

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOUHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département : **Génie Electrique**

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :
AISSAOUI Abderraouf
ABDELLI Ahmed

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : **Télécommunication**
Option : **Systèmes des Télécommunications**

Thème

***Les communications satellitaires : principe de
fonctionnement et analyses des performances***

Devant le jury composé de :

DJELLID Asma	MCB	UAMOB	Président
BOUCENNA M. Lamine	MCB	UAMOB	Encadreur
SAIDI Mohamed	MAA	UAMOB	Examineur
AYAD Mouloud	MCA	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2018/2019

Remerciements

Je remercie ALLAH le tout puissant qui m'a offert santé, courage, patience et volonté, me permettant de mener à terme ce présent travail.

Nous tenons à remercier Monsieur BOUCENNA Mohamed Lamine, notre promoteur, pour son aide, ses conseils, ses encouragements et ses orientations qui nous ont guidé jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Nous remercions aussi les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail et de nous faire part de leurs remarques pertinentes.

Nous exprimons notre plus grande gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude.

A tous celui qui ont sacrifié pour m'offrir les conditions propices à ma réussite :

A ma mère, à qui je dois la réussite, pour l'éducation qu'elle m'a prodiguée ; avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'elle a consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'elle m'a enseigné depuis mon enfance.

A l'âme de mon père.

A mes cher frères et sœurs.

A mes amis et toute ma famille avec tous mes sentiments de respect, d'amour, de gratitude et de reconnaissance pour tous les sacrifices déployés pour m'élever dignement et assurer mon éducation dans les meilleures conditions pour leurs encouragements et leurs soutiens.

Que ce travail soit l'expression de ma grande affection et un témoignage de mon attachement et de mon grand profond amour.

Abderraouf.

Pour que ma réussite soit complète je la partage avec toutes les personnes que j'aime, je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents pour leur amour et pour le courage et la volonté qu'ils m'ont inculqué.

A mes très chères sœurs et frères.

A toute la famille ABDELLI.

A tous mes amis et collègues sans exception.

Ahmed.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES COMMUNICATIONS SATELLITAIRES	
I.1. INTRODUCTION.....	3
I.2. HISTORIQUE	3
I.3. LES SATELLITES ARTIFICIELS.....	4
I.4. DOMAINE DE DEVELOPPEMENT.....	4
I.5. LA VIE D'UN SATELLITE	4
I.6. ARCHITECTURE D'UN SATELLITE.....	5
I.7. ORBITES.....	5
<i>I.7.1 Ceinture des radiations de Van Allen.....</i>	<i>6</i>
<i>I.7.2 Les orbites circulaires ou quasi-circulaires</i>	<i>6</i>
<i>I.7.3 Les orbites elliptiques.....</i>	<i>6</i>
<i>I.7.4 Autres dénominations</i>	<i>7</i>
<i>I.7.5 Différentes vitesses de satellisation.....</i>	<i>7</i>
<i>I.7.6 Scénario de lancement d'un satellite Géostationnaire.....</i>	<i>8</i>
I.8. LES SATELLITES DE TELECOMMUNICATION	9
<i>I.8.1 Définition</i>	<i>9</i>
I.9. LES FONCTIONS UTILES	10
<i>I.9.1 La station spatiale</i>	<i>10</i>
<i>I.9.2 Les stations terrestres.....</i>	<i>12</i>
<i>I.9.3 Les systèmes Satellitaires</i>	<i>13</i>
I.10. LES MODES DE LIAISON	14
<i>I.10.1 Les liaisons fixes (de type point à point)</i>	<i>14</i>
<i>I.10.2 Les liaisons en diffusion hertzienne (de type point à multipoint).....</i>	<i>14</i>
I.11. LES BANDES DE FREQUENCES	15
<i>I.11.1 Les fréquences.....</i>	<i>15</i>
<i>I.11.2 Les Bandes des Fréquences</i>	<i>15</i>
I.12. CONSTELLATIONS DES SATELLITES	15
I.13. LES SERVICES DE TELECOMMUNICATIONS PAR SATELLITES	16
<i>I.13.1 La téléphonie.....</i>	<i>16</i>
<i>I.13.2 La télédiffusion.....</i>	<i>17</i>
<i>I.13.3 La transmission des données.....</i>	<i>17</i>
<i>I.13.4 Le multimédia.....</i>	<i>17</i>
<i>I.13.5 La radiomessagerie</i>	<i>17</i>
<i>I.13.6 L'Internet.....</i>	<i>18</i>
<i>I.13.7 Positionnement (Localisation).....</i>	<i>18</i>
I.14. LES TECHNIQUES D'ACCES AU CANAUX SATELLITAIRES.....	21
<i>I.14.1 Modèle OSI de l'ISO</i>	<i>22</i>
<i>I.14.2 La couche MAC.....</i>	<i>22</i>
<i>I.14.3 Méthodes d'accès ou Techniques MAC.....</i>	<i>23</i>
<i>I.14.4 Les politiques de réservation fixe.....</i>	<i>23</i>
<i>I.14.5 Les politiques d'accès aléatoire.....</i>	<i>23</i>
<i>I.14.6 Les techniques d'accès aléatoires.....</i>	<i>24</i>

I.14.7	<i>PODA (Priority-Oriented Demand Assignment)</i>	25
I.14.8	<i>Les protocoles de réservation dynamique et les méthodes hybrides</i>	25
I.14.9	<i>Techniques hybrides</i>	26
I.15.	CONCLUSION	26
CHAPITRE II : BILANS DU LIAISON SATELLITAIRE		
II.1.	INTRODUCTION	27
II.2.	LIAISON SATELLITAIRE	27
II.3.	BILAN DE LIAISON.....	28
II.3.1	<i>Paramètres généraux</i>	28
II.3.2	<i>Bilan du lien montant (station sol vers satellite)</i>	33
II.3.3	<i>Bilan du lien descendant (satellite vers station sol)</i>	33
II.3.4	<i>Bilan de liaison global</i>	34
II.4.	INFLUENCE DE METHODE D'ACCES AU BILAN	34
II.4.1	<i>La qualité de service</i>	35
II.4.2	<i>QoS dans les satellites</i>	35
II.4.3	<i>Critères de performance des protocoles MAC</i>	35
II.5.	CALCUL DE BILAN DE LIAISON.....	36
II.6.	CONCLUSION	37
CHAPITRE III : METHODES D'ACCES ALEATOIRE DANS LES COMMUNICATIONS SATELLITAIRES		
III.1.	INTRODUCTION	39
III.2.	ALOHA CLASSIQUE (PUR) ET ALOHA DISCRETISE.....	39
III.3.	LES CHAINES DE MARKOV	42
III.4.	MODELISATION D'ALOHA DISCRETISE PAR LA CHAINE MARKOV	44
III.5.	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	49
III.6.	CONCLUSION	53
CONCLUSION GENERALE		54
REFERENCES		55

Table des figures

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES COMMUNICATIONS SATELLITAIRES

Figure I.1: L'architecture d'un satellite artificiel.....	5
Figure I.2 : Les différentes orbites de la terre.....	6
Figure I.3 : Les différentes vitesses de la satellisation.	8
Figure I. 4 : Scénario de lancement d'un satellite Géostationnaire.....	8
Figure I.5 : Les compositions d'un satellite de communication.....	10
Figure I.6 : Exemples des antennes.....	12
Figure I.7 : Constellation des satellites de localisation.	18
Figure I.8 : Le principe de triangulation par satellite.....	20
Figure I.9: Reprise sur une liaison satellite.....	21
Figure I.10 : Les différentes couches du modèle OSI.....	22
Figure I.11: Collision entre deux paquets sur un canal satellite.....	24
Figure I.12 : Aloha en tranches.....	25

CHAPITRE III : METHODES D'ACCES ALEATOIRE DANS LES COMMUNICATIONS SATELLITAIRES

Figure III.1 : Graphe de transition de la chaîne Markov.	44
Figure III.2 : Graph des transitions de la chaîne Markov modélisé.	45
Figure III. 3 : Distribution binomiale des probabilités de retransmission en fonction des transmissions par slot.	49
Figure III. 4 : Distribution binomiale des probabilités d'arrivée en fonction des arrivées par slot....	50
Figure III. 5 : Les valeurs optimales de probabilité de retransmission pour différentes distributions binomiales.	50
Figure III. 6 : Les valeurs optimales de probabilité d'arrivée pour différentes distributions binomiales.	51
Figure III.7 : Le débit (paquet par slot) en fonction de la charge offerte (tentative par slot).....	51
Figure III.8 : Le délai moyen des paquets (temps de slot) en fonction de charge offert (tentative par slot).....	52
Figure III.9 : Le débit (paquet par slot) en fonction de charge offerte pour les différents protocoles.	52
Figure III. 10 : Le délai moyen des paquet (temps de slot) en fonction de la charge offerte pour les différents protocoles.	53

Liste des tables

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES COMMUNICATIONS SATELLITAIRES

Tableau I.1: Classement des satellites par rapport son poids.....	5
Tableau I. 2 : Chronologies de quelques satellites de télécommunications.....	9
Tableau I. 3 : Les bandes des Fréquences et quelque des services.....	15
Tableau I. 4 : Délai de propagation dans différentes orbites.....	21
Tableau I. 5: Comparaison entre quelques protocoles d'accès aléatoires.	25

CHAPITRE II : BILANS DU LIAISON SATELLITAIRE

Tableau II. 1 : Les paramètres du lien montant.....	36
Tableau II. 2 : Les paramètres du lien descendant.	36
Tableau II. 3: Les résultats finaux du bilan de liaison.	37

Liste des abréviations

- **ACK:** Acknowledgement.
- **CDMA :** Code Division Multiple Access.
- **DAMA:** Demand Assignment Multiple Access.
- **FAMA:** Fixed Assignment Multiple Access.
- **FAMA:** (Fixed Assignment Multiple Access.
- **FAMA:** Fixed Assignment Multiple Access.
- **FDMA:** Frequency Division Multiple Access.
- **FDMA:** Frequency Division Multiple Access.
- **FEC:** Forward Error Correction.
- **FM:** Frequency Modulation.
- **FSK:** Frequency-shift keying.
- **GEO:** Geostationary Earth Orbit.
- **GPS:** global positioning system.
- **GTO:** Geostationary Transfer Orbit.
- **HEO:** Highly Excentric Orbit.
- **HEO:** High Earth Orbit.
- **ISO:** International Organization for Standardization.
- **LEO:** Low Earth Orbit.
- **LNB:** low noise block.
- **MAC:** Medium Access Control.
- **MEO:** Medium Earth Orbit.
- **OSI:** Open Systems Interconnection.
- **PR:** Packet Reservation.
- **PSK:** Phase shift Keying.
- **QAM:** Quadrature Amplitude Modulation.
- **QoS:** quality of service.
- **QPSK:** Quaternary Phase Shift Keying.
- **RA:** Random Access.
- **SFS :** Le service fixe par satellite.
- **SMS :** Le service mobile par satellite.
- **SRS :** Le service de radiodiffusion par satellite.
- **SSO:** orbits héliosynchrone (polaire).
- **TDMA:** Time Division Multiple Access.
- **TEB :** taux d'erreur binaire.
- **URSS :** Union des républiques socialistes soviétique.
- **USA:** united states of America.
- **VHF:** Very high frequency.
- **VSAT:** Very Small Aperture terminal.

Introduction Générale

Depuis plus de 50 ans, les communications de tous types n'ont cessé de croître. Tout groupe de médias a fait son apparition, au cours des années passés, comme par exemple les radios, le téléphone ou bien encore la télévision. Cependant, c'est le besoin toujours croissant de vouloir communiquer sur de longues distances, qui a donné naissance au satellite de télécommunication.

La communication entre une station terrestre et son satellite se fait en full duplex, c'est à dire dans les deux sens à la fois. Ceci est permis grâce à l'utilisation de deux fréquences différentes : une pour le flux montant (station terrestre vers satellite) et une pour le flux descendant (sens inverse). Cependant, nous constatons beaucoup de clients pouvaient communiquer avec le satellite, et si certains utilisent les mêmes fréquences, alors il ne doit pas y avoir de chevauchement de signaux, et donc collision. Alors, on doit faire appel aux techniques de partage du support ou les méthodes d'accès au support [1] pour gérer les communications simultanées envers le satellite. Il en existe un certain nombre, mais voici celles que l'on retrouve dans les communications satellites, et qui se divisent en deux grandes familles :

- ✓ Les méthodes d'accès FAMA (Fixed Assignment Multiple Access) :
 - La FDMA (Frequency Division Multiple Access).
 - La TDMA (Time Division Multiple Access).
 - La CDMA (Code Division Multiple Access).
- ✓ Les méthodes d'accès aléatoire : Ces méthodes permettent l'utilisation du canal à n'importe quel moment. S'il y a collision avec un autre client, différents algorithmes sont appliqués :
 - Aloha : Lors de la détection de la collision (long pour les communications satellites, un aller-retour entre station terrestre et le satellite), chaque client attend un temps aléatoire donné et tente de réémettre.
 - Aloha discrétisé : Identique à la méthode précédente, mais l'envoi ne peut se faire que dans des slots de temps prédéterminés à l'avance.

Les méthodes de réservation de paquets : Elles permettent, de manière explicite ou implicite, de réserver un canal de communication à l'avance pour permettre une émission de données sans collisions. Il existe souvent un canal spécial dédié à la réservation.

Dans les communications par satellites, on retrouve trois méthodes d'accès qui sont fréquemment utilisées :

- Aloha discrétisé : des débits faibles et le délai de paquet est moyen.
- Réservation par paquet : des débits moyens et le délai de paquet est important.
- TDMA : des débits maximums et le délai de paquet est important.

Problématique :

Un grand nombre d'utilisateurs de différents types vont essayer d'accéder au canal satellite (sens montant) afin d'envoyer leurs paquets. Il faut distribuer les ressources disponibles entre les différents utilisateurs de façon d'obtenir un débit maximum et un minimum délai moyen de paquet à chaque utilisateur.

Afin de traiter ce sujet et répondre à la problématique évoquée ; un plan de recherche a été établi. Il consiste tout d'abord de comprendre les communications satellitaires et ces principes de fonctionnement. Nous avons également mené des études sur les liaisons satellitaires et les méthodes d'accès aléatoires. Nous voudrions améliorer la technique d'accès aléatoire Aloha discrétisé par l'application de la chaîne de Markov à cette technique pour optimiser ces performances.

Le manuscrit de ce mémoire est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre concerne l'étude du satellite et les communications satellitaires dans le cadre d'étude de fonctionnement. On présente aussi les diverses catégories d'orbites, les fonctions utiles, les bandes des fréquences, les antennes, les services des télécommunications, etc. On termine par les techniques de transmission et les différentes techniques d'accès au canal.

Le deuxième chapitre sera consacré au bilan de liaison et leurs paramètres généraux, les influences sur le canal de transmission, les divers éléments introduisant dans la conception d'une liaison satellitaire et qui dégradent ses performances.

Le troisième chapitre présente le protocole Aloha et Aloha discrétisé comme des protocoles d'accès aléatoires et offre une analyse du modèle de Markov appliqué au protocole Aloha discrétisé. Il traite le débit d'une communication satellitaire, son amélioration, le problème des pertes des informations par collisions des trames et les performances de ce dernier comme débit et délais de transmissions des paquets d'information. Par la suite, on enchaîne les simulations faites sur le modèle étudié par des interprétations et évaluations des résultats obtenues.

En dernier, une conclusion générale qui résumera tout ce qui a été rapporté et obtenu comme résultat ainsi que des perspectives futures qui devraient intéresser d'autres études.

Chapitre I : Généralités sur les communications satellitaires

I.1. Introduction

Les satellites ont été inventés avec l'idée qu'un point d'observation en très haute altitude puisse servir de relais à de nombreuses autres applications de télécommunications. Avant la conquête de l'espace, ce principe de relais d'ondes électromagnétiques a été assuré par des avions en haute altitude et des ballons. Les progrès technologiques dans ce domaine ont entraîné l'apparition progressive de nouveaux services de télécommunications et de nouvelles applications. Ainsi de nombreux systèmes de télécommunication exploitent actuellement des satellites afin d'assurer des services fixes (satellites - Terre) ou mobiles (satellites - véhicules aéroportés, terrestres ou navals). Les applications peuvent être de type civil ou militaire pour le transfert de données internet, la télévision numérique, la téléphonie, la télémédecine ou la surveillance de la terre. Le réseau satellitaire s'intègre en complémentarité des réseaux terrestres existants. Il offre des services de diffusion, un accès à de vastes territoires et une rapidité de déploiement. Ce chapitre est une introduction générale sur les télécommunications par satellite. L'objectif est de présenter les principales caractéristiques des liaisons et les normes actuelles.

I.2. Historique

La conquête de l'espace est une passion qui a depuis fort longtemps fasciné l'esprit des chercheurs. Par contre l'idée de placer un objet en orbite autour de la terre a commencé à germer seulement au début du XXème siècle. Il a fallu attendre l'année 1945 pour que le concept de satellite voit le jour. C'est le britannique Arthur C. Clarke qui introduit le premier concept de communication par satellite [2]. L'ère spatiale a commencé avec le lancement du premier satellite artificiel actif de l'URSS le 4 octobre 1957, il s'agit de Spoutnik 1. En 1960, les Américains mettent en orbite leur premier satellite (Echo 1) en mode passif. Les deuxièmes types de satellite furent ensuite actifs. Ils possédaient leur propre système de réception et d'émission. Le premier satellite actif, Telstar 1 fut américain. En août 1964, le premier satellite fixe en orbite géostationnaire Syncom 3 permit véritablement d'assurer un service de télécommunication point à point pour des transferts sur longue distance [2]. Depuis 1965, Le premier satellite géostationnaire commercial fut Intelsat I. La même année, le premier satellite de télécommunications soviétiques de la série des Molniya est lancé. Mais il a fallu attendre les années 80, pour assister au " boom des satellites commerciaux". Et grâce à l'évolution des tailles des antennes et des technologies des satellites, les services de diffusion se sont ensuite largement imposés. La multiplication des offres de la télévision a poussé à l'adoption de standards de communication d'abord analogiques puis numériques.

