



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغزور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



N° Série :

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Télécommunications Avancées

THEME

**Application de l'algorithme méta-
heuristique ACO pour le routage des
réseaux AD HOC**

Réalisé par : - BENOUARET RABIAA
- TAKOUACHET SIHAM

Dirigé par : MAAMRI FOUZIA

Promotion 2015/2016

Dédicace

Merci mon dieu de m'avoir aidé et guidé

Je dédie ce modeste travail à ceux que

J'aime et respecte

*A celle qui partage avec moi ma vie A mon père, à ma mère, à mes frères et
son famille, à mes sœurs et son famille.*

Et mon mari et Pour mes enfants.

Et tout la famille, Takouachet, Zerdoume, Hoggas.

Je vous Aime tous.

T. Sihem

Dédicace

Merci mon dieu de m'avoir aidé et guidé

Je dédie ce modeste travail à ceux que

J'aime et respecte

A celle qui partage avec moi ma vie

A mon père, à ma mère, à mes sœurs, Et mon mari

Je vous Aime tous

Rabiaa. M

Remerciement

*Avant tout nous tenons à remercier **mon dieu** le tout puissant de
mon avoir Donné la force et le courage*

Nous saisons cette occasion pour adresser nos remerciements les plus

Profonds à :

*Nos parents, notre encadreur **Mme. Maamri Fouzia**. Qui a fourni des
efforts énormes, par ses information ses conseils et ses encouragements.*

Mes vifs remerciements vont aux membres du jury qui ont

Accepté de prendre de leur temps pour

Examiner notre travail

A tout les professeures de département Génie Electrique

A tous ce qui Fut à toute instante partie prenante de ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de prés et de loin

Ont contribué à la réalisation de ce mémoire

ملخص

تتكون شبكات Ad hoc من وحدات متنقلة تتصل عبر وسائط لاسلكية كل العقد تتعاون لضمان الإدارة السليمة للشبكة (الرقابة التوجيهية.....). طبيعة التوزيع الكامل لهذا النوع من الشبكة يطرح مشكلة الأداء (نظرا لحسابات الطرق) من بين البروتوكولات لحل هذه المشاكل نجد بروتوكولات مستوحاة من الطبيعة مثل معسكرات النمل هذه البروتوكولات تستعمل انتشار النمل من وحدات المصدر لاكتشاف الطريق. في هذا العمل قمنا بدراسة طريقة إيجاد اقصر طريق بالاعتماد على تقوية أثارا لمادة التي يتركها النمل في مساره وبالتالي التكوين المتتالي للحل العام وحساب فعال للطرق الناتج عن آلية الذكاء الجماعي.

كلمات مفتاحية: الشبكات المتنقلة Ad hoc استكشافات خوارزميات معسكرات النمل.

Résumé

Les réseaux ad hoc sont composés d'unités mobiles communicants via un média sans fil. Tous les nœuds coopèrent afin d'assurer la bonne gestion du réseau (contrôle, routage,...). La nature de ce type de réseau pose le problème de performances (dues aux calculs de routes), parmi les protocoles de solution de ces problèmes, nous distinguons des protocoles inspirés des méthodes méta-heuristiques qui constituent une famille d'algorithmes inspirés de la nature, tels que les colonies de fourmis. Ces protocoles utilisent une diffusion de fourmis (agents) par les nœuds sources pour la découverte des routes. Ce travail consiste à faire une étude afin de trouver le chemin le plus court en se basant sur le renforcement des traces de phéromone que les fourmis laissent sur leur passage, et la construction itérative d'une solution globale qui se base sur une sorte d'intelligence collective.

Mots-clés : réseaux mobiles, ad hoc, méta-heuristiques, algorithmes de colonies de fourmis.

Abstract

The ad hoc networks are composed of mobile units communicating via a wireless media. All the nodes cooperate to ensure the proper management of the network (control, routing...). The nature of this type of network poses the problem of performance (due to the calculations of roads). Among the protocols of solution of these problems, we distinguish from the protocols inspired of the méta-heuristic methods which constitute a family of algorithms inspired of nature, such as the colonies of ants. These protocols use a diffusion of ants (agents) by the nodes sources for the discovery of the roads. This work consists in making a study in order to find the way shortest while being based on the reinforcement of the pheromone tracks that ants leave on their passage, and the iterative construction of a global solution, which is based on a kind of collective intelligence.

Keywords: mobile networks, ad hoc, méta-heuristic, algorithms of colonies of ants.

Liste des figures

1.1 : Les différents modes de communication.....	06
1.2 : <i>Le réseau cellulaire (GSM)</i>	07
1.3: Architecture du réseau AMP.....	08
1.4: Technologie d'accès FDMA.....	08
1.5: Architecture du réseau GSM.....	09
1.6: Technologie d'accès TDMA.....	11
1.7: Architecture du réseau GPRS.....	12
1.8: Architecture du réseau UMTS.....	14
1.9: Comparaison des technologies d'accès au canal radio.....	15
1.10: Procédé d'étalement et de dés étalement du signal.....	16
1.11 : Evolution des réseaux sans fil.....	18
2.1 : un réseau Ad Hoc.....	22
2.2 : Le changement de la topologie des réseaux Ad Hoc.....	22
2.3 : Les nœuds cachés.....	24
3.1 : Eléments indispensable d'optimisation.....	32
3.2 : Des fourmis suivant une piste de phéromone	35
3.3 : Expérience de sélection des branches les plus courtes par Une colonie de fourmis	36
3.4 :Le problème du voyageur de commerce optimisé par l'algorithme AS.....	39
4.1 : Le renforcement de la probabilité d'une piste à définir.....	46
4.2 : La probabilité de la table de phéromone en fonction de temps pour $a=5$	47
4.3 : La probabilité de la table de phéromone en fonction de temps pour $a=50$	48
4.4 : Evolution de la probabilité en fonction de temps pour différentes valeurs de a	49
4.5 : Exemple de Graphe Dynamique.....	50
4. 6 : Longueur moyenne des chemins en fonction de Taux moyen de renouvellement des arêtes des chemins (%) pour $ro=0$	51
4.7: Longueur moyenne des chemins en fonction de Taux moyen de renouvellement des arêtes des chemins (%) pour $ro=0.2$	51
4. 8 :Longueur moyenne des chemins en fonction de Taux moyen de renouvellement des arêtes des chemins (%) pour $ro=0.4$	52
4.9 : Longueur moyenne des chemins en fonction de Taux moyen de renouvellement des arêtes des chemins (%) pour $ro=0.9$	52

Liste des tableaux

4.1 : Le taux moyen de renouvellement de la structure est alors environ.....50

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale :.....02

Chapitre 1 : Les réseaux mobiles :

1.1 Introduction :.....05

1.2. La transmission radio dans les environnements sans fil.....05

1.3. Modes de communication dans les réseaux mobile.....05

1.4. Les classes des réseaux mobiles.....06

1.4.1. Les réseaux avec infrastructure (cellulaires).....06

1.4.1.1. Première Génération (1G).....07

1.4.1.2 Deuxième Génération (2G).....09

1.4.1.2.1 Architecture09

1.4.1.3. Deuxième Génération et demie (2,5G).....11

1.4.1.3.1. Architecture.....12

1.4.1.4. Troisième Génération (3G).....13

1.4.1.4.1. Les services UMTS.....13

1.4.1.4.2. Architecture.....14

1.4.1.5. Quatrième génération (4G)17

1.4.1.5.1 Le standard LTE17

1.4.1.5.2. Le standard LTE Advanced18

1.5. Conclusion.....19

Chapitre 2: Routage dans les réseaux AD HOC :

2.1 Introduction21

2.2 .Les réseaux mobiles Ad hoc.....21

2.2.1 Définition21

2.2.2. Applications pour les réseaux mobiles *ad hoc* discontinus.....22

2.2.3 Les caractéristiques des réseaux ad hoc23

2.3. Le routage dans les réseaux ad hoc.....24

2.3.1 Définition du routage.....	24
2.3.2. Aperçu sur les protocoles du réseau.....	24
2.3.3 La difficulté du routage dans les réseaux ad hoc.....	25
2.3.4 La conception des stratégies de routage.....	26
2.3.5 L'évaluation des protocoles de routage.....	26
2.3.6 Protocoles uniformes et non-uniformes	27
2.3.7. La classification de MANET	27
2.3.7.1 Les protocoles de routage proactifs	27
2.3.7.2. Les protocoles de routage réactifs	28
2.3.7.3. Les protocoles de routage hybrides	29
2.4. Conclusion	29

Chapitre 3: Optimisation par méta-heuristique :

3.1. Introduction.....	31
3.2. L'origine de la méthode	31
3.3. Description et algorithme	31
3.4. Les éléments d'optimisation	32
3.5. Généralités sur les algorithmes d'optimisation.....	32
3.6.Algorithmes d'optimisation approchée.....	33
3.6.1. Heuristiques.....	33
3.6.2. Méta heuristiques.....	33
3.7. Applications	34
3.8. Les fourmis.....	34
3.8.1. Pourquoi les fourmis ?.....	34
3.8.2. Relation avec l'informatique	35
3.9. Algorithmes de colonies de fourmis en optimisation.....	35
3.9.1 .Optimisation naturelle : pistes de phéromone.....	35
3.9.2. Optimisation par colonies de fourmis et problème du voyageur de commerce....	37
3.9.2.1. Algorithme de base.....	37
3.9.2.2. Variantes.....	39
3.10. Les problèmes d'optimisation.....	41
3.11. Streaming audio ou vidéo.....	42
3.12. Conclusion.....	43

Chapitre 4 : Le problème du chemin le plus court et le plus robuste « Simulation et discussion » :

4.1. Introduction	45
4.2. Principe	45
4.3. Tables de phéromone	45
4.4 Plus court chemin et équilibrage de charge	46
4.5 Renforcement des tables de routage.....	47
4.6. Taux de renouvellement.....	49
4.7 Conclusion	53
Conclusion générale.....	56
Bibliographie.....	59
Annexe A	
Annexe B	
Annexe C	

INTRODUCTION GÉNÉRALE



Introduction générale

Durant la dernière décennie, l'avènement des normes IEEE802.11a/b/g, et bluetooth, et des interfaces matérielles associées ont permis le développement de nouveaux équipements mobiles qui héritent à la fois de l'ordinateur portable, du téléphone mobile, des consoles de jeux ou des lecteurs multimédia. [1]. En outre, certaines de ces technologies radio offrent des possibilités nouvelles de communication, elles permettent notamment de s'affranchir des infrastructures existantes et de mettre en œuvre une communication dite ad hoc. Les réseaux ad hoc ou MANET (Mobile Ad hoc Network) sont composés d'unités mobiles communiquant via un média sans fil, sans la nécessité d'infrastructure physique. Dans ce genre de topologie, tous les nœuds coopèrent afin d'assurer la bonne gestion du réseau (contrôle, routage,...). La nature de ce type de réseau pose le problème de performances (dues aux calculs de routes) ainsi que les problèmes liés à la sécurité des échanges entre les nœuds. Cette avancée technologique s'accompagne d'un besoin important pour de nouvelles connaissances théoriques et de nouvelles approches algorithmiques. Si celles-ci sont largement éprouvées pour les graphes statiques, modèles naturels des réseaux infrastructures, il n'en est pas de même des graphes dynamiques qui modélisent ces nouveaux réseaux, qui sont à la fois mobiles, imprévisibles et dont le fonctionnement est décentralisé.

Les MANETs sont des réseaux, sans infrastructure, qui résultent des communications entre différentes stations, ils ne sont pas identifiables simplement et ne peuvent être considérés de manière centralisée. L'absence d'infrastructure ne permet pas d'offrir simplement les mêmes services que les réseaux classiques. Cela implique la mise en place de mécanismes de découverte de voisinage et de routage locaux. La dynamique du réseau doit également être prise en compte, et les chemins construits dans ce réseau nécessitent de continuelles mises à jour. Cela suppose également que les algorithmes présentent des propriétés de robustesse et de flexibilité leur permettant de s'adapter à la fois à l'apparition et à la disparition de stations et des liens de communication associées. Le but de ce travail est donc de permettre de trouver le chemin le plus court et le plus robuste entre la source et une destination.

Ce mémoire est décomposé en 4 chapitres, le premier chapitre sera consacré aux réseaux mobiles. Ce chapitre nous permettra de maîtriser les principes des réseaux mobiles sans fil. Nous présenterons, tout d'abord, un principe le principe de la transmission sans fil et ensuite nous donnons les modes et les classes des réseaux mobiles. Dans un deuxième chapitre, nous présenterons le principe ainsi que les protocoles de routage. Le troisième chapitre porte sur l'optimisation des différents systèmes complexes par les algorithmes méta-heuristiques. Nous présenterons ensuite le principe de l'algorithme de fourmi (ACO).

Dans le dernier chapitre nous avons fait une simulation pour avoir le chemin le plus court en utilisant l'algorithme de colonies de fourmi.

Enfin, une conclusion générale est donnée pour résumer le principe de ce travail et des perspectives de développement de cet axe de recherche sont également examinées.

CHAPITRE 01

LES RÉSEAUX MOBILES



1.1. Introduction

Les réseaux sans fil (Wireless LAN ou WLAN ou IEEE 802.11), offrent aujourd'hui de nouvelles perspectives dans le domaine des télécommunications. C'est un système de transmission des données, conçu pour assurer une liaison indépendante de l'emplacement des périphériques informatiques qui compose le réseau. Les réseaux sans fil sont principalement employés lorsqu'il s'agit d'interconnecter des utilisateurs nomades (par exemple des portables) entre eux. ce système ne pose aucune restriction sur la localisation des usagers. Il utilise des ondes radio plutôt qu'une infrastructure câblée pour communiquer. ce nouveau mode de communication engendre de nouvelles caractéristiques, propres à l'environnement mobile : de fréquentes déconnexions, un débit de communication et des ressources modestes, et des sources d'énergie limitées. Les réseaux mobiles peuvent être classés en deux grandes classes :

- Réseau sans fil avec infrastructure (comme le GSM).
- Réseau sans fil sans infrastructure (comme les réseau ad hoc).

Cette première classe de réseaux sans fil constitue la base de notre sujet d'étude, et c'est ce que l'on va développer dans ce présent chapitre.

1.2. La transmission radio dans les environnements sans fil

La transmission radio utilisée dans la communication sans fil est basée sur le principe que l'accélération d'un électron crée un champ électromagnétique qui, à son tour accélère d'autres électrons et ainsi de suite. Il est alors possible de provoquer un déplacement électromagnétique [1]. Ce déplacement coordonné d'électrons peut alors servir pour le transfert d'information et constitue la base de la communication sans fil. deux signaux sur la même fréquence interfèrent et s'altèrent mutuellement. Pour y remédier, le spectre de fréquence est divisé en plusieurs parties (bandes de fréquence), chaque partie est dédiée à une utilisation spécifique. La taille limitée du spectre de fréquence impose donc le regroupement d'usagers dans des bandes. Par exemple, la bande de 25 Mhz à 890 Mhz est réservée aux émissions de télévision et la bande supérieure à 890 Mhz pour la téléphonie cellulaire et la transmission par satellite.

1.3. Modes de communication dans les réseaux mobile

La communication dans les réseaux mobiles Ad Hoc utilise plusieurs modes dont : la communication « point à point » ou « Unicast », la communication « multipoint » ou « Multicast », et la diffusion « Broadcast », Ces trois modes de communication peuvent être schématisés par la figure 1.1.

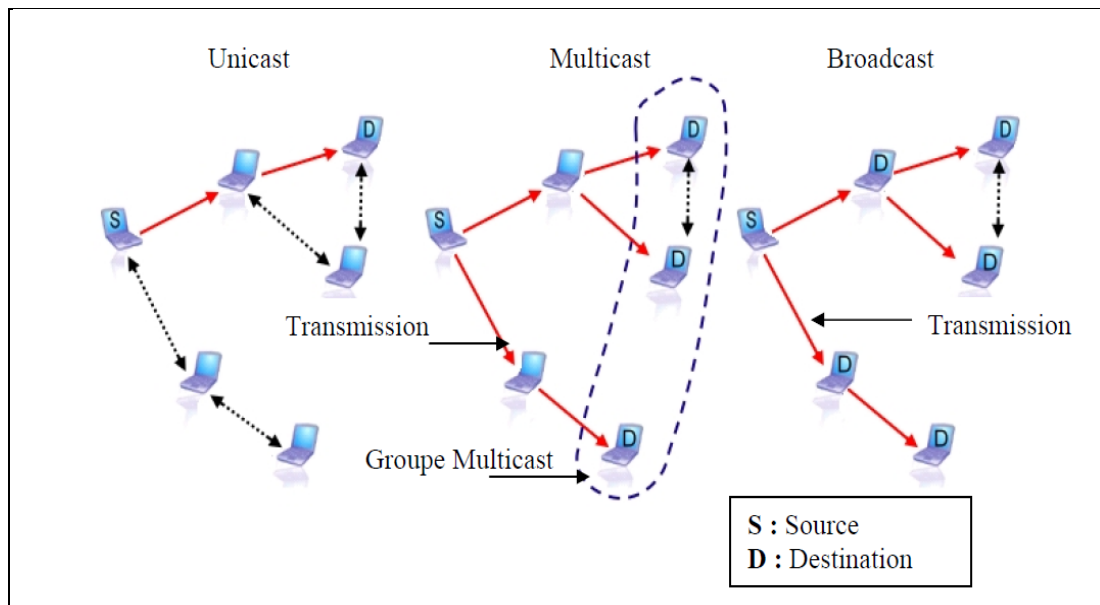


Figure 1.1 Les différents modes de communication

1.4. Les classes de réseaux mobiles

Dans l'espace des réseaux mobiles, nous pouvons distinguer deux classes de réseaux, à savoir, les réseaux mobiles basés sur une infrastructure de communication (modèle cellulaire), et les réseaux mobiles sans infrastructure (modèle ad hoc).

1.4.1. Les réseaux avec infrastructure (cellulaires)

Dans ce mode, le réseau sans fil est composé de deux ensembles d'entités distinctes les « sites fixes » d'un réseau de communication filaire classique, et les « sites mobiles ». Certains sites fixes, appelés stations de bases (SB) sont munis d'une interface de communication sans fil pour la communication directe avec les sites ou les unités mobiles (UM) localisés dans une zone géographique limitée appelée cellule.

Chaque station de base délimite 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, généralement fiable et d'un débit élevé. Les liaisons sans fil ont une bande passante limitée qui réduit sévèrement le volume des informations échangées. Dans ce modèle, 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. L'autonomie réduite de sa source d'énergie, lui occasionne de fréquentes déconnexions du réseau; sa reconnexion peut alors se faire dans un environnement nouveau voire dans une nouvelle localisation.

