

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2020

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



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département : Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

HAMMAL Soumia

et

OUCHEFOUNE Kenza

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

Filière : **Télécommunication**

Option : **Systèmes des Télécommunications**

Thème :

***Etude de l'impact des techniques d'accès sur les
performances des liaisons satellitaires***

Devant le jury composé de :

Chelbi Salim
Boucenna Mohamed Lamine
Djeddou Mustapha

MCB
MCB
MCA

UAMOB
UAMOB
UAMOB

Président
Encadreur
Examineur

Année Universitaire 2019/2020

Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant.

Nous tenons à exprimer en tout premier lieu notre gratitude et nos sincères remerciements, à notre encadreur monsieur BOUCENNA M. Lamine, merci de nous avoir encadrées, soutenues et si bien orientées tout au long de ce modeste projet.

Nous remercions les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et aussi pour leurs attentions et les intérêts portés envers notre travail.

Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble de nos enseignants pour toutes les connaissances qu'ils nous ont transmises

Sans oublier nos familles surtout nos parents et aussi nos amis qui n'ont cessé de nous soutenir.

Dédicace

Je dédie ce travail :

À ma chère mère,

À mon cher père,

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour eux.

Ce travail est le fruit de ses sacrifices qu'ils ont consentis pour mon éducation et ma formation.

À mon frère Mohammed Ali,

Pour ses soutiens et ses conseils précieux tout au long de mes études.

À mes chères sœurs Ahlem et Sarah,

À ma chère binôme Kenza,

Pour son entente et sa sympathie.

À tous mes chers amis,

Pour leurs aides et support dans les moments difficiles.

À tous mes collègues de Télécom,

À toute ma famille.

Soumia.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*A mes parents, qui représentent pour moi l'exemple du
Sacrifice, du dévouement, de l'honnêteté et du courage*

A Mes très chères sœurs

A mon frère

A ma chère binôme

A Tous mes Ami (e)s, chez lesquels j'ai trouvé

Réconfort et soutien dans tous les moments

Kenza

Table des matières

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Table des Matières.....	iv
Liste des Figures.....	vii
Liste des Tableaux.....	viii
Liste des abréviations.....	ix
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES COMMUNICATIONS SATELLITAIRES	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique.....	3
I.3. Les satellites artificiels.....	3
I.4. Fonctionnalités de base de satellite.....	4
I.5. Architecture d'un satellite.....	4
I.6. Les orbites.....	5
I.6.1. La ceinture des radiations de Van Allen.....	6
I.6.2. Les orbites circulaires ou quasi-circulaires.....	6
I.6.3. Les orbites elliptiques.....	7
I.6.4. l'Orbite géostationnaire.....	7
I.6.5. Autres dénominations.....	8
I.6.6. Les différentes vitesses de satellisation.....	9
I.7. Les satellites de télécommunication.....	10
I.7.1. Définition.....	10
I.7.2. Les systèmes d'un satellite de télécommunication.....	10
I.7.3. Le fonctionnement des télécommunications par le satellite.....	11
I.8. Le satellite ALCOMSAT- 1.....	11
I.9. Les systèmes Satellitaires.....	12
I.9.1. Les systèmes GEO (Geostationary Earth Orbit).....	12
I.9.2. Les systèmes MEO (Medium Earth Orbit).....	13
I.9.3. Les systèmes LEO (Low Earth Orbit).....	13
I.10. Les liaisons satellitaires.....	13
I.11. Les bandes des fréquences.....	14
I.12. Les constellations satellitaires.....	15
I.13. Les Services de télécommunications par satellites.....	16

I.13.1. La téléphonie	16
I.13.2. La télédiffusion	17
I.13.3. La transmission des données	17
I.13.4. L'Internet	18
I.13.5. Radio	18
I.13.6. Positionnement (Localisation).....	18
I.14. Les techniques d'accès aux canaux satellitaires	19
I.14.1. Modèle OSI de l'ISO.....	20
I.14.2. La couche MAC	20
I.14.3. Les politiques par répartition.....	21
I.14.4. Les politiques d'accès aléatoire.....	22
I.14.5. Les politiques de réservation : Demand Assignment Multiple Access (DAMA)	22
I.14.6. PODA (Priority-Oriented Demand Assignment)	23
I.14.7. Les techniques hybrides	23
I.15. Conclusion	24
CHAPITRE II : BILANS DU LIAISON SATELLITAIRE	
II.1. Introduction	25
II.2. La liaison satellitaire.....	25
III.3. Le bilan de liaison	26
II.3.1 Paramètres généraux	26
II.3.1.1. Le rapport signal sur bruit (C/N)	26
II.3.1.2. Le rapport d'énergie par bit sur bruit (E_b/N_0).....	26
II.3.1.3. l'Equation de FRIIS	27
II.3.1.4. l'Affaiblissement de propagation en espace libre	27
II.3.1.5. l'Antenne isotrope	27
II.3.1.6. Le Gain d'une antenne	28
II.3.1.7. La puissance isotrope rayonnée équivalente (P.I.R.E.)	28
II.3.1.8. Le facteur de mérite G/TB	28
II.3.1.9. La Capacité d'un canal.....	29
II.3.1.10. Les bruits dans les liaisons satellitaires.....	29
II.3.1.11. La température de bruit.....	30
II.3.1.12. l'Efficacité spectrale.....	30
II.3.2 Le bilan du lien montant (station sol vers satellite)	31
II.3.3 Le bilan du lien descendant (satellite vers station sol)	31
II.3.4 Bilan de liaison global	32

III.4. Influence de méthode d'accès sur le bilan d'une liaison.....	32
II.4.1 La qualité de service	32
II.4.2 QoS dans les satellites.....	32
II.4.3 Critères de performance des protocoles MAC.....	33
II.5. Le calcul du bilan de liaison	33
II.6. Conclusion	35
CHAPITRE III : METHODES D'ACCES ALEATOIRE DANS LES COMMUNICATIONS SATELLITAIRES	
III.1. Introduction	36
III.2. l'Aloha discrétisé.....	36
III.2.1. l'Aloha classique (pur)	37
III.2.2. l'Aloha discrétisé	39
III.3. Les chaines de Markov.....	39
III.3.1. La matrice de transition	40
III.3.2. Le vecteur de distribution	41
III.3.3. La matrice stationnaire pour une chaîne de Markov	41
III.3.4. Le graphe de transition	41
III.4. Modélisation de l'ALOHA discrétisé par les chaines Markov	42
III.4.1. Le flux d'arrivée et de retransmission.....	43
III.4.2. Les états des probabilités de transition	43
III.4.3. L'état stationnaire (stable)	46
III.4.4. Les performances du système.....	47
III.5. Interprétation des résultats	48
III.6. Conclusion.....	52
CONCLUSION GENERALE.....	53
REFERENCES.....	54

Liste des figures

Figure I.1 : Structure d'un satellite.

Figure I.2 : Représentation de l'apogée et du périégée.

Figure I.3 : Ceintures de Van Allen et lignes de flux magnétique.

Figure I.4 : Orbites circulaires.

Figure I.5 : Orbite elliptique.

Figure I.6 : Orbite géostationnaire

Figure I.7 : Les différentes orbites de la terre.

Figure I.8 : orbite Molniya.

Figure I.9 : Les différentes vitesses de la satellisation.

Figure I. 10 : Les systèmes d'un satellite de télécommunication.

Figure I.11 : satellite ALCOMSAT-1.

Figure I.12 : Les types de liaisons inter-satellites.

Figure I.13 : Architecture de la constellation de satellite.

Figure I.14 : Constellation des satellites de localisation.

Figure I.15 : Les différentes couches du modèle OSI.

Figure I.16 : Une partie du signal reçu pour le protocole ALOHA.

Figure II.1 : Liaison satellitaire et ces paramètres.

Figure III.1 : Chaîne de Markov globale du système.

Figure III.2 : Chaîne de Markov de l'ALOHA discrétisé.

Figure III.3 : La matrice de transition du système sous Python.

Figure III.4 : La probabilité de retransmission par slot.

Figure III.5 : La probabilité d'arrivé par slot.

Figure III.6 : Les variations des distributions binomiales en fonction de la probabilité de retransmission et d'arrivé.

Figure III.7 : Le délai de transmission des paquets en fonction de la probabilité de transmission.

Figure III.8 : Le débit du système en fonction de la probabilité de transmission.

Figure III.9 : Le délai de transmission en fonction de la probabilité de transmission pour les différents protocoles.

Figure III.10 : Le débit en fonction de la probabilité de transmission pour les différents protocoles.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les bandes des Fréquences et quelques services.

Tableau I.2 : Attribution de bandes de fréquences de liaisons typiques.

Tableau II.1 : Les paramètres de la liaison montante.

Tableau II.2 : Les paramètres de la liaison descendante.