I.3. Les satellites artificiels

Le satellite est défini par le Règlement des Radiocommunications (RR) de l'UIT comme un corps qui tourne autour d'un autre de masse prépondérante et dont le mouvement est principalement déterminé, d'une façon permanente, par la force d'attraction de ce dernier.

Un satellite artificiel est un engin placé en orbite autour d'un astre, en particulier de la Terre, par un système de transport spatial. Les satellites artificiels sont devenus des outils indispensables pour la science, la défense, les télécommunications et pour des applications aussi variées que la prévision du temps, la lutte contre la pollution ou le sauvetage de navigateurs en détresse [3].

I.4. Domaine de développement

Dès le début de l'ère spatiale, la recherche se développera dans trois directions :

- L'exploitation du système solaire et l'univers.
- Les vols habités.
- La surveillance et la gestion de la terre, satellite de navigation, de télécommunication, de détection des ressources terrestres, de météorologie, la pollution, la couche d'ozone, l'effet de serre, la climatologie et bien d'autres domaines sont étudiés en permanence et avec efficacité par les satellites.

I.5. La vie d'un satellite

Un satellite commence sa vie dans l'espace replié sous la coiffe du lanceur (fusé), qui protégé des frottements de l'air lors du passage dans l'atmosphère. Le satellite se sépare du lanceur lorsqu'il est sur l'orbite, les panneaux solaires sont déployés, son altitude par rapport à la terre et au soleil s'adapte, et le satellite effectue les manœuvres nécessaires pour rejoindre son orbite définitive.

C'est la phase de mise en route qui varie selon la mission : tel que

En orbite basse, le satellite est généralement injecté sur une trajectoire proche de celle choisie.

En orbite géostationnaire, il est injecté sur une orbite de transfert, Il n'est cependant pas opérationnel immédiatement.

La phase de recette en vol est destinée à valider un environnement réel de fonctionnement et les performances du système impossible à réaliser au sol. Les différents instruments sont donc progressivement « réveillés » et testés.

I.6. Architecture d'un satellite

Les satellites sont des objets très variés et chaque type a une architecture est un élément central propre à lui. La plate-forme ou « bus » supporte les équipements nécessaires à la mission, qu'on appelle la charge utile et est équipée pour lui fournir les ressources nécessaires à son fonctionnement (Figure I.1) [4].

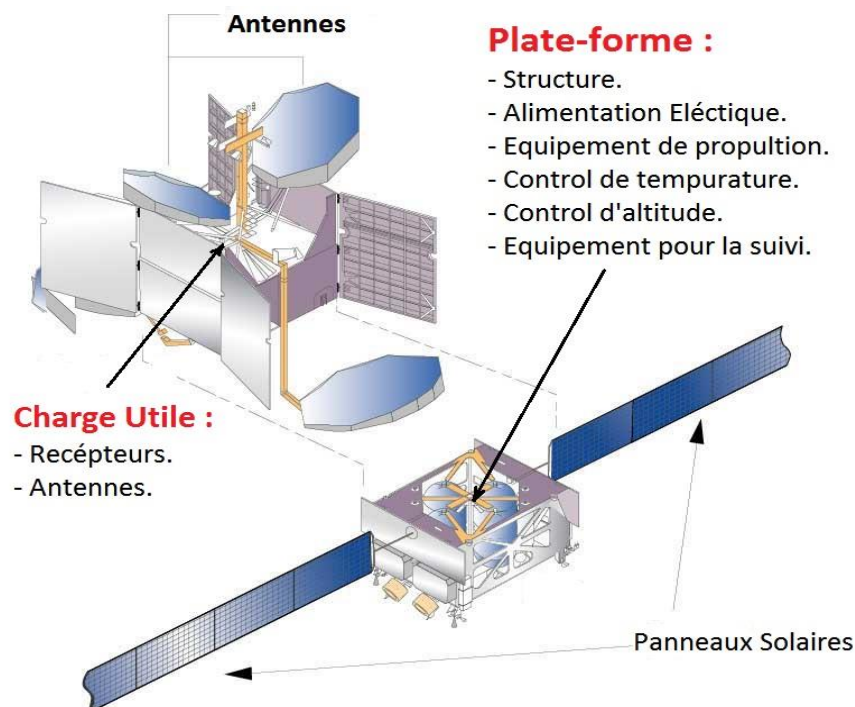


Figure I.1: L'architecture d'un satellite artificiel.

Les satellites sont classés suivant leur masse. On peut les regrouper en 7 catégories, allant du plus grand au plus petit (Tableau I.1).

Satellite	Grand	Moyen	Petit	Mini	Micro	Nano	Pico
Poids	Plus de 3 Tonne	1 à 3 Tonne	500 à 1000 Kg	100 à 500 Kg	10 à 100 Kg	1 à 10 Kg	Inferieur a 1 Kg

Tableau I.1: Classement des satellites par rapport son poids.

I.7. Orbites

L'orbite est la trajectoire décrite par rapport à un système de référence spécifié, le centre de gravité d'un satellite ou un autre objet spatial soumis de façon prépondérante aux forces naturelles, essentiellement les forces de gravitation [2]. La diversité des missions spatiales a pour conséquence une grande variété d'orbites. En fonction de ces missions, les orbites décrites par les satellites de la terre s'organisent en deux grandes catégories.

1.7.1 Ceinture des radiations de Van Allen

On distingue deux zones chargées de protons très énergétiques dues aux rayons cosmiques :

- 1ère zone : 1500 km à 5000 km d'altitude.
- 2ème zone : 13000 km à 20000 km d'altitude.

Les radiations détériorent les équipements électroniques des satellites. Ces zones définissent les trois domaines d'altitude.

1.7.2 Les orbites circulaires ou quasi-circulaires

Les satellites en orbite circulaire sont classés par leur altitude moyenne :

- Orbite basse : LEO (Low Earth Orbit) pour une altitude inférieure à 1500 km et supérieure à 500km. (Figure I.4)
- Orbite moyenne : MEO (Medium Earth Orbit) pour une altitude voisine de 20000 km.
- Orbite haute : GEO (Geostationary Earth Orbit) pour une altitude de 36000 km.

1.7.3 Les orbites elliptiques

Cette orbite est généralement provisoire, puisqu'on y met des satellites à orbite géostationnaire GTO (Geostationary Transfer Orbit) (Figure I.2). Parmi les orbites elliptiques, l'orbite de transfert géostationnaire est caractérisée par une apogée située à 36000 km. Ce qui correspond à l'altitude des satellites géostationnaires.

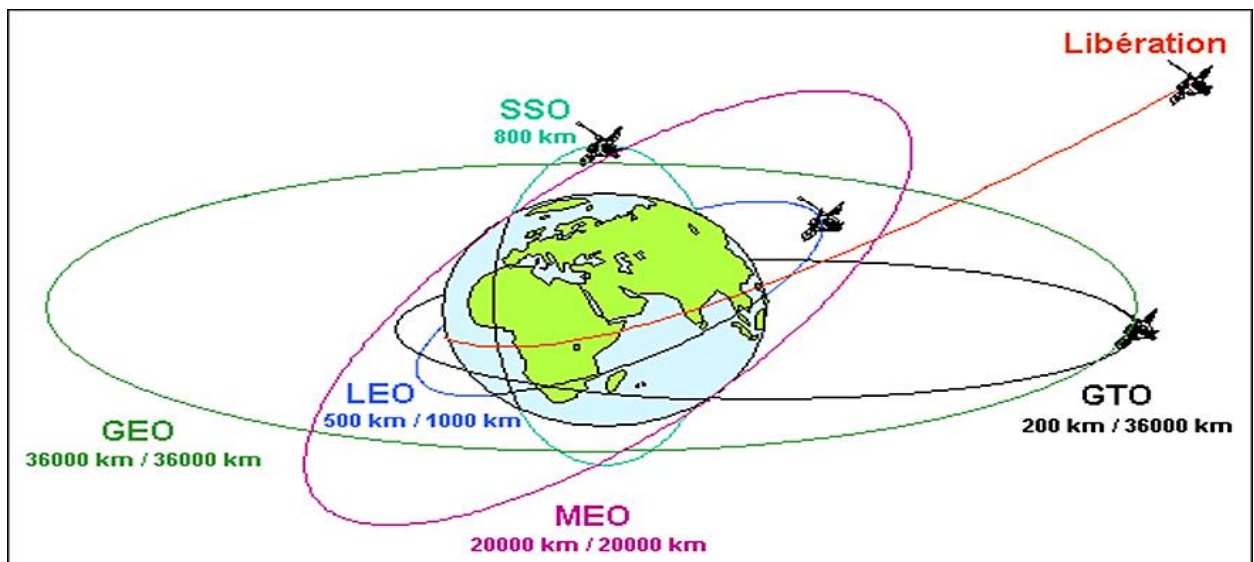


Figure I.2 : Les différentes orbites de la terre.

1.7.4 Autres dénominations

L'orbite très excentrique HEO (Highly Excentric Orbit) : Les satellites qui sont placés sur ces orbites ont une vitesse faible au voisinage de leur apogée, dans cette situation, leur vitesse par rapport au sol peut être très faible, comme s'ils étaient pendant un moment sur orbite GEO.

L'orbite inclinée : Les satellites sont situés sur une orbite inclinée d'un angle par rapport à l'équateur.

L'orbite phrasée : Les satellites ont la propriété de survoler au bout d'un temps fini, le même point (zone) physique de la terre, la période orbitale du satellite doit être dans un rapport rationnel avec la période sidérale de la terre.

L'orbite de parking : On appelle ainsi, des orbites intermédiaires où un satellite ou une sonde interplanétaire sont injectées par un lanceur, avant restitution d'orbite, en attente d'une injection précise notamment pour les transferts interplanétaires.

L'orbite héliosynchrone (polaire) : Cette orbite passant près des pôles présente la particularité de permettre au satellite qui s'y trouve de passer toujours à la même heure solaire au-dessus d'un lieu du globe et peuvent au bout d'un certain temps couvrir toute la surface du globe.

L'orbite de type molniya : Souvent utilisée par les russes ; cette orbite elliptique très excentrique (périgée vers 600 km, apogée vers 40000 km), est inclinée de 63°.

1.7.5 Différentes vitesses de satellisation

Pour pouvoir mettre un satellite en orbite autour de la terre, il faut lui donner une certaine vitesse, elle se nomme première vitesse cosmique. Elle est environ égale à $v_1 = 7,9$ km/s (28080 km/h) Pour les sondes spatiales il faut une vitesse plus importante car la sonde doit s'échapper de la gravitation terrestre (Figure I.3).

Elle est égale à $v_2 = 11,2$ km/s (40320 km/h). C'est la vitesse d'évasion. On a les situations suivantes pour les satellites et sondes Si v est inférieur à v_1 alors l'objet lancé retombe sur la terre.

- Si v est égale à v_1 alors le satellite a une orbite circulaire.
- Si v est compris entre v_1 et v_2 alors le satellite a une orbite elliptique.
- Si v est supérieur à v_2 alors la sonde a une orbite elliptique autour du soleil.

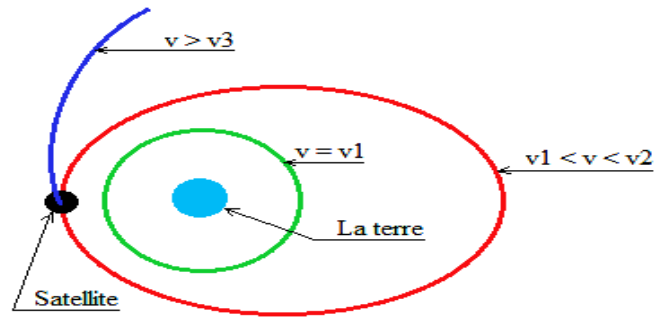


Figure I.3 : Les différentes vitesses de la satellisation.

1.7.6 Scénario de lancement d'un satellite Géostationnaire

- a) Le satellite est lancé de la base de cap Canaveral (USA) à 00 :04 :30 heure locale. Le satellite est mis en orbite basse circulaire autour de la terre. On laisse parcourir le satellite un certain nombre de fois.
- b) Le moteur d'apogée permet d'accélérer la vitesse du satellite et de le positionner sur une orbite elliptique de transfert (GTO).
- c) Dès que l'apogée est atteinte, un changement de vitesse permet de stabiliser le satellite sur l'orbite définitive c.à.d. dans ce cas en orbite géostationnaire, GEO (Figure I.4).



Figure I. 4 : Scénario de lancement d'un satellite Géostationnaire.

I.8. Les satellites de télécommunication

En 1945, Arthur C. Clarke décrit dans son ouvrage que de l'autre côté du ciel un système de satellites artificiels de la Terre pouvant être utilisé dans le domaine des communications afin de relier entre toutes les régions du globe. Le satellite serait mis en place dans l'espace à une altitude de quelque 35 790 km, de telle sorte que sa vitesse de révolution autour de la Terre soit la même que celle de la rotation de notre planète [2].

Un système de communication par satellite est composé d'un secteur spatial composé du satellite plus des moyens de contrôle situés au sol et d'un secteur terrien qui est constitué de l'ensemble des stations utiles situées au sol. Les stations se distinguent par leur taille qui varie selon le volume de trafic à acheminer sur la liaison spatiale.

I.8.1 Définition

Un satellite de télécommunication peut être considéré comme un relais hertzien. Ils permettent par l'intermédiaire de stations terrestre de faire transmettre des données de différentes natures (Données télégraphique, téléphonique, radiodiffusion, télédiffusion, transmission de données, internet... etc.). Les systèmes de télécommunications par satellites sont classés en fonction de l'altitude (orbites) des satellites. On distingue ainsi deux modes d'opération [5]:

Mode passif : Les premiers satellites furent d'abord passifs ; ils se contentaient simplement de réfléchir les signaux émis par les stations.

Mode actif : Le deuxième type de satellites fut ensuite actifs. C'est-à-dire qu'ils possédaient leur propre système de réception et d'émission.

1960	1 ^{er} satellite de communication ECHO.
1963	1 ^{er} satellite géostationnaire SYCHOM.
1965	1 ^{er} satellite commercial géostationnaire (EARLY BIRD, INTELSAT 240canaux de téléphone + 1 canal TV).
1976	3 satellites MARISAT pour la communication maritime.
1982	1 ^{er} système satellite de téléphone mobile INMARSAT-A.
1988	1 ^{er} satellite privé de télécom. Internet PAN AMERICAN.
1993	1 ^{er} système satellitaire de téléphone digitale.
1998	1 ^{er} système global de téléphone portable par satellite.

Tableau I. 2 : Chronologies de quelques satellites de télécommunications.

I.9. Les fonctions utiles

I.9.1 La station spatiale

Un satellite de télécommunications est une sorte de relais hertzien. Des fréquences de longueurs d'onde centimétriques sont utilisées pour acheminer les signaux. Le rôle du satellite est de palier à l'affaiblissement du signal qu'il reçoit, de le régénérer pour le transmettre et l'amplifier en fréquences vers la station terrienne réceptrice. Il ne s'occupe pas de la compréhension des données qu'il reçoit et qu'il doit retransmettre. En réalité, il doit simplement les régénérer pour permettre à la station terrienne de les recevoir convenablement : c'est une sorte de miroir. Les satellites comprennent plusieurs modules (figure I.5) [6].

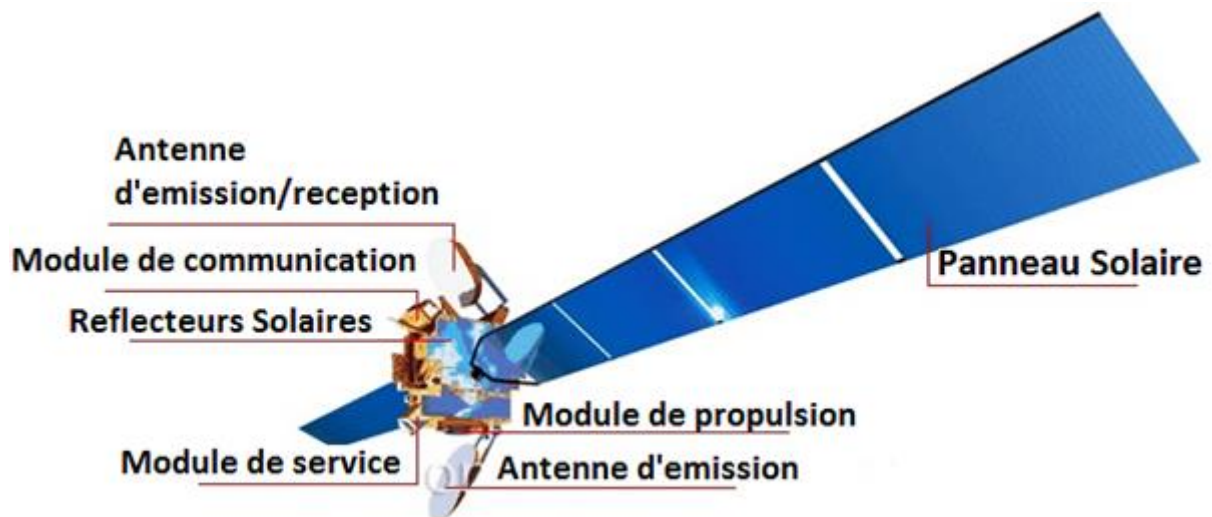


Figure I.5 : Les compositions d'un satellite de communication.

a. Le module de propulsion : Il regroupe le moteur de stabilisation avec ses réservoirs d'ergols et ses tuyères trois axes, La tuyère a la forme d'un cône convergent puis d'une surface divergente qui permet aux gaz de franchir la vitesse du son.

b. Le module de service : Assure la télémétrie, la télécommande, le contrôle de l'altitude et de l'orbite au moyen de la liaison radio avec le sol. Il oriente les panneaux solaires de façon à obtenir la puissance maximale de l'alimentation. Il comprend la batterie pour la télécommande et l'alimentation pendant les éclipses du soleil. Il contrôle l'installation électrique et la température des principaux composants.

c. Le module alimentation et énergie : Diverses sources d'énergie sont utilisables à bord des satellites, mais les conditions propres à chaque mission restreignent considérablement le choix. L'ensemble cellules solaires, batterie d'accumulateurs est la solution la plus fréquemment retenue. Les satellites, quelle que soit leur mission, consomment de l'électricité. Cette énergie électrique peut être obtenue à partir de l'énergie solaire (cellules solaires), de l'énergie nucléaire (générateurs isotopiques ou nucléaires), de l'énergie chimique (générateurs électrochimiques) [7] [8].

d. Le module de communication : Il reçoit le signal de la Terre, le démodule, l'amplifie, le re-module sur des fréquences différentes et enfin, le dirige vers l'antenne d'émission.

e. Le module des antennes : Il est établi en fonction des zones à desservir. Il comprend : l'antenne de réception, la ou les antennes d'émission, l'antenne de télémétrie et de la télécommande. Les signaux captés sont réémis sur une fréquence différente, en général plus basse. Ce changement de fréquence entre les antennes de réception et d'émission est assuré par des appareils appelés répéteurs, chargés également d'amplifier massivement le signal [9]. Le satellite est un répéteur transparent, il n'intervient pas sur le standard du signal transmis.