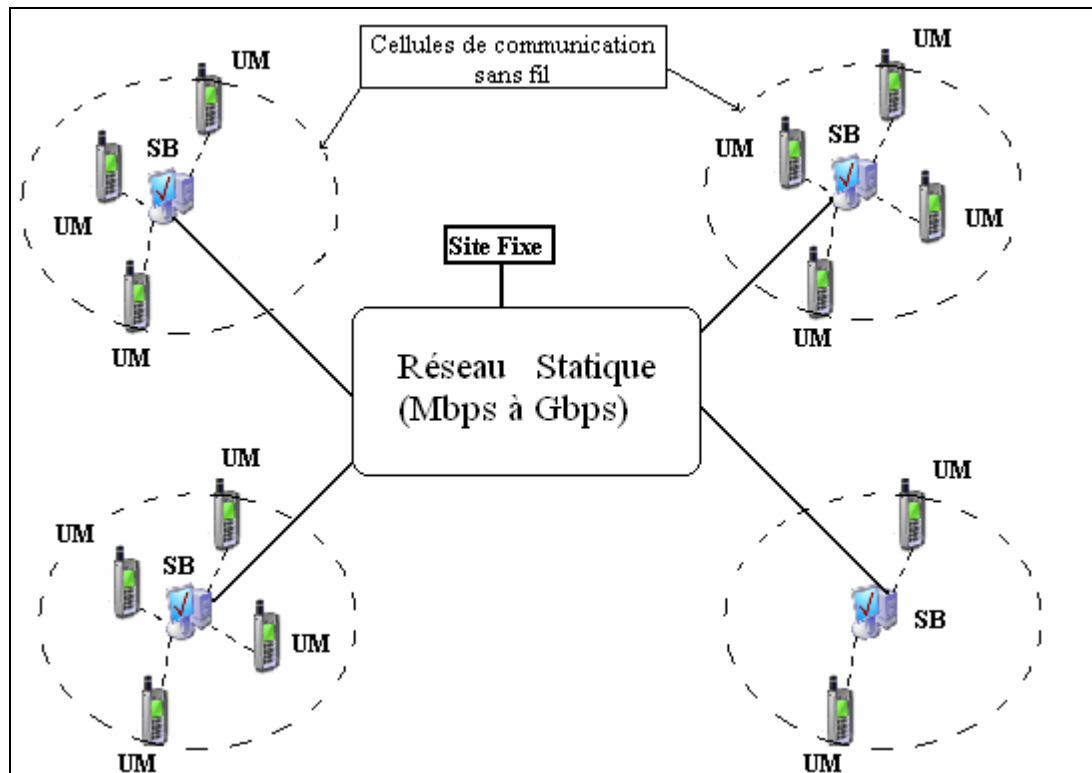


Figure 1.2 Le réseau cellulaire (GSM)

A fin d'agrandir la surface de couverture, plusieurs points d'accès¹ peuvent être installés pour un même 'groupe de travail'². Dans le cas d'utilisateurs mobiles, il y'a possibilité de passer d'un point d'accès à un autre sans perte de lien réseau (comme pour un réseau GSM schématiser dans la figure 1.2). Cette fonctionnalité s'appelle "Roaming".

1.4.1.1. Première Génération (1G)

La première génération [2] est apparue dans le début des années 80 et était caractérisée par des communications analogiques entre les terminaux et les stations de bases. Cette génération a introduit les concepts de cellules et de réutilisation de fréquences. Afin de minimiser les interférences entre les différentes cellules, des antennes directionnelles d'une ouverture de 120 degré furent utilisées. Le facteur de réutilisations optimales afin d'assurer les 18 dB du SIR (Signal-to-Interference Ratio) se révéla être 7 (Fig. 1.3). L'AMPS (Advanced Mobile Phone System).

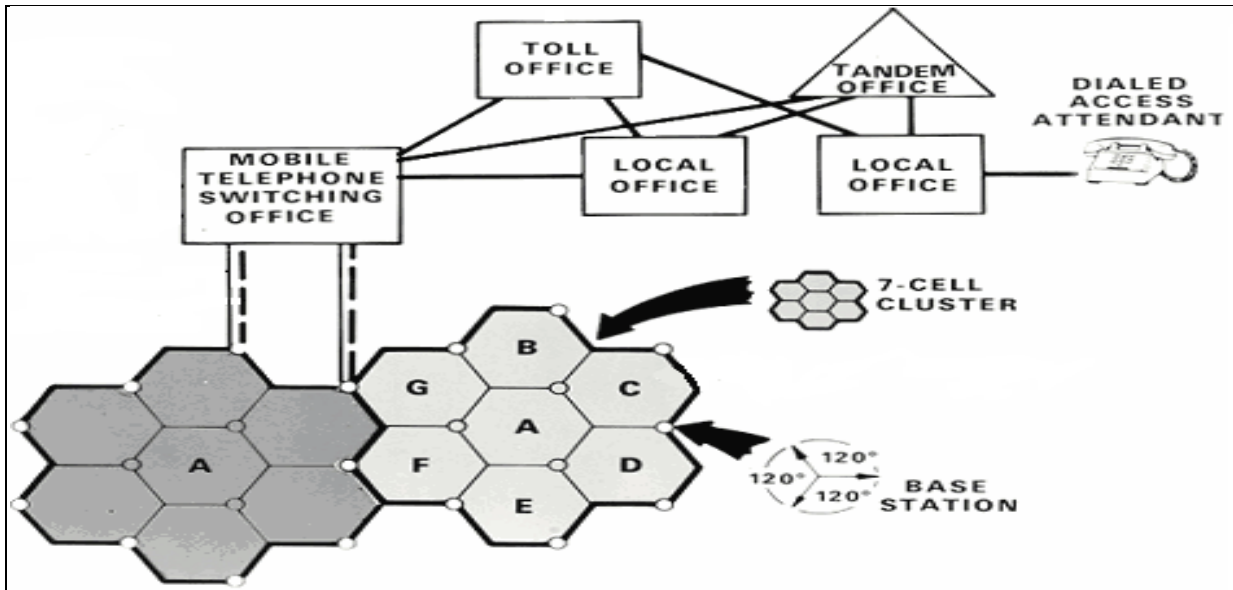


Figure. 1.3 Architecture du réseau AMP

Système populaire aux USA, fut développé par Bell Labs et rendu disponible en 1983. Un total de 40 MHz du spectre fut alloué dans la bande des 800MHz offrant ainsi 832 canaux de communication et un débit de l'ordre des 2.4kbps. Les Transmissions de la station de base vers les mobiles s'opéraient sur le forward channel utilisant les fréquences comprises entre 869-894 MHz tandis que les communications inverses prenaient place dans le reverse Channel utilisant la bande des 824-849 MHz. L'accès au canal radio par plusieurs mobiles était rendu possible par la technologie d'accès FDMA (Frequency Division Multiple Access) qui allouait une fréquence porteuse à chacun des utilisateurs pour la durée de la communication (Fig. 1.4)

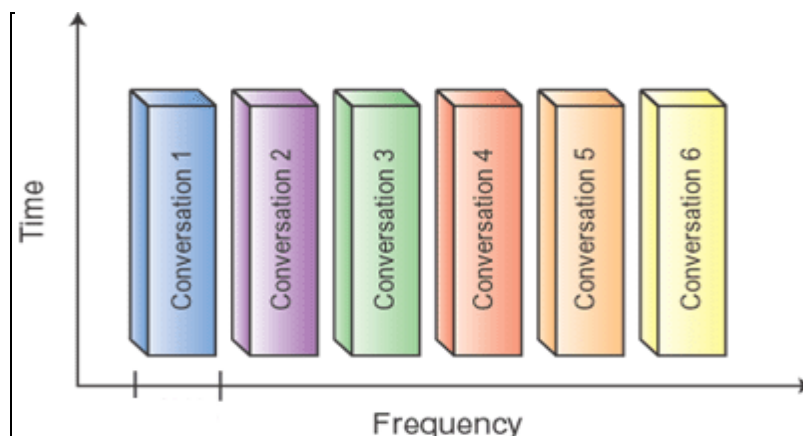


Figure. 1.4 Technologie d'accès FDMA

1.4.1.2. Deuxième Génération (2G)

La deuxième génération [3] se caractérise par le passage à un système entièrement numérique et une attention particulière fournie au développement de standard pour assurer l'interopérabilité des équipements. Un exemple de système de deuxième génération est le système GSM (Global System for Mobile) qui fit son apparition en Belgique en 1993. Les débits sont de l'ordre de 9,6kbps et *apparait* le premier service de type paquet, le SMS, qui est transporté au travers du réseau de signalisation.

1.4.1.2.1. Architecture

L'architecture du réseau GSM est illustrée à la Fig. 1.5. Le système est techniquement divisé en trois sous-systèmes :

1. le Network Sub-Système (NSS) qui est chargé de l'interconnexion avec le réseau fixe et de l'acheminement du trafic
2. le Base-Station Sub-système (BSS) qui assure et gère les transmissions radios réseau et
3. l'Opération and Support System (OSS) qui permet à l'opérateur d'exploiter son de faire de la maintenance

A ces trois sous-systèmes qui sont propres au réseau vient s'ajouter le MS (mobile Station) et sa carte SIM (Subscriber Identity Module).

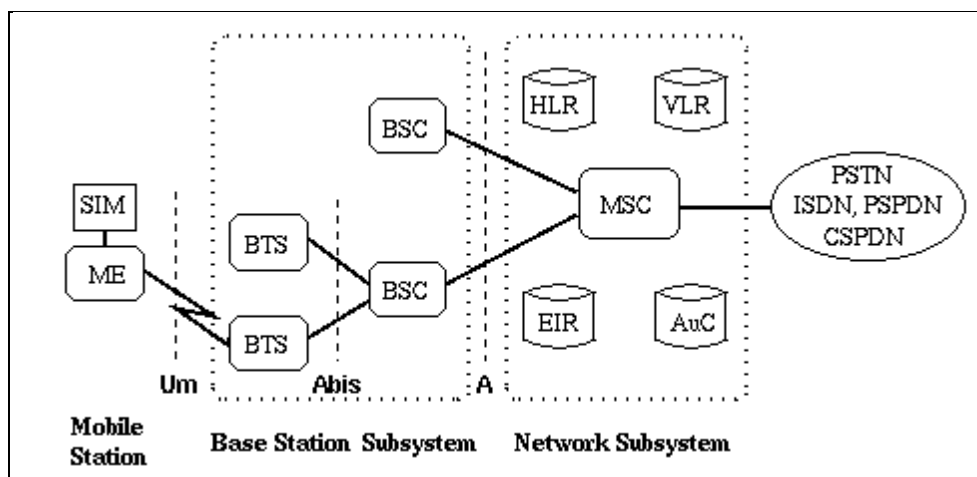


Figure. 1.5 Architecture du réseau GSM

a. Le Network Sub-System (NSS)

Le NSS comporte les bases de données, la signalisation et les commutateurs. il est composé des entités fonctionnelles suivantes :

- MSC (Mobile Switch Center) : Il contient notamment le commutateur proprement dit et permet l'interconnexion du réseau fixe (PSTN, ISDN,..) et du BSS (Base-Station Subsystem) via l'interface A.

- HLR (Home Location Register) : Le HLR d'un opérateur GSM contient les bases de données de ses abonnés, indiquant les services souscrits et des informations sur la localisation du mobile. Un HLR dessert généralement plusieurs MSC.

- VLR (V des informations du HLR relatives aux mobiles présent dans l'aire du MSC qu'il dessert. Il est souvent physiquement couplé au MSC en raison du nombre important de messages entre ces deux entités. isitor Location Register) : Le VLR quant μ a lui ne contient qu'un sous-ensemble.

- AUC (Authentications Center) : C'est la que son stockée les données (Clés) permettant d'authentifier l'abonné et d'assurer la confidentialité (Algorithme de chiffrement).

- EIR (Equipment Identity Register) : Cette base de données contient les caractéristiques des postes mobiles. Elle maintient des statistiques, l'IMEI (Numéro de série) des postes mobiles et une liste noire des appareils volés.

b. Le Base-Station Sub-system (BSS)

Le BSS est chargé de la communication radio avec les postes mobiles et est composée de base Station Controller (BSC) et de Base Transceiver Station (BTS). le BSC est l'organe intelligent du sous-système radio, il est capable de gérer plusieurs BTS et de dialoguer avec le MSC. Ses principales fonctions sont :

- L'allocation des canaux de communication et de signalisation
- Assurer le handover lorsqu'un mobile change de cellule.
- Transmettre au MSC les informations relatives μ a la localisation du mobile pour mettre à jour le VLR et le HLR.
- Aiguiller le trafic provenant du MSC vers les différentes BTS.
- Concentrer le trafic en provenance des BTS vers le MSC.

- **Une BTS est quant à elle chargée de**

- La gestion des liaisons radio (encodage, modulation, détection et correction D'erreur,..) Avec les postes mobiles.
- Chiffrer/déchiffrer les communications pour assurer la confidentialité.
- Mesurer la qualité du signal reçu et les transmettre au BSC pour un éventuel handover
- Contrôler la puissance d'émission pour limiter les interférences

- **L'interface radio**

Le GSM opère dans la bande des 900 MHz et utilise deux bandes de fréquence de 25 MHz :

1. La bande 890-915 MHz est utilisée dans le sens MS / BST
2. La bande 935-960 MHz est utilisée dans le sens BST / MS

Le spectre est divisé en 124 paires de fréquences porteuses (une pour chaque sens de la communication) espacées de 200 kHz et réparties entre les différentes cellules. Chaque porteuse est ensuite divisée dans le temps en 8 TS (Time Slot) par la méthode d'accès TDMA (Time Division Multiple Access), fournissant ainsi 992 canaux physiques de communication (Fig. 1.6).

1.4.1.3. Deuxième Génération et demie (2,5G)

La deuxième génération et demie [4] est une extension du réseau GSM pour Y incorporer les services paquets et constitue le premier pas vers les services

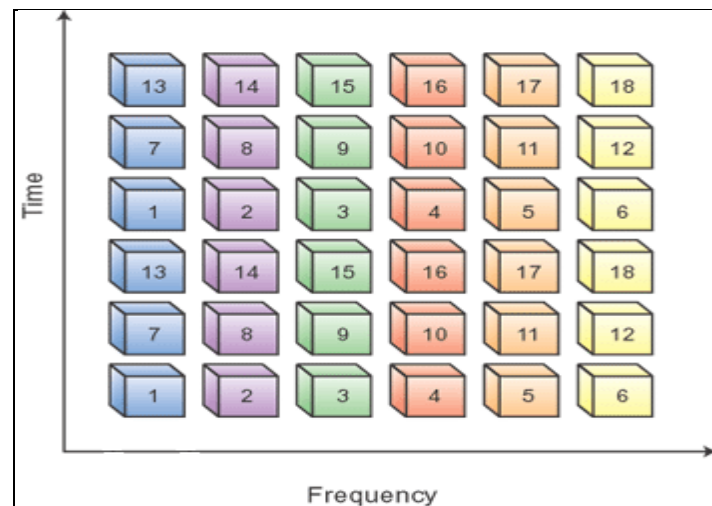


Figure. 1.6 Technologie d'accès TDMA

De troisième génération. Le General Pack et Radio Service (GPRS) et l'Enhanced Data rate Gsm Evolution (EDGE) sont des technologies issues de cette génération. GPRS est une solution basée sur la commutation de paquets IP, il fonctionne en recouvrant les 8 TS utilisés pour le GSM d'une couche logique basé sur la paquetsation. Le GPRS est un service dit always-on, dès la première connexion un circuit virtuel est établi donnant l'impression à l'utilisateur d'être en permanence connecté. Contrairement au mode circuit qui alloue une ligne dédiée à l'utilisateur pour la durée de la communication, le mode paquet n'alloue des intervalles de temps que lorsque les données sont disponibles pour la transmission. Il permet donc une facturation sur le volume de paquets transmis et non plus sur la durée.

En théorie, GPRS supporte des débits de transmissions allant jusqu'à 171.2Kbps dans les conditions idéales. En pratique, les interférences et l'occupation du canal par d'autres communications ramène le débit moyen à une valeur nettement inférieure (en moyenne 40kbps).

EDGE repose sur la même architecture que le GPRS, il permet un débit trois fois supérieur au GPRS en passant d'une modulation GMSK (Gaussian Minimum-Shift Keying) à une modulation 8-PSK (octogonal Phase Shift Keying). Cette nouvelle modulation permet de transporter 3 bits par symbole alors que le GMSK n'en permettait qu'un seul. Il permet ainsi par une simple mise à jour software des équipements de tripler le débit offert par GPRS et d'atteindre les 473,6kbps dans le cas idéal d'un mobile au pied de la station de base.

1.4.1.3.1. Architecture

Malgré le désir de reposer au maximum sur le réseau existant, des changements protocolaires et hardware furent nécessaires pour construire un réseau de paquet pouvant supporter de manière efficace les burst du trafic **IP**.

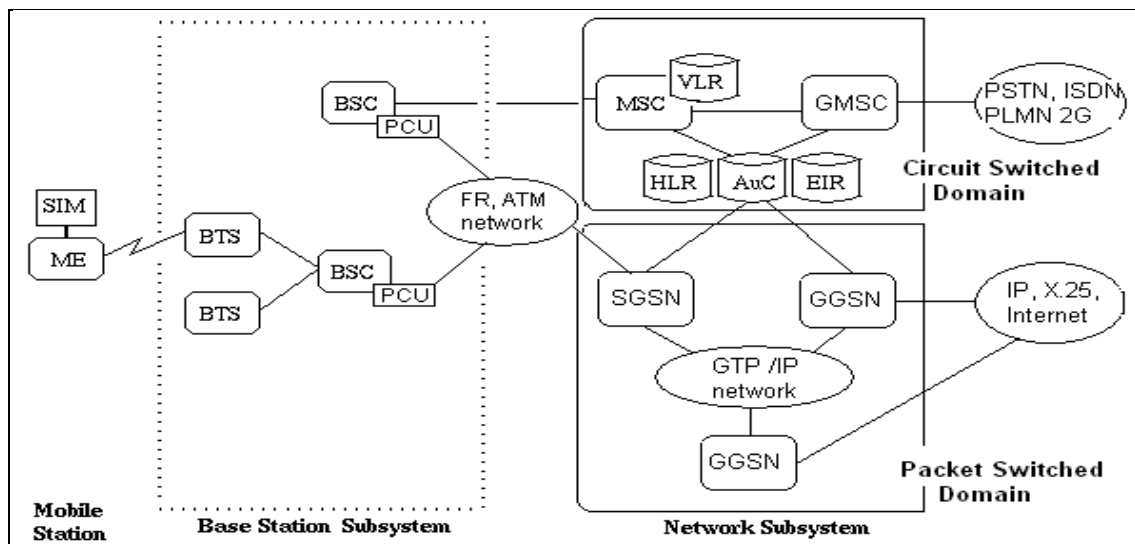


Figure. 1.7 Architecture du réseau GPRS

a .GPRS NSS

Dans le cœur du réseau, les MSC existants sont des technologies à commutation de circuit et ne peuvent donc pas supporter de manière efficace le trafic **IP**.

Deux composants ont donc été rajoutés :

1. le Gateway GPRS Support Node (GGSN) : il fait office de passerelle entre le réseau GPRS et un réseau public de données tel que le réseau internet ou un réseau X.25. Il permet également de connecter différents réseaux GPRS Afin d'assurer le roaming.

2. le Serving GPRS Support Node (SGSN) : Il a le rôle d'un MSC à commutation de paquets il assure le routage des paquets en provenance et à destination des Utilisateurs de la zone de service n qu'il dessert. Il est chargé de gérer la mobilité et mettre à jour les information de

localisation du HLR. Le protocole utilisé pour l'encapsulation des données entre le SGSN et le GGSN est GTP (GPRS Tunneling Protocol). Il repose sur TCP et UDP et permet le transport des données, des informations de contrôle (activation session, ajustement QoS,...) et des informations de facturations.

Le software des bases de données (VLR, HLR,...) a subi une mise à jour pour intégrer le nouveau format des requêtes et des fonctions introduites par le GPRS.

b .GPRS BSS

En plus des changements dans le NSS, une mise à jour des couches supérieures (software) du BSS était nécessaire pour intégrer la couche logique PDCH (Packet Data channel) sur l'interface radio. A la sortie du BSC, une séparation entre le trafic voix et le trafic data est mise en place. Le trafic voix sera dirigé vers les MSC de la même façon que les appels GSM standards, tandis que le trafic data sera écoulé par un réseau Frame relay vers le SGSN au moyen d'une ou plusieurs PCUs (Paquet Controller Unit).

