atteindre n'importe quel autre nœud en utilisant, au plus, un seul nœud intermédiaire. La figure suivante reprend l'exemple de partitionnement introduit dans [LIN 97].



**Figure 2.6** : La décomposition du réseau en groupes.

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le concept de réseau ad hoc et le problème de routage dans cet environnement. Dans la pratique, les réseaux ad hoc connaissent aujourd'hui plusieurs applications tel que les applications militaires et les applications de secours et de façon générale, toutes les applications caractérisées par une absence d'infrastructure préexistante.

Après avoir défini l'environnement mobile ad hoc et décrit ses principales applications et caractéristiques, nous avons parlé du problème d'acheminement des paquets dans les réseaux ad hoc, c'est à dire le problème de routage. Le routage est un service très important dans les environnements mobiles, surtout quand il n'y a pas d'infrastructure qui s'occupe de l'acheminement des données.

Comme nous avons vu, le problème de routage est loin d'être évident dans les réseaux ad hoc, où l'environnement impose de nouvelles limitations par rapport aux environnements classiques. Les stratégies de routage doivent tenir compte des changements fréquents de la topologie, de la consommation de la bande passante qui est limitée, ainsi d'autres facteurs... Une fois le protocole de routage est conçu, une évaluation de performances doit être faite afin de tester la fiabilité et l'efficacité de la solution proposée.

Finalement, nous avons présenté quelques notions nécessaires à la compréhension du concept de routage dans les environnements mobiles. Dans la partie suivante, nous allons donner une présentation synthétique des différentes solutions qui existent et qui résolvent le problème de routage dans les réseaux mobiles ad hoc.