Selon leur fonction, les antennes de satellite peuvent être classées dans les catégories suivantes : antennes de communication et antennes de satellite spéciale [10] [6]. Les antennes de communication sont utilisées pour le suivi, la télémétrie et le fonctionnement des commandes tout au long des phases de la mission après la séparation du véhicule de lancement. On distinct plusieurs antennes utiliser dans le domaine satellitaire par exemples :

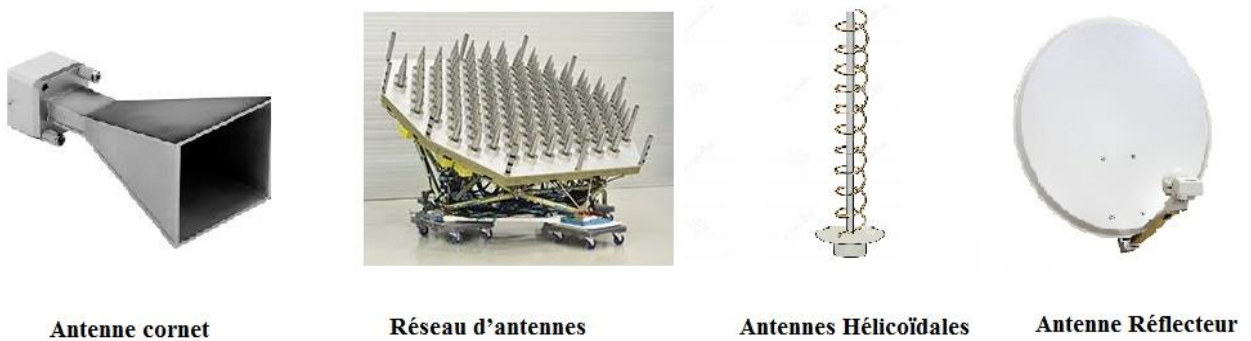


Figure I.6 : Exemples des antennes.

f. Empreinte de pas : Les satellites emploient un faisceau concentré pour donner un signal plus fort au-dessus d'une zone de la terre très petite. Cette zone s'appelle : l'empreinte de pas du satellite.

g. Les transpondeurs : Les satellites commerciaux transportent un certain nombre de transpondeurs. Par exemple un signal télévisé peut disposer d'un transpondeur à lui seul alors qu'un autre transpondeur achemine des centaines d'appels téléphoniques. Les plus grands des satellites commerciaux peuvent être munis d'une cinquantaine de transpondeurs. Le signal capté par un satellite est affaibli par la distance qu'il a parcourue, avant d'être amplifié par des préamplificateurs à faible bruit, il est déphasé du bruit de fond qui l'accompagne, et converti en une fréquence différente.

1.9.2 Les stations terrestres

Les stations terrestres peuvent être de diverses échelles. Les grandes stations, dont les antennes paraboliques peuvent avoir jusqu'à 30 m de diamètre, permettent de collecter les communications d'une zone à un niveau international. Elles sont réservées aux grands opérateurs. Et les petites stations plus légères, les VSAT (Very Small Aperture Terminal), sont dotées des antennes paraboliques d'un mètre de diamètre.

a. **La parabole** : Élément incontournable de la réception satellite. Comme pour une antenne de télévision, c'est elle qui capte le signal venant du satellite et qui le concentre vers le convertisseur. Plus une parabole est grande, meilleur est son gain.

b. **Le LNB (Low Noise Block)** : En réception satellite, le signal recueilli par l'antenne parabolique est trop faible pour pouvoir l'exploiter directement ; il faut l'amplifier, c'est l'un des rôles du LNB nommé également tête.

c. **Le démodulateur** :

Cet appareil peut recevoir un signal modulé en hautes fréquences et le transformer en informations basses fréquences. En réception, il permet l'obtention des signaux audio, vidéo et données véhiculées par une onde porteuse, afin de les restituer via les circuits du téléviseur ou d'un ordinateur. Il transforme les fréquences en tensions et traite l'information de façon à ce qu'elle soit lue par un ordinateur.

d. **Mode d'utilisation des Satellites** : Un satellite de télécommunications peut être utilisé comme un simple relais hertzien entre deux stations terrestres, mais il comprend également d'autres options intéressantes. Il offre ainsi une capacité de diffusion, pouvant retransmettre les signaux émis depuis la Terre vers plusieurs stations espacées. Réciproquement, le satellite peut capter des informations en provenance de différentes stations d'émission, présentant dans ce cas une capacité de collecte. De plus, il est maintenant possible de concevoir des systèmes de liaisons directes entre satellites. Bien qu'ils soient très complexes à mettre en œuvre, Iridium a mis en place en 1999, un système de téléphonie mobile mondiale assuré par un réseau de 66 satellites en orbite basse, où chacun est relié à quatre autres satellites.

1.9.3 Les systèmes Satellitaires

II.3.1.1. Les systèmes GEO (Geostationary Earth Orbit)

Ils correspondent à des satellites évoluant sur l'orbite géostationnaire. Les systèmes GEO ont été les premiers utilisés et restent aujourd'hui majoritaires. L'orbite est extrêmement encombrée et l'on trouve presque un satellite tous les deux degrés. L'avantage de cette orbite est évidemment le fait que le satellite reste fixe par rapport à la Terre et qu'il n'est pas nécessaire de le poursuivre au moyen d'antennes mobiles au sol. L'avantage vient aussi du fait que l'altitude du satellite étant très élevée (ce dernier "voit" environ 42% de la surface de la Terre (Trois satellites suffisent pour couvrir tout le globe). Les inconvénients sont le temps de propagation, il faut compter environ 250 ms pour un aller et retour vers le satellite.

II.3.1.2. *Les systèmes MEO (Medium Earth Orbit)*

Ils correspondent à des satellites évoluant en orbite moyenne. Le système (ICO Global Communications) se base sur une constellation de 10 satellites sur 2 plans inclinés de 45°.

II.3.1.3. *Les systèmes LEO (Low Earth Orbit)*

Ils correspondent à des satellites évoluant en orbite basse. Plusieurs grands systèmes (Iridium, Globalstar, SkyBridge, Teledesic) se basent sur de telles constellations. L'avantage de ces systèmes est le temps de propagation très court, typiquement 10 ms de temps de propagation pour un satellite à 1.500 km d'altitude. Cet avantage fait de ces systèmes d'excellents candidats pour des applications interactives mettant en jeu des terminaux mobiles avec des antennes omnidirectionnelles et des amplificateurs de faibles puissances.

II.3.1.4. *Les systèmes elliptiques*

Ils correspondent à des satellites évoluant en orbite elliptique. Ce type de satellite est utilisé depuis 1967 par le système Molniya qui assure des télécommunications pour la Sibérie. Son orbite est inclinée de 63° par rapport au plan équatorial.

I.10. Les modes de liaison

Il y a essentiellement deux types de liaison pour les télécommunications par satellites [6]:

I.10.1 Les liaisons fixes (de type point à point)

Il s'agit des liaisons montantes vers le satellite. Dans ce cas, le point d'émission et le point de réception sont parfaitement connus géographiquement, et le trajet de l'information est parfaitement défini.

I.10.2 Les liaisons en diffusion hertzienne (de type point à multipoint)

Le point émetteur est parfaitement connu. Mais la réception se fait sur une zone généralement large dans laquelle les récepteurs sont fixes ou mobiles. Il s'agit, notamment, des émissions de radio ou de télévision reçues par voie hertzienne à partir d'un satellite.

I.11. Les bandes de fréquences

Pour éviter un chaos total dans le ciel, une réglementation internationale spécifique et stricte a été mise en place par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT-T) concernant la répartition des fréquences ; elle fait partie intégrante du règlement international des radiocommunications. Cette réglementation définit notamment la position orbitale des satellites et les bandes de fréquences qu'ils doivent utiliser et respecter.

I.11.1 Les fréquences

Les bandes de fréquences mises en œuvre pour les communications par satellite sont le plus souvent comprises entre 1 et 30 GHz. La bande de fréquence 1-30 GHz est divisée en sous bandes désignées par des lettres (Tableau I.3) [9].

I.11.2 Les Bandes des Fréquences

Bande	Bande de fréquence (GHz)	Services
<i>Service mobile par satellite</i>		
VHF	0.03 – 0.3	Messagerie
UHF	0.3 – 1.0	Militaire, Navigation mobile
L	1 - 2	Diffusion audio, Radiolocalisation
S	2 - 4	Navigation mobile
<i>Service fixes par satellite</i>		
C	4 - 8	Radiodiffusion
X	8 - 12	Militaire
Ku	12 - 18	Diffusion vidéo
Ka	27 - 40	Diffusion audio
<i>Service de Radiodiffusion par satellite</i>		
K	18 - 27	Observations astronomiques, radars
Onde mm	> 40	Inter satellite

Tableau I. 3 : Les bandes des Fréquences et quelque des services.

I.12. Constellations des satellites

Une constellation est constituée des satellites dont les mouvements sont synchronisés entre eux et dont les trajectoires par rapport à la Terre se reproduisent à l'identique au bout d'une durée constante, le plus souvent de plusieurs jours [9]. C'est un véritable mouvement d'horlogerie en orbite qui est mis en place, permettant une couverture mondiale et une utilisation aisée par l'utilisateur. Les offres du lanceur et les possibilités de lancements multiples rendent possible

maintenant le déploiement de dizaines de satellites constituant généralement une constellation dans un délai acceptable par les opérateurs.

Différents types de constellation peuvent être distingués :

- Les constellations en orbite intermédiaire à plus de 5 000 kilomètres d'altitude, avec des périodes de révolution autour de la Terre d'environ 12 heures ; c'est le cas des systèmes de satellites de positionnement GPS en place et de la future constellation Galileo.
- Les constellations en orbite basse à une altitude inférieure à 1 500 kilomètres avec des périodes de révolution d'environ 2 heures, représentées par les systèmes de satellites de télécommunication Globalstar et Iridium.

I.13. Les Services de télécommunications par satellites

Plusieurs types de services de communications par satellites sont définis dans la réglementation : le service fixe par satellite (SFS), le service mobile par satellite (SMS) qui comporte un service mobile terrestre et un service mobile maritime, le service de radiodiffusion par satellite (SRS). Selon le Règlement de l'UIT-T, la télécommunication est " toute transmission, émission ou réception de signes, de signaux, d'écrits, d'images, de sons ou de renseignements de toute nature par fil, radioélectricité, optique ou d'autres systèmes électromagnétiques " [11].

I.13.1 La téléphonie

On peut distinguer les systèmes de la téléphonie fixe par satellite et les systèmes de la téléphonie mobile par satellite. La téléphonie fixe par satellite concerne essentiellement les appels internationaux qui mettent en jeu un satellite. Les satellites utilisés sont de type géostationnaire.

A côté de la téléphonie fixe par satellite on trouve la téléphonie mobile par satellite et dans ce domaine, deux familles de systèmes existent :

- Les systèmes de téléphonie mobile par satellite géostationnaires (GEO).
- Les systèmes de téléphonie mobile par satellites MEO et LEO.

Parmi les systèmes utilisant des satellites GEO on peut citer Inmarsat qui a été le premier système de communications mobiles par satellites d'abord pour la desserte en mer puis en avion et en terrestre. Et Thuraya offre un service de téléphonie mobile sur l'Asie centrale, le Moyen Orient, l'Afrique centrale et l'Europe. Parmi les systèmes de téléphonie mobile par satellites LEO on citera Iridium et Globalstar.

1.13.2 La télédiffusion

La transmission vidéo par satellite est la première application des satellites de télécommunications. Elle est estimée à 60% de la capacité du secteur spatial. Le premier système de télédiffusion directe numérique par satellite DIRECT TV aux Etats Unis est entré en service en 1994. En France deux bouquets ont été lancés en 1996 (TPS et Canal Satellite). Ces systèmes utilisent des satellites géostationnaires ce qui permet d'utiliser des antennes fixes chez les usagers. DIRECT TV possède ses propres satellites alors que Canal Satellite utilise un satellite Astra et TPS un satellite Eutelsat Hot Bird.

1.13.3 La transmission des données

Les réseaux d'entreprise par satellite sont apparus vers 1980 grâce à la diminution de la taille des stations terriennes. On parle de VSAT (Very Small Aperture Terminal) pour des stations terriennes dont le diamètre d'antenne est inférieur à 2,4 mètres.

1.13.4 Le multimédia

Le multimédia haut débit se situe à la convergence de l'audiovisuel, de l'informatique et des télécommunications. Il bénéficie des nouvelles capacités techniques des satellites de télécommunication multimédia (bandes de fréquence Ka et Ku) et offre une très large gamme de services :

- Voix, vidéoconférence, visiophone
- Tous les services de données possibles : symétriques ou asymétriques, moyen et haut débit, multimédia ou non, interactifs ou différés, etc.
- Applications : télétravail, télémédecine, télé-enseignement, télé-achat, tout échange de données.
- Accessibilité directe pour tous les usagers par des terminaux adaptés, dans le monde entier, même sans infrastructure Télécom au sol.

1.13.5 La radiomessagerie

La radiomessagerie par satellites est un service offert sur plusieurs satellites GEO comme Inmarsat-C et D, OmniTracs ou encore EutelTracs. Elle existe aussi sur des constellations en orbite basse telle OrbComm.

1.13.6 L'Internet

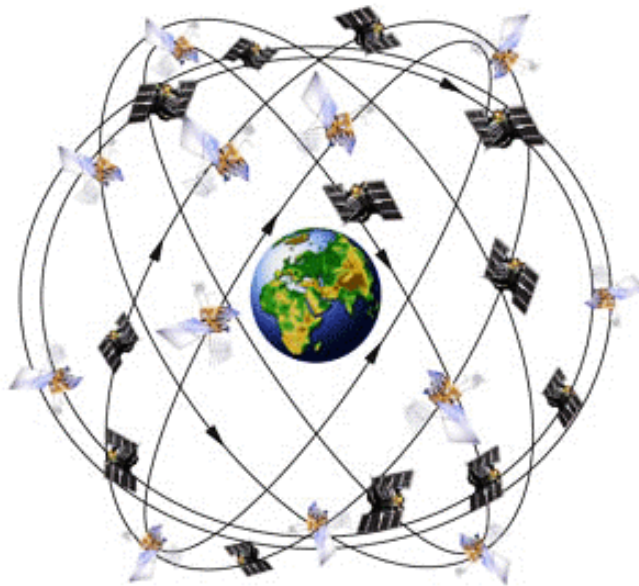
L'Internet par satellite est un sujet d'actualité, et le satellite fait partie des solutions d'accès local au même titre que le LMDS, l'ADSL, les solutions câblés ou d'autres technologies. SkyBridge d'Alcatel qui font partie de ce type de systèmes.

1.13.7 Positionnement (Localisation)

Le système GPS permet de donner les coordonnées géographiques dans le monde entier. Le GPS fonctionne avec une constellation de 30 satellites en orbite autour de la Terre [12] (Figure I.7). Chaque satellite envoie sur Terre des signaux qui comportent :

- La position dans l'espace du satellite
- L'heure et la date d'émission du signal

Votre puce GPS, qu'elle soit contenue dans un smartphone ou un boîtier GPS, se contente de capter ces signaux. Quand votre appareil a reçu les signaux d'un minimum de 4 satellites, alors en calculer sa propre latitude, longitude et altitude, et donc de vous dire où vous êtes.



***Figure I.7:** Constellation des satellites de localisation.*

Le GPS

Chaque satellite possède une horloge atomique maintenue à 7 us du temps UTC et émet à 2 fréquences élevées en bande L de $L_1=1560$ MHz (longueur d'onde : 19 cm) et $L_2= 1230$ MHz (longueur d'onde : 24 cm). Cette fréquence ne traverse ni béton ni feuillage dense .il est donc nécessaire que le récepteur soit dans une zone dégagée. Trois types de signaux sont émis par les satellites de blocs I, II, IIA et IIR :

- Un message de navigation du système (état, identification, position, temps) sur L_1 à 50 Hz durant 30sec.
- Un code dit C/A (Clear/Access ou Code/Accession) au rythme de la milliseconde, permettant mesure de la distance, module L_1 . Code de 1023 bits est émis à 1.023 Mbits/sec, il dure 1 seconde. C'est ce signal qui peut être dégradé par une erreur volontaire appelée SA (sélective availability).
- Un code dit P ou Y (Précision) à intervalles longs et réservé uniquement aux utilisateurs privilégiés du GPS. Ce code est émis sur L_1 et L_2 à une fréquence 10 fois plus grande de 10.23Mbits/sec. Sa durée est de 7 jours. Les clients utilisent des clés de décryptage.
- Les satellites de nouvelles générations, bloc IIR-M diffuseront un nouveau code exclusif aux militaires américains (code M) sur les porteuses L_1 et L_2 . Quant aux satellites bloc IIF, ils transmettront de plus une nouvelle onde porteuse L_5 qui sera modulée par 2 nouveaux code civils I5 et Q5.

a) Principe de localisation GPS

Le principe de localisation est simple. En effet, si on imagine de vouloir localiser un point M, de la surface du globe terrestre, il suffit d'entrer en contact avec 3 satellites. Chaque satellite envoie son numéro d'identification, sa position précise par rapport à la terre, ou dans le repère lié à Greenwich, l'heure exacte d'émission du signal. Le récepteur GPS, grâce à son horloge supposée synchronisée sur celle des satellites, calcule donc le temps de propagation à la vitesse de la lumière et en déduit la distance au satellite.