1.4.1.4 Troisième Génération (3G)

Un certain nombre d'objectifs en termes de normalisation avaient été fixés initialement par l'ITU (International Telecommunication Union) dans le cadre de l'IMT-2000 pour l'élaboration de la troisième génération. Cependant, suite à de nombreuses négociations internationales, il a été décidé de ne pas élaborer une norme unique mais bien une famille de normes :

- Le W-CDMA (Wide-band Code Division Multiple Access) en Europe
- Le CDMA2000 en Amérique
- Le TD-SCDMA (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access) en Chine

L'Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) [5,6] est une des technologies de téléphonie mobile numérique de troisième génération européenne, elle est basée sur la norme W-CDMA standardisée par le 3GPP (3rd Generation Partnership Project).

1.4.1.4.1. Les services UMTS

Les services offerts par l'UMTS sont semblables à ceux déjà présents dans les réseaux GSM et GPRS (téléphonie, visiophonie, SMS,...). Il est cependant possible de négocier les paramètres des bearer services (services de bas niveau pour le support des tels services) lors de l'établissement d'une connexion et de les renégocier lors d'une session en cours.

Les bearer services ont différents paramètres de QoS pour le end-to-end Delay, la gigue et le taux d'erreur. Les débits offerts sont :

- 144 Kbits/s en outdoor dans une zone rurale (vitesse >120 km/h)

- 384 Kbits/s en outdoor dans une zone urbaine (vitesse <120 km/h)
- 2048 Kbits/s en indoor ou à courte portée en outdoor (vitesse <10 km/h) les services réseaux de l'UMTS définissent différentes classes de QoS pour quatre types de trafic :
- Conversational class (voix, visiophonie, jeux vidéo)
- Streaming class (multimedia, video à la demand, webcast)
- Interactive class (web browsing, jeux en réseau, accès aux bases de données)
- Background class (email, SMS, téléchargement)

Les deux premières classes, destinées aux applications aux contraintes temporelles fortes, favorisent le délai et la gigue tandis que les deux dernières attachent D'avantage d'importance au taux d'erreur des paquets.

1.4.1.4.2. Architecture

a. Le Core Network

Le cœur du réseau est basé sur celui construit pour le GSM avec GPRS, seul des changements minimes ont été apportés pour le support des fonctionnalités Offertes par l'UMTS. Il est divisé en un domaine à commutation de circuit et un autre à commutation de paquet (Fig. 1.8).

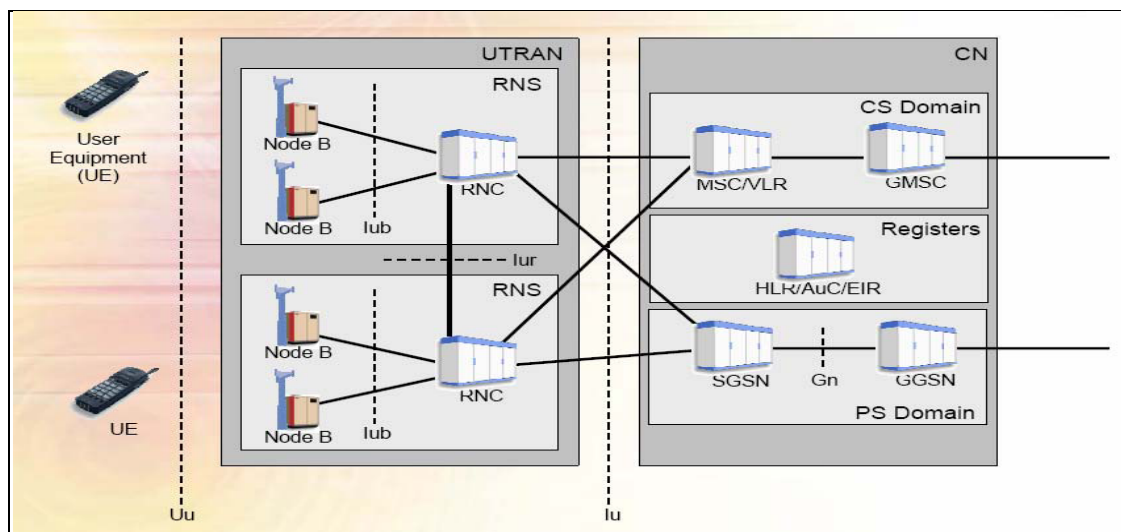


Figure. 1.8 Architecture du réseau UM

L'ATM (Asynchronous Transfer Mode) a été défini comme technologie pour la transmission au sein du Core Network. Le trafic de la commutation de circuit est pris en charge par l'ATM Adaptation Layer type 2 (AAL2) qui a été développé pour des applications à débits variables sensibles aux délais. La partie à commutation de paquets est quant à elle gérée par

l'AAL5 conçu pour le transport de trames de données associées à des services orientés sans-connexion.

b. L'accès au canal radio

L'accès au canal radio est assuré par la technologie W-CDMA, il s'agit d'un système CDMA où la bande de fréquence disponible est utilisée pleinement par tous les utilisateurs en même temps (Fig. 1.9). Il est incompatible avec les méthodes d'accès utilisées dans le réseau GSM (FDMA/TDMA) et nécessite donc la mise en place de nouveaux équipements dans le sous-système radio du réseau.

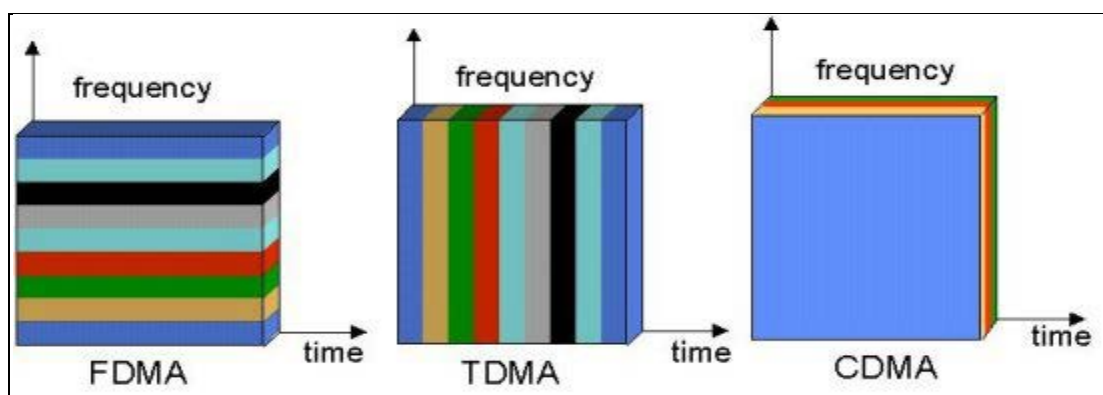


Figure. 1.9 Comparaison des technologies d'accès au canal radio

La bande de fréquence est divisé en différentes séquences de codes, les spreading codent (code d'étalement), qui sont attribués aux utilisateurs lors de leur connexion avec la station de base. Lors de l'émission, les données des utilisateurs sont multipliées avec leur code d'étalement et envoyés simultanément à la même fréquence sur le canal. A la réception par la BS, le signal d'un utilisateur est noyé sous le bruit interférant et ce n'est qu'en le multipliant à nouveau par son code d'étalement (despreading) que celui ci émergera du bruit (Fig. 1.10). Après dés étalement et intégration, la capacité du signal à s'élever au dessus du bruit est fonction du rapport signal-bruit et du facteur d'étalement du code utilisé, aussi appelé gain de traitement. Les codes de spreading doivent être orthogonaux entre eux pour agir indépendamment sur chaque signaux émanant d'un utilisateur distinct, ils sont donc disponibles en nombre limités dans une cellule. Comme nous venons de le voir, les spreading codes ont un impact sur le gain de traitement mais ils imposent également une limitation sur le débit d'émission. Il en résulte donc que le nombre d'utilisateur présent dans une cellule influe sur le SNR.

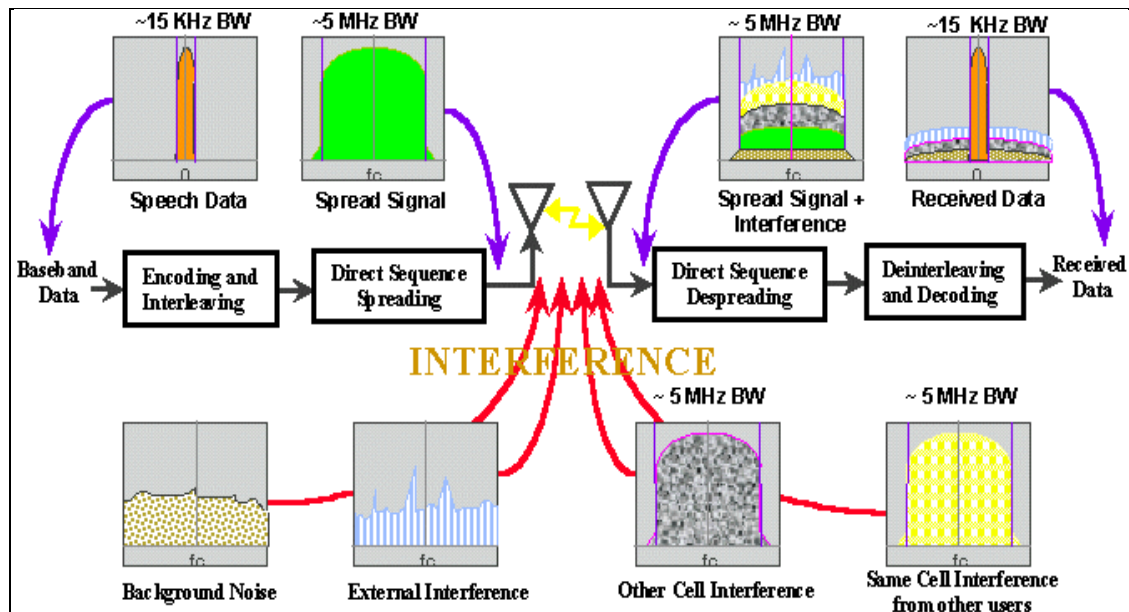


Figure. 1.10 Procédé d'étalement et de dés étalement du signal

Le débit de transmission et le gain de traitement. Le contrôle de puissance est donc un facteur clé dans le réseau UMTS pour limiter les interférences. Cependant, lorsque le bruit devient trop important, la station de base dispose d'un mécanisme de celle breathing lui permettant de réduire sa zone de couverture. Les nœuds les Plus distants qui sont la source des interférences les plus importantes seront alors éjectés de la cellule. Si ces nœuds sont µa porté d'une autre cellule, un transfert s'effectuera. Dans le cas contraire, ils basculeront sous la couverture du réseau GSM et ne bénéficieront plus des services offerts par l'UMTS.

Tous les abonnés émettant dans la même plage de fréquence, le motif de réutilisation cellulaire est réduit à un, ce qui facilite grandement la planification. Les différentes stations de bases sont alors distinguées par un deuxième code, le code de brouillage (scrambling). Comme toutes les stations communiquent à la même fréquence, le changement de cellule est opérable avant même d'avoir quitté la cellule en cours. C'est ce qu'on appelle le softer handover.

c. L'UMTS Terrestrial Radio Access Network

L'architecture du réseau UMTS est surtout marquée par des changements importants dans le sous-système d'accès radio, nommé UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network). L'UTRAN est constitué de Radio Network Controller (RNC) qui a pour rôles :

- Le contrôle des ressources radio
- Le contrôle d'admission
- L'allocation du canal
- Le paramétrage du contrôle de puissance
- Le contrôle du Hand

- Chiffrage
- La segmentation et le réassemblage
- Macro diversité Un RNC contrôle un ou plusieurs Node B qui a pour rôles :
 - Transmission et réception des données sur l'interface radio
 - Détection et correction d'erreurs (FEC : Forward Error Correction)
 - Adaptation du débit
 - W-CDMA spreading/dispreading
 - Codage du canal physique CDMA
 - Modulation et démodulation
 - Faire appliquer le contrôle de puissance
 - Envoyer les mesures au RNC pour le Handover et la macro diversité
 - S'occuper des Softer Handover afin de réduire le trafic entre le RNC et Node B et assurer la micro diversité.

1.4.1.5 Quatrième génération (4G)

En télécommunications, la 4G est la quatrième génération des standards pour la téléphonie mobile. Succédant à la 2G et la 3G, elle permet le «très haut débit mobile», c'est-à-dire des transmissions de données à des débits théoriques supérieures à 100 Mbit/s, voire supérieures à 1 Gbit/s (débit minimum défini par l'UIT pour les spécifications IMT Advanced(en)). En pratique, les débits sont de l'ordre de quelques dizaines de Mbit/s selon le nombre d'utilisateurs, puisque la bande passante est partagée entre les terminaux actifs des utilisateurs présents dans une même cellule radio. Une des particularités de la 4G est d'avoir un « cœur de réseaux » basé sur IP et de ne plus offrir de mode commuté (établissement d'un circuit pour transmettre un appel « voix », ce qui signifie que les communications téléphoniques utilisent la voix sur IP (en mode paquet). [7]

1.4.1.5.1 Le standard LTE

Le LTE (Long Term Evolution) est une évolution des normes de téléphonie mobile. Les réseaux LTE sont des réseaux cellulaires constitués de milliers de cellules radio qui utilisent la même fréquence hertziennes, y compris dans la cellule radio moyennes, grâce au codage radio OFDMA (de la base vers le terminal) et SC-FDMA (du terminal vers la base). Ceci permet d'affecter à chaque cellule une largeur spectrale plus importante qu'en 3G, variant de à 20 MHz et donc d'avoir une bande passante plus importante et plus de débit dans chaque cellule. [8]

1.4.1.5.2 Le standard LTE Advanced

Le LTE-Advanced est une norme de réseaux de téléphonie mobile de 4G définie par l'organisme de normalisation 3GPP qui fait partie (avec le Gigabit WiMAX) des technologies réseaux retenues par l'Union internationale des télécommunication(UIT) comme norme 4G. LTE signifie Long Term Evolution. Le LTE-Advanced sera capable de fournir des débit pics descendants supérieurs à 1 Gb/s à l'arrêt et à plus de 100 Mb/s pour un terminal en mouvement, grâce aux technologies réseaux intelligentes qui permettent de maintenir des débits plus élevés en tout point de la cellule radio, alors qu'ils baissent fortement en bordure des cellules UMTS et LTE.[9]

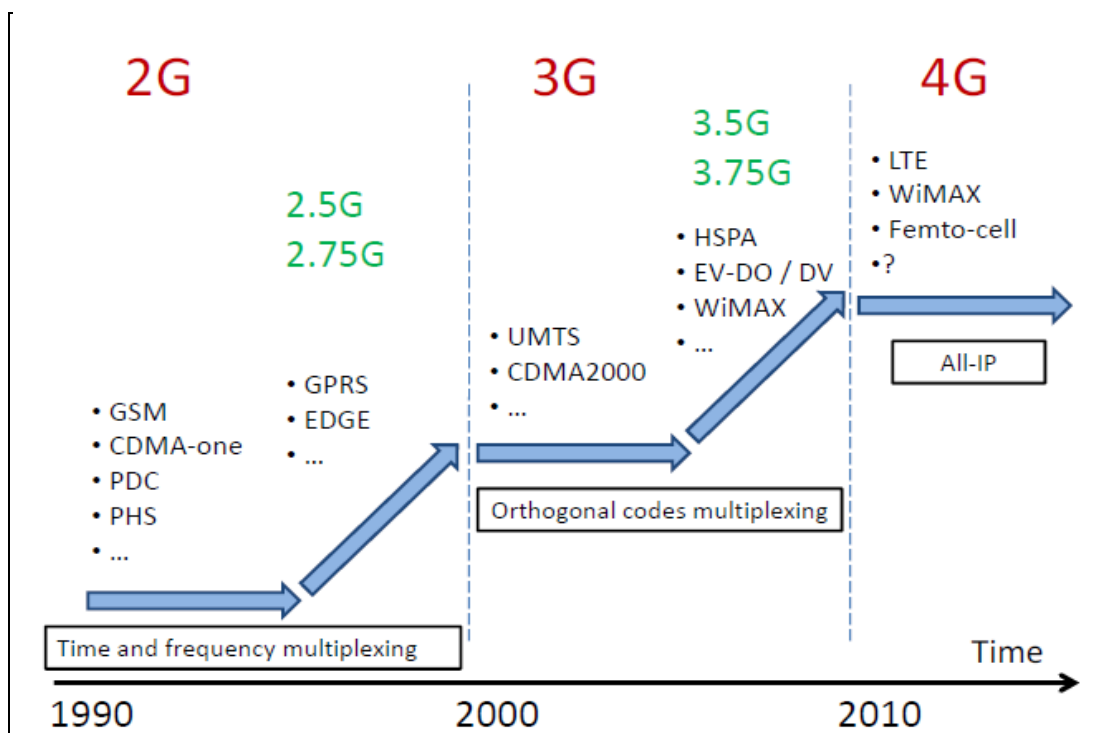


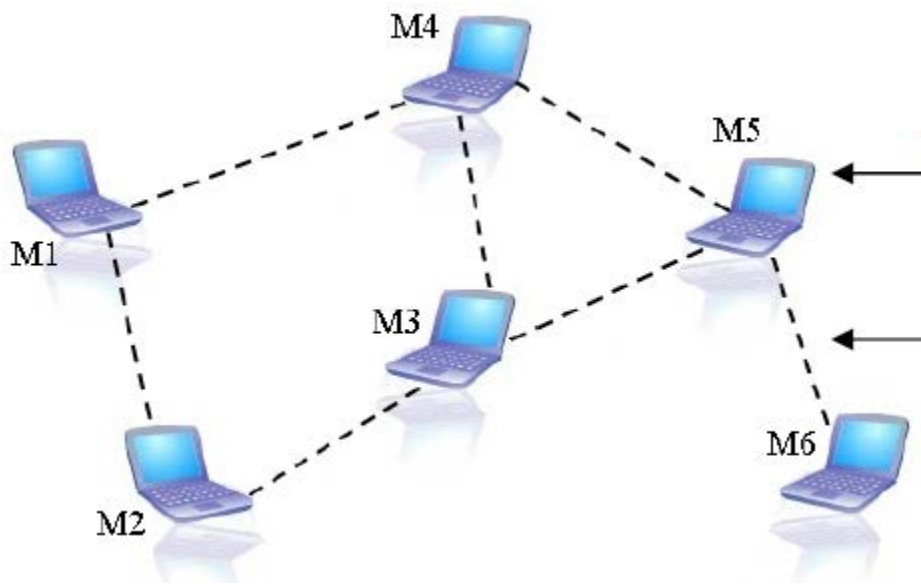
Figure.1.11 Evolution des réseaux sans fil.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par donner une définition du réseau GSM, ses composants ainsi que ses améliorations permettant le passage de la première génération du réseau sans fil analogique vers la deuxième génération, qui a été le début de la communication numérique, réunissant le réseau sans fil et le réseau terrestre. Ensuite, la génération 2.5 des réseaux sans fil connue sous le nom GPRS, a permis la transmission en paquets des données. Après, une 3G est née, comportant les réseaux connus sous le nom UMTS. L'UMTS, a fouillé la voie vers la conception d'un mobile de la quatrième génération (4G), permettant l'échange d'un taux d'informations énorme avec une très grande rapidité, surtout avec l'utilisation des protocoles IP (transmission en mode paquets), qui permet d'atteindre des débits allant jusqu'à les 2Gbps.

CHAPITRE 02

LE ROUTAGE DANS LES RÉSEAUX AD HOC



2.1. Introduction

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 surviabilité en cas de n'importe quelle panne d'arc ou de nœud.