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

Liste des abréviations

ACK	Acknowledgment
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ASAL	Agence Spatiale Algérienne
ATDR	Attente De Retransmission
ATM	Automated Teller Machines
CDMA	Code Division Multiple Access
CSMA	Carrier Sensing Multiple Access
CSMA CA	CSMA Collision Avoidance
CSMA CD	CSMA Carrier Detection
DAB	Digital Audio Broadcasting
DAMA	Demand Assignment Multiple Access
DVB-S	Digital Video Broadcasting Satellite
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
FAMA	Fixed Assignment Multiple Access
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GEO	Geostationary Earth Orbit
GPS	Global Positioning System
GSO	Geosynchronous Satellite
HEO	Highly Excentric Orbit
IFFO	Interleaved Frame Flush Out
IP	Internet Protocol
LEO	Low Earth Orbit
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LNA	Low Noise Amplifier
MAC	Media Access Control
MEO	Medium Earth Orbit
MPEG-2	Moving Picture Experts Group 2
NTSC	National Television Standard Committee
OSI	Open Systems Interconnection
PAL	Phase Alternating Line
PODA	Priority Oriented Demand Assignment
QoS	Quality Of Service

RRR

RTPC

SECAM

SNR

SR

TDMA

TS

TTC

VSAT

Round **R**obin **R**eservation

Réseau **T**éléphonique **P**ublic **C**ommuté **F**ixe

Sequentiel **C**ouleur **W**ith **M**emory

Signal **T**o **N**oise **R**atio

Subscription **R**adio

Time **D**ivision **M**ultiple **A**ccess

Time **S**lot

Telemetry **T**racking and **C**ommand

Very **S**mall **A**perture **T**erminal

Introduction Générale

Introduction Générale

Les communications par satellites sont devenues de plus en plus utilisées dans le monde actuel. Plusieurs services dans des secteurs différents s'effectuent essentiellement à base uniquement des communications satellitaires comme les services de navigation, localisation, surveillance, contrôle et d'autres. Les communications satellitaires peuvent être déroulées soit en liaison directe (station terrienne vers satellite), soit aussi en liaison indirecte par l'intermédiaire d'autres satellites formant ce qu'on appelle une constellation de satellite et aussi des réseaux satellitaires.

Comme les réseaux sans fil ; les liaisons ou réseaux satellitaires souffrent également des facteurs externes ou internes qui causent l'affaiblissement de la qualité de transmission et rend parfois la communication impossible. Nous tenons à expliquer en détails ces facteurs et leurs effets sur les communications satellitaires dans ce manuscrit. Aussi, la qualité de communication est souvent évaluée par un calcul de bilan de liaison qui tient en compte tous les paramètres agissants sur la liaison pour enfin sortir d'une décision sur la faisabilité et la qualité de la liaison satellitaire. Un détail important est exprimé dans notre mémoire sur le calcul de ce bilan avec des exemples concrets pour éclaircir l'idée au lecteur.

Parmi les facteurs cruciaux influant sur les communications par satellite, il y a la gestion de l'accès au canal de transmission. Tel que, le réseau peut passer par des phases de fonctionnement différentes et qu'à chaque phase le système a besoin d'un mécanisme adéquat rendre l'accès facile et intelligent. En effet, les communications satellitaires à cause de la collision, atteignent parfois des phases de saturation créant une surcharge de données et mettent en instabilité le réseau de communication. Dans ce cas, une technique intelligente pour la gestion d'accès doit être mise en place. Pour cela, nous distinguons deux grandes familles de techniques destinées à gérer l'accès au canal, qui sont les techniques ou protocoles à accès fixe et à accès aléatoire. Les communications satellitaires et afin de gagner le temps de propagation qui est considéré long par rapport aux autres réseaux sans fil, utilisent au départ, des techniques d'accès aléatoire pour réserver le canal. Tel que, les protocoles aléatoires qui se caractérisent par un accès rapide et non compliqué qui peut être très utile dans les communications à longues distances qui coutent des délais plus importants.

L'Aloha classique (ou pur) est le protocole de base dans la famille des protocoles à accès aléatoire qui a été suivi rapidement par une version améliorée appelée Aloha discrétisé. Ce dernier qui porte dans son principe le fait de diviser l'axe du temps en intervalles de temps égaux appelés 'Time Slot' (TS), oblige le départ de chaque transmission juste au début du TS. Une technique rajoutée afin de minimiser le taux de collision et améliorer les performances des liaisons satellitaires. Après, il y avait le CSMA pour Carrier Sensing Multiple Access, et

Introduction Générale

ses versions comme le CSMA CA (CSMA Collision Avoidance) et le CSMA CD (Carrier detection), et d'autres.

Malgré ces améliorations, les transmissions satellitaires souffrent encore parfois de l'instabilité à cause de la collision. L'idée dans ce travail est d'étudier les liaisons satellitaires et chercher comment améliorer ses performances par un traitement plus précis de la gestion d'accès, en faisant intervenir les chaînes de Markov, afin d'assurer une gestion d'accès plus intelligente et un service continu et plus stable des réseaux satellitaires. A cet effet, nous arrangeons notre mémoire comme suit :

Le premier chapitre : développe des généralités sur les communications satellitaires, fonctionnalités de base de satellite, caractéristique des satellites, les orbites et les techniques d'accès aux canaux satellitaires.

Le deuxième chapitre : Expose le formalisme de calcul du bilan d'une liaison satellitaire.

Le troisième chapitre : Contient des explications sur les deux protocoles d'accès Aloha et Aloha discrétisé, enchaînés par une application des chaînes de Markov sur l'ALOHA discrétisé. Le chapitre conclut par un ensemble de simulations qui justifient l'impact de cette méthode sur les performances des communications satellitaires comme le débit, le délai moyen et la probabilité de succès de la transmission.

Chapitre I : Généralités sur les communications satellites

I.1. Introduction

Aujourd'hui, les communications par satellites sont devenues indispensables. A cause de leurs services diverses et impressionnantes ; sont maintenant incluses dans la plupart des tâches et activités humaines, que ce soit dans le domaine économique, politique, scientifique, sociale ou culturel. Depuis son premier lancement à la fin des années cinquante, le satellite est toujours en développement et ne cesse pas d'offrir des nouveaux services et avantages afin de faciliter et accélérer les services de la vie quotidienne des êtres humains.

Dans ce chapitre nous présentons une introduction générale sur les télécommunications par satellite. L'objectif est de présenter les principales caractéristiques des liaisons satellitaires et les normes actuellement employées.

I.2. Historique

L'exploration spatiale est un domaine passionnant qui a toujours attiré l'esprit des scientifiques. Cependant, l'idée de placer des objets en orbite autour de la terre a commencé à apparaître il y a un siècle. À la fin de la Seconde Guerre mondiale, le concept de satellites est né. C'est le britannique Arthur C. Clarke qui a introduit le concept des communications par satellite. L'union soviétique a lancé son premier satellite artificiel en 1957 : Spoutnik 1. Ce satellite est une simple boule métallique d'un diamètre de 58 cm et est équipé d'un simple émetteur radio.

Les premiers satellites lancés étaient passifs (réflecteurs) et n'avaient pour fonction que de réfléchir les signaux de la station terrienne. Le principal inconvénient est que ces signaux sont diffusés dans toutes les directions, de sorte que tous les pays du monde peuvent les recevoir. Ensuite, afin de faire fonctionner correctement ces satellites, il est nécessaire d'installer de grandes antennes au sol pour leur donner une forte puissance d'émission et de réception. En 1960, les Américains ont réussi à mettre en orbite leur premier satellite en mode passif. Le deuxième type de satellite lancé est actif. En d'autres termes, ils ont leur propre ensemble de réception et d'envoi. L'utilisation des satellites à des fins commerciales a commencé en 1965 [1].

I.3. Les satellites artificiels

Un satellite en général est tout corps naturel ou artificiel se déplaçant autour d'un corps céleste tel qu'une planète ou une étoile. Dans le présent contexte, il n'est fait référence qu'aux satellites artificiels en orbite autour de la planète Terre. Ces satellites sont placés sur l'orbite souhaitée et ont des charges utiles en fonction de l'application envisagée.

Un satellite artificiel est un engin construit par l'homme et placé en orbite autour d'un astre, en particulier de la Terre, par une fusée ou un système de transport spatial. Apparus pour des motifs politiques, 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 [2].

I.4. Fonctionnalités de base de satellite

Le satellite offre un certain nombre de fonctionnalités qui ne sont pas facilement disponibles avec d'autres types de communication, car le satellite couvre une grande surface de la Terre. Le satellite fournit une liaison de communication avec les communautés éloignées dans une zone peu peuplée, qui sont difficiles d'accès par d'autres moyens. Le signal satellite ignore les frontières politiques [3].

Nous distinguons deux types essentiels de satellites :

- ✓ **Le satellite actif** : il comporte le système d'antenne : l'émetteur, le récepteur et l'alimentation. Il fonctionne comme un répéteur hyperfréquence actif, relaie le signal à la station de réception soit instantanément, soit après stockage dans sa mémoire et attend que le satellite focalise la station de réception terrestre.
- ✓ **Le satellite passif** : est un ballon métallisé ou une sphère métallique et il est utilisé comme réflecteur passif, il renvoie simplement le signal d'une région de la terre à une autre région.

I.5. Architecture d'un satellite

Le satellite se compose généralement d'une plate-forme et d'une charge utile. La plateforme se compose de tous les sous-systèmes qui permettent à la charge utile de fonctionner correctement, à savoir [4]:

- La structure mécanique qui supporte tous les équipements du satellite.
- L'alimentation électrique : constituée des panneaux solaires et de batteries utilisées comme alimentation lors des éclipses de soleil par la terre et la lune.
- Le contrôle d'attitude et d'orbite, avec capteurs et actionneurs.
- Le sous-système de propulsion.
- L'équipement TTC (télémétrie suivi et commande) embarqué.

La charge utile comprend les antennes satellites et l'équipement électronique d'amplification des porteuses montantes.