- Le point M est donc sur une sphère de rayon D_1 et de centre le satellite S_1 , l'intersection avec le globe donne un premier cercle C_1 .
- Le point M est aussi sur une sphère de rayon D_2 et de centre le satellite S_2 , l'intersection avec le globe donne un deuxième cercle C_2 . Les cercles C_1 et C_2 se coupent donc en 2 points.

Le point M est enfin sur une sphère de rayon D_3 et de centre le satellite S3, l'intersection avec le globe donne un troisième cercle C3. C'est le troisième satellite "qui lève l'indétermination" et précise de manière unique le point M cherché (Figure I.8).

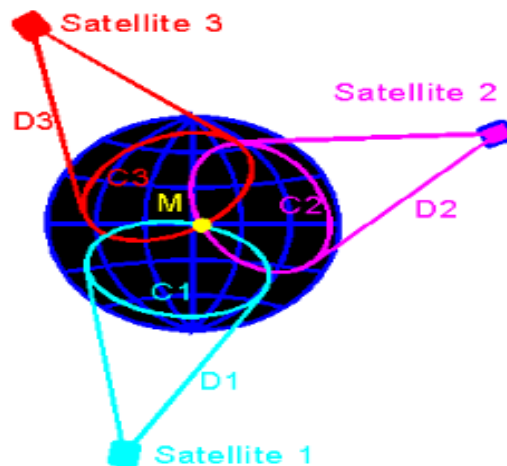


Figure I.8: Le principe de triangulation par satellite.

L'horloge du récepteur est moins précise que celle du satellite et n'est jamais parfaitement synchronisée. Le calcul consiste donc à résoudre des équations dont les inconnues sont les trois coordonnées X Y Z de M, et une erreur de temps et inconnue mais identique pour toutes les mesures des distances approchées D_1, D_2, D_3, \dots puisque tous les satellites sont parfaitement synchronisés entre eux. Ainsi le récepteur utilise les données de quatre satellites, soit par des mesures successives avec une seule voie de réception, soit par des mesures simultanées avec un récepteur à plusieurs voies. Cette dernière méthode est impérative pour des engins évoluant à grande vitesse.

Le GPS assure en tous points du globe un positionnement et une navigation en trois dimensions, précis à 100 mètres près pour les utilisateurs classiques (soumis à une dégradation éventuelle aléatoire des signaux), et approchant 10 mètres dans le plan horizontal et 15 mètres en altitude pour les usagers privilégiés ou l'armée américaine.

GPS Différentiel : La méthode consiste à utiliser un récepteur placé en une station connue. Il calcule donc l'erreur volontaire SA dont nous avons parlé plus haut, et qui dégrade la précision. Cette information de correction est alors répercutée sur les récepteurs du voisinage. C'est ainsi que fonctionnent les avions qui peuvent alors se positionner à quelques mètres près. Tel que, les nouvelles techniques permettent d'atteindre une précision centimétrique.

Enfin, nous ajoutons que le système GPS est américain et est géré par le département de la défense des USA. L'usage de ce système par tous les autres pays que les États-Unis est souvent considéré comme une dépendance qui ne plaît pas toujours (pour des raisons géopolitiques). Pour cet effet, différents états prévoient leurs propres systèmes de positionnement par satellite :

- La Russie a son système Glonass.
- L'Europe met actuellement en place les satellites du système Galileo.
- La Chine a son système Beidou.
- L'Inde et le Japon ont également en projet leur système régional.

I.14. Les techniques d'accès au canaux satellitaires

Les canaux satellite, comme tous les systèmes à canaux partagés, demandent une technique d'accès. Dans le cas de satellites géostationnaires, les stations terrestres ne découvrent qu'il y a eu chevauchement des signaux que 0,27seconde après leur émission (elles peuvent s'écouter grâce à la propriété de diffusion) (Tableau I.5), ce qui représente une perte importante sur un canal d'une capacité de plusieurs mégabits par seconde due à long délai de propagation (Figure I.9).

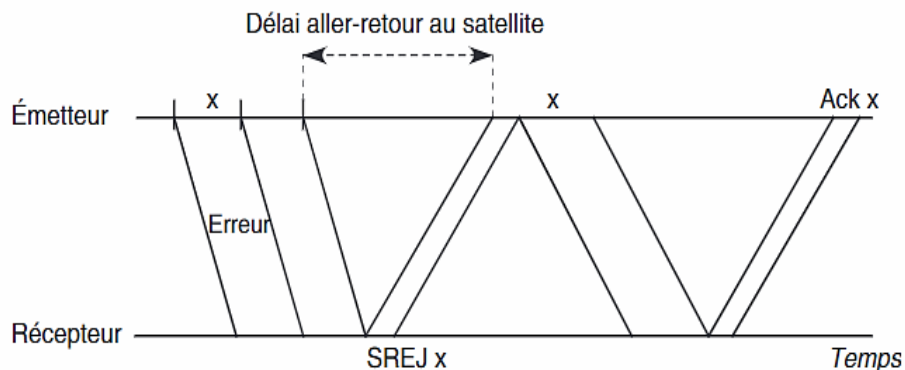


Figure I.9: Reprise sur une liaison satellite.

Orbite	Altitude moyenne d'orbite	Délai d'aller	Délai d'aller-retour
LEO	800 km	2.7 ms	5.4 ms
MEO	10 355 km	34.5 ms	69 ms
GEO	35 786 km	119.3 ms	238.6 ms

Tableau I. 4 : Délai de propagation dans différentes orbites.

1.14.1 Modèle OSI de l'ISO

Afin de fournir une base commune pour décrire les systèmes de communication et réduire la complexité de conception d'un réseau, l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO : International Organization for Standardization) a introduit un modèle d'interconnexion de système appelé OSI (Open Systems Interconnection) [13]. Le concept important du modèle OSI est l'organisation en couche : chaque couche représente un module indépendant qui contient un ensemble de fonctions et utilise les services de la couche inférieure. Les données sont traitées successivement couche par couche, chaque couche ajoute un en-tête à l'émission qui sera retiré puis utilisé à la réception. Le modèle de référence OSI contient 7 couches, l'organisation et la fonctionnalité de chaque couche sont montrées dans la Figure I.10 :

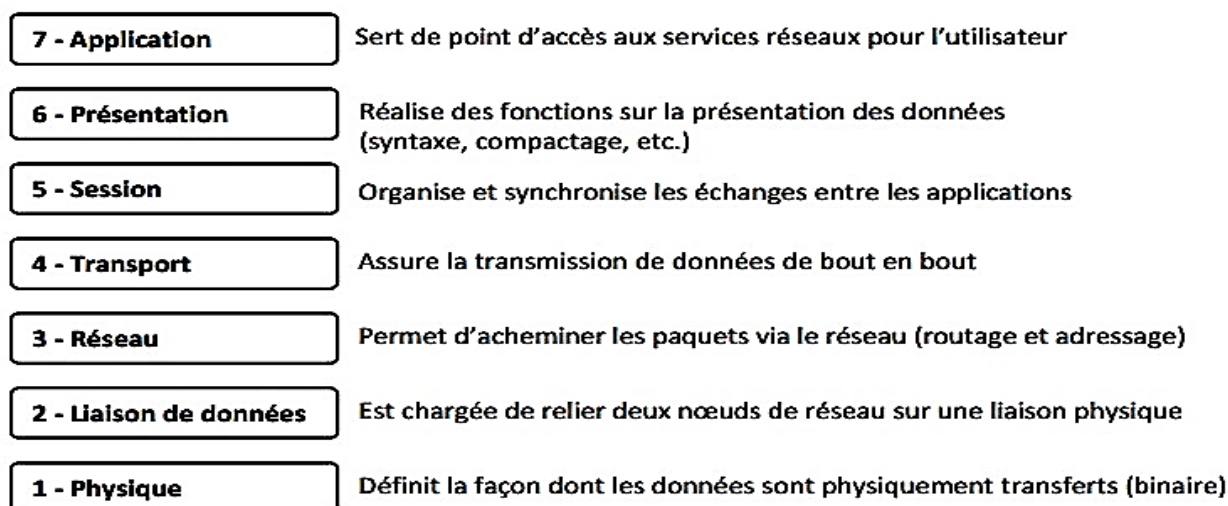


Figure I.10 : Les différentes couches du modèle OSI.

1.14.2 La couche MAC

La sous-couche MAC est une partie de la 2^{ème} couche OSI : liaison de données qui a le rôle de gérer l'accès au canal de transmission. Le rôle de la sous-couche MAC (Medium Access Control) est principalement de gérer le problème du conflit d'accès lorsqu'un même médium de communication est partagé pour multiples systèmes. La stratégie communément adoptée consiste tout d'abord à simplifier ce problème en faisant en sorte que les conflits ne se produisent pas à l'échelle d'un bit de donnée mais plutôt à l'échelle d'un ensemble de bits. Pour cela, le MAC impose à chaque système expéditeur de regrouper les données qu'il transmet en paquet de bits. De plus, les systèmes de transmission n'étant que rarement suffisamment synchrones, ces paquets doivent généralement être délimités par des séquences de bits de contrôle aisément reconnaissables. L'ensemble résultant est appelé une trame. Le MAC doit aussi gérer le problème

du conflit. Ce problème est généralement résolu en deux étapes. La première consiste à choisir une technique de base afin d'isoler le trafic généré par différentes stations. Cette technique de base est généralement appelée technique d'accès. Comme ces techniques ne sont généralement pas suffisantes, il convient ensuite d'établir la politique d'accès aux ressources de communication. Cette politique est généralement appelée schéma d'accès. L'ensemble de ces deux aspects est le protocole d'accès.

1.14.3 Méthodes d'accès ou Techniques MAC

Dans cette section, on va discuter brièvement les techniques principales d'accès au canal [1]. Ces techniques de base peuvent servir pour définir ensuite les protocoles d'accès qu'on va étudier dans ce mémoire.

1.14.4 Les politiques de réservation fixe

Les politiques de réservation fixe, ou FAMA (Fixed-Assignment Multiple Access), utilisées dans les systèmes satellitaires, sont les mêmes que celles utilisées dans les réseaux de mobiles : FDMA, TDMA et CDMA. Actuellement, la CDMA n'est pas employée dans les réseaux satellite, mais elle devrait venir en complément des techniques terrestres de troisième génération, telles que l'UMTS, le CDMA 2000, etc [1].

1.14.5 Les politiques d'accès aléatoire

Les techniques d'accès aléatoire ont été introduite dans le réseau satellite, où le délai de propagation est très important, les stations terrestres qui émettent des signaux ne sont informées d'une éventuelle collision de leur paquet que 270 ms après l'émission. L'accès aléatoire consiste donc, pour les stations terrestres, à émettre dès qu'elles ont un paquet de données en leur possession. S'il y a collision, les stations terrestres concernées s'en aperçoivent puisqu'elles écoutent les signaux émis sur le canal. Les paquets perdus sont retransmis ultérieurement, après un temps aléatoire, de façon à réduire au maximum le risque de nouvelles collisions. La **Figure 1.11** illustre la collision entre deux paquets sur un canal satellite.

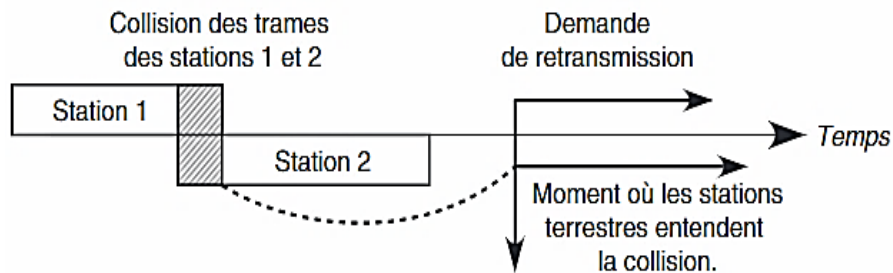


Figure I.11: Collision entre deux paquets sur un canal satellite.

1.14.6 Les techniques d'accès aléatoires

Les deux grandes catégories de politiques d'accès aléatoires sont l'ALOHA et l'ALOHA discrétisé. La technique ALOHA tire son nom d'un mot hawaïen, car elle a pour origine des expériences réalisées à l'Université de Hawaï pour relier les centres informatiques dispersés sur de nombreuses îles. Dans le système ALOHA, la propriété de diffusion et les codes détecteurs d'erreur permettent aux stations terrestres de savoir si leurs émissions de paquets se sont effectuées correctement. Si ce n'est pas le cas, les paquets sont retransmis après un délai aléatoire. Ce délai est un paramètre essentiel, qui détermine les performances du système.

Des méthodes d'évaluation de performance montrent que, si le nombre de stations terrestres est très grand et tend mathématiquement vers l'infini et qu'aucune politique précise ne soit suivie pour la retransmission des messages perdus dans les collisions, l'utilisation du canal tend vers 0, et le débit devient nul. Les deux grandes politiques de contrôle consistent à allonger les temps avant retransmission en fonction du nombre de paquets en attente de réémission ou bien à stopper les nouvelles émissions dès que le nombre de paquets en attente de retransmission dépasse une valeur fixée à l'avance. Malgré tout, le débit maximal correspond à une utilisation du canal satellite égale à 0,184 Paquet/slot.

Le concept d'ALOHA discrétisé repose sur la division du temps en tranches de longueur égale correspondant au temps de transmission d'un paquet, qui, de ce fait, doit avoir une longueur constante. Les collisions se produisent dans ce cas sur l'ensemble de la tranche, et non plus, comme avant, sur des parties de paquets seulement (voir figure I.12). Les émissions doivent être synchronisées en début de tranche de temps.

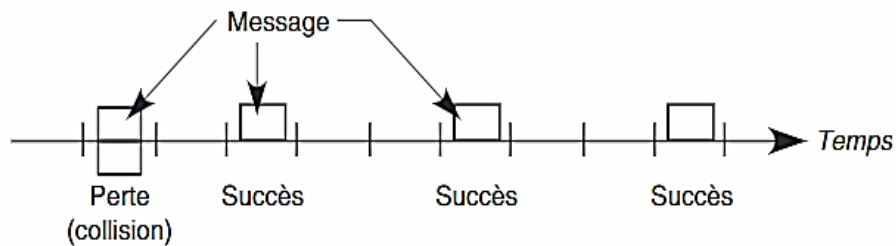


Figure I.12 : Aloha en tranches.

Par cette méthode, on peut atteindre un débit de 0.368 Paquet/slot.

Technique	Délai	Débit	Utilisation du canal	Complexité d'implémentation	Puissance maximale requise	Sensibilité déséquilibre de puissance
Aloha pur	Moyen	Faible	Faible	Faible	Haute	Faible
Aloha discrétisé	Faible	Moyen	Faible	Faible	Haute	Faible
CSMA	Haute	Haute	Haute	Faible	Haute	Moyen
CSMA CD	Haute	Haute	Haute	Moyen	Haute	Moyen
CSMA CA	Haute	Haute	Moyen	Faible	Haute	Moyen

Tableau I. 5: Comparaison entre quelques protocoles d'accès aléatoires.

I.14.7 PODA (Priority-Oriented Demand Assignment)

La procédure PODA utilise également une réservation par paquets. Dans ce cas, la trame est divisée en une première partie, qui permet de réaliser des réservations, et une seconde pour le transport des paquets des émetteurs ayant réussi leur réservation. Toutes les stations écoutent la partie réservation et utilisent le même algorithme pour classer les réservations. La frontière entre les deux parties dépend du nombre de stations et de la charge globale

I.14.8 Les protocoles de réservation dynamique et les méthodes hybrides

Les protocoles de réservation dynamique allouent les ressources en fonction de la demande des utilisateurs. Des priorités peuvent être attribuées aux différents utilisateurs. Le séquenceur, qui peut se trouver dans le satellite, organise les réservations suivant les niveaux de priorité. Les garanties de service dépendent de l'allocation des ressources. Par exemple, CF-DAMA (Combine Free DAMA) garantit une qualité de service pour les priorités hautes et une distribution équitable des ressources restantes pour les basses priorités.

I.14.9 Techniques hybrides

Un grand nombre de techniques hybrides ont été proposées, parmi lesquelles les trois suivantes :

- **L'association d'un protocole FAMA**, qui assure une qualité de service pour quelques classes de clients à haute priorité, et d'une politique DAMA, pour partager le reste de la bande passante.

Un exemple d'une telle solution est offert par la politique FBA/DAMA, qui fournit une garantie minimale de bande passante sur une partie, le reste de la bande passante étant répartie par une technique DAMA.

- **Le schéma RRR** (Round-Robin Reservation), requiert un nombre de stations inférieur au nombre de tranches nécessaires à la discipline TDMA. Chaque station possède une tranche dédiée. Les tranches restantes sont accédées par les stations suivantes selon un accès aléatoire de type Aloha.

- **La technique IFFO** (Interleaved Frame Flush-Out), dans laquelle la trame est divisée en trois parties, une pour le contrôle, une pour les tranches réservées et une pour l'accès aléatoire. La partie contrôle, qui est subdivisée en mini tranches, une pour chaque station, permet d'effectuer des réservations. Tous les émetteurs qui deviennent actifs après le passage de la partie réservation de la trame peuvent accéder aux tranches en libre-service. Si une collision se produit, les stations concernées utilisent leur tranche réservée. Les tranches appartenant à la partie réservée mais qui n'ont pas fait l'objet d'une réservation peuvent être utilisées pour l'accès aléatoire.