Les réseaux mobiles peuvent être classés en deux grandes classes :

- Réseau sans fil avec infrastructure (comme le GSM).
- Réseau sans fil sans infrastructure (comme les réseaux ad hoc).

Cette deuxième classe de réseaux sans fil constitue la base de notre sujet d'étude, et c'est ce que l'on va développer dans ce présent chapitre. Dans le but de bien comprendre les stratégies et les approches utilisées dans la conception des protocoles permettant aux réseaux ad hoc de se relier à Internet, nous allons, tout d'abord, présenter le routage dans les réseaux ad hoc eux-mêmes. Après avoir décrit les réseaux ad hoc et leurs principales caractéristiques, nous présenterons les principes des protocoles de routages inter ad hoc les plus connus.

2.2. Les réseaux mobiles Ad hoc

2.2.1. Définition

Un réseau mobile Ad Hoc (figure 2.1), appelé généralement MANET (Mobile Ad hoc Network), consiste en une grande population, relativement dense, d'unités mobiles qui se déplacent dans un territoire quelconque. Le seul moyen de communication est l'utilisation « Des ondes radio » qui se propagent entre les différents nœuds mobiles, sans l'aide d'une infrastructure préexistante ou administration centralisée.

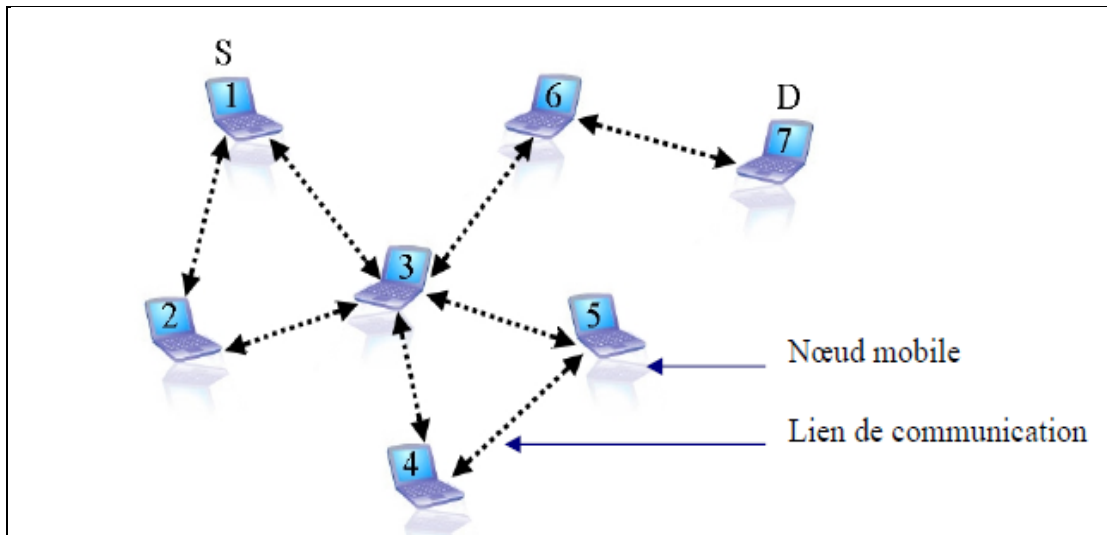


Figure 2.1 un réseau Ad Hoc.

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 (figure 2.2).

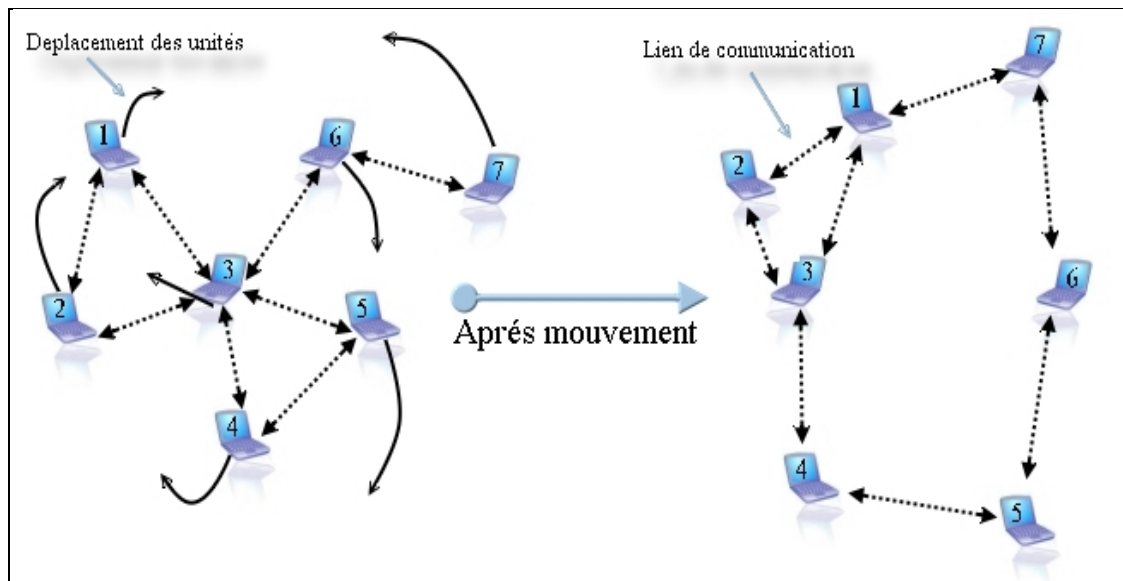


Figure 2.2 Le changement de la topologie des réseaux Ad Hoc

2.2.2. Applications pour les réseaux mobiles *ad hoc* discontinus

Les réseaux mobiles ad hoc tolérant les délais ne permettent pas de garantir l'existence de chemins de communication de bout en bout. La notion de trajet se substitue à celle de chemin. Le principal mécanisme mis en œuvre est de type store-and-forward 1, qui plutôt que de subir les

déconnexions, s'appuie sur la mobilité et la capacité de stockage des stations pour transmettre de l'information. Ainsi, les applications utilisables dans ces réseaux sont de type diffusion et partage de documents [10], mais également de type collecte d'informations dans les réseaux de capteurs qui peuvent présenter des délais de connexions importants [11].

2.2.3. Les caractéristiques des réseaux Ad Hoc

Les réseaux sans fil ad hoc se caractérisent principalement par :

- **Bande passante limitée** : Une des caractéristiques primordiales des réseaux basés sur la communication sans fil est l'utilisation d'un médium de communication partagé (ondes radio). Ce partage fait que la bande passante réservée à un hôte soit modeste.
- **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.
- **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.
- **Erreur de transmission** : Les erreurs de transmission radio sont plus fréquentes que dans les réseaux filaires.
- **Interférences** : Les liens radios ne sont pas isolés, deux transmissions simultanées sur une même fréquence ou, utilisant des fréquences proches peuvent interférer [12].
- **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.
- **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.
- **Nœuds cachés** : Ce phénomène est très particulier à l'environnement sans fil. Un exemple est illustré par la figure 2.3. Dans cet exemple, les nœuds B et C ne s'entendent pas, à cause d'un obstacle qui empêche la propagation des ondes. Les mécanismes d'accès au canal vont permettre alors à ces nœuds de commencer leurs émissions simultanément. Ce qui provoque des collisions au niveau du nœud A [12].

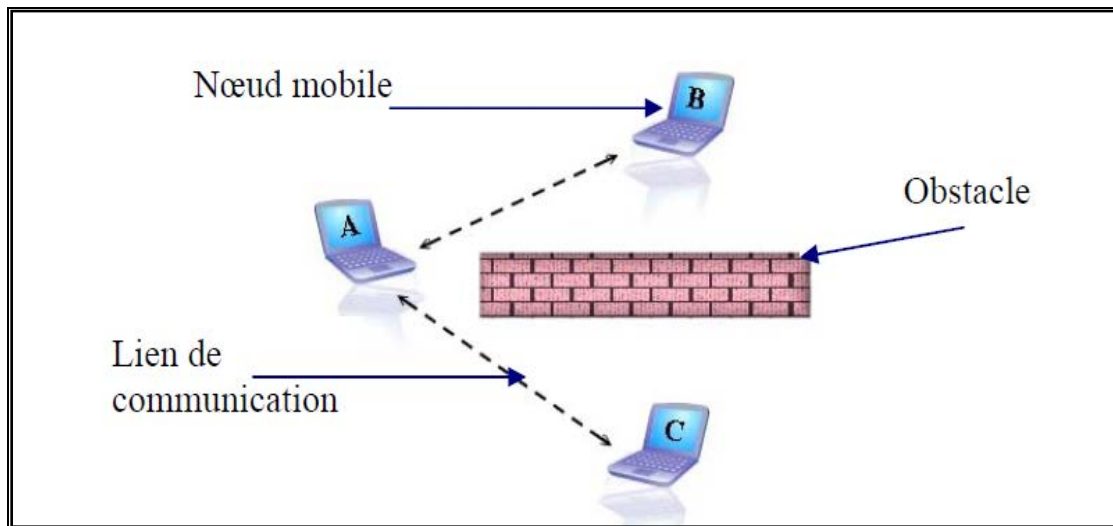


Figure 2.3 Les nœuds cachés

2.3. Le routage dans les réseaux ad hoc

Pour mieux comprendre les stratégies et les approches utilisées dans la conception des protocoles permettant aux réseaux ad hoc de se relier à Internet, nous allons, tout d'abord, parler du routage à l'intérieur des réseaux ad hoc. Dans ce qui suit nous allons présenter les principes des protocoles de routages inter ad hoc les plus connus.

2.3.1. Définition du routage

Le routage est une méthode d'acheminement des informations vers la bonne destination à travers un réseau de connexion donnée, il consiste à assurer une stratégie qui garantit, à n'importe quel moment, un établissement de routes qui soient correctes et efficaces entre n'importe quelle paire de nœud appartenant au réseau, ce qui assure l'échange des messages d'une manière continue. Vu les limitations des réseaux ad hoc, la construction des routes doit être faite avec un minimum de contrôle et de consommation de la bande !passante [13].

2.3.2. Aperçu sur les protocoles du réseau

Un protocole est une méthode standard qui permet la communication entre des processus (s'exécutant éventuellement sur différentes machines), c'est-à-dire un ensemble de règles et de procédures à respecter pour émettre et recevoir des données sur un réseau. Il en existe plusieurs selon ce que l'on attend de la communication. Certains protocoles seront par exemple spécialisés dans l'échange de fichiers (le FTP), d'autres pourront servir à gérer simplement l'état de la transmission et des erreurs (c'est le cas du protocole ICMP), ...

2.3.3. 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 [14].

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, 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 une 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.

2.3.4. 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 multipoints 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.

2.3.5. 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, permet de faire 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 :

- le contrôle utilisé dans le mécanisme de mise à jour de routage
- les délais moyens du transfert des paquets
- le nombre moyen de nœuds traversés par les paquets de données.

2.3.6. Protocoles uniformes et non-uniformes

Certains protocoles de routage n'utilisent pas tous les nœuds d'un réseau pour faire transiter les messages, au contraire ils en sélectionnent certains, en fonction du voisinage ou pour former des cellules. Ces protocoles sont dits non-uniformes. Ceux qui utilisent tous les nœuds du réseau capables de router sont appelés protocoles uniformes.

2.3.7. La classification de MANET

C'est la classification qui nous intéresse et qu'on maintient pour la suite de ce chapitre. Suivant la manière de création et de maintenance de routes lors de l'acheminement des données, les protocoles de routage peuvent être séparés en : **Proactif**, **Réactif** et **Hybride**.

2.3.7.1 Les protocoles de routage proactifs

Un protocole de routage est dit proactif si les procédures de création et de maintenance des routes, durant la transmission des paquets de données, sont contrôlées périodiquement. Cette maintenance reste toujours active même s'il n'y a pas de trafic circulant dans le réseau. Deux principales méthodes sont utilisées dans cette classe de protocoles proactifs :

La méthode *Link state* et la méthode *Distance Vector*. Ces méthodes sont utilisées aussi dans les réseaux filaires. Parmi les protocoles de routages proactifs les plus connus on citera le DSDV, FSR, OLSR ...

a- Link Stat

Dans cette méthode, chaque nœud garde une vision de toute la topologie du réseau et ce par l'intermédiaire des requêtes périodiques portant sur l'état des liaisons avec les nœuds voisins. En effet la mise à jour dans cette méthode se fait pour chaque nœud diffusant l'état des liens des nœuds voisins dans le réseau. Cette opération est aussi faite en cas de changement dans l'état des liens.

b- Distance Victor

Dans cette méthode par contre, chaque nœud diffuse à ses nœuds voisins sa vision des distances qui le séparent de tous les hôtes du réseau. En se basant sur les informations reçues par tous ses voisins, chaque nœud de routage fait un certain calcul pour trouver le chemin le plus court vers n'importe quelle destination. Le processus de calcul se répète, s'il y a un changement de la distance minimale séparant deux nœuds, et cela jusqu'à ce que le réseau atteigne un état stable. Cette technique est basée sur l'algorithme distribué de Bellman Ford (*DBF*).

2.3.7.2. Les protocoles de routage réactifs (à la demande)

Ce sont des protocoles dans lesquels la mise à jour ou le contrôle des routes se fait à la demande, c'est-à-dire lorsqu'une source veut transmettre des paquets de données vers une destination. Dans ce cadre plusieurs politiques peuvent être adoptées, les plus importantes sont :

a. La Technique d'apprentissage en arrière

Le mécanisme d'apprentissage en arrière ou le backward Learning [15] est basé sur le fait que lorsqu'un nœud source veut transmettre un message à une destination précise, il procède tout d'abord à l'opération d'inondation de sa requête sur tout le réseau. Ainsi chaque nœud intermédiaire dit de transit (appartenant au chemin par lequel va passer le message), indique le chemin au nœud source lors de la réception de la requête. On dit qu'il apprend le chemin au nœud source, tout en sauvegardant la route dans la table transmise. Enfin, lorsque la requête arrive à bon port, le nœud destinataire, et suivant le même chemin, transmet sa réponse sous forme de requête. Notons que le chemin établi entre les nœuds est un chemin Full duplex. Signalant aussi que la source garde trace du chemin tant qu'il restera en cours d'utilisation une fois que le chemin sera calculé.

b. Technique du routage source

Dans cette technique, le nœud source détermine toute la liste des nœuds par lesquels doit transiter le message, ainsi le nœud émetteur inclut dans l'entête du paquet une route source. En effet, afin de construire la route, le nœud source doit préciser les adresses exactes des nœuds par lesquels le message transitera jusqu'à atteindre le destinataire. Ainsi, le nœud source transmet le paquet au premier nœud spécifié dans la route. Notons que chaque nœud par lequel le paquet transit, supprime son adresse de l'entête du paquet avant de le retransmettre. Une fois que le paquet arrive à sa destination, il sera délivré à la couche réseau du dernier hôte. Plusieurs protocoles de routage réactifs existent dont l'AODV, TORA, DSR...etc.

2.3.7.3. Les protocoles de routages Hybrides

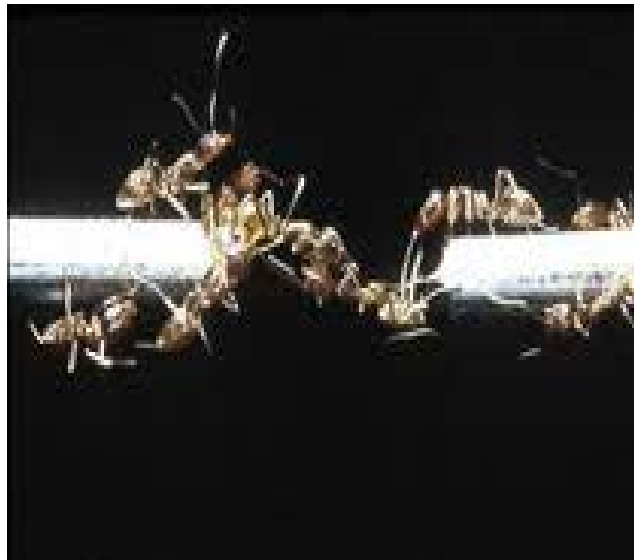
Les protocoles hybrides combinent les deux idées : celle des protocoles proactifs et celle des protocoles réactifs. Ils utilisent un protocole proactif pour avoir des informations sur les voisins les plus proches (au maximum les voisins à deux sauts). Au-delà de cette zone prédéfinie, le protocole hybride fait appel aux techniques des protocoles réactifs pour chercher des routes.

Ce type de protocoles s'adapte bien aux grands réseaux, cependant, il cumule aussi les inconvénients des protocoles réactifs et proactifs en même temps (messages de contrôle périodique, le coût d'ouverture d'une nouvelle route). Plusieurs protocoles hybrides existent dont le CBRP et le ZRP (Zone Routing Protocol) [16].

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. En fin Présenter les trois classes de protocoles de routages: Proactifs, Réactifs et hybrides,

CHAPITRE 03
OPTIMISATION PAR COLONIES
DE FOURMIS



3.1. Introduction

L'optimisation est un sujet central en recherche opérationnelle, un grand nombre de problèmes d'aide à la décision pouvant en effet être décrits sous la forme de problèmes d'optimisation. Les problèmes d'identification, l'apprentissage supervisé de réseaux de neurones ou encore la recherche du plus court chemin est, par exemple, des problèmes d'optimisation.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude des capacités du méta heuristique d'optimisation par colonie de fourmis ('Ant Colony Optimization' - ACO) [16]. Les Algorithmes à base de colonies de fourmis ont été initialement [17]. Depuis son apparition, l'ACO requiert de plus en plus l'attention de la communauté scientifique vu le succès qu'elle a réalisé. Elle a été appliquée à plusieurs problèmes combinatoires comme le problème du voyageur De commerce, affectation quadratique [18], routage de véhicules, sac à dos multidimensionnel [19].

3.2. L'origine de la méthode

Les fourmis ont la particularité d'employer pour communiquer des substances volatiles appelées phéromones. Elles sont très sensibles à ces substances, qu'elles perçoivent grâce à des récepteurs situés dans leurs antennes. Ces substances sont nombreuses et varient selon les espèces. Les fourmis peuvent déposer des phéromones au sol, grâce à une glande située dans leur abdomen, et former ainsi des pistes odorantes, qui pourront être suivies par leurs congénères. Les fourmis utilisent les pistes de phéromones pour marquer leur trajet, par exemple entre le nid et une source de nourriture. Une colonie est ainsi capable de choisir (sous certaines conditions) le plus court chemin vers une source à exploiter, sans que les individus aient une vision globale du trajet.

3.3. Description et algorithme

Pour bien comprendre comment fonctionne l'optimisation par colonie de fourmis, on va retourner vers le premier algorithme proposé, c'est l'algorithme « Ant System » proposé par Colomi et autres en 1992 ; au début chaque fourmi est mise aléatoirement sur une ville et elle a une mémoire qui stocke la solution partielle qu'elle a construit jusqu'ici (au commencement la mémoire contient seulement la ville du début). À partir de sa ville de début, une fourmi se déplace itérativement d'une ville vers une autre mais avec une règle de probabilité.

3.4. Les éléments d'optimisation

L'optimisation est une des mathématiques consacré à l'étude du (ou des) minimum(s)/maximum(s) d'une fonction à une ou plusieurs variables sur un certain domaine de définition, de l'étude de leur existence à leur détermination, en général par la mise en œuvre d'un algorithme et par suite un programme. Pour mener à bien une opération, plusieurs éléments sont indispensables et conditionnent la solution trouvée. La figure suivante présente les quatre éléments essentiels à la résolution d'un problème d'optimisation.