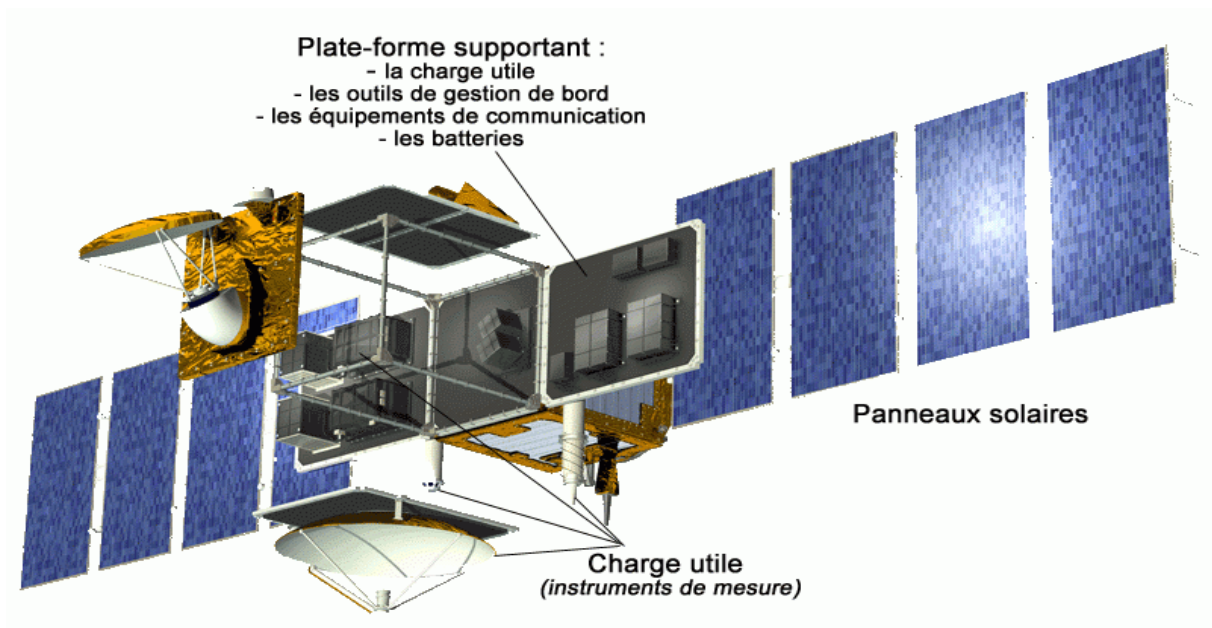


Figure I.1 : Structure d'un satellite [5].

I.6. Les orbites

C'est la trajectoire d'un satellite artificiel autour de la terre. Une orbite contient plusieurs satellites tournant sur le même anneau. La hauteur de l'orbite est liée à la zone couverte par ses satellites. Tant que la gravité de la terre équilibre la force centrifuge, le satellite peut maintenir la même orbite pendant longtemps. Parce que les satellites tournent autour de l'atmosphère, ils ne peuvent pas résister à la résistance de l'air. Par conséquent, en raison de la loi d'inertie, la vitesse du satellite reste constante, ce qui entraîne une orbite stable autour de la terre pendant de nombreuses années [6] [7].

- ✓ L'apogée : le point le plus haut du satellite auquel sa vitesse est la plus lente.
- ✓ Le périgée : Le point le plus bas du satellite auquel sa vitesse est la plus rapide.
- ✓ L'inclinaison : c'est l'angle formé entre le plan orbital et le plan équatorial. Plus l'angle est important, plus la surface couverte par le satellite est grande.

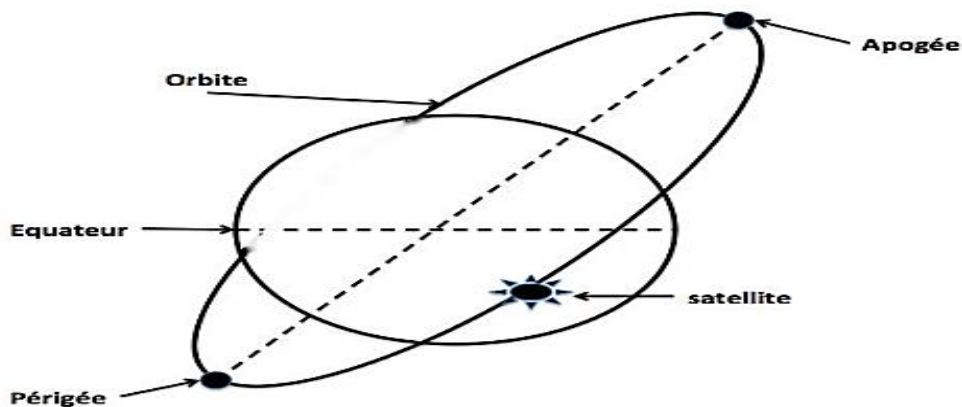


Figure I.2 : Représentation de l'apogée et du périgée [8].

I.6.1. La ceinture des radiations de Van Allen

En 1958, une équipe dirigée par James Van Allen a découvert que la terre est entourée de ceintures de rayonnement d'intensité variable, provoquées par l'interaction de particules spatiales électriquement chargées et du champ magnétique terrestre. La figure I.3 illustre ces ceintures de rayonnement, généralement connues sous le nom de ceintures de Van Allen. Il y a deux ceintures de rayonnement principales, une ceinture intérieure de protons et d'électrons de haute énergie à environ 1,5 rayons terrestres et une ceinture extérieure d'électrons énergétiques à environ quatre rayons terrestres. L'importance de ces ceintures pour les applications satellites est que ces particules chargées peuvent endommager l'électronique et les logiciels des engins spatiaux [9].

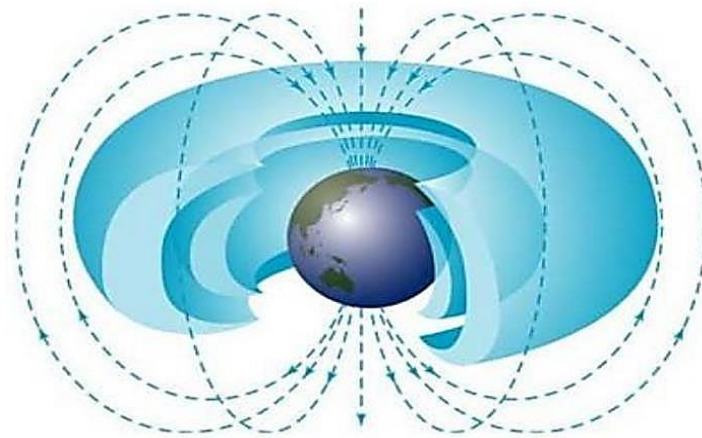


Figure I.3 : Ceintures de Van Allen et lignes de flux magnétique [10].

I.6.2. Les orbites circulaires ou quasi-circulaires

Les orbites sont classées dans trois catégories principales [9]:

- ✓ Orbite terrestre basse (LEO) : celles situées dans la plage d'altitude presque 750–1500 km (en dessous de la ceinture intérieure Van Allen).
- ✓ Orbite terrestre moyenne (MEO) : celles situées dans la plage d'altitude presque 10 000–20 000 km (entre les ceintures Van Allen).
- ✓ Orbite géostationnaire / géosynchrone (GEO) : celles situées sur une orbite circulaire ou quasi circulaire à une altitude de 35 786 km au-dessus de l'équateur (au-delà des ceintures de Van Allen).



Figure I.4 : Orbites circulaires [11].

I.6.3. Les orbites elliptiques

Comme son nom l'indique, un satellite placé sur cette orbite décrit un trajet elliptique autour de la terre. Pour placer un satellite sur une orbite elliptique, selon Newton et sa théorie de la gravité, la vitesse de lancement dans l'espace doit être supérieure à 7900 m/s. La principale caractéristique de cette orbite est que la vitesse subie par le satellite est très variable [11].

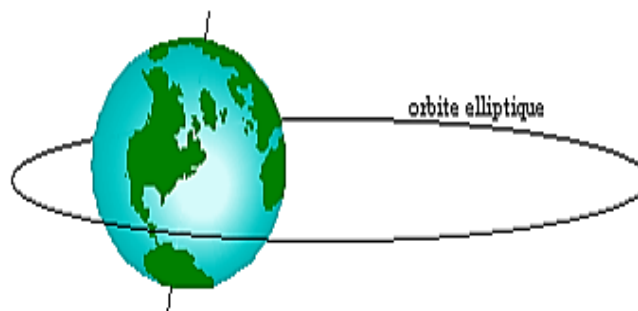


Figure I.5 : Orbite elliptique [11].

I.6.4. l'Orbite géostationnaire

Au départ, l'orbite géostationnaire fait référence à une orbite circulaire inclinée à un angle nul, c'est-à-dire dans le plan équatorial. Mais ses caractéristiques sont complètement différentes de l'orbite circulaire simple, on l'appelle l'orbite géostationnaire. Cette orbite est la plus utilisée actuellement car la qualité des signaux est équivalente, voire supérieure à celle des autres orbites, mais il est beaucoup plus rentable d'utiliser ce type de satellite dans la mesure où l'avantage majeur est la possibilité d'employer sur la terre des antennes fixes.

Au fil des années, alors que le nombre de satellites sur l'orbite géostationnaire a augmenté, cette trajectoire est devenue très chargée. Les scientifiques prévoient aussi un

danger pour les satellites en état de marche, car les satellites dits «indésirables» n'ont plus d'énergie et ne peuvent pas contrôler leurs vitesses de fonctionnement, ce qui entraîne une dérive opérationnelle et une dégradation des autres satellites [11].

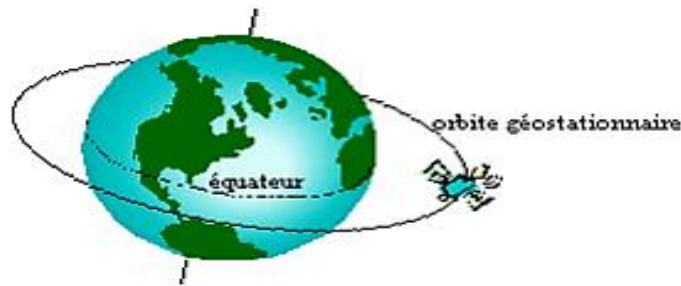


Figure I.6 : Orbite géostationnaire [11].

I.6.5. Autres dénominations

- **L'orbite très excentrique HEO (Highly Excentric Orbit) :** La HEO est la seule orbite non circulaire des quatre types. Elle a une altitude maximale (apogée) similaire au GSO (geosynchronous satellite) et une altitude minimale (périgée) similaire au LEO [12].