I.15. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude générale sur les satellites, et en particulier les satellites des télécommunications, où nous avons expliqué leur composition, l'opération de la mise en orbite, le principe de fonctionnement et les différents services qu'ils peuvent offrir. La localisation par satellite est parmi les services largement utilisé, et qui ne cesse de s'améliorer en donnant une rapidité meilleure avec plus de précision. Pour cela, une explication bien détaillée a été abordé au cours de ce chapitre. En fin, nous avons entamé l'étude sur les techniques pour l'accès au canal de communication satellitaires. Une étude qui comporte la description des protocoles d'accès aléatoire souvent utilisé dans les liaisons satellitaires. Ces protocoles souffrent à nos jours de faibles performances en termes de débit et délais de transmission, ce qui influe sur la qualité de la liaison.

Chapitre II : Bilans du Liaison Satellitaire

II.1. Introduction

L'évaluation de l'état d'une liaison satellitaire se reporte au calcul de son bilan de liaison. Dans ce chapitre, nous exposons les différents paramètres dont il faut tenir compte lorsqu'on étudie le bilan de la liaison satellitaire future ou déjà existante, en tenant compte bien évidemment des conditions dans lesquelles ces paramètres fonctionnent. Et, nous donner un exemple de calcul d'un bilan de liaison satellitaire afin d'illustrer l'application de ces paramètres. L'impact de la qualité de quelques modules composant la liaison, comme l'antenne émettrice et réceptrice, sur la qualité de la liaison est illustré dans le reste du chapitre.

II.2. Liaison satellitaire

Dans une liaison satellitaire, le signal émis par l'émetteur arrive au récepteur faible pondant la transmission malgré les gains des antennes et les amplificateurs utiliser (Figure II.1).

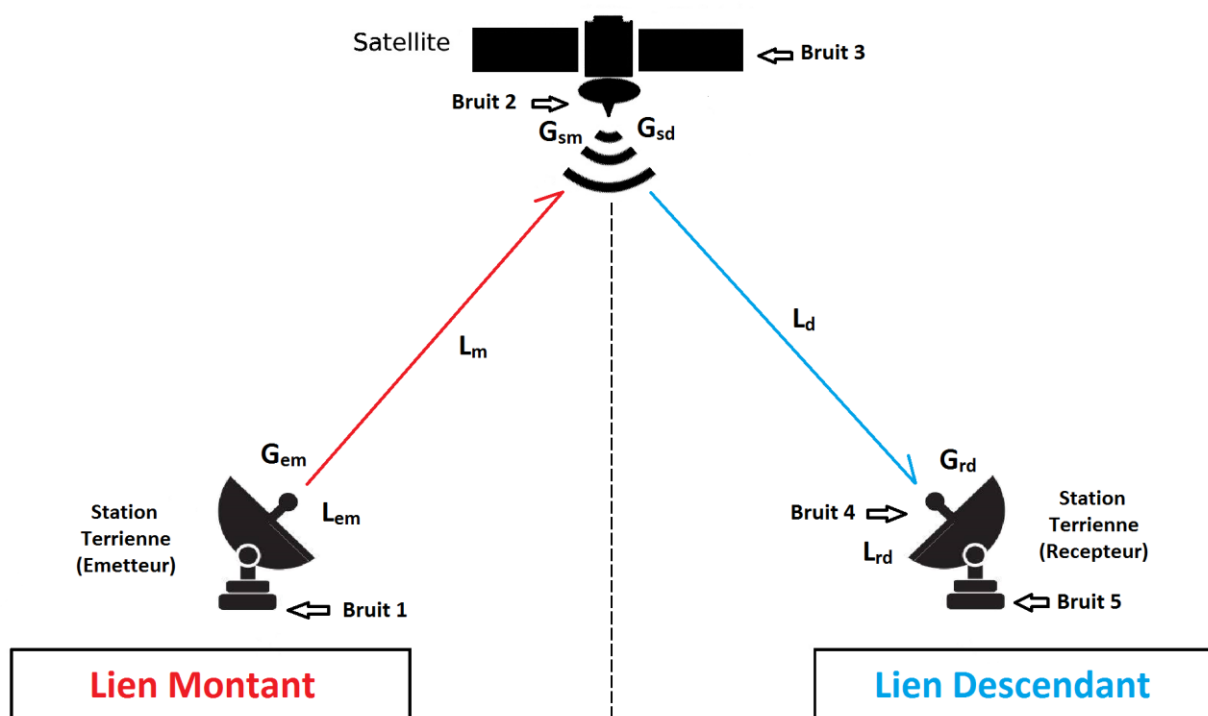


Figure II.1 : Liaison satellitaire et ces paramètres.

Une liaison satellite est peut-être décomposé en deux parties essentielles :

- Le lien montant : désigne la partie du lien depuis la station émettrice terrienne vers le satellite.
- Le lien descendant : désigne la partie du lien depuis le satellite jusqu'à la station réceptrice terrienne.

II.3. Bilan de liaison

Le bilan de liaison (ou Link budget en anglais) est un outil fondamental pour dimensionner les puissances à mettre en jeu dans un canal de transmission, c'est l'ensemble des équations que permettant de calculer le rapport signal utile sur bruit en sortie du récepteur en fonction de tous les paramètres qui influent sur la puissance de l'onde émise. [14].

Nous avons donc deux bilans de liaisons distincts. Pour chacun des deux nous retrouvons les paramètres : G/T_B qui est le facteur de mérite, la *PIRE* (Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente) et les puissances et les antennes utilisées sont très diverses d'une station à une autre. Nous avons inclus quelques critères de performances des protocoles d'accès au canal et leurs influences sur la qualité de liaison satellitaire.

II.3.1 Paramètres généraux

II.3.1.5. Le rapport signal sur bruit (C/N)

Le rapport puissance de la porteuse, sur densité de la puissance du bruit, C/N_0 , s'exprime en décibels Hertz [dB Hz] et se réfère au rapport de la puissance de la porteuse sur la puissance du bruit ramené à sa bande passante. Soit la puissance du bruit, divisée par la bande passante de sa densité spectrale de puissance.

$$S/B = \frac{P_s}{P_b} \quad (\text{II. 1})$$

$$S/B = \left(\frac{U_s}{U_b} \right)^2 \quad (\text{II. 2})$$

$$S/B_{dB} = 10 \log(S/B) \quad (\text{II. 3})$$

II.3.1.6. Le rapport l'énergie par bit sur bruit (E/N)

E_b/N_0 est le rapport de l'énergie par bit divisée par la densité spectrale de puissance de bruit. Il permet de comparer les taux d'erreur binaire (TEB) (efficacité) des différents systèmes de modulation numérique. Ces deux facteurs sont normalisés et la bande passante n'est plus une préoccupation.

$$C/N_0 = E_b/N_0 \cdot R \quad (\text{II. 4})$$

$$\left(C/N_0 \right)_{dB} = \left(E_b/N_0 \right)_{dB} + 10 \log R \quad (\text{II. 5})$$

R : est le taux réel de bits d'information.

II.3.1.7. Affaiblissement de propagation (A_p)

L'affaiblissement de propagation est égal au rapport de la puissance isotrope rayonnée équivalente de l'émetteur, à la puissance disponible à la sortie d'une antenne de réception isotrope.

$$A_p = AEL - L_{fs} \text{ (dB)} \quad (\text{II. 6})$$

L'effet du sol local à proximité de l'antenne est pris en compte dans le calcul du gain d'antenne, mais non dans celui de l'affaiblissement de transmission [11].

▪ Affaiblissement d'Espace Libre (AEL)

Lorsqu'une onde électromagnétique se propage, elle se disperse dans l'espace et subit donc un affaiblissement, même dans un milieu sans pertes. Dans les bandes basses, inférieures à 10 GHz, les pertes dues aux phénomènes météorologiques comme la pluie sont réduites. La détermination de l'affaiblissement d'espace libre permet de se faire rapidement une idée des niveaux envisageables côté récepteur, lorsque les deux stations sont en visibilité directe l'équation (II.7) exprime l'affaiblissement en fonction de la distance et la fréquence.

$$A = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (\text{II. 7})$$

Avec :

A : affaiblissement d'espace libre entre antennes isotropes, exprimé en dB

d : distance entre l'émetteur et le récepteur exprimée en mètres

λ : longueur d'onde du rayonnement, exprimée en mètre.

▪ Affaiblissement due à l'espace libre (L_{fs})

On peut décomposer l'affaiblissement due à l'espace libre en plusieurs affaiblissements, tels que :

- L'affaiblissement d'absorption (absorption par l'ionosphère, par les gaz de l'atmosphère ou par les précipitations).
- L'affaiblissement par diffraction comme pour le cas de l'onde de sol.

- L'affaiblissement dû à la réflexion équivalente ou à la diffusion, comme dans le cas de l'ionosphère, compte tenu des effets de focalisation ou défocalisation due à la courbure d'une couche réfléchissante.
- L'affaiblissement par couplage de polarisation, lequel peut provenir de tout défaut d'adaptation de polarisation entre les antennes pour le trajet particulier considéré.
- La baisse de gain d'antenne ou dégradation du gain d'antenne, qui peut être due à la présence de phénomènes importants de diffusion sur le trajet.
- L'effet des interférences entre le rayon direct et les rayons réfléchis par le sol, par des obstacles ou par des couches atmosphériques.

II.3.1.8. Antenne isotrope

C'est l'antenne de référence, elle n'est pas physiquement réalisable et se représente par une source ponctuelle omnidirectionnelle. Elle permet de définir les caractéristiques des antennes réelles. Une antenne isotrope est une antenne qui, alimentée par la puissance P_e , rayonnerait cette puissance avec la même intensité dans toutes les directions. A la distance d , toute la puissance est répartie sur la surface de la sphère [11].

$$P_d (W / m^2) = \frac{P_e G_e}{4\pi d^2} \quad (\text{II. 8})$$

P_e : Puissance d'émission.

G_e : Gain d'émission.

II.3.1.9. Le Gain d'une antenne

C'est le rapport entre la puissance P_r captée par l'antenne à la distance D d'une source quelconque, et celle que capterait une antenne isotrope à la même distance (en espace libre) [15] [11].

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (\text{II. 9})$$

D : diamètre de l'antenne parabolique.

η : Efficacité de l'antenne (rendement) généralement entre 50% et 70%.

λ : Longueur d'onde (en m, $\lambda=c/f$, $c=3.10^8$ m/s).

Alors en décibel :

$$G [dB] = 10 \log \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (\text{II. 10})$$

II.3.1.10. Puissance isotrope rayonnée équivalente (P.I.R.E.)

La PIRE d'une antenne en un point donnée est la puissance relative à 1W qui serait nécessaire à un émetteur isotrope situé à la même distance pour créer la même densité de flux que celle reçue du satellite à cet endroit. Cette valeur est constituée par le produit de la puissance fournie à l'antenne par son gain G_e dans une direction donnée par rapport à une antenne isotrope [16].

$$PIRE = P_e G_e \quad (\text{II. 11})$$

La PIRE en décibel est :

$$PIRE [dBW] = G_e [dBi] + P_e [dBW] \quad (\text{II. 12})$$

II.3.1.11. Facteur de mérite G/T_B

Dans le domaine spatial, le facteur de mérite ou encore le G/T_B est le critère primordial qui permet de mesurer les performances d'une station. Plus le G/T_B est élevé, plus le rendement du système est meilleur [11]. Tel que : G : est le gain de l'antenne. Et T_B : est la température de bruit de tout le système ramené en entrée de l'antenne.

II.3.1.12. La Capacité d'un canal

En présence de bruit sur le canal, la transmission n'est pas parfaite et il convient dès lors de déterminer la proportion des symboles qui risquent d'être entachés d'erreur. Pour chaque milieu de transmission, on peut chiffrer la capacité théorique du canal en [b/s], c'est-à-dire le nombre maximum de bits par seconde qu'il est possible de transmettre avec une erreur aussi faible que voulue, exprimée à partir de la bande passante du canal $[0, w]$ et du rapport signal à bruit S/N à l'intérieur du canal. Cette relation est dite de Shannon-Hartley.

$$C = w \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{II. 13})$$

C : la capacité de canal (bit/sec).

w : la taille de canal (Hz).

S/N : Le rapport signal sur bruit.

II.3.1.13. Bruits dans un lien de communication par satellite

Les principales sources des bruits dans un lien de communication par satellite [15] : (Figure II.1)

Bruit 1 : c'est le bruit faisant partie du signal à transmettre en plus du bruit thermique généré par le modulateur, le mélangeur et l'amplificateur de puissance. Ce bruit est généralement

suffisamment petit en comparaison avec la puissance du signal utile et il est négligeable par rapport aux autres sources de bruit.

Bruit 2 : c'est le bruit thermique issu de la terre et reçu par l'antenne du satellite (généralement à 300K).

Bruit 3 : bruit thermique généré par le transpondeur du satellite. Il dépend principalement des performances de l'amplificateur à faible bruit du premier étage d'amplification du transpondeur.

Bruit 4 : bruit reçu par l'antenne de la station de base en plus du signal issu du satellite incluant le bruit du ciel (bruit de fond galactique), le bruit thermique atmosphérique et le bruit thermique terrestre.

Bruit 5 : bruit thermique généré par le récepteur de la station de base et qui dépend des performances de l'amplificateur à faible bruit du premier étage d'amplification du récepteur. En plus de ces sources de bruit, un lien de communication par satellites est soumis à des interférences introduites par d'autres systèmes de communication par satellite.

II.3.1.14. *Température de bruit*

1. Température de bruit d'un système

Dans un système, le bruit de fond est déterminé par le bruit thermique défini par la relation :

$$N_0 = K.T_B \quad (\text{II. 14})$$

$$N_0 [dB] = 10 \log(K) + 10 \log(T_B) = -228.6 + 10 \log(T_B) \quad (\text{II. 15})$$

K : constante de Boltzmann $1.38 \times 10^{-23} \text{ W / Hz / K}$.

T_B : température de récepteur en degré Kelvin.

N_0 : puissance du bruit thermique.

2. Température de bruit d'une antenne de station sol

$$T_A = T_s + (1 - \eta) T_0 \quad (\text{II. 16})$$

T_A : température de bruit due aux ions de l'atmosphère la foudre, absorption atmosphérique

T_0 : température ambiante en kelvin.

II.3.1.15. *Efficacité spectrale*

L'efficacité spectrale est généralement exprimée au format « bits par seconde par hertz », abrégé en bits/s/Hz donnée par la relation suivante :

$$Eff = \frac{D_b}{B} (\text{bits / s / Hz}) \quad (\text{II. 17})$$

La définition habituelle est le débit de données net en bits par seconde (bps) divisé par la bande passante en Hertz.

II.3.2 Bilan du lien montant (station sol vers satellite)

Soit $(C/N)_m$ le rapport signal sur bruit au niveau du satellite.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_m = \frac{PIRE_{sol} G_{sat} L_m}{KT} \quad (\text{II. 18})$$

$PIRE_{sol}$: PIRE de la station terrienne émettrice égale à la puissance fournie à l'antenne P_e multipliée par le gain de l'antenne G_e .

L_m : est un paramètre qui dépend de la longueur d'onde λ du signal transmis et de la distance D_m entre la station sol émettrice et le satellite.

$$L_m = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_m}\right)^2 \quad (\text{II.19})$$

En dB nous aurons :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right) = 10 \log \left(\frac{C}{N_0}\right)_m \quad (\text{II. 20})$$

- **Pertes d'implémentation** : Ce sont les pertes liées à la modulation et la démodulation.

II.3.3 Bilan du lien descendant (satellite vers station sol)

Soit $(C/N_0)_d$ le rapport signal sur bruit au niveau de la station de réception sol.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d = \frac{PIRE_{sat} G_{sol} L_d}{KT} \quad (\text{II. 21})$$

En dB nous aurons :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{d,dB} = 10 \log \left(\frac{C}{N_0}\right)_d \quad (\text{II. 22})$$

$PIRE_{sat}$ égale à la Puissance fournie à l'antenne P_{sat} multiplié par le gain de l'antenne.

L_d : paramètre dépendant de la longueur d'onde λ du signal transmis et de la distance D entre le satellite et la station réceptrice.

$$L_d = \left(\frac{\lambda}{4\pi D_d}\right) \quad (\text{II. 23})$$

K : constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23} \text{W/Hz/K}$.

T : température de bruit de récepteur K°.

II.3.4 Bilan de liaison global

Le rapport signal sur bruit de la liaison global se déduit des deux derniers par la formule :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right) = \frac{1}{\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_m} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0}\right)_d}} \quad (\text{II. 24})$$

C/N_0 est le rapport signal sur bruit en sortie du récepteur de la station terrienne. Cette formule est en fait générale et s'applique pour toute liaison utilisant un transpondeur linéaire spatial ou terrestre.

La puissance reçue

La puissance reçue P_r peut être exprimée selon l'équation de Fris :

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t(\theta_t, \varphi_t) G_r(\theta_r, \varphi_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 (1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2) |a_t \cdot a_r^*|^2 e^{-\alpha R} \quad (\text{II. 25})$$

$$P_r = \frac{A_r}{4\pi R^2} = P_e G_e G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (\text{II. 26})$$

- G_t, G_r : sont des gains linéaires des antennes d'émission et réception.
- Γ_t et Γ_r : sont les coefficients de réflexion des antennes.
- a_t et a_r : sont les vecteurs de polarisation des antennes.
- α : est le coefficient d'absorption du milieu.
- R : est la distance émetteur-récepteur.

II.4. Influence de méthode d'accès au bilan

Dans le but d'avoir un bilan de liaison plus précis et global, on intègre les critères des performances de la sous-couche MAC (Médium Access Control) qui se base sur un protocole d'accès bien déterminé. Les performances de la couche MAC, sont alors reliées fortement et directement à la qualité du protocole d'accès utilisé. Donc, si les performances du protocole sont bonnes, cela revient d'avantage à la couche MAC, et donc à la liaison étudiée. Et l'inverse est juste.