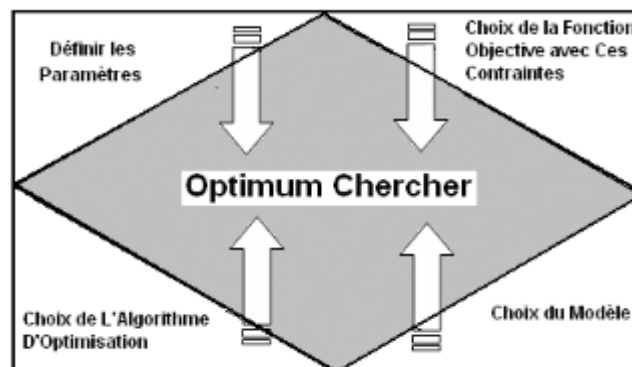


Figure. 3.1 Eléments indispensable d'optimisation

En général, un grand nombre de paramètres sont indispensables, il faut être capable de définir les paramètres utiles à l'optimisation. Certains paramètres ont une influence sur la fonction choisie, d'autres pas. Etant donné le coût des simulations, seul les paramètres influents sont à retenir :

- **Une fonction objective** : définit l'objectif à atteindre. La définition de cette fonction est en fait un problème délicat. Car le problème est formulé en un problème d'optimisation par l'intermédiaire de la fonction objective. C'est elle qui est au centre de l'optimisation, c'est donc elle que dépend la pertinence de la solution.

- **Un modèle** : précis, robuste et malléable du système étudié est indispensable. Ce modèle doit être utilisable sur un domaine d'étude le plus large possible.

- **Un algorithme d'optimisation** : permet de trouver la solution. Différentes méthodes d'optimisation existent et en sont présentées.

3.5. Généralités sur les algorithmes d'optimisation

La résolution d'un problème d'optimisation s'appuie généralement sur un algorithme d'optimisation. L'algorithme d'optimisation cherche le jeu de paramètres de l'objet à optimiser donnant à une fonction relative au problème, la valeur maximale ou minimale. L'algorithme d'optimisation doit permettre de converger vers l'objet optimal en minimisant ou maximisant cette

fonction par rapport aux paramètres variables. Généralement, pour toute méthode d'optimisation, l'ingénieur définit les variables du problème, l'espace de recherche et la fonction d'adaptation relative au problème.

3.6. Algorithmes d'optimisation approchée

3.6.1. Heuristiques

Une heuristique d'optimisation est une méthode approchée se voulant simple, rapide et adaptée à un problème donné. Sa capacité à optimiser un problème avec un minimum d'informations est contrebalancée par le fait qu'elle n'offre aucune garantie quant à l'optimalité de la meilleure solution trouvée.

Du point de vue de la recherche opérationnelle, ce défaut n'est pas toujours un problème, Tout spécialement quand seule une approximation de la solution optimale est recherchée.

3.6.2. Méta heuristiques

Parmi les heuristiques, certaines sont adaptables à un grand nombre de problèmes différents sans changements majeurs dans l'algorithme, on parle alors de méta-heuristiques. La plupart des heuristiques et de méta heuristiques utilisent des processus aléatoires comme moyens de récolter de l'information et de faire face à des problèmes comme l'explosion combinatoire. En plus de cette base stochastique, le méta heuristiques sont généralement itératives, c'est-à-dire qu'un même schéma de recherche est appliqué plusieurs fois au cours de l'optimisation, et directes, c'est-à-dire qu'elles n'utilisent pas l'information du gradient de la fonction objectif. Elles tirent en particulier leur intérêt de leur capacité à éviter les optima locaux, soit en acceptant une dégradation de la fonction objectif au cours de leur progression, soit en utilisant une population de points comme méthode de recherche (se démarquant ainsi des heuristiques de descente locale). Souvent inspirées d'analogies avec la réalité (physique, biologie, éthologie, . . .), elles sont généralement conçues au départ pour des problèmes discrets, mais peuvent faire l'objet d'adaptations pour des problèmes continus. Le méta heuristique, du fait de leur capacité à être utilisées sur un grand nombre de problèmes différents, se prêtent facilement à des extensions. Pour illustrer cette caractéristique, citons notamment :

- L'optimisation multi objectif (dites aussi multicritère) [20], ou il faut optimiser plusieurs objectifs contradictoires. La recherche vise alors non pas à trouver un optimum global, mais un ensemble d'optima "au sens de Pareto" formant la "surface de compromis" du problème.

- L'optimisation multimodale, ou l'on cherche un ensemble des meilleurs optima globaux et/ou locaux.

- L'optimisation de problèmes bruités, ou il existe une incertitude sur le calcul de la fonction objectif. Incertitude dont il faut alors tenir compte dans la recherche de l'optimum.
- L'optimisation dynamique, ou la fonction objective varie dans le temps. Il faut alors approcher au mieux l'optimum à chaque pas de temps
- La parallélisations, ou l'on cherche à accélérer la vitesse de l'optimisation en répartissant la charge de calcul sur des unités fonctionnant de concert. Le problème revient alors à adapter le méta heuristique pour qu'elle soit distribuée.
- L'hybridation, qui vise à tirer parti des avantages respectifs de méta heuristiques différentes en les combinant.

Enfin, la grande vitalité de ce domaine de recherche ne doit pas faire oublier qu'un des intérêts majeurs de méta heuristiques est leur facilité d'utilisation dans des problèmes Concrets. L'utilisateur est généralement demandeur de méthodes efficaces permettant d'atteindre un optimum avec une précision acceptable dans un temps raisonnable. Un des enjeux de la conception de méta heuristiques est donc de faciliter le choix d'une méthode et de simplifier son réglage pour l'adapter à un problème donné.

3.7. Applications

Les méta-heuristiques sont souvent employées pour leur facilité de programmation et de manipulation. Elles sont en effet facilement adaptables à tout type de problème d'optimisation. Toutefois, elles sont le plus judicieusement employées sur des problèmes d'optimisation difficile, où des méthodes d'optimisation plus classiques (méthodes déterministes, notamment) montrent leurs limites.

3.8. Les fourmis

3.8.1. Pourquoi les fourmis ?

Nous présenterons dans notre travail d'étude des nouvelles méta-heuristiques permettant de résoudre des problèmes tels que le voyageur de commerce, en s'inspirant du comportement social des fourmis. Le comportement des fourmis est un comportement collectif. Chaque fourmi a pour priorité le bien être de la communauté. Chaque individu de la colonie est a priori indépendant et n'est pas supervisé d'une manière ou d'une autre. Ce concept est appelé Hétéarchie (s'opposant à la Hiérarchie) chaque individu est aidé par la communauté dans son évolution et en retour il aide au bon fonctionnement de celle-ci. La colonie est donc autocontrôlée par le biais de mécanismes relativement simples à étudier.

3.8.2 Relation avec l'informatique

En observant une colonie de fourmis à la recherche de nourriture dans les environs du nid, on s'aperçoit qu'elle résout des problèmes tels que celui de la recherche du plus court chemin. Les fourmis résolvent des problèmes complexes par des mécanismes assez simples à modéliser. Il est ainsi assez simple de simuler leur comportement par des algorithmes.

3.9. Algorithmes de colonies de fourmis en optimisation

Le premier algorithme de ce type (le "Ant System"¹) a été conçu pour le problème du voyageur de commerce, mais n'a pas permis de produire des résultats compétitifs. Cependant, l'intérêt pour la métaphore était lancé et de nombreux algorithmes s'en inspirant ont depuis été proposés — dans divers domaines —, certains atteignant des résultats très convaincants.

3.9.1. Optimisation naturelle : pistes de phéromone

Les algorithmes de colonies de fourmis sont nés à la suite d'une constatation : les insectes sociaux en général, et les fourmis en particulier, résolvent naturellement des problèmes relativement complexes. Les biologistes ont étudié comment les fourmis arrivent à résoudre collectivement des problèmes trop complexes pour un seul individu, notamment les problèmes de choix lors de l'exploitation de sources de nourriture.



Figure. 3.2 Des fourmis suivant une piste de phéromone (photographie d'E. D. Taillard, tirée de [21]).

Les fourmis ont la particularité d'employer pour communiquer des substances volatiles appelées phéromones. Elles sont attirées par ces substances, qu'elles perçoivent grâce à des

récepteurs situés dans leurs antennes. Ces substances sont nombreuses et varient selon les espèces. Les fourmis peuvent déposer des phéromones au sol, grâce à une glande située dans leur abdomen, et former ainsi des pistes odorantes, qui pourront être suivies par leurs congénères (figure 3.2).

Les fourmis utilisent les pistes de phéromone pour marquer leur trajet, par exemple entre le nid et une source de nourriture. Une colonie est ainsi capable de choisir (sous certaines conditions) le plus court chemin vers une source à exploiter [22], sans que les individus aient une vision globale du trajet. En effet, comme l'illustre la figure 3.2, les fourmis le plus rapidement arrivées au nid, après avoir visité la source de nourriture, sont celles qui empruntent les deux branches les plus courtes. Ainsi, la quantité de phéromone présente sur le plus court trajet est légèrement plus importante que celle présente sur le chemin le plus long. Or, une piste présentant une plus grande concentration en phéromone est plus attirante pour les fourmis, elle a une probabilité plus grande d'être empruntée. La piste courte va alors être plus renforcée que la longue, et, à terme, sera choisie par la grande majorité des fourmis. On constate qu'ici le choix s'opère par un mécanisme d'amplification d'une actuation initiale. Cependant, il est possible qu'en cas d'une plus grande quantité de phéromone déposée sur les grandes branches, au début de l'expérience, la colonie choisisse le plus long parcours.

D'autres expériences [23], avec une autre espèce de fourmis, ont montré que si les fourmis sont capables d'effectuer des demi-tours sur la base d'un trop grand Écart par rapport à la direction

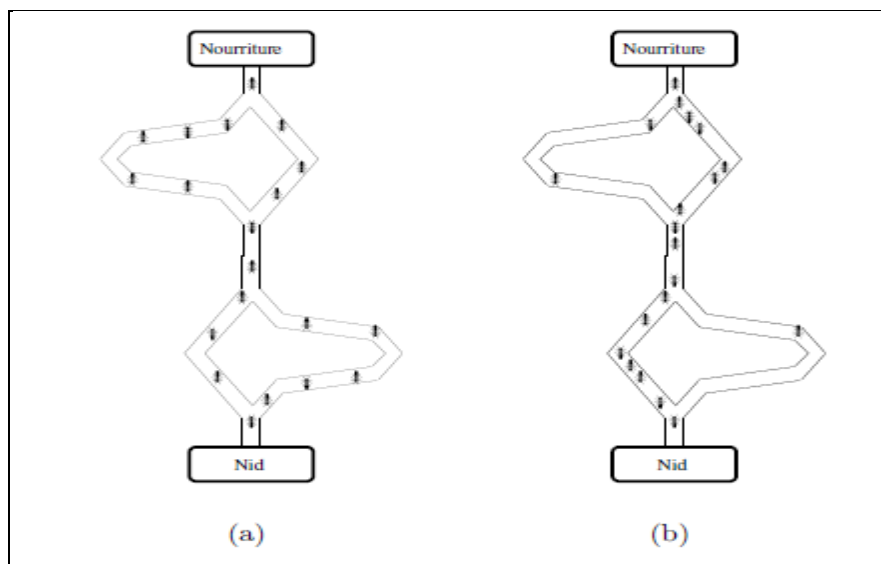


Figure. 3.3 Expérience de sélection des branches les plus courtes par Une colonie de fourmis

(a) au début de l'expérience, (b) à la fin L'expérience.

de la source de nourriture, alors la colonie est plus flexible et le risque d'être piégé sur le chemin long est plus faible. Il est difficile de connaître avec précision les propriétés physico-chimiques des pistes de phéromone, qui varie en fonction des espèces et d'un grand nombre de paramètres. Cependant, les métas heuristiques d'optimisation de colonies de fourmis s'appuient en grande partie sur le phénomène d'évaporation des pistes de phéromone. Or, on constate dans la nature que les pistes s'évaporent plus lentement que ne le prévoient les modèles. Les fourmis réelles disposent en effet "d'heuristiques" leur apportant un peu plus d'informations sur le problème (par exemple une information sur la direction). Il faut garder à l'esprit que l'intérêt immédiat de la colonie (trouver le plus court chemin vers une source de nourriture) peut être en concurrence avec l'intérêt adaptatif de tels comportements. Si l'on prend en compte l'ensemble des contraintes que subissent une colonie de fourmis (prédation, compétition avec d'autres colonies, etc.), un choix rapide et stable peut être meilleur, et un changement de site exploité peut entraîner des coûts trop forts pour permettre la sélection naturelle d'une telle option.

3.9.2. Optimisation par colonies de fourmis et problème du voyageur de commerce

Le problème du voyageur de commerce ("Travelling Salesman Problem", TSP) a fait l'objet de la première implémentation d'un algorithme de colonies de fourmis : le "Ant system" (AS) [24]. Le passage de la métaphore à l'algorithme est ici relativement facile et le problème du voyageur de commerce est bien connu et étudié. Il est intéressant d'approfondir le principe de ce premier algorithme pour bien comprendre le mode de fonctionnement des algorithmes de colonies de fourmis. Il y a deux façons d'aborder ces algorithmes. La première, la plus évidente au premier abord, est celle qui a historiquement mené au "Ant System" original ; nous avons choisi de la décrire dans cette section. La seconde est une description plus formelle des mécanismes communs aux algorithmes de colonies de fourmis.

Le problème du voyageur de commerce consiste à trouver le trajet le plus court (désigné par "tournée" ou plus loin par "tour") reliant n villes données, chaque ville ne devant être visitée qu'une seule fois. Le problème est plus généralement défini comme un graphe complètement connecté $(N;A)$, où les villes sont les nœuds N et les trajets entre ces villes, les arêtes A .

3.9.2.1. Algorithme de base

Dans l'algorithme AS, à chaque itération t ($1 \leq t \leq t_{\max}$), chaque fourmi k ($k = 1, \dots, m$) parcourt le graphe et construit un trajet complet de $n = |N|$ étapes (on note $|N|$ le cardinal de l'ensemble N). Pour chaque fourmi, le trajet entre une ville i et une ville j dépend de :

1. la liste des villes déjà visitées, qui définit les mouvements possibles à chaque pas, quand la fourmi k est sur la ville i : J_k^i

2. l'inverse de la distance entre les villes : $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$ appelée visibilité. Cette information "Statique" est utilisée pour diriger le choix des fourmis vers des villes proches, et éviter les villes trop lointaines ;

3. la quantité de phéromone déposée sur l'arête reliant les deux villes, appelée l'intensité de la piste. Ce paramètre définit l'attractivité d'une partie du trajet global et change à chaque passage d'une fourmi. C'est, en quelque sorte, une mémoire globale du système, qui évolue par apprentissage.

La règle de déplacement (appelée "règle aléatoire de transition proportionnelle" par les auteurs [25]) est la suivante :

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha \cdot (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} (\tau_{il}(t))^\alpha \cdot (\eta_{il})^\beta} & \text{si } j \in J_i^k \\ 0 & \text{si } j \notin J_i^k \end{cases} \quad (1.1)$$

Où β et α sont deux paramètres contrôlant l'importance relative de l'intensité de la piste, $N_{ij}(t)$, et de la visibilité, η_{ij} . Avec $\alpha = 0$, seule la visibilité de la ville est prise en compte ; la ville la plus proche est donc choisie à chaque pas. Au contraire, avec $\beta = 0$, seules les pistes de phéromone jouent. Pour éviter une sélection trop rapide d'un trajet, un compromis entre ces deux paramètres, jouant sur les comportements de diversification et d'intensification (voir section 1.3.4.3 de ce chapitre), est nécessaire.

Après un tour complet, chaque fourmi laisse une certaine quantité de phéromone $\Delta \tau_{ij}^k(t)$ Sur l'ensemble de son parcours, quantité qui dépend de la qualité de la solution trouvée :

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)} & \text{si } (i, j) \in T^k(t) \\ 0 & \text{si } (i, j) \notin T^k(t) \end{cases} \quad (1.2)$$

Où $T^k(t)$ est le trajet effectué par la fourmi k à l'itération t , $L^k(t)$ la longueur de la tournée et Q un paramètre fixé. L'algorithme ne serait pas complet sans le processus d'évaporation des pistes de phéromone. En effet, pour éviter d'être piégé dans des solutions sous-optimales, il est nécessaire de

permettre au système “d'oublier” les mauvaises solutions. On contrebalance donc l'additivité des pistes par une décroissance constante des valeurs des arêtes à chaque itération. La règle de mise à jour des pistes est donc :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (1.3)$$

Où m est le nombre de fourmis et ρ le taux d'évaporation. La quantité initiale de phéromone sur les arêtes est une distribution uniforme d'une petite quantité $\tau_0 \geq 0$.

3.9.2.2. Variantes

Ant System & élitisme Une première variante du “Système de Fourmis” [26] : elle est caractérisée par l'introduction de fourmis “élitistes”. Dans cette version, la meilleure fourmi (celle qui a effectué le trajet le plus court) dépose une quantité de phéromone plus grande, dans l'optique d'accroître la probabilité des autres fourmis d'explorer la solution la plus prometteuse.

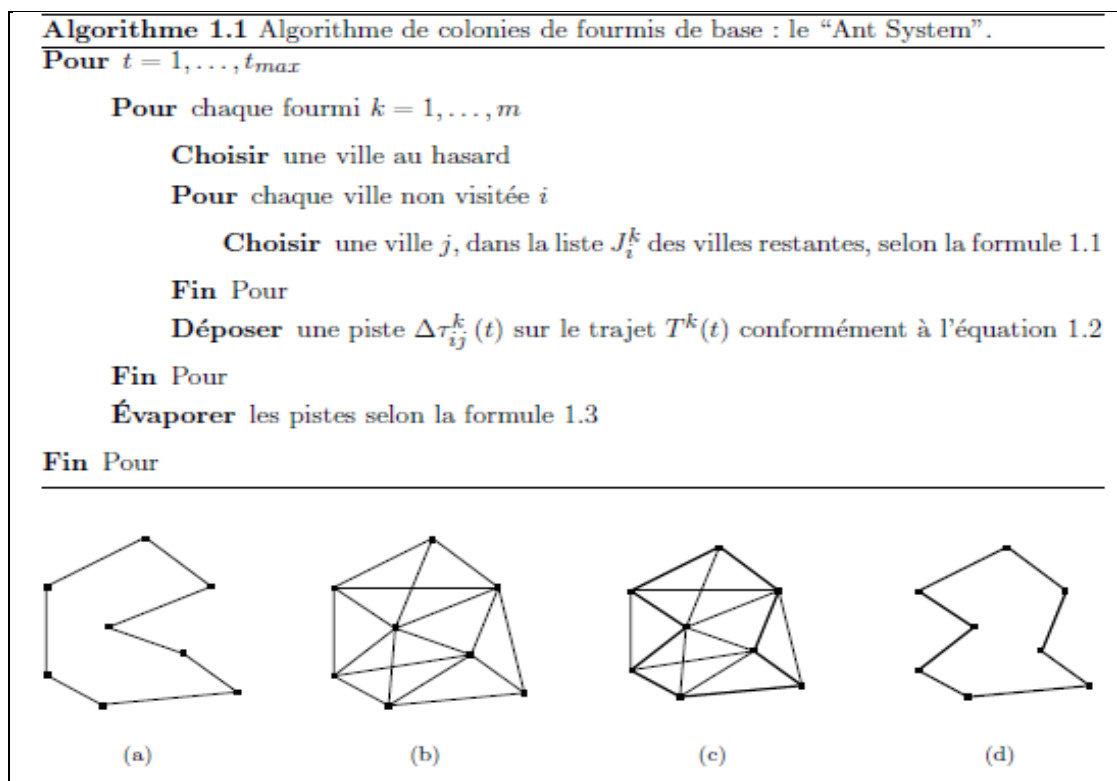


Figure.3.4. Le problème du voyageur de commerce optimisé par l'algorithme AS

les points représentent les villes et l'épaisseur des arêtes la quantité de phéromone déposée. (a) exemple de trajet construit par une fourmi, (b) au début du calcul, tous les chemins sont explorés,

(c) le chemin le plus court est plus renforcé que les autres, (d) l'évaporation permet d'éliminer les moins bonnes solutions.