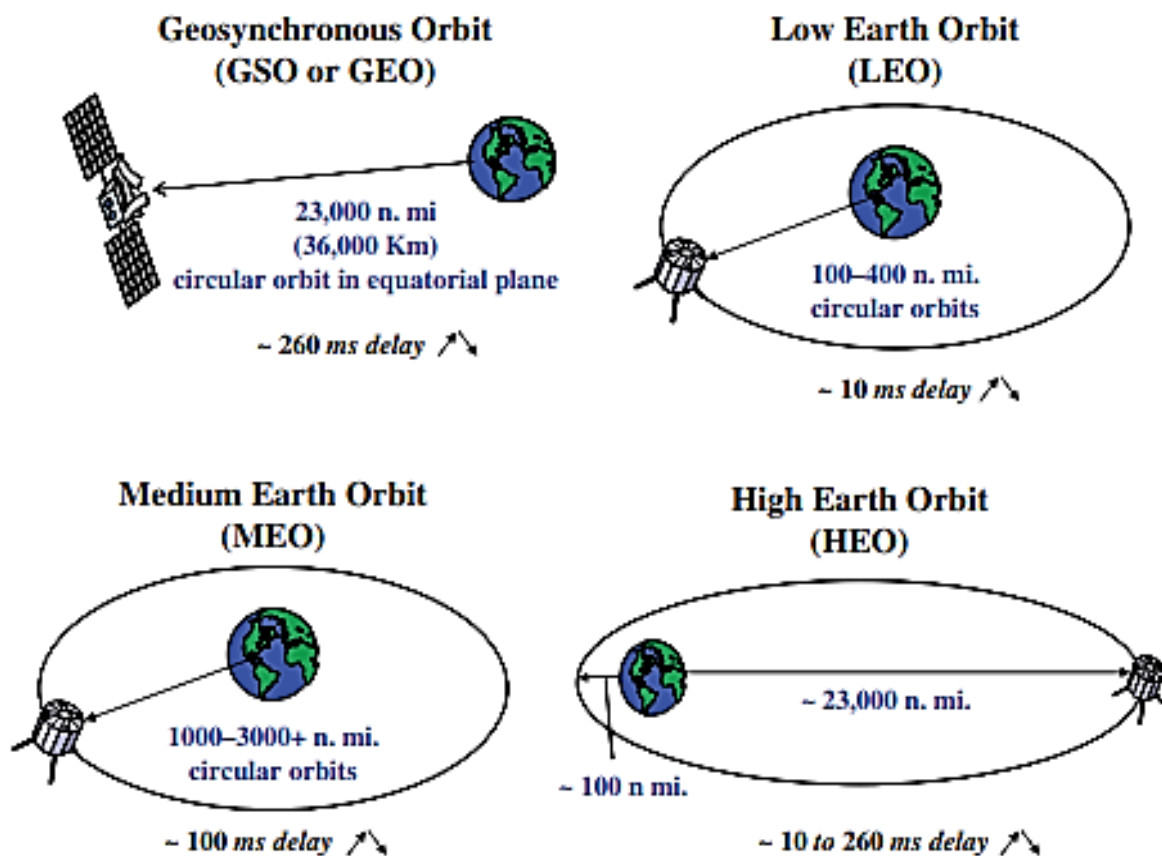


Figure I.7 : Les différentes orbites de la terre [12].

- **L'orbite parabolique :** L'orbite parabolique correspondant à une ellipse avec une excentricité $e=1$ (ou énergie $E=0$), physiquement irréalisable, car la probabilité de réaliser un tir d'énergie nulle, est nulle [7].
- **L'orbite hyperbolique :** Orbite utilisée pour les tirs interplanétaires. Son excentricité est égale ou supérieure à 1. La vitesse du satellite sur cette orbite est supérieure à la vitesse de largage, et échappera à l'attraction terrestre [7].
- **L'orbite du type molniya :** Les Russes utilisent ce type d'orbite. Son inclinaison orbitale est de 65° , l'apogée est proche de 40 000 kilomètres et le périégée est proche de 1000 kilomètres [7].

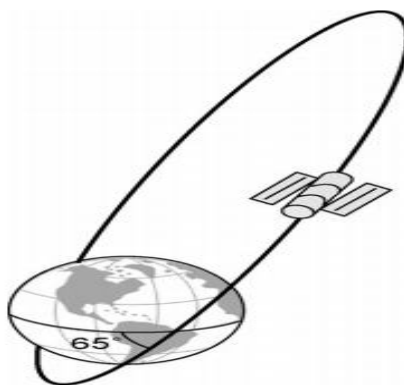


Figure I.8 : Orbite Molniya [2].

1.6.6. Les différentes vitesses de satellisation

Pour qu'un satellite soit en orbite autour de la terre il faut lui donner une vitesse spécifique qui se nomme première vitesse cosmique sachant qu'elle est égale presque à $v_1 = 7.9 \text{ Km/s}$ (280880 Km/h). Pour les sondes spatiales ont besoin d'une vitesse plus élevée, car les sondes spatiales doivent s'échapper de la gravité de la terre (figure I.9). C'est la vitesse d'évasion qu'elle est égale à $v_2 = 11,2 \text{ km/s}$ (40320 km/h), pour cela on distingue quatre situations possibles pour les satellites et les sondes [13]:

- L'objet lancé retombe sur la terre quand v est inférieur à v_1 .
- Le satellite a une orbite circulaire quand v est égale à v_1 .
- Le satellite a une orbite elliptique quand v est compris entre v_1 et v_2 .
- La sonde a une orbite elliptique autour du soleil quand v est supérieur à v_2 .

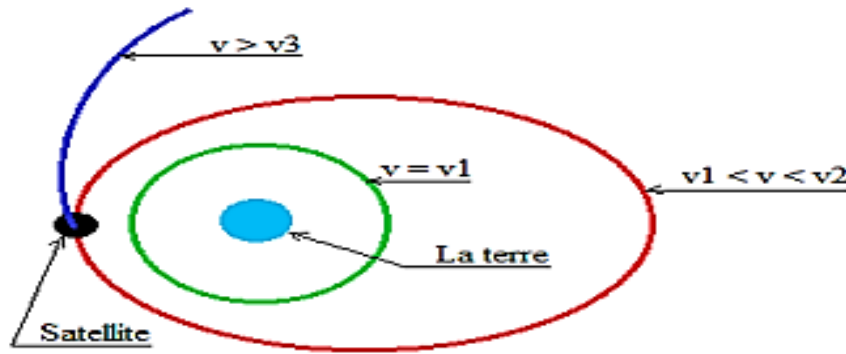


Figure I.9 : Les différentes vitesses de la satellisation [13].

I.7. Les satellites de télécommunication

I.7.1. Définition

Un satellite de télécommunication peut être considéré comme une sorte de relais hertzien. En effet, il ne s'occupe pas de la compréhension des données : ce n'est qu'un simple miroir. Son rôle est de régénérer le signal qu'il a reçu et de le retransmettre amplifié en fréquence à la station réceptrice. De plus, il est également possible d'établir des liaisons directes entre satellites [1].

I.7.2. Les systèmes d'un satellite de télécommunication

- Le signal à émettre est donné à la station émettrice qui transmet le signal vers le satellite. Le satellite se compose d'un récepteur qui recueille le signal, l'amplifie et le traduit en une autre fréquence. La fréquence traduite est ensuite retransmise à la station réceptrice.
- Le signal transmis par la station terrienne émettrice est appelé liaison montante. Le signal retransmis depuis le transpondeur satellite est appelé liaison descendante. La fréquence de liaison montante est supérieure à la fréquence de liaison descendante.
- La combinaison récepteur et émetteur d'un satellite est appelée transpondeur. Le transpondeur est essentiellement un répéteur RF-RF. La fonction de base du transpondeur est la traduction et l'amplification de fréquence. Différents transpondeurs sont utilisés pour différents canaux de fréquence [14].

La Figure I.10 montre le fonctionnement de base d'un système de communication par satellite.

Il existe trois parties principales du système de communication par satellite :

- Station terrienne émettrice.
- Transpondeur.
- Station terrienne réceptrice.

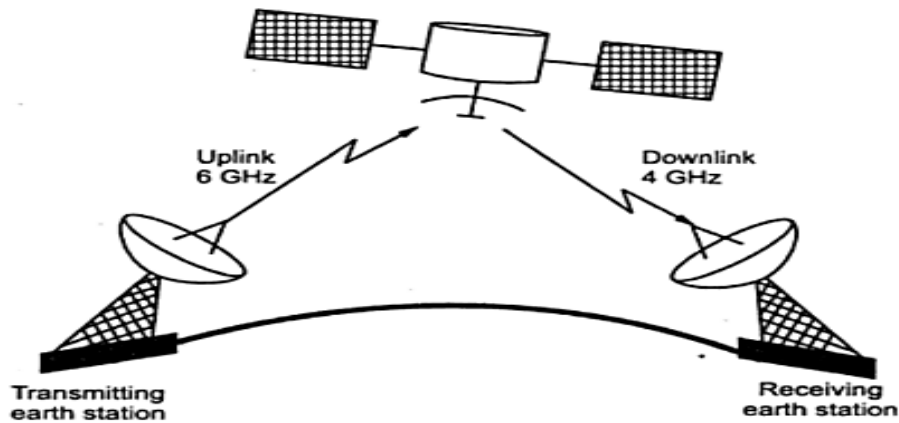


Figure I. 10 : Les systèmes d'un satellite de télécommunication [14].

I.7.3. Le fonctionnement des télécommunications par satellite

Les possibilités offertes par les satellites de télécommunications dépassent de loin les moyens classiques de liaison intercontinentaux tels que les câbles sous-marins. Un satellite placé sur une orbite géostationnaire couvre environ un tiers de la surface terrestre. Par conséquent, Il peut donc mettre en liaison des stations quelconques se trouvant dans cette zone. Cette possibilité a permis d'établir des télécommunications intercontinentales.