II.4.1 La qualité de service

La QoS est l'effet global produit par les caractéristiques d'un service fourni à un usager qui déterminent le degré de satisfaction que cet usager retire du service. La qualité d'un service est caractérisée par l'effet conjugué des notions suivantes : logistique, facilité d'utilisation, faisabilité, intégrité et d'autres facteurs propres à chaque service. L'expression « qualité de service » ne désigne pas un degré d'excellence dans un sens comparatif, pas plus qu'elle n'est à prendre dans un sens quantitatif aux fins d'évaluation techniques [17]. La notion QoS utilise plusieurs paramètres qui sont communs dans tout contexte. Les principaux paramètres sont :

- Taux d'erreur.
- Taux de perte.
- Délai de transfert.
- Gigue (variation du délai de transfert).

II.4.2 QoS dans les satellites

Dans la couche MAC, un protocole d'accès doit accomplir la QoS demandée ; on parle des différentes capacités de la couche MAC. En réalité, le protocole d'accès peut varier d'un service à un autre. Pour des applications temps réel par exemple, un accès avec délai garanti est nécessaire et un protocole rigide avec réservation est préféré. Par contre, pour les applications non-temps réel où le délai n'est pas garanti mais la perte des paquets est cruciale, un protocole avec accès aléatoire est préféré. Dans les communications personnelles par satellite, la plupart des sources de trafics sont individuelles ; le trafic généré est donc non agrégé et très variable. Un accès direct au canal radio est nécessaire, ce qui complique la tâche de la couche MAC [18]. D'autre part la constellation de satellites présente plusieurs contraintes en délai, gigue et perte. Ceci est dû au temps de propagation élevé qui impose l'utilisation des protocoles d'accès avancés.

II.4.3 Critères de performance des protocoles MAC

Débit normalisé : Proportion du temps pendant laquelle le canal est utilisé pour une transmission réussie (good put).

Délai de paquet : Temps entre la génération d'un paquet par l'émetteur et sa réception avec succès à la destination (peut comprendre le délai dans la file d'attente, le délai d'accès, la transmission, la propagation, les éventuelles retransmissions).

Stabilité : Le protocole est stable si le débit ne tend pas vers 0 lorsque la charge augmente indéfiniment. Nous signalons ici que les protocoles Aloha et Aloha discrétisé ne sont pas stables.

Equité : Le protocole est équitable si toutes les stations reçoivent en moyenne la même quantité de ressources pour un même trafic.

II.5. Calcul de bilan de liaison

Dans cette partie nous allons aborder le calcul du bilan de liaison lors d'une communication entre deux stations au sol et un satellite. Après pour montrer l'importance du bilan de liaison, on fait le calcul sur un satellite GEO **Telstar V** localisé à 97° W et une station sol avec les paramètres suivants (voir tableau II.1 et tableau II.2) [19] :

Lien montant		
Paramètres	Valeurs	Unité
Fréquence	6.175	GHz
Puissance de transmission (Pe= 850W)	29.3	dBW
Gain d'antenne d'émission (Ge) (7m)	50.6	dB _i
PIRE lien montant (vers Satellite) [dBw]	77.9	dBw
Perte d'espace libre	200.4	dB
Perte atmosphérique	0.1	dB
La densité de puissance rayonnée	-84.4	dBW/m ²
Gain d'antenne de réception (Gr)	26.3	dB _i
Température de bruit de récepteur (450K)	26.5	dBK
G/T Satellite	-0.7	dB/K

Tableau II. 1 : Les paramètres du lien montant.

Lien descendant		
Paramètres	Valeurs	Unité
Fréquence	3.95	GHz
Puissance de transmission (Pe= 10W)	10.0	dBW
Gain d'antenne d'émission (Ge) (7m)	27.0	dB _i
PIRE (Satellite)	35.5	dBW
Perte d'espace libre	196.0	dB
Perte atmosphérique	0.1	dB
Gain d'antenne de réception (Gr) (3.2m)	40.2	dB _i
Puissance porteuse au réception	-121.7	dBW
Température de bruit de récepteur (140K)	21.5	dBK
G/T sol	18.2	dB/K
Puissance de bruit	-133.1	dBW

Tableau II. 2 : Les paramètres du lien descendant.

En utilisant les équations mentionnées précédemment pour calculer le rapport de la puissance du signal sur le bruit à l'entrée de récepteur du lien montante, et le rapport signal sur bruit au niveau de la station terrienne réceptrice pour le lien descendant. Après on calcule le bilan total.

❖ Les résultats de calcul

Le tableau ci-dessous illustre les résultats finals de bilan de liaison d'un satellite GEO **Telstar V** (Tableau II.3).

Paramètres	Valeurs	Unité
C/N montant	31.7	dBHz
C/N descendant	11.4	dBHz
C/N total	8.38	dBHz
C/N Requête	8.0	dBHz

Tableau II. 3: Les résultats finaux du bilan de liaison.

On remarque que le rapport C/N montant est plus grand que le C/N descendant et le rapport C/N total est acceptable. Dans les communications satellitaires la qualité de liaison totale se rapproche de la liaison la plus mauvaise.

Les résultats montrent l'impact fort du facteur de mérite (G/T_B) et la PIRE sur le bilan de la liaison. Tel que plus le G/T_B et la PIRE sont élevés plus la liaison est meilleure.

II.6. Conclusion

Le bilan de liaison permet aux scientifiques d'évaluer l'état du lien concerné, et de savoir l'améliorer en agissant sur des paramètres de conception et même d'installation afin de garantir une qualité acceptable pour accomplir la mission souhaitée par la liaison satellitaire étudiée. En effet, nous constatons qu'il y a quelques paramètres qui portent de fortes influences sur le bilan de liaison comme ; la PIRE, le facteur de mérite et les protocoles d'accès à l'émission ainsi qu'à la réception du signal émis par le satellite.

Un exemple réel d'un bilan de liaison, est exposé au cours de ce chapitre, pour donner aux lecteurs un exemple pratique de calcul et de tirer conclusion sur la marge de variation de quelque facteur intervenant dans le calcul du bilan et de savoir tirer conclusion sur l'état du lien selon les différentes valeurs données.

**Chapitre III : Méthodes d'accès
aléatoire dans les communications
satellitaires**

III.1. Introduction

Jusqu'à ce chapitre, nous avons étudié une approche sur les satellites et les communications satellitaires de point de vue moyens et principes de fonctionnement (chapitre 1) et de point de vue bilan de liaison (chapitre 2). Nous avons vu également que les méthodes d'accès au support de communication font un facteur très important pour améliorer les liaisons satellitaires.

Nous allons dans ce chapitre, étudier les performances des protocoles d'accès aléatoire Aloha et Aloha discrétisé et chercher comment améliorer leurs performances par l'emploi d'un modèle mathématique consistant en se basant sur les chaînes de Markov. Nous présentons à la fin un ensemble de simulations afin d'évaluer l'avantage de ce modèle.

III.2. Aloha classique (pur) et Aloha discrétisé

Pur Aloha et Aloha discrétisé ont été utilisés comme protocoles d'accès aléatoire en communication par satellite. Selon ces protocoles, les paquets sont transmis par plusieurs utilisateurs. Si ces paquets sont transmis simultanément par plus d'un utilisateur, il y aura une collision. Après la transmission, l'émetteur reçoit une information concernant les paquets reçus et ceux qui ont été objet d'une collision. Ces derniers vont être retransmis après un temps aléatoire. Nous considérons que le temps est divisé en unités, et à chaque unité de temps un paquet peut être transmis. A la fin de chaque unité de temps, les sources auront une information d'aucune transmission, d'une transmission ou de plusieurs transmissions (collision). Un paquet arrivant à la source est immédiatement transmis. Les paquets sujets de collisions seront refoulés et programmés pour une retransmission dans un intervalle aléatoire de temps [20] [21].

Dans ce qui suit, nous allons commencer notre développement sur ces deux protocoles en appliquant un développement à base des chaînes de Markov sur l'évènement d'arrivée des paquets qu'on le considère un processus stochastique.

❖ Hypothèses considérées

- Tous les paquets sont de même taille (durée d'émission 'T' constante).
- La station centrale envoie immédiatement et sans erreur les ACK.
- On suppose le canal parfait.
- Le nombre de stations est supposé infini, i.e., source infinie.
- L'ensemble des stations se comporte comme une source qui suit la loi de poisson de paramètre Λ paquets/s.

- Si X est le nombre de paquets générés pendant une durée t : Alors,

$$P[X = k] = \Lambda e^{-\lambda t} \frac{(\Lambda t)^k}{k!} \quad (\text{III. 1})$$

- Si T_i est la durée d'inter-arrivée entre deux paquets. Alors, T_i suit une loi exponentielle de paramètre λ , on peut donc écrire :

$$\begin{aligned} f_{T_i}(t) &= \Lambda e^{-\Lambda t} \\ E[T_i] &= 1/\Lambda \end{aligned} \quad (\text{III. 2})$$

- Les stations ont une mémoire tampon (buffer) d'un paquet.
- Le flux des paquets nouvellement générés ou réémis est à la loi de Poisson de paramètre g paquets/Ts.
- Le temps de propagation est constant (toutes les stations sont équidistantes de la station centrale).
- Période de vulnérabilité : pour un paquet P déjà envoyé, est la période pendant laquelle, une transmission peut provoquer une collision avec P.

Etude des Performances de l'Aloha pur

➤ Débit utile (S) :

- S : proportion du temps pendant laquelle le canal transporte des données utiles avec succès.
- Un paquet reçu en t_0 ne subit pas de collision si aucun paquet n'est émis entre $(t_0 - T - \tau)$ et $(t_0 + T - \tau)$:

$$\begin{aligned} P_{\text{succès}} &= e^{-2gT} \\ S &= gTP_{\text{succès}} = gTe^{-2gT} \end{aligned} \quad (\text{III. 3})$$

- Soit $G = g * T$ la charge normalisée :

$$S = G e^{-2G} \quad (\text{III. 4})$$

➤ Délai d'accès (W) :

- On décompose le délai d'accès moyen :

$$\begin{aligned} W &= T_R + T + \tau \\ T_R &= R(T_{BO} + T + T_{ACK} + 2\tau) \end{aligned} \quad (\text{III. 5})$$

Où :

- T_R : est le délai moyen d'attente avant retransmission (en cas de collision).
- T : est le délai de transmission d'un paquet.
- τ : est le temps de propagation.
- R : est le nombre moyen de retransmissions.
- T_{ACK} : est le temps de transmission d'un ACK.
- T_{BO} : est le temps moyen d'attente dû à l'algorithme de retour aléatoire (back off).
- NB : on suppose qu'il n'y a pas de limites au nombre de retransmissions.
- Le nombre moyen de retransmissions R :

$$\begin{aligned}
 R &= P_{succés} (1 - P_{succés}) + 2P_{succés} (1 - P_{succés})^2 + \dots \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} n P_{succés} (1 - P_{succés})^n \\
 &= \frac{1 - P_{succés}}{P_{succés}} \\
 &= e^{2G} - 1
 \end{aligned}
 \tag{III. 6}$$

- Temps d'attente moyen T_{BO} : on suppose un tirage aléatoire uniforme sur l'intervalle $[1 ; K]$.
Tel que, K est la taille de la fenêtre de backoff.

$$T_{BO} = \frac{K+1}{2} T \tag{III. 7}$$

On en déduit :

$$W = (e^{2G} - 1) \left(\frac{(K+3)T}{2} + 2\tau + T_{ACK} \right) + T + \tau \tag{III. 8}$$

✚ Etude des performances de l'Aloha discrétisé

Les performances du système pur Aloha peuvent être optimisées en changeant la fenêtre de collision.

➤ Débit utile (S) :

- Le débit utile s'en trouve augmenté :

$$\begin{aligned}
 P_{succés} &= e^{-gT} \\
 S &= gTP_{succés} = gTe^{-gT}
 \end{aligned}
 \tag{III. 9}$$

$$= S = Ge^{-G} \tag{III. 10}$$

➤ Délai d'accès (W) :

$$W = T_R + \tau + T + T_a \tag{III. 11}$$

- $T_a = T/2$ est le temps moyen entre l'instant de génération et le début du prochain slot.

On en déduit :

$$W = (e^G - 1)((K + 3)T/2 + 2\tau + T_{ACK}) + 3T/2 + \tau \quad \text{(III. 12)}$$

III.3. Les chaînes de Markov

Une chaîne de Markov est une suite d'événements aléatoires dans le temps ou conditionnellement au présent, le futur ne dépend pas du passé, ou autrement dit le futur ne dépend du passé que par le présent [22].

Définition 1 : Formellement, soit E un espace fini ou dénombrable. Ce sera l'espace des états. Soit $X = \{X_n ; n \geq 0\}$ une suite de variables aléatoires dans E. On dit que X est une chaîne de Markov si, pour tout $X_1, X_{n+1} \in E$, on a

$$\mathbb{P}(\underbrace{X_{n+1} = x_{n+1}}_{\text{Le futur}} \mid \underbrace{X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n}_{\text{Le passé (et le présent)}}) = \mathbb{P}(\underbrace{X_{n+1} = x_{n+1}}_{\text{Le futur}} \mid \underbrace{X_n = x_n}_{\text{Le présent}})$$

Cette propriété des chaînes de Markov est aussi connue comme propriété de Markov.

La matrice de transition

Il s'agit de modéliser une chaîne de Markov à l'aide de représentations synthétiques afin de connaître l'évolution des états du système. On utilisera les matrices ou encore les graphes. Soit une chaîne de Markov possédant un ensemble d'états E. On note :

- $P_{i,j}$: la probabilité d'une transition à l'état j à l'instant $t+1$ sachant qu'elle a été dans l'état i à l'instant t.
- T : la matrice de ces probabilités :

$$T_{i,j} = \begin{pmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \dots & \dots & \dots & \dots & P_{0,N+1} \\ P_{1,0} & P_{1,1} & & & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & & & \vdots \\ \vdots & & & P_{i,i} & P_{i,j} & & \vdots \\ \vdots & & & P_{j,i} & P_{j,j} & & \vdots \\ \vdots & & & & & \ddots & \vdots \\ P_{1,N+1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & P_{N+1,N+1} \end{pmatrix} \quad \text{(III. 13)}$$

Cette matrice contient les probabilités des transitions envisageables par le système ($P_{i,j} = 0 \Rightarrow$ pas de transitions possibles de i à j).

Remarque : la matrice n'est pas symétrique, ($P_{i,j}$ n'est pas forcément égal à $P_{j,i}$). En effet, la probabilité de passage de i à j n'est pas en général égale à celle de passage de j à i .

Définition : Une matrice vérifiant les deux propriétés suivantes :

$$\begin{aligned} \forall (i, j) \quad & P_{i,j} \\ \forall j \quad & \sum_j P_{i,j} = 1 \end{aligned} \tag{III. 14}$$

Est une matrice stochastique.

- La matrice d'une chaîne de Markov est forcément stochastique et inversement, toute matrice stochastique est une matrice d'une chaîne de Markov.

Les états stationnaires ou stables de la matrice des transitions

Les probabilités des états stationnaires de la matrice sont les probabilités que satisfait la condition suivante : $P \times T = P$. Tel que :

$$\begin{aligned} P_0 &= P_0T_{0,0} + P_1T_{0,1} + P_2T_{0,2} + P_3T_{0,3} + \dots + P_mT_{0,m} \\ P_1 &= P_0T_{1,0} + P_1T_{1,1} + P_2T_{1,2} + P_3T_{1,3} + \dots + P_mT_{1,m} \\ P_2 &= P_0T_{2,0} + P_1T_{2,1} + P_2T_{2,2} + P_3T_{2,3} + \dots + P_mT_{2,m} \\ &\vdots \\ P_m &= P_0T_{m,0} + P_1T_{m,1} + P_2T_{m,2} + P_3T_{m,3} + \dots + P_mT_{m,m} \end{aligned} \tag{III. 15}$$

Après le calcul de système des équations linaires on aura les probabilités stables des transitions pour n transitions.

Le graphe de transition

Une autre représentation d'une chaîne de Markov permettant de déduire les propriétés qualitatives est le graphe de transition [23]. Ce graphe orienté possède un sommet pour chaque état de la chaîne et un arc d'un sommet vers un autre si la probabilité de cette transition est non nulle (Figure III.1).

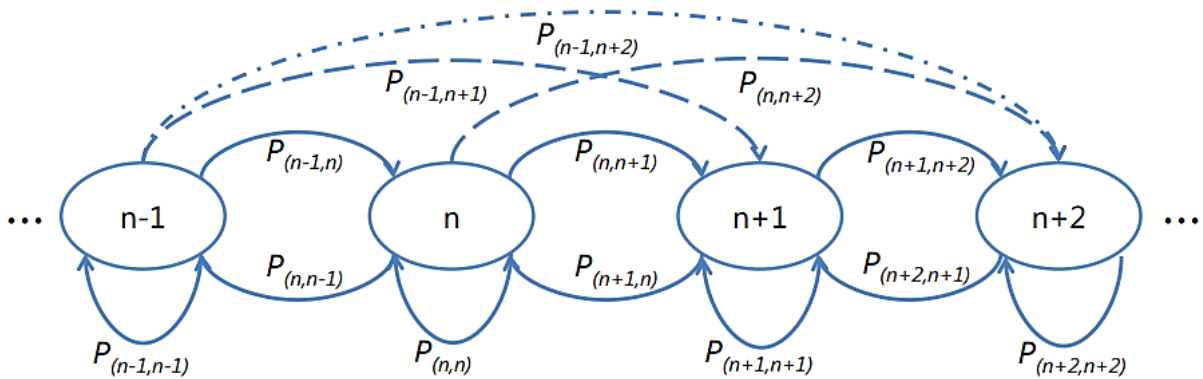


Figure III.1 : Graphe de transition de la chaîne Markov.

III.4. Modélisation d'Aloha discrétisé par la chaîne Markov

✚ Modèle et formulation du système

Nous utilisons le modèle de Markov dans lequel, l'état du système change régulièrement dans le temps, le flux des paquets arrivés au système suit un processus de Bernoulli avec le paramètre p_a qui signifie qu'à chaque unité de temps, il y a une probabilité p_a d'un nouveau paquet arrive au système, et tous les paquets arrivés sont indépendants.