Ant-Q Dans cette variante de AS, la règle de mise à jour locale est inspirée du "Qlearning2". Cependant, aucune amélioration par rapport à l'algorithme AS n'a pu être démontrée. Cet algorithme n'est d'ailleurs, de l'aveu même des auteurs, qu'une préversion du "Ant Colony System".

Ant Colony System L'algorithme "Ant Colony System" (ACS) a été introduit pour améliorer les performances du premier algorithme sur des problèmes de grandes tailles [27,28]. ACS est fondé sur des modifications de l'AS :

ACS introduit une règle de transition dépendant d'un paramètre q_0 ($0 \leq q_0 \leq 1$), qui définit une balance diversification/intensification. Une fourmi k sur une ville i choisira une ville j par la règle :

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{u \in J_i^k} [(\tau_{iu}(t)) \cdot (\eta_{iJ})^\beta] & \text{si } q \leq q_0 \\ J & \text{si } q > q_0 \end{cases}$$

Où q est une variable aléatoire uniformément distribuée sur $[0; 1]$ et $J \in J_i^k$ une ville sélectionnée aléatoirement selon la probabilité :

$$p_{iJ}^k(t) = \frac{(\tau_{iJ}(t)) \cdot (\eta_{iJ})^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} (\tau_{il}(t)) \cdot (\eta_{il})^\beta} \quad (1.4)$$

En fonction du paramètre q_0 , il y a donc deux comportements possibles : si $q > q_0$ le choix se fait de la même façon que pour l'algorithme AS, et le système tend à effectuer une diversification ; si $q \leq q_0$, le système tend au contraire vers une intensification. En effet, pour $q \leq q_0$, l'algorithme exploite davantage l'information récoltée par le système, il ne peut pas choisir un trajet non exploré. La gestion des pistes est séparée en deux niveaux : une mise à jour locale et une mise à jour globale. Chaque fourmi dépose une piste lors de la mise à jour locale :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \tau_0$$

Où τ_0 est la valeur initiale de la piste. À chaque passage, les arêtes visitées voient leur quantité de phéromone diminuée, ce qui favorise la diversification par la prise en compte des trajets non explorés. À chaque itération, la mise à jour globale s'effectue comme ceci :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}(t)$$

Où les arêtes (i; j) appartiennent au meilleur tour T^+ de longueur L^+ et où $\Delta\tau_{ij}(t) = \frac{1}{L^+}$. Ici, seule la meilleure piste est donc mise à jour, ce qui participe à une intensification par sélection de la meilleure solution. Le système utilise une liste de candidats. Cette liste stocke pour chaque ville les v plus proches voisins, classés par distances croissantes. Une fourmi ne prendra en compte une arête vers une ville en dehors de la liste que si celle-ci a déjà été explorée. Concrètement, si toutes les arêtes ont déjà été visitées dans la liste de candidats le choix se fera en fonction de la règle 1.4, sinon c'est la plus proche de villes non visitées qui sera choisie.

ACS & 3-opt Cette variante est une hybridation entre l'ACS et une recherche locale de type 3-opt [27]. Ici, la recherche locale est lancée pour améliorer les solutions trouvées par les fourmis (et donc les ramener à l'optimum local le plus proche).

Max-Min Ant System Cette variante (notée MMAS) est fondée sur l'algorithme AS et présente quelques différences notables [28] :

1. Seule la meilleure fourmi met à jour une piste de phéromone.
2. Les valeurs des pistes sont bornées par τ_{\min} et τ_{\max} .
3. Les pistes sont initialisées à la valeur maximum τ_{\max} .
4. La mise à jour des pistes se fait de façon proportionnelle, les pistes les plus fortes étant moins renforcées que les plus faibles.
5. Une réinitialisation des pistes peut être effectuée.

Les meilleurs résultats sont obtenus en mettant à jour la meilleure solution avec une fréquence de plus en plus forte au cours de l'exécution de l'algorithme.

3.10. Les problèmes d'optimisation

À la résolution des problèmes d'optimisation est utilisée dans un grand nombre de domaines à l'origine, ce sont les militaires qui se sont intéressés à ces questions au cours de la seconde guerre mondiale. C'était en fait un nouveau domaine de recherche en mathématiques appliquées qui a vu le jour avec la recherche opérationnelle. Le développement de l'informatique a ouvert de nouveaux

horizons à la résolution de ces problèmes, et a permis un élargissement massif des champs d'application de ces techniques.

La résolution d'un problème d'optimisation et un problème complexe, car de nombreux facteurs interviennent et interagissent entre eux. Néanmoins, l'optimisation appliquée au domaine d'électrotechnique permet de résoudre des problèmes qui étaient insolubles auparavant et aboutit souvent à des solutions originales.

Quel service pour quel réseau ?

Les contraintes de routage ci-dessus dépendent à la fois de la mobilité des réseaux et du type d'information que l'on cherche à router. En effet certains réseaux sont plus mobiles que d'autres et on sait que les déconnexions coûtent très cher. La nature des informations dépend des applications que l'on cherche à exécuter. Celles-ci sont plus ou moins sensibles à la latence dans les communications.

3.11. Streaming audio ou vidéo

Le type de service le plus difficile à prendre en charge est celui des applications de streaming audio ou vidéo qui consistent à envoyer un flux de données d'un serveur vers un ou plusieurs clients. Le volume de données est très important et le flux des données envoyées ne supporte pas d'être interrompu. La contrainte de flux renvoie à la notion de qualité de service. On sait par exemple que les différentes normes IEEE 802.11 ne peuvent pas assurer de qualité de service à cause de l'implémentation probabiliste de la couche physique. La norme Bluetooth semble plus adaptée au problème. Permettraient d'envisager ce service en multi-sauts. Néanmoins, les faiblesses de débit et de couverture du Bluetooth ne sont pas attractives et à ce jour aucune solution de ce genre n'existe. Concernant le Wifi, malgré les problèmes de qualité de service, plusieurs propositions sont faites en traitant le problème de diverses manières. [29], les auteurs proposent un mécanisme d'adaptation du débit en fonction du taux de perte d'information perçu. Ils mènent à bien des simulations pour vérifier leurs hypothèses. Le routage et la mobilité ne sont pas traités dans cette proposition. [30], les auteurs proposent un algorithme de routage pour un réseau de stations mobiles. Des simulations sont faites et l'algorithme est comparé à AODV, un protocole de routage classique dédié aux MANETs. Enfin, [31], les auteurs reportent de véritables expérimentations sur des ordinateurs portables et un réseau IEEE802.11b. Dans ces tests les stations ne sont pas mobiles. En résumé les applications de type streaming audio ou vidéo s'accommodent difficilement des contraintes des réseaux ad hoc sans fil et d'autant moins que les stations sont mobiles.

3.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons investigué les capacités de l'optimisation par colonies de fourmis pour la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire et multi-objective. Après une étude de l'état de l'art des problèmes d'optimisation combinatoire et multi-objectif, nous avons proposé une taxonomie des algorithmes fourmis présentés dans la littérature pour résoudre des problèmes de ce type.

ACO est une méthode stochastique qui requiert de plus en plus l'attention de la communauté scientifique. Ce méta heuristique a prouvé sa performance pour plusieurs problèmes d'optimisation combinatoire NP-difficiles. L'utilisation des traces de phéromone permet d'exploiter l'expérience de recherche acquise par les fourmis et ainsi renforcer l'apprentissage pour la construction de solutions dans les itérations futures de l'algorithme. En même temps, l'information heuristique peut guider les fourmis vers les zones prometteuses de l'espace de recherche.

CHAPITRE 04

LE PROBLÈME DU CHEMIN LE PLUS COURT ET LE PLUS ROBUSTE

« SIMULATION ET DISCUSSION »



4.1. Introduction

L'algorithme de fourmi très proche de la métaphore fourmi qui exploite l'idée d'un système composé d'entités autonomes au fonctionnement totalement décentralisé. Cet algorithme est appliqué à un problème naturellement distribué de répartition de charge dans un réseau de télécommunication. Ce réseau est composé de routeurs sensés assurer la communication de bout en bout entre des paires de clients. Chaque routeur possède une capacité (un nombre maximum de communications simultanées). Le but est non seulement de trouver des routes relativement courtes mais aussi d'équilibrer la charge et d'éviter les congestions.

4.2. Principe

L'idée générale est que des agents (fourmis) sont dispersés dans ce réseau, qu'ils s'y déplacent et qu'ils mettent collectivement à jour les tables de routage dans les routeurs du réseau. Ces tables servent à router les appels téléphoniques. Les appels modifient la charge du réseau et influencent indirectement le comportement des fourmis. Il faut noter que dans ce problème il n'est pas possible d'évaluer globalement les solutions produites et de les partager dans tout le réseau. Du fait de la nature distribuée du réseau, les décisions de routage et les modifications de tables de routage se font localement, sans évaluation centralisée. C'est le dépôt de phéromone dans l'environnement (ici les stations du réseau mobile) qui définit les solutions que l'on cherche. En effet, les solutions sont des routes au sens classique des réseaux et comme dans les réseaux classiques, la route menant d'un point à un autre est découverte au fur et à mesure du parcours des stations.

4.3. Tables de phéromone

Dans les problèmes de routage, chaque nœud possède une table de routage qui permet de déterminer pour chaque sommet du réseau quelle est la route à prendre. Cette route est déterminée la plupart du temps de proche en proche : la table de routage d'un sommet A indique lequel des voisins de A doit être traversé pour atteindre un sommet destination.

Les tables de routage sont remplacées par des tables de phéromone. Celles-ci n'indiquent plus pour chaque nœud vers quel voisin aller mais la probabilité pour chaque voisin d'être le suivant. Les phéromones des *ACO*s sont exprimées en probabilités lors de la procédure de choix des fourmis. Ainsi chaque sommet possède pour chaque nœud du réseau une table de probabilités avec autant d'entrées que le sommet a de voisins. La somme des probabilités des voisins d'un sommet pour une destination donnée est 1. Les fourmis choisissent leur prochain nœud à l'aide d'un tirage aléatoire proportionnel aux probabilités de la table de routage.

Les appels téléphoniques sont routés d'une manière plus classique en utilisant les tables de phéromone et en sélectionnant systématiquement les voisins avec les meilleures probabilités.

4.4. Plus court chemin et équilibrage de charge

Pour permettre la construction de plus courts chemins il faut que les tables de phéromone guident les fourmis de préférence vers les plus courtes pistes. Pour faire transparaître cette idée de longueur des chemins, le dépôt des fourmis est proportionnel au trajet déjà effectué par la fourmi, de sorte que celles ayant parcouru un long chemin influencent moins les tables de routage que les fourmis ayant parcouru de plus courts chemins. Si a est l'âge en nombre de sauts d'une fourmi, la valeur de renforcement de phéromone est donnée par la relation suivante [32] :

$$\Delta p = \frac{0.08}{a} + 0.005 \quad (4.1)$$

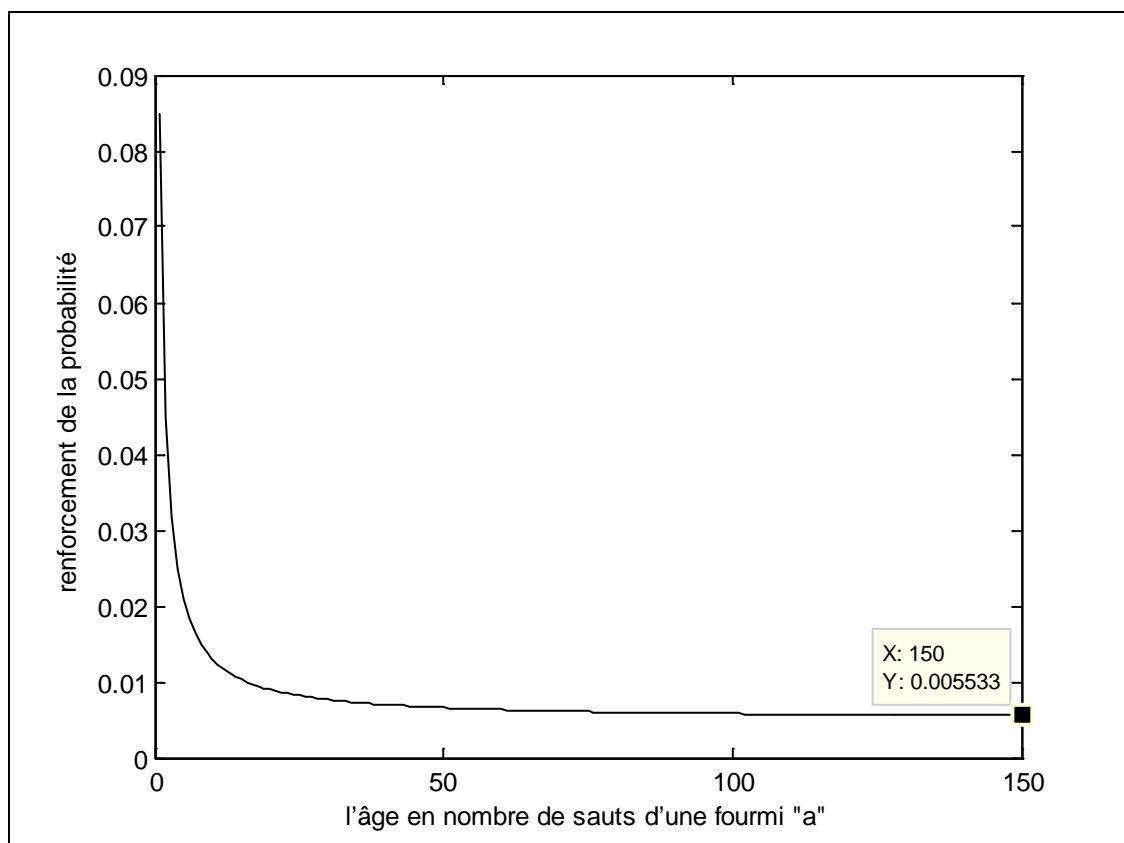


Figure. 4.1 Le renforcement de la probabilité d'une piste à définir

D'après cette figure nous pouvons constater clairement que si a augmente Δp diminue, donc ce mécanisme favorise les chemins les plus courts.

4.5. Renforcement des tables de routage

Les fourmis en se déplaçant mettent à jour les tables de phéromone. Une fourmi choisissant d'emprunter le voisin v du sommet s pour se rendre à la destination d va mettre à jour la table de phéromone de d dans s de la manière suivante :

$$p_d^s(v) = \frac{p_d^s(v) + \Delta p}{1 + \Delta p} \quad (4.2)$$

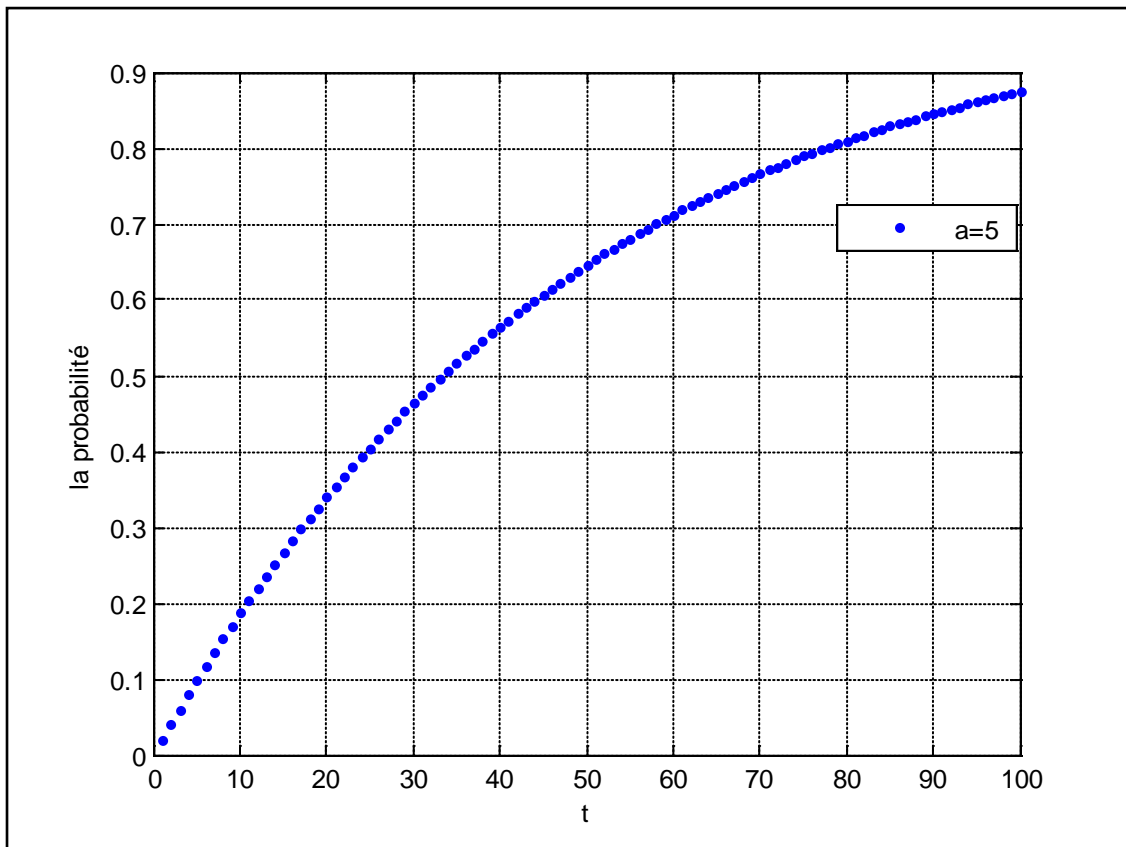


Figure. 4.2 La probabilité de la table de phéromone en fonction de temps pour $a=5$

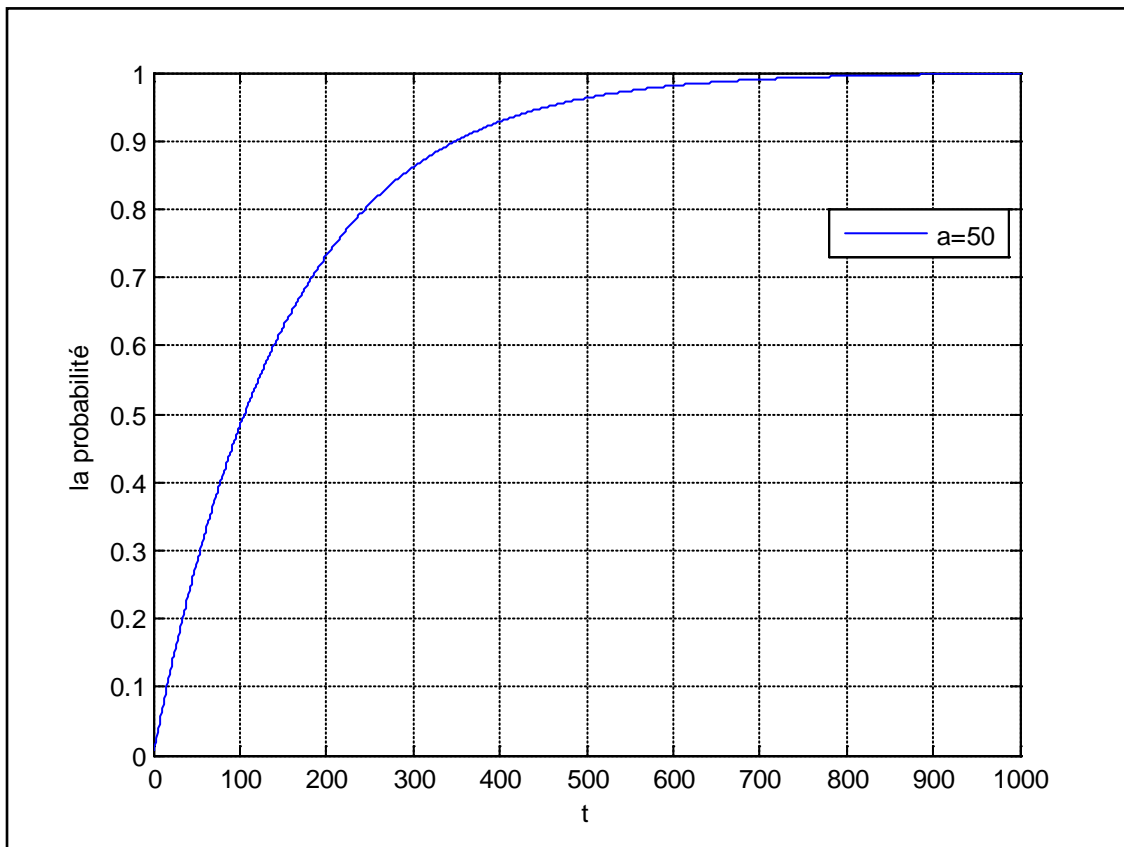


Figure. 4.3 La probabilité de la table de phéromone en fonction de temps pour $a=50$