Les télécommunications spatiales a conduit à des améliorations et des développements significatifs dans les domaines de la téléphonie, des télégrammes, des télécopies, des téléconférences, de la rédaction de journaux, la transmission de données numériques entre les filiales de l'entreprise et de nombreuses autres applications. Outre les télécommunications fixes qui peuvent établir des liens entre les stations de radiodiffusion et de télévision à l'échelle mondiale, régionale ou nationale, les télécommunications de services mobiles permettent d'améliorer les liaisons entre un point fixe situé sur la terre et des engins de transport comme les navires, avions et véhicules routiers. Ils ont contribué au contrôle et à l'amélioration de la navigation aérienne et maritime [15].

I.8.Le satellite ALCOMSAT- 1

L'Algérie a lancé son premier satellite de télécommunications Alcomsat-1. Ce satellite algérien de télécommunications spatiales a été lancé le 11 décembre 2017 avec succès, porté par le lanceur chinois *Long March 3B*, depuis la station *Xichang Satellite Launch Center*, située dans la province du Sichuan à 2200 km au Sud-Ouest de Pékin. Le satellite Alcomsat-1 est dédié notamment aux télécommunications, la télédiffusion et l'internet. Construit pour une

durée de vie de 15 ans, Alcomsat-1 dispose de 33 répéteurs opérationnels : 19 en bande Ku, 12 en bande Ka et deux en bande L. Le satellite est exploité par l'Agence spatiale algérienne (ASAL) [16] [17].



Figure I.11 : Satellite ALCOMSAT-1 [18].

I.9. Les systèmes Satellitaires

I.9.1. Les systèmes GEO (Geostationary Earth Orbit)

Le GEO est également appelé orbite géosynchrone (ou synchrone), qui a une période de révolution de 24 heures mais il est inclinée par rapport à l'équateur. Les orbites situées en dessous d'une altitude moyenne d'environ 36 000 km ont des périodes de révolution inférieures à 24 heures et sont donc appelées non GEO. Le satellite GEO a la capacité de couvrir un hémisphère entier à la fois. Les satellites sont conçus pour ne durer qu'environ 15 ans en orbite, en raison de l'impossibilité pratique de desservir un satellite en GEO et de reconstituer les consommables (carburant, cellules de batterie et composants dégradés et défaillants). La plupart des satellites de communication sont aujourd'hui des satellites géostationnaires et les domaines d'application spécifiques des satellites géostationnaires sont [14] :

- La radiodiffusion télévisuelle.
- Les communications mondiales régionales, nationales et internationales.
- Les circuits téléphoniques et de données.
- Les services de la téléphonie mobile.

- Les réseaux privés pour entreprises, agences gouvernementales.
- Les applications militaires.

I.9.2. Les systèmes MEO (Medium Earth Orbit)

L'altitude du système d'orbite terrestre moyenne (MEO) est d'environ 1500 à 36000 km. La période d'orbite du satellite est d'environ 6 heures, une période beaucoup plus longue que le système LEO, a tendance à pendre sur une région donnée de la terre pendant quelques heures. La distance de transmission et le retard de propagation sont supérieurs à ceux de LEO mais toujours nettement inférieurs à GEO.

Les domaines d'application spécifiques des satellites MEO sont [14] :

- La surveillance de la surface de la terre.
- Les constellations des systèmes de positionnement global (GPS).
- La collecte de données pour les services militaires.

I.9.3. Les systèmes LEO (Low Earth Orbit)

Le système de satellites mobiles en iridium utilise l'orbite terrestre basse (LEO) dans laquelle les satellites se trouvent à une altitude d'environ 1000 km et dépassent chacun un utilisateur donné en quelques minutes seulement. L'avantage d'utiliser un réseau à satellite non GEO (LEO) est que la portée de l'utilisateur est plus courte, donc moins de puissance rayonnée est requise et le délai de propagation est également réduit. Le service est transféré de satellite à satellite de manière transparente. La période d'orbite du satellite est comprise entre 1,6 et 1,8 heure.

Les domaines d'application spécifiques des satellites LEO sont [14] :

- Les communications mobiles par satellite.
- La surveillance de la surface de la terre.
- Les applications des ressources terrestres.
- Les levés géologiques.

I.10. Les liaisons satellitaires

Pour éviter les relais terrestres, beaucoup des réseaux proposent des liaisons inter-satellites. Ces liaisons doivent avoir une haute directivité et peuvent être classées en deux catégories différentes [19] :

✓ **Les liaisons intra-orbitales** : relient deux satellites adjacents sur la même orbite. La direction du satellite voisin reste à peu près constante.

- ✓ **Les liaisons inter-orbitales** : permettent aux satellites adjacents d'orbites différentes de se lier. Comme le montre la figure I.12 :
- ✓ **Les liaisons alternées** : dont la direction peut être perpendiculaire à la vitesse du satellite, mais nécessitent une déconnexion lorsque les orbites se croisent.
- ✓ **Les liaisons permanentes** : ayant une direction polarisée avec le perpendiculaire à la vitesse du satellite, et qui peut rester en permanence.

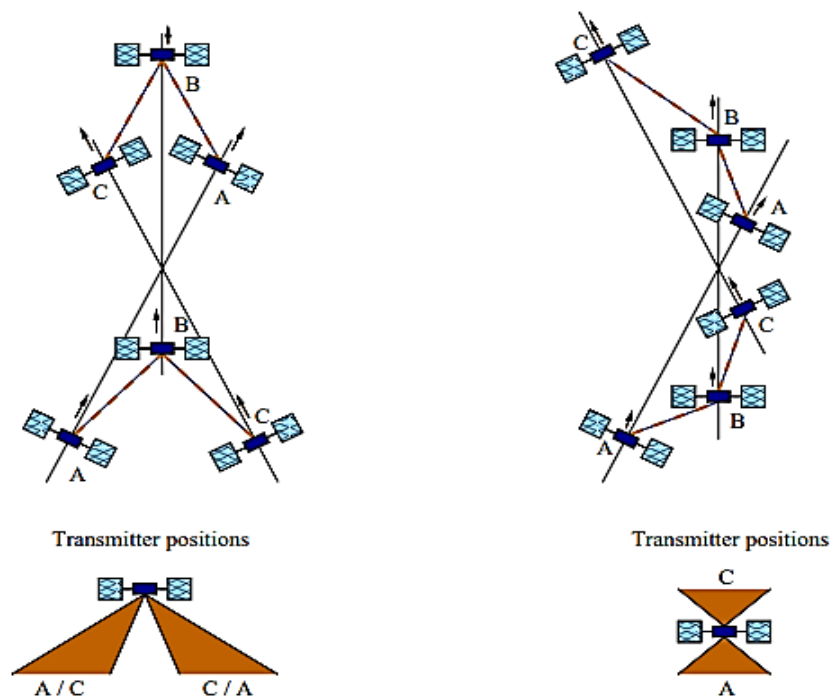


Figure I.12 : Les types de liaisons inter-satellites [19].

I.11. Les bandes des fréquences

Les bandes de fréquences mises en œuvre pour les communications par satellite sont le plus souvent comprises entre 1 et 30 GHz. En dessous de 1 GHz les ondes sont principalement réfléchies et diffusées par l'atmosphère. Au-dessus de 30 GHz les liaisons satellitaires sont possibles mais l'absorption atmosphérique est importante et la technologie d'amplification plus complexe. La bande de fréquence 1-30 GHz est divisée en sous bandes désignées par des lettres [20] :

Bande	Bande de fréquence (GHz)	Services
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
C	4 – 8	Radiodiffusion
X	8 – 12	Militaire
Ku	12 – 18	Diffusion vidéo
Ka	27 – 40	Diffusion audio
K	18 – 27	Observations astronomiques, radars
Onde mm	> 40	Inter satellite

Tableau I.1 : Les bandes des Fréquences et quelques services [20].

Bande	Liaison montante (GHz)	Liaison descendante (GHz)
C	5.925-7.075	3.7-4.2
Ku	14.0-14.5	11.7-12.2
Ka	27.5-31.0	17.7-21.2

Tableau I.2 : Attribution de bandes de fréquences de liaisons typiques [20].

I.12. Les constellations satellitaires

Une constellation est un groupe de satellites similaires travaillant ensemble en partenariat pour fournir un réseau de services utiles. La constellation (ou configuration) des satellites dans le système LEO est conçue pour fonctionner comme un réseau principalement pour obtenir une couverture plus ou meilleure. Chaque satellite dans un plan orbital maintient sa position par rapport aux autres satellites. Chaque satellite d'une constellation LEO, par exemple, agit comme un nœud de commutation et est connecté aux satellites voisins par des liaisons intersatellites [20].

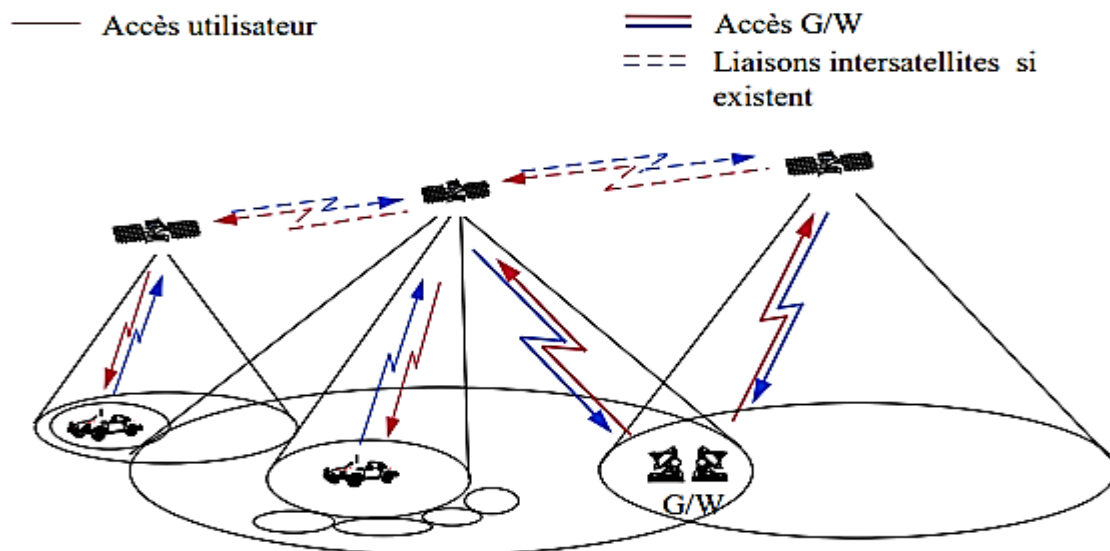


Figure I.13 : Architecture de la constellation de satellite [21].