Si deux ou plus des paquets arrivent dans la même unité de temps il y aura une collision entre les paquets. Les nœuds avec les paquets collisionnés ne peut transmis des nouveaux paquets et ces paquets reste dans le système pour être retransmis. Après la collision entre les paquets, Un paquet sera retransmis avec une probabilité p_r , qui ne dépend pas du temps, et pout une restriction d'une solution symétrique optimale, nous considérons que les probabilités de retransmission sont indépendantes de i . Nous supposons que si plus qu'un nœud tente une transmission dans le même intervalle de temps, alors tous les paquets seront perdus, et la distribution de probabilité d'un état après une transition dépend seulement de l'état présent.

En posant que m est le nombre des nœuds. D'après la distribution binomiale des probabilités on détermine les probabilités de j transmissions ou arrivées parmi i backlogged nœuds (nœuds portant des paquets à retransmettre).

Posant $Q_r(i, j)$ la probabilité de j parmi i paquets backlogged sont retransmis :

$$Q_r = \binom{i}{j} p_r^j (1 - p_r)^{i-j} \quad \text{(III. 16)}$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, i$$

p_r : est la probabilité de retransmission dans un intervalle de temps.

Posant aussi $Q_a(i, j)$ la probabilité d'arrivée de j paquets parmi i paquets backlogged :

$$Q_a = \binom{m-i}{j} p_a^j (1-p_a)^{m-i-j} \quad \text{(III. 17)}$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, m-i$$

- p_a : est la probabilité de générer un paquet dans le slot disponible.
- m : est le nombre des utilisateurs (ou nœuds).
- Le temps est divisé en slot.
- Nouveau Paquet : chaque nœud transmet un nouveau paquet au début de chaque slot avec la probabilité p_a , ($p_a < 1/m$).
- [Succès] : Si un seul paquet est transmis avec succès.
- [Collusion] : Si $k > 1$ retransmissions durant un slot.
 - o Les paquets sont préservés dans le système pour la retransmission dans le slot suivant.
- [Retransmission] : Les paquets qui ont faits collusion sont appelés backlogged.
 - o Le paquet sera retransmis avec une probabilité p_r .
 - o Les états de la chaîne X_n sont caractérisés par le nombre des backlogged paquets dans le slot.

❖ Les états des probabilités de transition

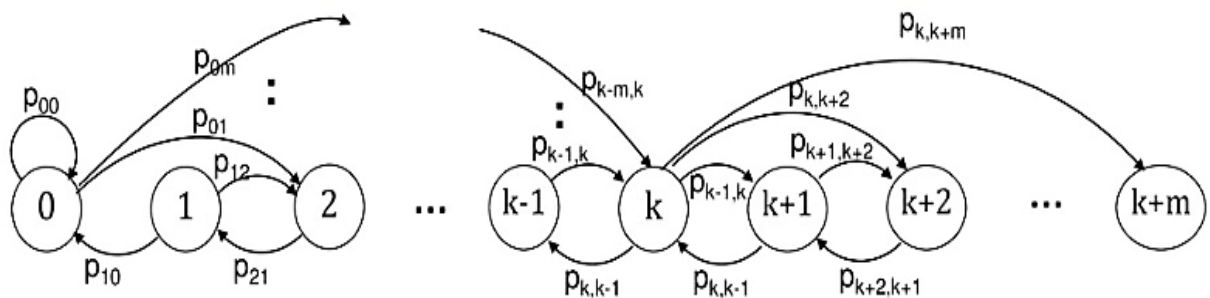


Figure III.2 : Graph des transitions de la chaîne Markov modélisé.

Il est important de signaler que l'état du système est représenté par une matrice stochastique de transition [21] [24].

Nous allons maintenant chercher les probabilités de chaque transition, tel qu'à :

• **L'état 0 :** (pas de paquets backlogged).

- On reste dans le même état si :

- 0 arrivé ou 1 arrivé. Donc :

$$T_{0,0} = Q_a(0, m) + Q_a(1, m) \quad \text{(III. 18)}$$

- Vers l'état 1 :

- Pas possible (un seul paquet ne peut pas fait collusion avec lui-même).

- Vers l'état k :

- Si k de m nœuds transmis dans le même slot, alors ;

$$T_{0,k} = Q_a(k, m) \quad \text{(III. 19)}$$

$$T_{0,k} = \binom{m}{k} p_a^k (1 - p_a)^{m-k} \quad \text{Si} \quad 1 < k \leq m \quad \text{(III. 20)}$$

$$T_{0,k} = 0 \quad \text{Si} \quad k > m$$

• **L'état k :** (k paquets backlogged).

Transitions de l'état k :

- Supposons qu'on est dans l'état k (k paquets backlogged).

- Vers l'état k-1 :

- 0 arrivé et 1 retransmission.

$$\begin{aligned} T_{k,k-1} &= Q_a(0, m) Q_r(1, m) \\ &= (1 - p_a)^m k \cdot p_r (1 - p_r)^{k-1} \end{aligned} \quad \text{(III. 21)}$$

- Reste dans le même état :

- 0 arrivé et 0 retransmission.

Où

- 1 arrivé et 0 retransmission.

Où

- 0 arrivé et ≥ 2 retransmission.

$$\begin{aligned} T_{k,k} &= Q_a(0, m) \cdot Q_r(0, m) + Q_a(1, m) \cdot Q_r(0, m) + Q_a(0, m) \cdot [1 - (Q_r(0, m) \cdot Q_r(1, m))] \\ &= (1 - p_a)^m (1 - p_r)^k + m \cdot p_a (1 - p_a)^{m-1} (1 - p_r)^k + (1 - p_a)^m [1 - (1 - p_r)^k - k \cdot p_r (1 - p_r)^{k-1}] \end{aligned} \quad \text{(III. 22)}$$

- Vers l'état $k + 1$:

➤ 1 arrivé et > 0 retransmission.

$$\begin{aligned} T_{k,k+1} &= Q_a(1, m) \cdot [1 - Q_r(0, m)] \\ &= m \cdot p_a (1 - p_a)^{m-1} \cdot (1 - (1 - p_r)^k) \end{aligned} \quad (\text{III. 23})$$

- Vers l'état $k + r$:

➤ r Arrivée et tout retransmission.

$$\begin{aligned} T_{k,k+r} &= Q_a(r, m) \\ &= \binom{m}{r} p_a^r (1 - p_a)^{m-r} \quad 1 < r \leq m \\ T_{k,k+r} &= 0 \quad r > m \end{aligned} \quad (\text{III. 24})$$

Suivant les différents états et les éventuelles transitions indiquées ; nous pouvons maintenant construire notre matrice de transitions suivante :

$$T_{i,j} = \begin{pmatrix} T_{0,0} & 0 & T_{0,2} & \cdots & T_{0,m} \\ T_{1,0} & T_{1,1} & T_{1,2} & \cdots & T_{1,m} \\ 0 & T_{2,1} & T_{2,2} & \cdots & T_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & T_{m,m} \end{pmatrix} \quad (\text{III. 25})$$

Nous cherchons maintenant les probabilités des états stationnaires ou stables pour les paquets backlogged. Notons par P_i la probabilité à l'équilibre pour que le système soit dans l'état n (état d'attente au début d'un slot). La solution optimale est obtenue par la résolution du problème d'optimisation suivant :

$$\begin{cases} P_i = P_i \cdot T_{i,j} \\ \sum_{i=1}^m P_i = 1 \\ P_i \geq 0 \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, 3 \dots m \quad (\text{III. 26})$$

Pour la résolution du system des équations linaires de la matrice précédente ; on peut caractériser les états par les équations suivantes :

$$P_i = \begin{cases} \sum_{j=0}^{i+1} P_j T_{ij} & 0 \leq i \leq m-1 \\ \sum_{j=0}^m P_j T_{im} & i = m \end{cases} \quad (\text{III. 27})$$

$$P_{i+1} = \left(P_i - \sum_{j=0}^i P_j T_{ji} \right) / T_{i+1,i} \quad (\text{III. 28})$$

Où $P_1, P_2, P_3, P_4, \dots, P_m$ sont les probabilités de l'état stationnaire pour les paquets backloggés dans le système. Le nombre moyen des paquets (nœuds) backloggés dans le système est déterminé par l'équation :

$$\bar{B} = \sum_{i=1}^m iP_i \quad (\text{III. 29})$$

Le nombre moyen des paquets (nœuds) en attente du slot suivant pour la transmission est déterminé par :

$$\bar{K} = p_a (m - \bar{B}) \quad (\text{III. 30})$$

✚ Les performances du système

✓ Débit utile (S) :

Le débit total moyen (défini comme étant le nombre moyen de paquets qui sont transmis avec succès) est peut être exprimé par l'équation :

$$P_{succés} = Q_a(1, m)Q_r(0, m) + Q_a(0, m)Q_r(1, m) \quad (\text{III. 31})$$

$$\bar{S}_{thr} = p_a (1 - p_a)^{m-i-1} + p_r (1 - p_r)^{i-1} \quad (\text{III. 32})$$

En utilisant l'équation de balance (c-à-d, l'entrée = la sortie) à l'équilibre, le débit total moyen satisfait (et donc peut être calculé plus facilement par)

$$\bar{S} = p_a \sum_{i=0}^m P_i (m - i) = p_a (m - \bar{B}) \quad (\text{III. 33})$$

✓ Délai d'accès (W) :

Le délai des paquets backloggés W , qui est défini comme étant le temps moyen en slots, qu'un paquet en attente prend pour aller de la source à la destination, peut également être calculé à l'aide la formule de Little.

Le nombre moyen des paquets présents dans le système est égal à $\bar{B} + \bar{S}$ (somme des paquets backlogged et des nouveaux arrivés). Quant au taux de départ, il est exactement égal au débit moyen \bar{S}_{thr} . Nous définissons le délai moyen de transmission d'un paquet \bar{W} , comme étant le temps moyen, en slots, que prend un paquet de sa source à sa destination. L'application de la formule de Little donne :

$$\bar{W} = 1 + \frac{\bar{B}}{p_a(m - B)} \quad \text{(III. 34)}$$

Les paramètres sont définis par approximation aux valeurs réelles, par ce que le temps de détection de collusion n'est pas considéré dans le calcul pour le but de simplifier le calcul (dans la pratique ces valeurs doivent être prises en considération).

III.5. Interprétation des résultats

Les distributions binomiales des probabilités de retransmission et d'arrivée des paquets sont illustrées pour plusieurs valeurs de p_r et de p_a comme montré dans les figures III.3, III.4, III.5 et III.6.

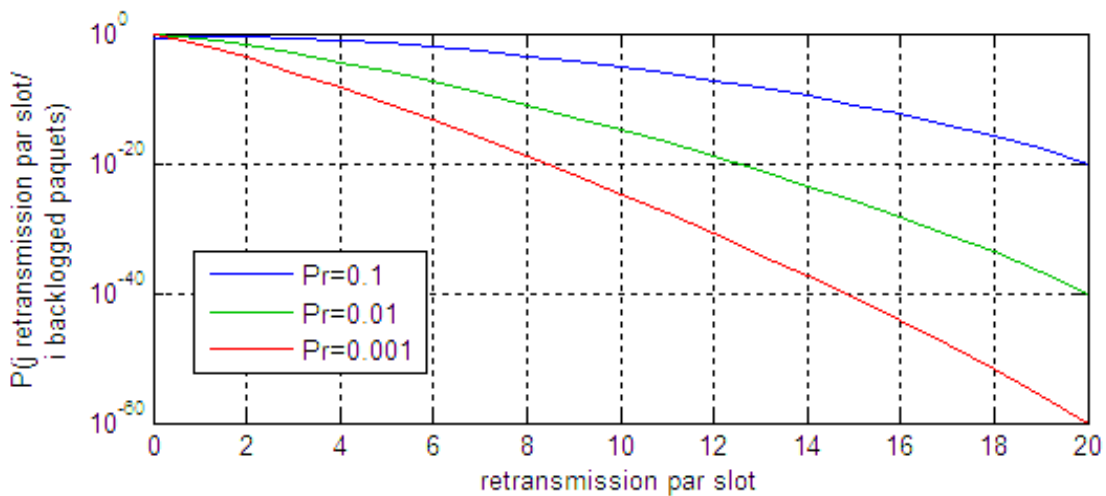


Figure III. 3 : Distribution binomiale des probabilités de retransmission en fonction des transmissions par slot.

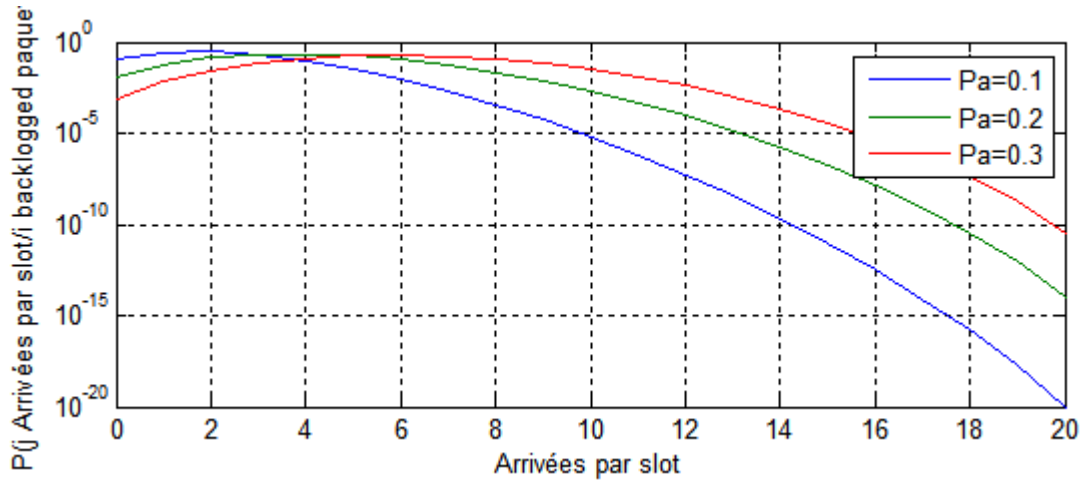


Figure III. 4 : Distribution binomiale des probabilités d'arrivée en fonction des arrivées par slot.

Les figures III.3 et III.4 décrivent le comportement du système envers le taux des paquets retransmis ou envers le taux des nouveaux paquets arrivés respectivement. Les deux figures confirment l'affaiblissement des probabilités d'arrivée ou de retransmission lorsque le nombre des arrivés ou des retransmis respectivement augmente. Nous remarquons aussi, que les valeurs initiales $p_a=0.3$ et $p_r=0.1$ donnent des meilleures valeurs des distributions respectivement concernées.

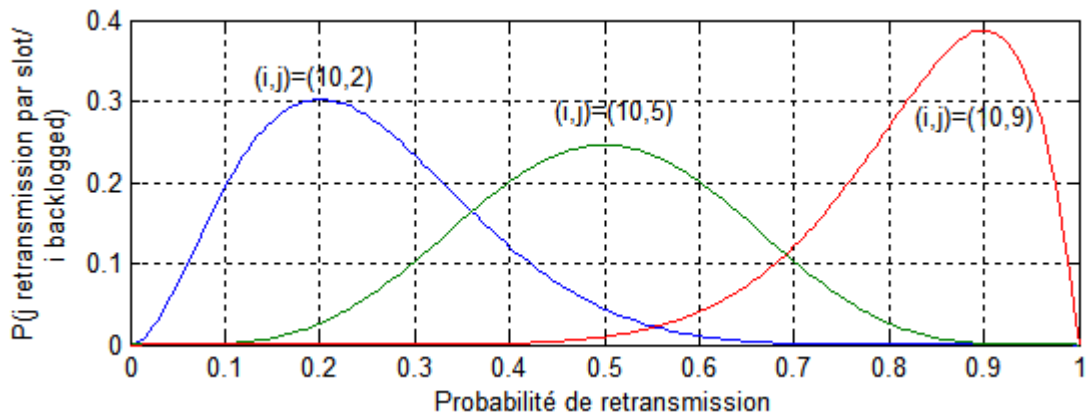


Figure III. 5 : Les valeurs optimales de probabilité de retransmission pour différentes distributions binomiales.

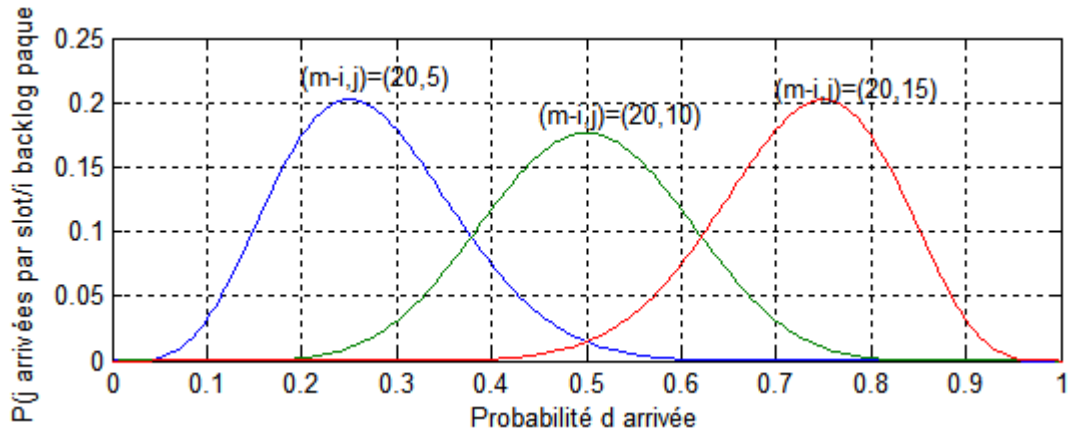


Figure III. 6 : Les valeurs optimales de probabilité d'arrivée pour différentes distributions binomiales.

Comme le système étudié dépend essentiellement aux conditions initiales qui sont les probabilités d'arrivée et de retransmission. Alors, pour mener le système à des situations optimales ; nous devons choisir la meilleure combinaison entre ces deux probabilités. En effet, les figures ci-dessus III.5 et III.6, peuvent guider les chercheurs et les scientifiques pour extraire les valeurs les plus convenables. Tel qu'on peut constaté que les valeurs optimales pour la distribution de la retransmission et de l'arrivée sont atteintes que lorsque $p_r = j/i$, et $p_a = j/m-i$.