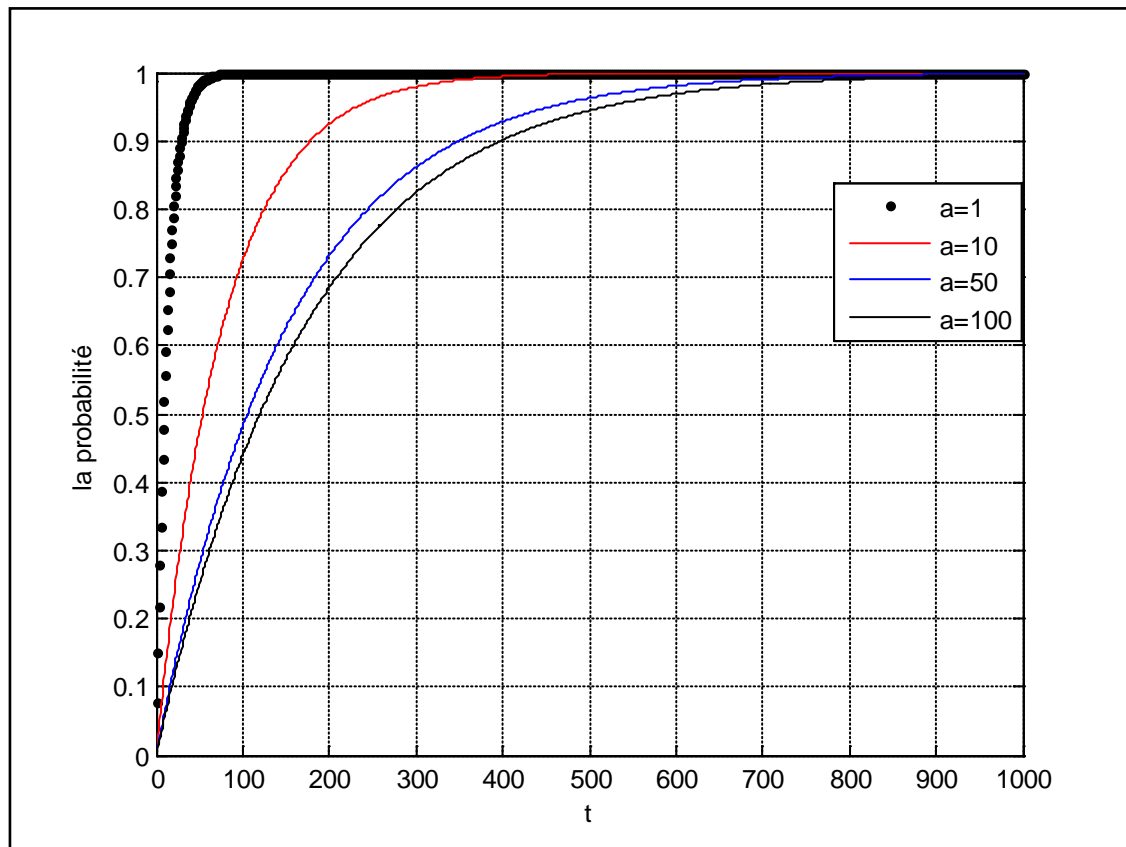


Figure. 4.4 Evolution de la probabilité en fonction de temps pour différentes valeurs de a

Cette figure montre que la probabilité des voisins de s pour la destination d tend vers 1 quelque soit la valeur de a, mais au fur et à mesure que a augmente le temps pour avoir une probabilité égale à 1 augmente.

4.6. Taux de renouvellement

Soit une structure S dans un graphe dynamique observée à deux dates différentes de l'évolution du graphe (t_1 et t_2). S_{t_1} est la structure au temps t_1 et S_{t_2} est la structure au temps t_2 . Le taux de renouvellement $t_r(S_{t_1}, S_{t_2})$ correspond au nombre de modifications M (ajouts et suppressions d'éléments) dans la structure entre ces deux dates par rapport au nombre d'éléments $|S_{t_1}|$ dans la structure de départ :

$$t_r(S_{t_1}, S_{t_2}) = \frac{M}{|S_{t_1}|}$$

(4.x)

La figure 4.5 illustre 6 états instantanés d'un graphe dynamique pris à des dates quelconques et croissantes. Nous considérons que les événements topologiques se produisent aux dates indiquées et qu'entre ces dates aucune modification ne survient dans le graphe. Une structure dont la propriété est un plus court chemin entre les sommets A et E est maintenu.

La structure en question est représentée par l'ensemble d'arêtes de couleur rouge (claire) qui forme un plus court chemin entre A et E.

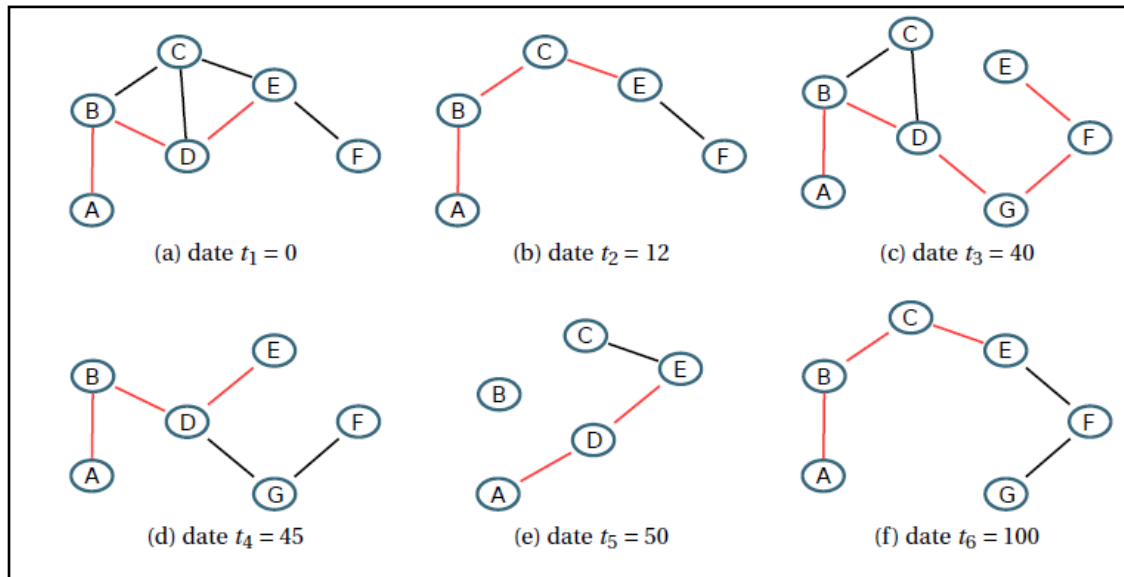


Figure. 4.5 Exemple de Graphe Dynamique

tab 4.1 Le taux moyen de renouvellement de la structure est alors environ

Intervalle de dates	Apparitions	disparitions	Cardinal de départ	Taux de renouvellement
[t1 : t2]	2	2	3	4/3=1,33
[t2 : t3]	4	2	3	6/3=2
[t3 : t4]	1	3	5	4/5=0,8
[t4 : t5]	1	2	3	3/3=1
[t5 : t6]	3	2	2	6/2=3

Du point de vue des stations, la détermination d'un plus court chemin dans un MANET est un processus décentralisé. Chaque station utilise des informations locales, son voisinage par exemple, pour effectuer ses traitements et prendre ses décisions. Les paramètres de l'algorithme utilisés sont les suivants :

$$m = 40 \text{ nombre de fourmis, } q_0 = 0.35 ; \rho = 0.2 ; Q = 0.1$$

L'objectif recherché ici est double : minimiser la taille des chemins construits et minimiser le taux de renouvellement des liens de ces chemins.

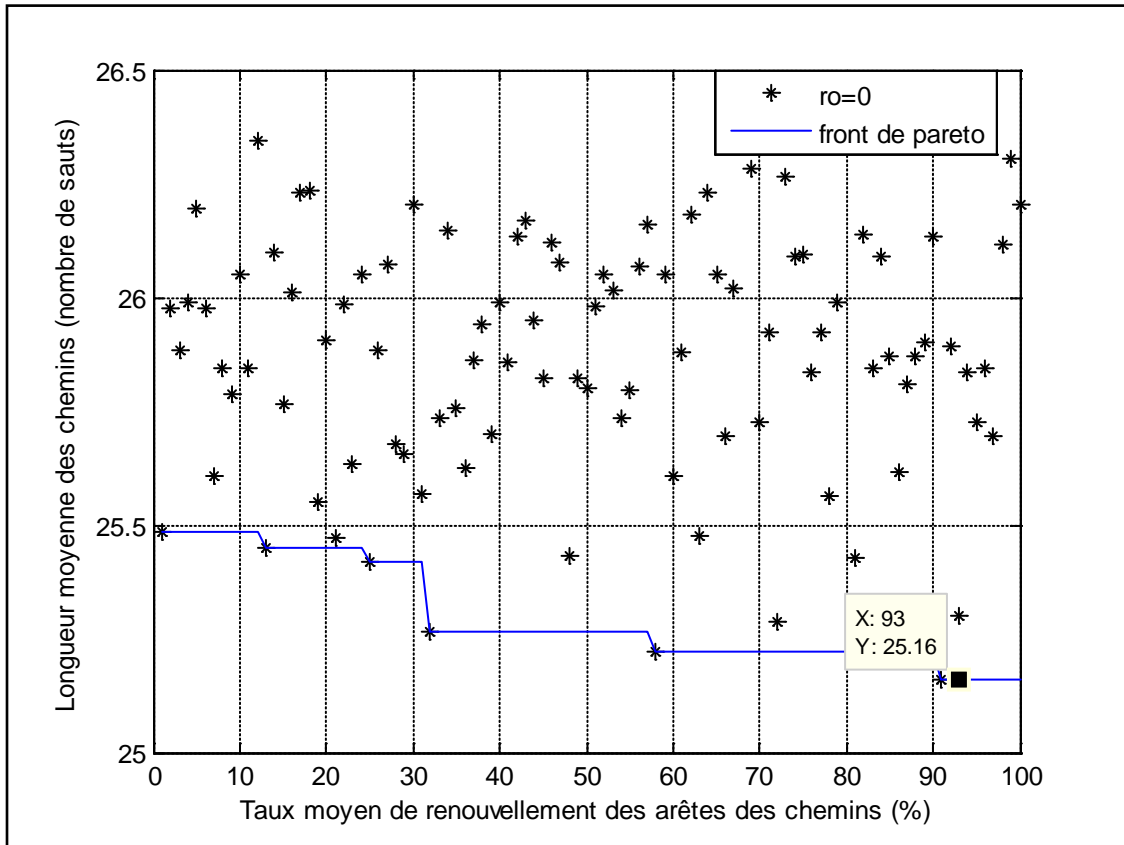


Figure. 4.6 Longueur moyenne des chemins en fonction de Taux moyen de renouvellement des arêtes des chemins (%) pour $ro=0$

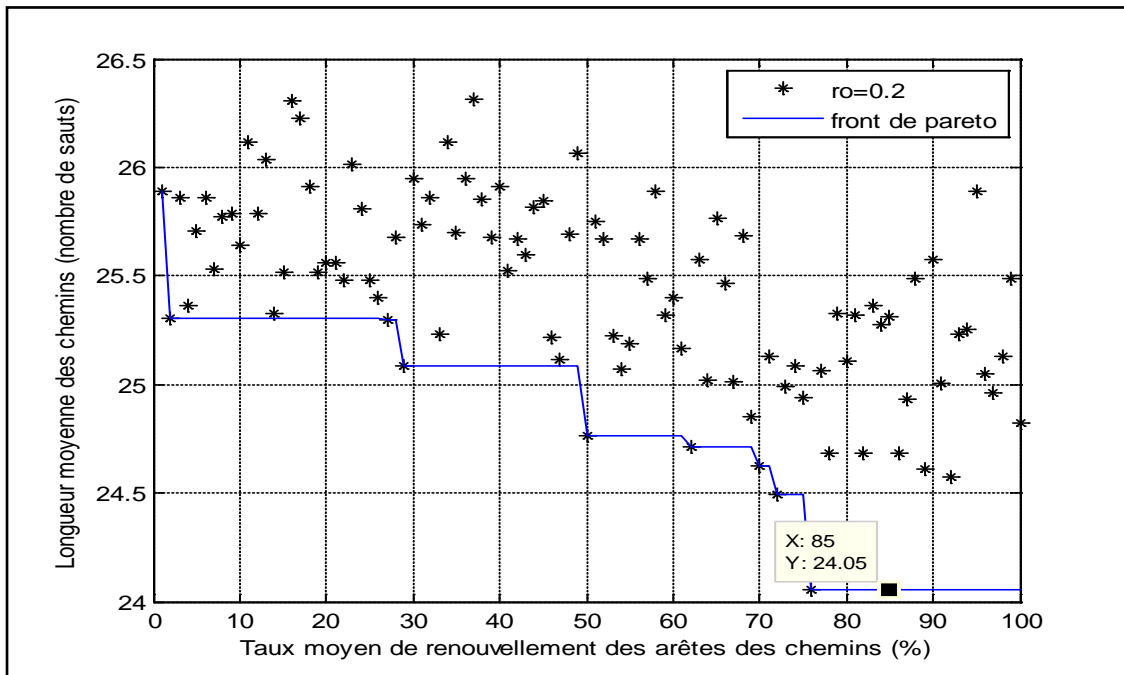


Figure. 4.7 Longueur moyenne des chemins en fonction de Taux moyen de renouvellement des arêtes des chemins (%) pour $ro=0.2$

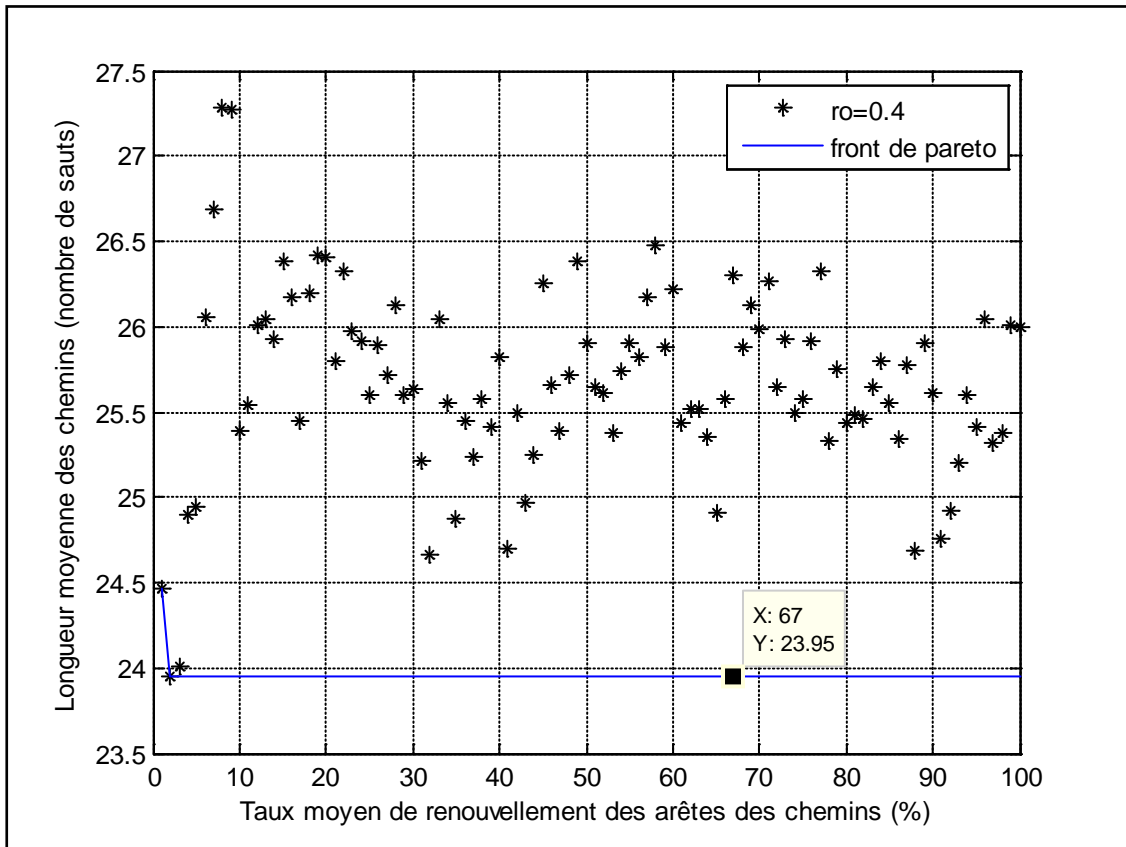


Figure. 4.8 Longueur moyenne des chemins en fonction de Taux moyen de renouvellement des arêtes des chemins (%) pour $ro=0.4$

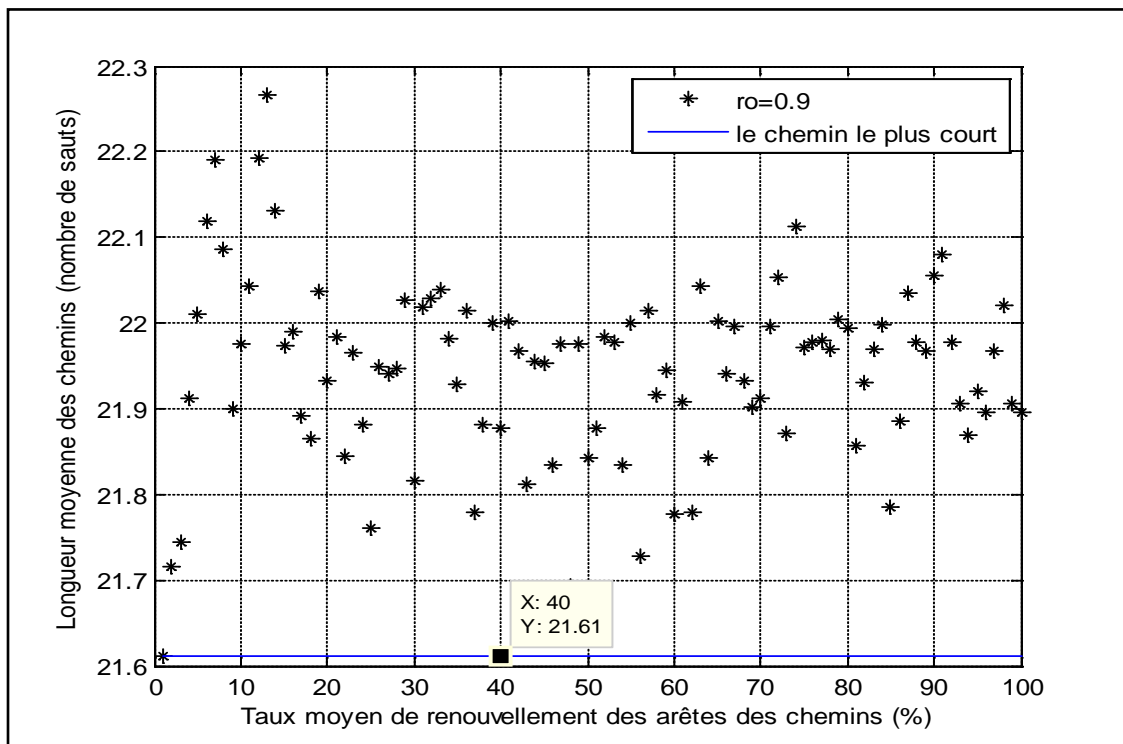


Figure. 4.9 Longueur moyenne des chemins en fonction de Taux moyen de renouvellement des arêtes des chemins (%) pour $ro=0.9$

Concernant l'évaporation ρ , qui peut varier entre 0 et 1, on trouve dans le front de Pareto des valeurs variant de 0 à 0.9. Une valeur de 0 pour ce paramètre signifie qu'aucune évaporation n'est effectuée sur les pistes. À l'inverse une évaporation de 1 effacerait toutes les pistes de phéromone, et transformerait l'algorithme fourni en algorithme de recherche aléatoire.