I.13. Les Services de télécommunications par satellites

Les satellites de télécommunications fournissent une gamme variée de services, notamment des services de radiodiffusion, télévisuelle, de téléphonie internationale et de la communication des données, la plupart de ces services étant de nature polyvalente. Traditionnellement, les applications par satellite comprenaient la radiodiffusion télévisuelle et les services de téléphonie fixe et mobile, mais maintenant de nouvelles dimensions sont ajoutées aux applications par satellite avec l'avènement de services comme internet et le multimédia. Cependant, les satellites sont confrontés à une forte concurrence des réseaux terrestres en général et de la fibre optique en particulier [2].

I.13.1. La téléphonie

Les lignes terrestres et les câbles de communication sous-marins acheminent la plupart des appels téléphoniques dans le monde. Cependant, certaines régions utilisent la téléphonie fixe par satellite, notamment : des régions de certains continents et des pays où les télécommunications fixes sont rares à inexistantes ; par exemple de grandes régions d'Amérique du Sud, d'Afrique, du Canada, de Chine, de Russie, d'Australie et des bords de l'Antarctique et du Groenland. De plus, le téléphone satellite dessert des îles éloignées telles que l'île de l'Ascension, Sainte-Hélène, Diego Garcia et l'île de Pâques, où aucun câble sous-marin n'est en service. Le réseau téléphonique public commuté fixe (RTPC) relaie les appels téléphoniques des téléphones fixes vers une station terrienne, où ils sont ensuite transmis à un satellite géostationnaire. La liaison descendante suit un chemin analogue. Les téléphones

satellites se connectent directement à une constellation de satellites géostationnaires ou à orbite terrestre basse. Les appels sont ensuite renvoyés vers un port de télécommunications par satellite (téléport) connecté au RTPC [22].

I.13.2. La télédiffusion

La transmission vidéo par satellite est la première application des satellites de télécommunications. On estime qu'il représente 60% de la capacité du secteur spatial. Les normes vidéo analogiques PAL (Phase Alternating Line), SECAM (Sequentiel Couleur with Memory) et NTSC (National Television Standard Commitee) peuvent être utilisées pour la transmission, mais les normes vidéo numériques sont utilisées dans la plupart des systèmes actuels. Essentiellement, la norme DVB-S (Digital Video Broadcasting Satellite) est utilisée, qui encode les flux vidéo à l'aide de MPEG-2 (Moving Picture Experts Group 2) et permet aux signaux d'être transmis entre les systèmes satellites, les systèmes sans fil et les systèmes câblés. Tous les progiciels satellitaires européens utilisent la norme DVB-S, et la norme audio numérique de radiodiffusion numérique correspondante est appelée DAB (Digital Audio Broadcasting). Il faut ajouter que la norme DVBS2 prend en charge le format MPEG-4 (Moving Picture Experts Group 4) et les formats généraux tels que IP (Internet Protocol) et ATM (Automated Teller Machines), ce qui permet aux données d'être transmises dans leur format d'origine sans les encapsuler dans des trames MPEG [8].

I.13.3. La transmission des données

La transmission de données constitue la troisième grande application des satellites de télécommunications. Elle comprend [8]:

- Les réseaux satellite de l'entreprise sont apparus vers 1980 en raison de la réduction de la taille des antennes et de la réduction du coût des stations terriennes. Cette réduction permet aux satellites de concurrencer efficacement les infrastructures au sol pour des réseaux d'au moins des dizaines de sites. Nous parlons de VSAT (Very Small Aperture Terminal) pour les stations terriennes de diamètre d'antenne inférieur à 2,4 m.
- La radiomessagerie par satellites est un service fourni sur plusieurs satellites GEO tels qu'Inmarsat-C et D, OmniTracs ou EutelTracs. Elle existe également dans les constellations en orbite basse comme OrbComm.

– Dans le même temps, l'internet par satellite est désormais un sujet très important : le satellite, le LMDS, l'ADSL, les solutions par câble et d'autres technologies font désormais partie des solutions d'accès locales.

I.13.4. L'internet

Dans les régions éloignées, les satellites permettent aux utilisateurs d'accéder à internet. Ensuite, le modem satellite joue le rôle du modem ADSL : il accède au réseau internet via une antenne parabolique, qui communique avec un satellite, et le satellite lui-même est connecté au réseau internet via un centre [8].

I.13.5. Radio

La radio par satellite propose des services audio dans certains pays, notamment aux États-Unis. Une radio satellite ou radio par abonnement (SR) est un signal radio numérique qui est diffusé par un satellite de communication, qui couvre une portée géographique beaucoup plus large que les signaux radio terrestres. Les services mobiles, tels que Sirius, XM et World space, permettent aux auditeurs de parcourir tout un continent, en écoutant la même programmation audio où qu'ils aillent [22].

I.13.6. Positionnement (Localisation)

GPS une abréviation pour le système de positionnement global. Il s'agit d'un système de navigation par satellite qui vous permet de connaître vos coordonnées de position à l'aide d'un récepteur n'importe où dans le monde, quelles que soient les conditions météorologiques. L'idée de base du GPS est de fournir l'emplacement et l'heure aux récepteurs du monde entier quelles que soient les conditions météorologiques. La localisation 3D peut être obtenue chaque fois qu'il y a au moins 4 satellites visibles pour le récepteur, alors que la localisation 2D peut déjà être estimée avec 3 satellites. Un exemple en est l'utilisation du GPS dans l'aviation car il est indépendant des conditions météorologiques. Cela donne la possibilité de naviguer physiquement sans visibilité et d'utiliser le pilote automatique pour les vols. C'est également un outil utile pour les situations d'urgence, et à titre d'exemple, le GPS combiné avec les services basés sur la localisation des systèmes cellulaires, les appels d'urgence peuvent être localisés de manière suffisamment précise par les opérateurs mobiles. Le système est de plus en plus utilisé dans les environnements sans emplacement. En particulier, les

réseaux de télécommunications peuvent utiliser le GPS pour la synchronisation de la transmission sur de grandes zones.

Le premier stade pleinement opérationnel du GPS, avec 24 satellites et 3 satellites de rechange, a été atteint en 1994. Les satellites GPS ont une certaine durée de vie et doivent être remplacés après leur période utile. Au fil du temps, le GPS a également été développé. Cela a abouti à la mise en œuvre de la prochaine génération de satellites GPS III [2] [23].



Figure I.14 : Constellation des satellites de localisation [24].

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

Les stations terriennes communiquent entre elles via des équipements satellitaires. Lorsque l'un d'eux veut envoyer un signal, il doit être capable d'émettre indépendamment des autres stations qui peuvent vouloir envoyer un signal. L'accès au satellite, et à un canal du satellite, par plusieurs porteuses implique la mise en œuvre de techniques spécifiques, appelées technologies d'accès multiple. La mise en œuvre de ces technologies variera selon que le satellite ne possède qu'un seul faisceau (satellite à faisceau unique) ou plusieurs faisceaux (satellite à faisceaux multiples). Une stratégie d'accès aux canaux par satellite est mise en place afin de permettre à plusieurs utilisateurs d'accéder au même canal de transmission, et une exploitation maximale des transpondeurs, tout en garantissant que les interférences sont minimisées. C'est pourquoi il est souhaitable de mettre en œuvre une technologie de partage des ressources spatiales communes. Les trois principales stratégies d'accès aux chaînes satellitaires sont: la politique par répartition (FDMA, TDMA, CDMA, etc.), les stratégies d'accès aléatoire et les stratégies de réservation [8].

I.14.1. Modèle OSI de l'ISO

Le modèle OSI (Open Systems Interconnection) est un outil de référence pour comprendre les communications de données entre deux systèmes en réseau. Il divise les processus de communication en sept couches. Chaque couche remplit à la fois des fonctions spécifiques pour prendre en charge les couches supérieures et offre des services aux couches inférieures. Les trois couches les plus basses se concentrent sur le passage du trafic à travers le réseau vers un système final. Les quatre couches supérieures entrent en jeu dans le système final pour terminer le processus. Sans le Modèle OSI, les réseaux seraient très difficiles à comprendre. Cependant avec le modèle OSI, les réseaux peuvent être divisés en éléments gérables. Le modèle OSI fournit un langage commun pour expliquer les composants et leurs fonctionnalités et mettre en œuvre [25].