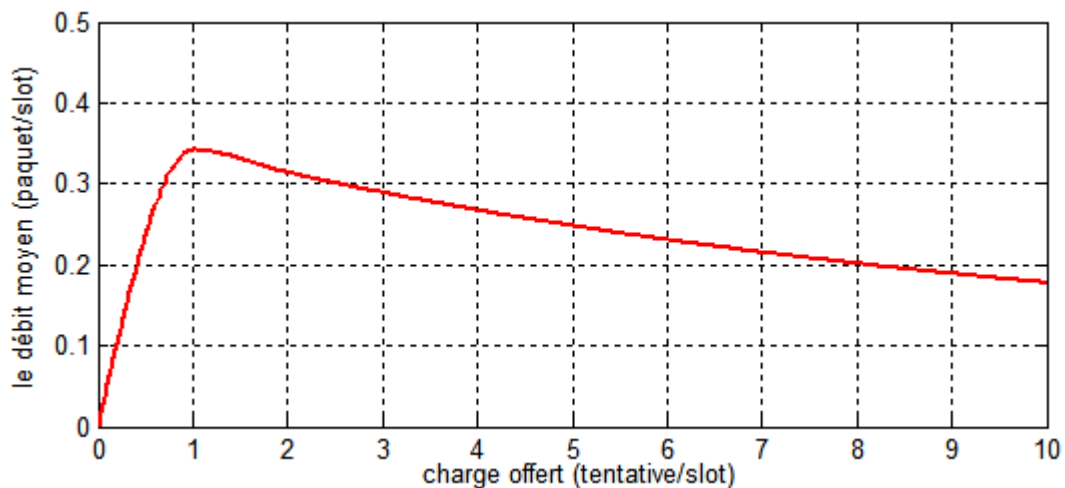


Figure III.7 : Le débit (paquet par slot) en fonction de la charge offerte (tentative par slot).

La figure III.7, montre la variation du débit moyen vis-à-vis la charge du trafic utilisant le canal de transmission. La charge peut signifier également le nombre des utilisateurs. Et nous remarquons que le débit varie inversement proportionnel avec la charge du trafic. Et cela peut être expliqué par le partage du canal avec d'autres utilisateurs et même par la possibilité d'avoir des collisions et des erreurs qui diminuent le taux de la réussite des transmissions.

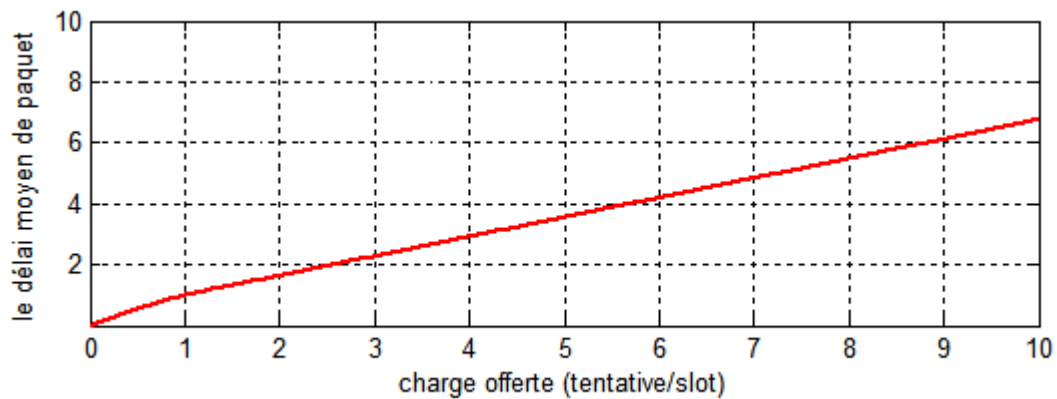


Figure III.8 : Le délai moyen des paquets (temps de slot) en fonction de charge offert (tentative par slot).

La figure III.8, montre la variation du délai moyen vis-à-vis la charge du trafic occupant le canal de transmission. Le délai varie proportionnellement avec la charge et cela est logique comme tout système de télécommunication. Cette variation peut être expliquée par la même explication que le débit et que les causes sont les mêmes ; le partage du canal, les collisions et les erreurs créent les retransmissions et prolonge le délai pour que le paquet soit transmis avec succès.

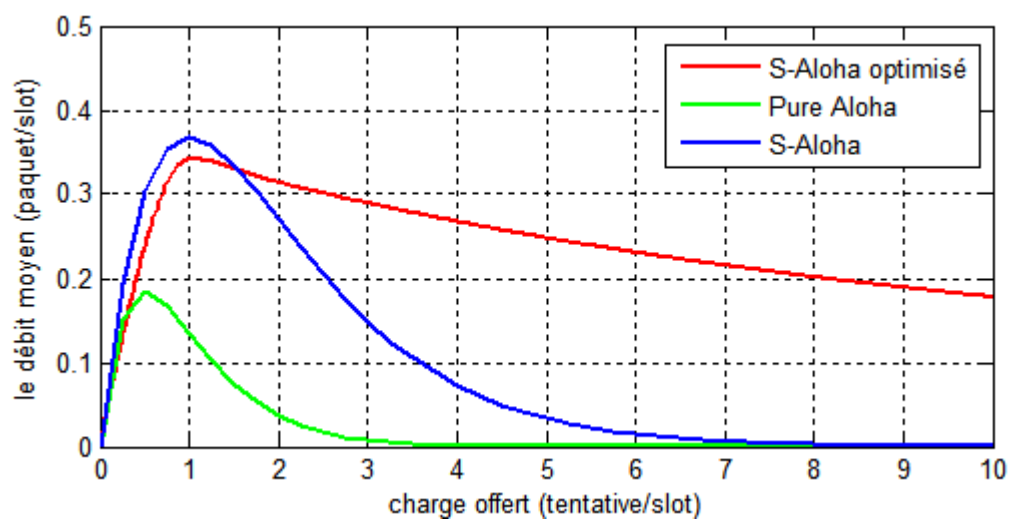


Figure III.9 : Le débit (paquet par slot) en fonction de charge offerte pour les différents protocoles.

La figure III.9 montre une comparaison en termes de débit de transmission, entre les protocoles Aloha classique, Aloha discrétisé et Aloha optimisé par notre modèle. Notre système semble plus stable que les autres et présente un débit plus élevé avec un léger affaiblissement tout en augmentant la charge du trafic dans le canal de transmission.

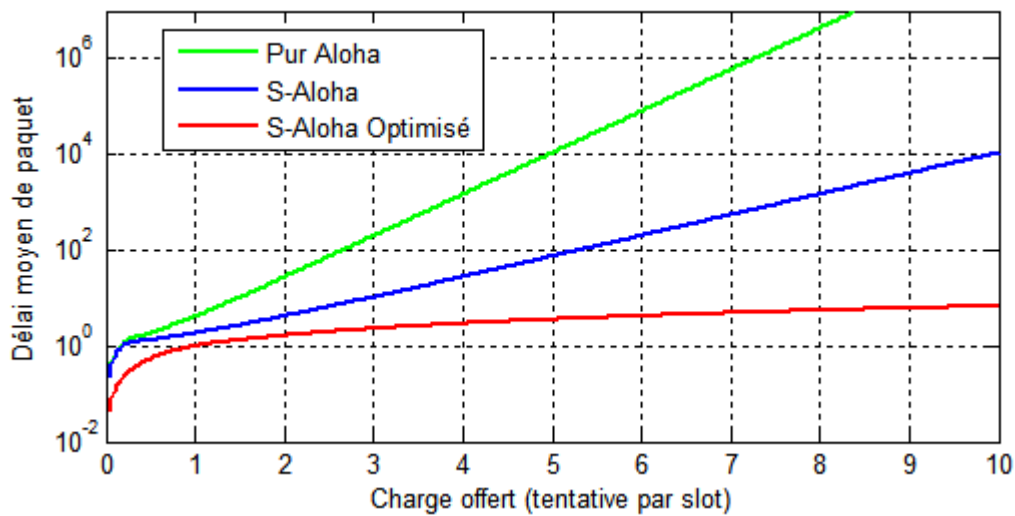


Figure III. 10 : Le délai moyen des paquet (temps de slot) en fonction de la charge offerte pour les différents protocoles.

Comme le débit de transmission figuré dans la courbe précédente ; le délai est meilleur dans notre système. L'écart est très remarquable, et l'avantage du modèle étudié est très considérable. Malgré l'augmentation de la charge du trafic, le S-Aloha optimisé se comporte en stabilité avec un faible taux d'affaiblissement (variation).

En fait, l'amélioration en débit et en délai de transmission, exprime une amélioration des performances du protocole étudié, et donne plus de stabilité à notre liaison satellitaire. La liaison porte désormais une immunité plus forte en face des collisions en suivant un protocole plus intelligent dans ses démarches devant les différentes situations.

III.6. Conclusion

Le modèle étudié dans ce chapitre mène à une amélioration très considérable des performances du protocole Aloha discrétisé, et donc des liaisons satellitaires. Le débit et le délai de transmission sont devenus meilleures qu'auparavant, et cela revient à la façon dont ce protocole gère les différents états du canal, notamment l'état de collision. La liaison offre maintenant une qualité meilleure en faisant un bilan de liaison plus satisfaisant.

Notre étude extraite du travail fait dans [25], confirme et valide encore ses résultats obtenus.

Conclusion Générale

Les performances des systèmes des communications satellitaires sont un critère très important dans le choix des applications et les services satellitaires.

En télécommunication spatiale, les liaisons montantes et descendantes entre la station sol et le satellite, nous permet d'établir un bilan de liaison général. D'une façon générale, dans les conditions normales de propagation, la qualité des liaisons satellitaires en visibilité directe est parfaite, sa dégradation est causée essentiellement par les évanouissements, conditions atmosphériques et les collisions. Pour pallier de ces phénomènes, on doit perfectionner de plus en plus nos équipements de transmission pour garder toujours une qualité meilleure du signal reçu. Pour cela, nous avons élaboré une étude sur la méthode d'accès qu'utilisent les liaisons satellitaires, qui est l'Aloha discrétisé, qui souffre de mauvaises performances. Nous avons suivi une recherche consistante dans cet axe afin de comprendre le principe du développement mathématique entrepris, et gagner un bagage scientifique solide dans ce domaine-là. Et pourquoi pas porter encore d'autres améliorations.

Cette étude nous a poussé à bien connaître l'environnement des télécommunications satellitaires, et d'assimiler des approches et modèles mathématiques formulés par le biais des lois classiques de probabilité comme la loi de Poisson, Binomial et de Bernoulli sur des variables stochastiques. Nous avons également appris l'usage, le principe de fonctionnement et l'utilité des chaînes de Markov dans l'étude des transmissions.

Cette étude nous a donné l'ambition d'approfondir encore notre recherche dans ce domaine. Nous voulons découvrir une approche plus formelle sur les protocoles d'accès aléatoire par l'emploi des théorèmes mathématiques plus avancés, afin de pouvoir offrir à la télécommunication spatiale une gestion optimisée plus intelligente.

References

- [1] G. Pujolle, "*Les réseaux*", Editions Eyrolles, Paris, 2018.
- [2] A. C. Clarke, "*Extra terrestrial relays : can rocket stations give world wide radio coverage ?*", Wireless World, Les Etates Unis, 1945.
- [3] R. Erne, "*Les télécommunications spatiales et les ressources de l'espace extraatmosphérique l'évolution de leur réglementation*", Thèse de Thèse de doctorat en Sciences Politiques (droit international); l'université de Genève, Suisse, 2007.
- [4] B. Battrick, H. Lacoste, "*Rapport Annuel 2005*", Agence spatiale européenne, Noordwijk, Pays-Bas, 2006.
- [5] E. Dubois, "*Convergence dans les réseaux satellite*", Thèse de doctorat en Réseaux et Télécommunications; Université de Toulouse, France, 2008.
- [6] B. R. Elbert, "*Introduction to Satellite Communication*", 3 ed, Artech House, London, 2008.
- [7] H. Daspet, D. Goudot, "*Applications spatiales des générateurs électrochimiques*", Dunod, Paris, 1967.
- [8] J. P. Gabano, G. Gerbier et J. F. Laurent, "*High Energy Density Electrochemical Generators with Lithium Negative*", Power Sources Conference, Atlantic City, 1969.
- [9] M. O. Kolawole, "*Satellite communication engineering*", CRC Press, London, 2016.
- [10] J. T. Mayhan, "*Adaptive antenna design considerations for satellite communication antennas*", IEE Proceedings H (Microwaves, Optics and Antennas), vol. 130, no. 1, pp. 98-107, IET Digital Library, Lexington, 1983
- [11] D. Roddy, "*Satellite communications*", McGraw-Hill Prof Med/Tech, New York, 2006.
- [12] Couleur-science.eu, "*quel est le principe de fonctionnement du gps*", <https://couleur-science.eu/?d=97791a--quel-est-le-principe-de-fonctionnement-du-gps>, Consulté le 30 May 2019.
- [13] I. Rec, "*X. 200*", Information Processing Systems-OSI Reference Model-The Basic Model, 1994.
- [14] A. Boyer, "*Canaux de transmission bruités*", Support de cours énoncé de travaux dirigés, institut national des sciences appliquées, Toulouse, 2011.
- [15] H. Boutayeb, "*Eléments De Base Des Communications Par Satellite*", École Polytechnique, Montreal, 2006.
- [16] J. M. Kamatiki, "*Influence de la PIRE sur la transmission par satellite géostationnaire*", mémoire d'Ingénieur technicien en Radio transmission ISTA Goma, Congo, 2014.
- [17] H. Koraitim, et S. Tohmé, "*Resource allocation and connection admission control in satellite networks*", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 17, no. 2, pp. 360-372, 1999.

- [18] D.P. Connors, B. Ryu, et S. Dao, "*Modeling and simulation of broadband satellite networks. I. medium access control for QoS provisioning*", IEEE Communications Magazine, vol. 37, no. 3, pp. 72-79, 1999
- [19] B. E. Elbert, "*The satellite communication applications handbook*", Artech house, Norwood, 2004.
- [20] M. Kaplan, "*A sufficient condition of nonergodicity of a Markov chain (Corresp.)*." IEEE Transactions on Information Theory, vol. 25, no. 4, pp. 470-471, 1979.
- [21] E. Altman, R. El Azouzi et T. Jiménez, "*Slotted Aloha as a game with partial information*", Computer networks, vol. 45, no. 6, pp. 701-713, 2004.
- [22] R. Lachieze-Rey, "*Chaînes de Markov (et applications)*", M1 Paris Descartes, Paris, 2019.
- [23] M. Robson, "*Module C1.7 : Processus stochastique et simulation*", <http://dept-info.labri.fr/ENSEIGNEMENT/formation-a-distance/cibermiage-processus/c1.7/ch01/seq02/sequence.htm#Section01>, Consulté le 23 Septembre 2019.
- [24] E. Sabir, M. Raiss-El-Fenni et M. Elkamili, "*Slotted aloha à première transmission différée : Une nouvelle solution pour supporter les applications sensibles au délai*", Proceedings of MAJESTIC, Avignon, France, 2009.
- [25] M, Reyes-Ayala, E. A. Andrade-Gonzalez, J. A. Tirado-Mendez et H. J. Aguilar, "*Markovian Chain Analysis in Aloha for Satellite Applications*", International Journal of Communications 1, pp. 170-173, 2007.

RÉSUMÉ

Ce mémoire de master consiste à étudier les communications satellitaires, leur composants et fonctionnalités et principe de fonctionnement, tout en tenant compte les performances.

Notre travail s'articule sur une étude générale sur les liaisons par satellite. Dans la première partie, nous avons donné une introduction à la transmission par satellite.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié les différents paramètres influant sur la liaison comme la P.I.R.E, le facteur de mérite, l'affaiblissement en espace libre et l'influence des protocoles d'accès au canal sur le bilan de liaison.

Le but de cette étude est d'optimiser le Protocol d'accès au canal du côté des performances comme le délai moyen de paquet et le débit.

Enfin, nous avons appliqué la chaîne de Markov dans le protocole Aloha discrétisé et on a fait une comparaison les performances avec quelque protocole existant.

Mot clé : Bilan de liaison, Satellite, Communication satellitaire, Méthodes d'accès au support, Protocol MAC, Chaîne de Markov, Débit, Délai moyen de paquet.

SUMMARY

This master thesis consists of studying satellite communications, their components and functionalities and operating principle, while taking into account the performances.

Our work is based on a general study on satellite links. In the first part, we gave an introduction to satellite transmission.

In the second part, we studied the different parameters influencing the link such as P.I.R.E, the merit factor, the free space loss and the influence of the channel access protocols on the link budget.

The purpose of this study is to optimize the channel access protocol on the performance side such as average packet delay and throughput.

Finally, we applied the Markov chain in the discrete Aloha protocol and we compared the performances with some existing protocol.

Keyword: Link budget, Satellite, Satellite communication, Media access methods, Protocol MAC, Markov chain, Throughput, Average packet delay.

الملخص

تتكون رسالة الماجستير هذه من دراسة الاتصالات الساتلية ومكوناتها ووظائفها ومبدأ التشغيل ، مع مراعاة الأداء . يعتمد عملنا على دراسة عامة حول الوصلات الساتلية. في الجزء الأول ، قدمنا مقدمة عن البث الفضائي. في الجزء الثاني ، درسنا المعلمات المختلفة التي تؤثر على الرابط مثل P.I.R.E وعامل الجدارة وفقدان المساحة الحرة وتأثير بروتوكولات الوصول إلى القناة على ميزانية الوصلة.

الغرض من هذه الدراسة هو تحسين بروتوكول الوصول إلى القنوات في جانب الأداء مثل متوسط تأخر الرزم والإنتاجية. أخيرًا ، طبقنا سلسلة Markov في بروتوكول Aloha المنفصل وقارننا العروض مع بعض البروتوكول الموجود.

الكلمات المفتاحية: ميزانية الوصلة ، الأقمار الصناعية ، الاتصالات عبر الأقمار الصناعية ، طرق الوصول إلى الوسائط ، بروتوكول MAC ، سلسلة Markov ، الإنتاجية ، متوسط تأخير