La meilleure solution pour l'objectif de longueur des chemins est de 21,61 avec $\rho = 0.9$ ce qui correspond au comportement classiquement décrit concernant les algorithmes fournis et leur capacité à trouver des plus courts chemins. La technique de mémorisation des valeurs des pistes de phéromone présentée précédemment consiste à conserver la valeur des phéromones dans les nœuds concernés quand une arête disparaît puis de la réaffecter quand elle réapparaît.

4.7. Conclusion

Les problèmes que pose le routage dans les réseaux mobiles sont liés à leur nature imprévisible et dynamique ainsi qu'aux faibles ressources (débit et autonomie) des stations qui les composent. Les algorithmes de routage proposés doivent tenir compte de certaines contraintes :

- l'absence d'infrastructure qui empêche tout contrôle centralisé et impose une résolution distribuée ;
- la dynamique du réseau et la perte rapide de validité des routes qui imposent des mécanismes de mise à jour adaptés ;
- la faiblesse des ressources qui oblige à limiter le volume et la fréquence des données de routage échangées.

Les routes construites doivent elles aussi se soumettre aux contraintes des *MANETs*. En effet, les faibles débits poussent à limiter le nombre d'intermédiaires entre deux stations de façon à minimiser le temps de transit de l'information. Le plus court chemin en nombre de sauts a des chances d'être également le plus rapide en temps de transmission. De plus, le chemin qui utilise le moins de stations est, vraisemblablement, le plus économe en énergie. Il y a donc un intérêt à déterminer des plus courts chemins pour construire des routes. Le comportement des fourmis a été beaucoup étudié et appliqué avec succès à de nombreux problèmes d'optimisation. Le principe général est le suivant :

1. chaque fourmi se déplace et dépose des phéromones dans l'environnement sur son passage;
2. Le choix du déplacement des fourmis est partiellement guidé par les quantités de phéromones présentes sur les pistes et ce choix est probabiliste ;
3. les phéromones s'évaporent avec le temps.

Le mécanisme général est itératif, les étapes précédentes sont répétées. Durant l'exécution, les chemins voient leur quantité de phéromones augmenter proportionnellement au nombre de fourmis qui les parcourent. À l'échelle de l'environnement qui peut être un graphe, on observe des chemins, des groupes d'arêtes, des structures. Le but de chaque individu à tout moment est de se déplacer et de marquer son environnement. Le déplacement est influencé par des informations et des contraintes locales.

Le renforcement local des pistes est effectué à chaque déplacement d'une fourmi, il représente une valeur constante ou calculée à partir des informations locales. Ce renforcement est local et ne correspond à aucune évaluation globale.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est de faire une étude de l'algorithme de colonie de fourmi et de l'appliquer pour le routage des réseaux mobiles ad hoc afin de trouver le chemin le plus court. En effet la contrainte présente dans tous les problèmes considérés est celle d'environnements dynamiques et distribués et les soucis de modélisation.

L'optimisation par colonies de fourmis est une méta-heuristique stochastique basée sur l'amélioration itérative d'une population de solutions et qui s'inspire de l'intelligence que peuvent manifester les fourmis lors de leurs déplacements vers la recherche de nourriture, et le processus de découverte du chemin et diffusion de l'information sur les différents chemins trouvés.

Les réseaux Ad hoc, appelés aussi réseaux spontanés, sont conçus d'entités (qui peuvent être mobiles) avec ou sans des infrastructures fixes préexistantes. Un moyen simple de conception des réseaux ad hoc revient à considérer qu'il correspond à une amélioration des capacités de connectivité des réseaux locaux (Local Area Network), par la limitation maximale du rôle d'une infrastructure fixe. La portée de transmission limitée des interfaces réseaux sans-fils, le trafic de communication acheminé vers d'autres destinations fixes ou mobiles, doit passer et être ainsi relayé par des nœuds intermédiaires afin d'être acheminé à sa destination finale. Chaque nœud intermédiaire est alors aussi considéré comme un routeur qui contribue et coopère à l'acheminement des paquets aux autres membres du réseau. Trouver et établir correctement des routes d'une manière efficace et en moins de temps possible est l'objectif ultime des protocoles de routage en réseau ad hoc. Donc les différentes caractéristiques de l'approche de routage se basant sur l'Optimisation par Colonies de fourmis pour les réseaux ad hoc sont les suivants :

- Systèmes d'agents
- Grande adaptation à la topologie courante du réseau.
- Basé seulement sur l'information locale.
- Pas nécessaire de transmettre les tables de routage ou aucun autre block d'information aux voisins, ou à tous les nœuds du réseau.
- Possibilité d'intégrer la qualité du lien dans le calcul de la concentration de la phéromone, spécialement durant le processus d'évaporations.
- Les nœuds peuvent surveiller la qualité du lien.
- Chaque nœud a une table de routage avec des entrées pour tous ses voisins, qui contiennent aussi la concentration de la phéromone.
- La règle de décision est basée sur la concentration de la phéromone dans le nœud courant, qui est fournie pour chaque lien possible.

Donc d'après cette étude nous avons conclu que les algorithmes inspiré de la nature et parmi ceux-ci l'algorithme ACO est très efficace pour la résolution des problèmes complexes.

Les perspectives de ce travail sont multiples tant au niveau théorique des graphes dynamiques qu'au niveau applicatif des problématiques liées aux MANETs. Plus tard il sera envisageable d'implémenter cet algorithme sur un véritable simulateur de réseau mobile ad hoc.

BIBLIOGRAPHIE



Bibliographies

- [1] Site disponible sur : IEEE802.11. <http://www.ieee802.org/11/>.
- [2] DHIKRA SAFFAR AMIRA. Les réseaux cellulaires (GSM, GPRS, UMTS). Institut
- [3] C.K. Toh. Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems. Prentice.hall
- [4] Gillian Bocq. Elect 321, public networks. Technical report, ULB,
- [5] Kitty Wilson Jarrett Lillian Goleniewski. Telecommunications Essentials
- [6] Overview of the universal mobile telecommunication system. Internet Draft,
- [7] M. Dohler M. J. Nawrocki and A. Hamid Aghvami. UMTS Radio Network. John Wiley
- [8] 4G. Site disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/4G>
- [9] LTE. Site disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/LTE> (r/c3/A9seaux mobiles)
- [10] Frédéric Guidec and Hervé Roussain. Parallel and Distributed Processing and applications.
- [11] Pubudu. Pathir ana. Node localization using mobile. IEEE Transactions on Mobile .
- [12] LTE Advanced. Site disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/LTE_Advanced
- [13] M. Aljnidi. *Modèle*, Architecture et protocoles de sécurité pour les réseaux Autonome mobiles_ Thèse de L'ENST.
- [14] Mathias P Proceedings. IEEE International éron, Etude de l'équité dans les Réseaux ad hoc, Master's thesis, Ecole Normale Supérieure de Lyon,
- [15] Mathias Péron, Etude de l'équité dans les réseaux ad hoc, Master's thesis, Ecole Normale Supérieure de Lyon.
- [16] P.Jacque, P. Muhlethaler, T. Clausen, A. Laouiti, A. Qayyum, and L. Viennot. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks.
- [17] David B. Johnson, David A. Maltz, and Yih-Chun Hu. The dynamic source Routing protocol (DSR) for mobile ad hoc networks for IPv4.
- [18] Dorigo, M. and Stützle, T. Ant Colony Optimization. MI Press.
- [19] Dorigo, M., Maniezzo, V., and Colomi, A. (1996). The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. IEEE Trans. Syst. Man Cybern, B (26)
- [20] Gambardella, L., Taillard, E., and Agazzi, G. (1999). New Ideas in Optimization, chapter MACS-VPTW: A multiple ant colony system for vehicle routing problems with time Windows,
- [21] Collette, Y. and Siarry, P. (2002). Optimisation multiobjectif. Eyrolles edition.
- [22] Dr_eo, J., P_etrowski, A., Siarry, P., and Taillard, E. D. (2003). M_etaheuristiques pour

L'optimisation difficile. Eyrolles.

- [23] Goss, S., Aron, S., Deneubourg, J. L., and Pastels, J. M. (1989). Self- Organized Shortcuts in The Argentine Ant. *Naturwissenschaften*,
- [24] Beckers, R., Deneubourg, J. L., and Goss, S.. Trails and Uturns in the Selection of a Path by the Ant *Lasius Niger*. *J. Theor. Biol.*
- [25] Colomi, A., Dorigo, M., and Maniezzo, V. Distributed Optimization by Ant Colonies
- [26] Bonabeau, E., Dorigo, M., and Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence, From Natural to Arti_cial Systems*. OxfordUniversity Press.
- [27] Dorigo, M., Maniezzo, V., and Colomi, A. The Ant System : Optimization by a Colony of Cooperating Agents. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern, B* (26)
- [28] Dorigo, M. and Gambardella, L. M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. *IEEE Trans. Evol. Comp.*,
- [29] Dorigo, M. and Gambardella, L. M. Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem. *BioSystems*,
- [30] M.I. Kazantzidis, L.Wang, and M.Gerla. On fairness and efficiency of adaptive audio application layers for multihop wireless networks. In *Mobile Multimedia Communications. (MoMuC '99) 1999 IEEE International Workshop on*,
- [31] Toby Xu and Ymg Cai. Streaming in Manet: Proactive link protection and receiver-oriented Adaptation. In *Performance, Computing, and Communications Conference. IPCCC.IEEE Internationa*, pages 178–185.
- [32] thèse de Yoann Pigné.
- [33] disponible sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Optimum_de_Pareto?

ANNEXE

Annexe A

A.1. Technologies

Cette section fait un très rapide tour d'horizon des différentes technologies employées en 2008, technologies qui resteront probablement d'actualité dans un futur proche pour mettre en œuvre les réseaux mobiles ad hoc.

A.1.1. IEEE802.11

L'ensemble de normes IEEE802.11 [1] contient plusieurs spécifications qui représentent la majorité des implémentations actuelles et futures. Les normes IEEE802.11 concernent les modes de communication mais aussi la qualité de service (IEEE802.11i) et la sécurité (IEEE802.11h). Ces normes ont des couches physiques différentes mais reposent sur le même protocole de liaison de données, CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Ce protocole repose sur une approche probabiliste dont le principe consiste à réserver le support radio avant d'émettre des paquets. En effet, dans un réseau sans fil, une seule machine peut émettre à la fois et du fait de la particularité du medium, les collisions plutôt qu'être détectées doivent être évitées. Il est en effet impossible à une station d'écouter le medium et d'émettre sur ce même medium simultanément. L'efficacité du protocole de communication repose alors sur la qualité des stratégies d'accès au medium. Les protocoles utilisés sont basés sur des demandes de réservation du medium avec indication du délai de transmission associé. DCF (Distributed Coordination Fonction), permet, en mode ad hoc de réaliser la coordination nécessaire entre les stations. D'autre part, en mode ad hoc, pour que le transit de données soit effectué il faut que l'émetteur et le récepteur soient synchronisés. Le mécanisme de recherche de voisinage et de synchronisation se révèle relativement rapide en pratique (généralement inférieur à la seconde). Par contre lorsque des stations sont synchronisées, elles n'explorent plus leur voisinage. Il se peut donc que deux stations déjà synchronisées par ailleurs, se retrouvent à portée de communication radio l'une de l'autre sans en avoir connaissance. Ainsi, le mécanisme de transit ne permet pas d'assurer une qualité de service suffisante des applications de type *VOIP*. L'intérêt principal de cette norme est de permettre la conception de réseaux autour de points d'accès, mais aussi en mode *ad hoc*, de pair-à-pair. Parmi toutes les normes, les trois suivantes nous semblent les plus intéressantes dans le cadre des réseaux mobiles *ad hoc*.

IEEE802.11b. Cette norme définie en 1999 est implémentée, en 2008, sur l'immense majorité des dispositifs dédiés aux réseaux sans fil. Elle permet un débit théorique de 11Mbi t/s sur la fréquence de 2.4GHz . La couverture est de l'ordre de 30 mètres pour le débit théorique et 90 mètres pour un débit de 1Mbi t/s .

IEEE802.11g. Cette norme est compatible avec la précédente et propose un meilleur débit (54Mbi t/s au maximum) grâce à une méthode qui multiplexe les communications de manière plus efficace mais aussi plus sensible aux échos. Elle est aussi très largement implémentée sur les différents équipements aujourd'hui disponibles.

IEEE802.11n. Cette norme propose un débit théorique encore supérieur aux deux précédents avec 248Mbi t/s en théorie. Ce débit est atteint entre autre grâce à la technologie des antennes *MIMO* (*Multiple-Input Multiple-Output*) qui en plus de multiplexer les communications sur plusieurs bandes de fréquences, utilise plusieurs antennes à l'émission et à la réception.

Annexe B

B.1. Morphologie

Les fourmis sont des insectes mesurant en moyenne de 0.01 à 3 centimètres, et pesant de 1 à 150 milligrammes. Elles ont un corps principalement de muscles enveloppés dans une carapace chitineuse très résistante. On peut observer que le corps de la fourmi est divisé en trois parties majeures bien reconnaissables :

La tête qui est le support des antennes (récepteurs sensoriels extrêmement développés) et des mandibules (membres situés au niveau de la bouche qui se présentent sous forme de pinces dentées et puissantes).

Le thorax qui permet la communication entre la tête et l'abdomen, soutenue par trois paires de pattes très longues et très fines qui permettent aux fourmis (tout comme aux araignées qui ne sont pas des insectes) de déplacer dans toutes les directions et dans toutes les positions possibles. L'abdomen, quand à lui, contient tout le système digestif et le moteur du système sanguin. Même si la plupart des fourmis sont asexuées, certaines présentent un système reproductif mâle ou femelle

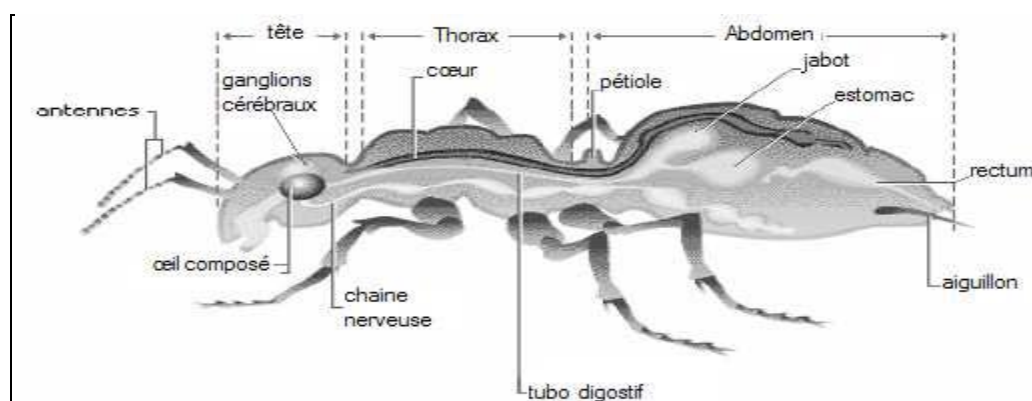


Figure. B.1. Anatomie de la fourmi.

Les fourmis présentent un système nerveux peu développé comparé à celui de l'Homme (1 million de fois moins de neurones que le nôtre), un système sensoriel, digestif, circulatoire, ainsi que différentes glandes ayant des fonctions bien particulières. Ainsi, même si les fourmis apparaissent sous forme d'insectes minuscules, elles ont une organisation physiologique très développée et c'est celle-ci qui leur permet d'évoluer aisément dans leur environnement. De plus, elles présentent des lieux d'émission et de réception de messages chimiques, ce que nous allons développer prochainement

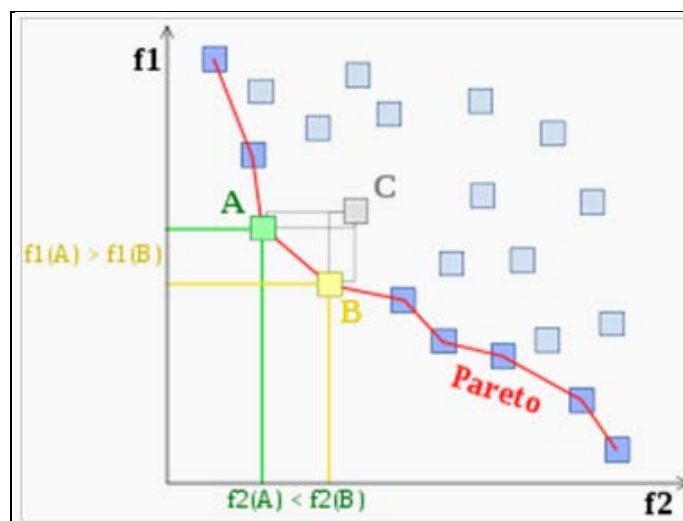
Annexe C

C.1. Concept d'optimum de Pareto

En économie, un optimum de Pareto, nommé d'après l'économiste italien Vilfredo Pareto, est un état de la société dans lequel on ne peut pas améliorer le bien-être d'un individu sans détériorer celui d'un autre [33]. La notion d'optimum de Pareto permet de diviser en deux l'ensemble des états possibles de la société. On peut ainsi distinguer :

- ceux qui sont uniformément améliorables : il est possible d'augmenter le bien-être de certains individus sans réduire celui des autres.
- ceux qui ne sont pas uniformément améliorables : l'augmentation du bien-être de certains individus implique la réduction du bien-être d'au moins un autre individu.

Ce sont les états entrant dans ce deuxième cas de figure que l'on désigne comme *optima au sens de Pareto*, ou *optima de Pareto*, ou *front de Pareto*.



Exemple de frontière d'efficacité de Pareto : si les situations préférables sont celles où f_1 et f_2 sont les plus faibles, le point C n'est pas sur la frontière de Pareto parce qu'il est dominé par les points A et B . Les points A et B sont tous les deux efficaces.