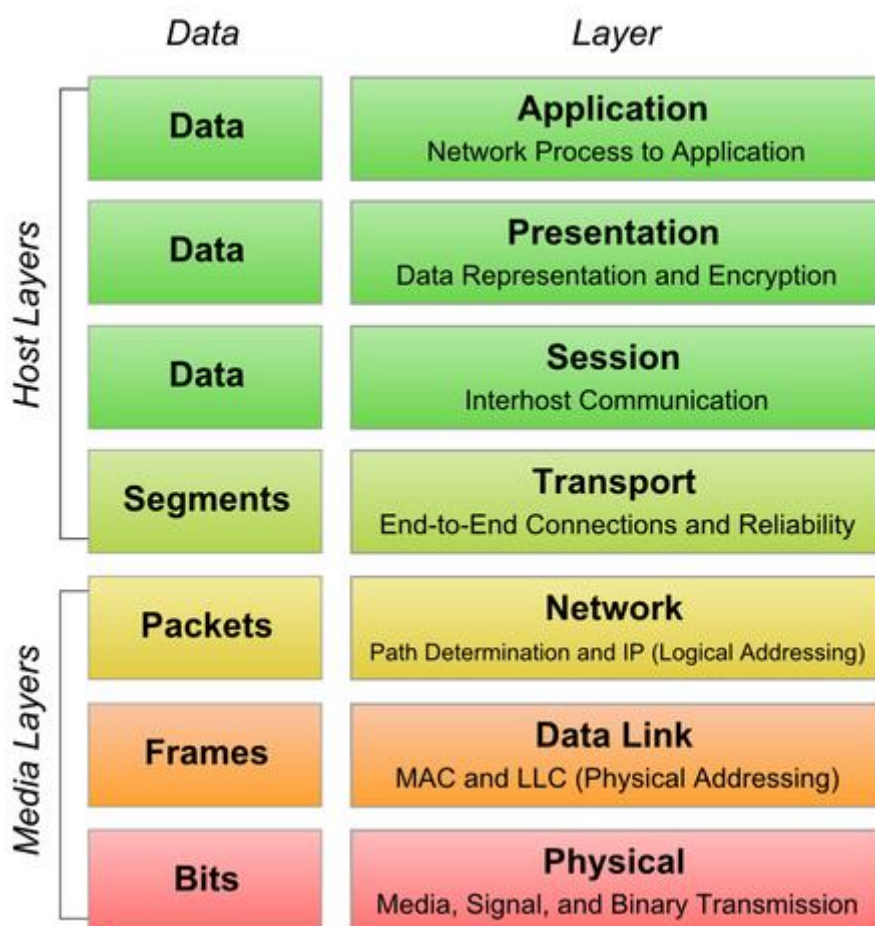


Figure I.15: Les différentes couches du modèle OSI [26].

I.14.2. La couche MAC

Le rôle de la sous-couche MAC (Media Access Control) est principalement de gérer les conflits d'accès lorsque plusieurs systèmes partagent le même support de communication. La

stratégie couramment adoptée consiste à simplifier d'abord ce problème en s'assurant que les conflits ne se produisent pas à l'échelle d'un bit de données mais à l'échelle d'un ensemble de bits. Pour cette raison, MAC demande à chaque système émetteur de regrouper les données qu'il transmet en paquets de bits. De plus, les systèmes de transmission étant rarement suffisamment synchronisés, il est généralement nécessaire de limiter ces paquets par des séquences de bits de contrôle facilement identifiables.

L'ensemble de résultats est appelé une trame. Outre les données reçues de la couche supérieure, cette trame contient également de nombreux bits de contrôle et de gestion: descriptions de l'émetteur et du récepteur de la trame, sommes de contrôle, etc. En plus de la structure de trame, le MAC doit également gérer le conflit lui-même. Ce problème peut généralement être résolu en deux étapes. La première consiste à choisir une technologie de base pour isoler le trafic généré par différentes stations. Cette technique de base est généralement appelée technique d'accès. Étant donné que ces technologies sont généralement insuffisantes, il est nécessaire d'établir une stratégie d'accès aux ressources de communication. Cette stratégie est souvent appelée schéma d'accès. La combinaison de ces deux aspects est le protocole d'accès [22].

1.14.3. Les politiques par répartition

Ces politiques regroupent les politiques d'accès suivant [8] :

- ✓ **Accès multiple à répartition de fréquence (FDMA)** : Permet à n stations de diviser la bande passante du transpondeur satellite en n sous-bandes. Chaque sous-bande est attribuée à une station et est autorisée à émettre simultanément mais indépendamment des autres stations.
- ✓ **Accès multiple à répartition dans le temps (TDMA)** : Il s'agit de diviser le temps en plusieurs intervalles de temps, qui sont attribués tour à tour à différentes stations terriennes. Toutes les stations terriennes émettent à la même fréquence porteuse sur toute la largeur de bande, mais en continu.
- ✓ **Accès Multiple à Répartition par Code (CDMA)** : Le principe de cette méthode d'accès est d'effectuer une attribution de canal en identifiant le code de chaque station du système de communication. Ces stations utilisent toute la bande passante et les codes qui leur sont attribués permettent de séparer les données qu'elles envoient des données des autres stations.

I.14.4. Les politiques d'accès aléatoire

Elles regroupent les politiques d'accès suivants [8] :

- ✓ **ALOHA** : Permet aux stations de transmettre des paquets de données de manière inconditionnelle dès qu'elles les ont, sans avoir à écouter les médias avant la transmission. En cas de conflit, la station renverra le paquet après un délai aléatoire.
- ✓ **ALOHA discrétisé** : L'idée de cette méthode est de couper le temps en slots, et chaque slot correspond au temps de transmission d'un paquet de données. Puis la station émettrice transmet les paquets de manière synchrone au début de slot.
- ✓ **ALOHA avec réservation** : Il s'agit d'une méthode basée sur le concept de probabilité. Si une station commence à envoyer un paquet de données, il y a de fortes chances d'envoyer un autre paquet de données immédiatement. Ce raisonnement conduirait à l'idée de réserver plusieurs tranches de temps à la station qui a commencé à émettre. De plus, si une collision se produit, elle se produira dans tout l'intervalle plutôt qu'une partie de celui-ci.

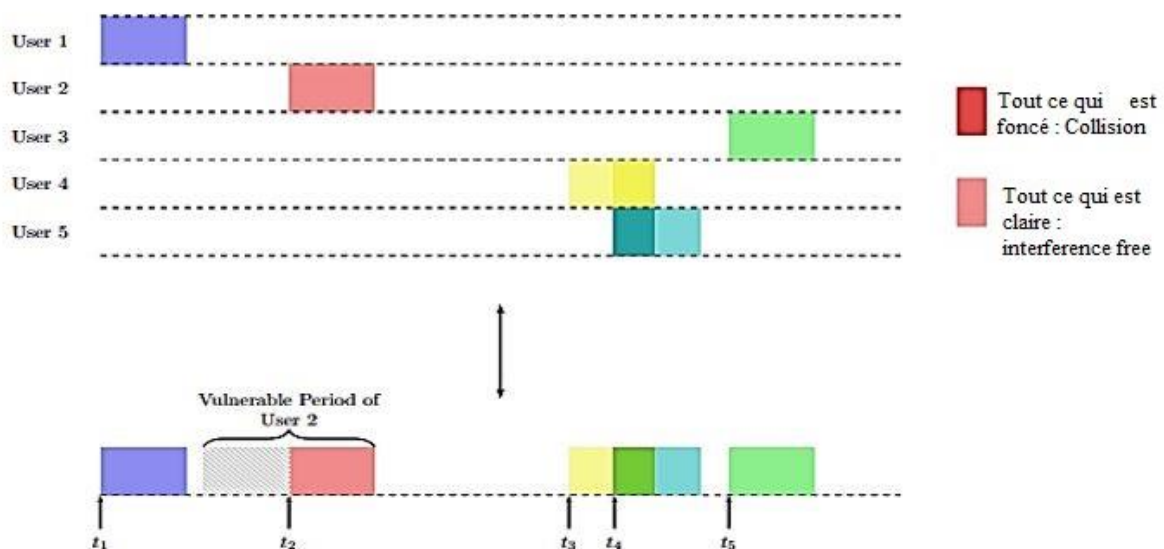


Figure I.16: Une partie du signal reçu pour le protocole ALOHA.

I.14.5. Les politiques de réservation : Demand Assignment Multiple Access (DAMA)

Elles permettent aux stations qui n'en ont besoin que de transmettre leurs données. Cette catégorie nécessite un processus de réservation pour autoriser la transmission de la station, ce qui entraîne un retard important avant de devenir propriétaire du canal. Généralement, ce procédé est très efficace pour l'utilisation des téléphones car il permet d'optimiser les ressources spatiales.

Le choix de la méthode d'accès par satellite est critique pour les performances du réseau. La sélection se fera sur la base de deux critères principaux, à savoir le nombre de communications et leur durée. Pour les conversations fréquentes et longues, la méthode TDMA est recommandée. La méthode FDMA convient pour un nombre moyen ou important d'appels, mais sa durée est limitée. La méthode CDMA optimise de manière optimale les bandes de fréquences spatiales disponibles, mais n'est pas utilisée. Ses performances se limitent aux appels occasionnels de courte durée [8].

I.14.6. PODA (Priority-Oriented Demand Assignment)

La PODA combine des demandes implicites et explicites. Chaque trame PODA TDMA se compose d'une partie de contrôle et d'une partie de données avec une limite réglable. La limite est adaptée à la charge actuelle. L'accès à la partie contrôle peut être déterministe ou par contention ALOHA. Tous les terminaux suivent la partie de contrôle et maintiennent une file d'attente pour déterminer leurs instances d'accès appropriées. Pour le trafic de flux comme la voix et la vidéo, une réservation n'est effectuée qu'une seule fois et est conservée par chaque terminal dans une file d'attente distincte [27].

I.14.7. Les techniques hybrides

Les techniques qui combinent à la fois l'accès à la réservation et l'accès aléatoire pour améliorer les performances sont appelés protocoles hybrides. De tels schémas hybrides ont une capacité intégrée d'adaptation au profil de trafic offert. Ainsi, selon l'intensité et le profil de la charge offerte, les protocoles peuvent s'adapter dynamiquement pour offrir aux stations des possibilités soit d'utiliser un accès aléatoire, soit de faire des réservations [28].

Il y a plusieurs techniques hybrides ont été proposées, parmi lesquelles les trois suivantes :

✓ **Le protocole FAMA** : L'accès multiple est la technique de partage ou de division du canal (support de transmission) pour le nombre de stations le partageant. Les trois méthodes d'accès multiple les plus couramment utilisées sont [15]:

- Accès multiple par répartition en fréquence (FDMA).
- Accès multiple par répartition dans le temps (TDMA).
- Accès multiple par répartition par code (CDMA).

✓ **La technique IFFO** : Les protocoles IFFO (Interleaved Frame Flush-Out) intègrent à la fois l'accès basé sur la contention et la réservation pour arbitrer l'utilisation du canal

satellite. Ces protocoles sont particulièrement adaptés à une utilisation dans les réseaux à satellite à commutation de paquets [28].

✓ **Le schéma RRR :**(Round-Robin Reservation) combine l'accès aléatoire aux réservations. Dans RRR, on suppose qu'il y a plus de créneaux que de stations, et chaque station peut se voir attribuer un créneau domestique, les emplacements supplémentaires (ceux qui ne sont pas des emplacements d'origine) ne sont attribués à personne [28].

I.15. Conclusion

La communication par satellite est importante dans notre vie actuelle et présente plusieurs avantages pour assurer une communication rapide et plus facile et offrir ainsi une vie plus pratique.

Ce chapitre a été consacré aux généralités sur les communications satellitaires. Nous avons présenté le satellite de télécommunications et ses différents services, leurs caractéristiques, fonctionnalités de base de satellite, ses différentes orbites, les systèmes satellitaires, ces liaisons, les bandes des fréquences, les constellations et aussi satellite Alcomsat-1 qui est le premier satellite de télécommunications de l'Algérie. Le chapitre s'est conclu par une introduction sur les techniques d'accès aux canaux satellitaires.

Chapitre II : Bilans du Liaison Satellitaire

II.1. Introduction

Lors de la conception d'un système de télécommunications, l'une des premières et des plus importantes étapes consiste à calculer un bilan de liaison (également appelé analyse de liaison). Le bilan de liaison est un calcul théorique des performances de bout en bout de la liaison de communication. Il rend compte de tous les gains et pertes du lien dans un ensemble spécifique de conditions, et le résultat de l'analyse est un ensemble de facteur de mérite qui caractérise la qualité du lien.

Ce chapitre illustre comment calculer le bilan d'une liaison satellitaire. Avant d'effectuer un exemple de calcul, nous allons d'abord définir les notions de base du bilan de liaison.

II.2. La liaison satellitaire

La liaison par satellite de communication est définie par plusieurs paramètres de base, certains utilisés dans les définitions de systèmes de communication traditionnels, d'autres propres à l'environnement satellitaire. Deux liaisons aériennes ou en espace libre unidirectionnelles entre les stations terriennes sont illustrées. Une station terrestre émet vers le satellite un flux d'information cette partie de la liaison s'appelle la liaison montante, tandis que la partie du satellite au sol est la liaison descendante. Le satellite n'est qu'un simple répéteur, il régénère les signaux reçus et les réémet en direction de la Terre. La figure II.1 illustre le principe d'une liaison satellitaire [29].

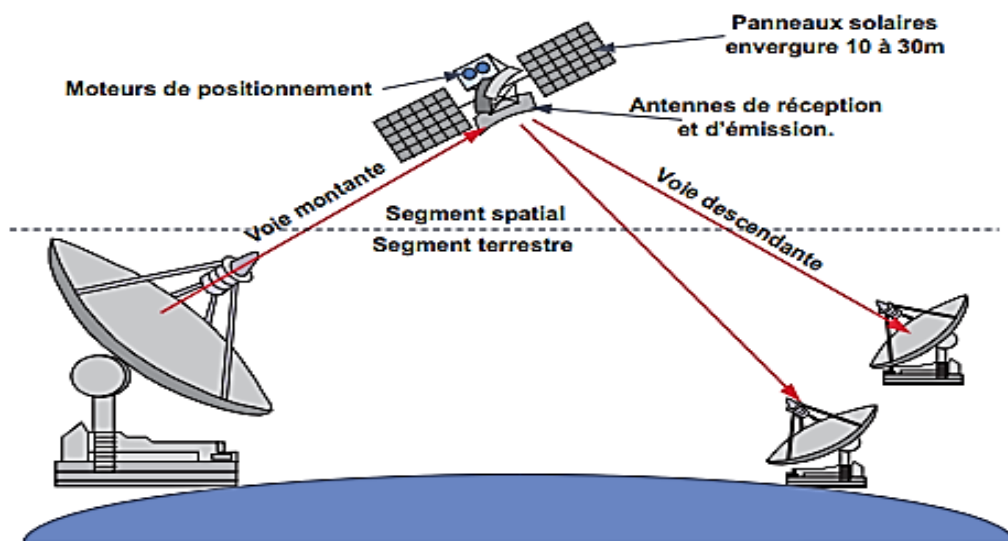


Figure II.1 : La liaison satellitaire et ces paramètres [30].

III.3. Le bilan de liaison

Le bilan de liaison est une méthode efficace pour analyser la couverture d'un réseau sans fil. Cette méthode est également appliquée à l'ensemble du processus de planification et d'optimisation du réseau. Le processus spécifique du bilan des liaisons montantes et descendantes est presque le même. Mais leurs résultats budgétaires sont utilisés à des fins différentes. Le bilan de liaison montante est toujours utilisé pour déterminer la couverture de la cellule. Lorsque le nombre d'utilisateurs d'accès augmente, la capacité de la liaison descendante est limitée. Par conséquent, le bilan de la liaison descendante est toujours utilisé pour estimer la capacité du système [31].

II.3.1 Paramètres généraux

II.3.1.1. Le rapport signal sur bruit (C/N)

Le rapport puissance de la porteuse sur bruit C/N est une valeur importante pour évaluer la qualité de la liaison de transmission par satellite. A partir du C/N, une conclusion directe peut être tirée en ce qui concerne le taux d'erreur sur les bits à attendre. Le C/N est le résultat de la puissance rayonnée par le satellite (environ 100 W), du gain d'une antenne aux extrémités émettrice et réceptrice (taille de l'antenne réceptrice) et de la perte dans l'espace entre les deux [32].

$$C/N [dB] = 10\log\left(P_{Porteuse}/P_{Bruit}\right) \quad (II.1)$$

En plus du rapport de la puissance de la porteuse sur bruit, il existe également le rapport signal sur bruit (SNR ou S/N). C'est une mesure relative, permettant la comparaison entre le niveau du signal utile et celui du bruit. Le SNR désigne le rapport de la puissance du signal en bande de base, sur le bruit mesuré avant modulation ou après démodulation [33] :

$$S/N [dB] = 10\log\left(P_{Signal}/P_{Bruit}\right) \quad (II.2)$$

II.3.1.2. Le rapport d'énergie par bit sur bruit (E_b/N_0)

Le rapport d'énergie par bit sur bruit E_b/N_0 est un paramètre couramment utilisé pour comparer les systèmes numériques. C'est un rapport signal sur bruit ; plus précisément, c'est le rapport de l'énergie binaire à la densité spectrale de puissance de bruit, l' E_b/N_0 peut être calculé par [34] [35] :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_R}{N_0} \times \frac{1}{R_b} \quad (\text{II.3})$$

Où,

P_R : La puissance du récepteur.

R_b : Le taux de bits d'information.

II.3.1.3. l'Equation de FRIIS

Dans un environnement d'espace libre, comme notre atmosphère, la perte peut être déterminée par l'équation de Friis [36] :

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

Avec ;

P_r et P_e : sont respectivement la puissance disponible au niveau de l'antenne de réception et la puissance fournie à l'antenne source.

G_r et G_e : sont respectivement le gain de l'antenne du récepteur et le gain de l'antenne de l'émetteur.

λ : est la longueur d'onde de la porteuse.

d : est la distance émetteur-récepteur.

II.3.1.4. l'Affaiblissement de propagation en espace libre

Pour calculer l'affaiblissement en espace L_{SF} en utilisant l'équation de Friis et en supposant que $G_r = G_e = 1$ [37] :

$$L_{SF}(db) = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (\text{II. 5})$$

II.3.1.5. l'Antenne isotrope

Une antenne isotrope est définie comme un élément hypothétique qui rayonne également dans toutes les directions. C'est une antenne idéale mais elle n'est pas réalisable pratiquement. Il est utile comme antenne de référence pour déterminer les propriétés directives des antennes pratiques. Si P_i est la puissance d'entrée d'une antenne isotrope sans perte, la densité de puissance est [38] :

$$P_D = \frac{P_i}{4\pi r^2} \quad W/m^2 \quad (\text{II. 6})$$

Où, r est le rayon d'une sphère.

II.3.1.6. Le Gain d'une antenne

Le gain d'antenne est un paramètre qui décrit certains facteurs de gain de l'antenne au signal électromagnétique de la direction de l'émetteur ou de la direction du récepteur. Le gain d'antenne est l'un des principaux paramètres du système de communication par satellite, car il peut avoir un effet sur le calcul de la PIRE (puissance isotrope rayonnée efficace). Le gain d'antenne peut être calculé à partir de [39] :

$$G = \eta \cdot \left(\frac{\pi \cdot D}{\lambda} \right)^2 \quad (\text{II. 7})$$

Tel que ;

G : Gain d'antenne parabolique (watt).

D : Diamètre de l'antenne (m).

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

η : Efficacité de l'antenne.

c : Vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s).

f : Fréquence de travail (GHz).

II.3.1.7. La puissance isotrope rayonnée équivalente (P.I.R.E.)

La puissance rayonnée isotrope équivalente est la quantité de puissance qu'une antenne doit transmettre à un récepteur afin de produire le niveau de pointe de transmission. La PIRE est généralement mesurée en décibels sur un niveau de puissance donné et correspond essentiellement à la force d'une transmission vers un emplacement de réception. PIRE, par conséquent, fournit un moyen de comparer la puissance de transmission entre les dispositifs émetteurs, indépendamment de la taille, de la forme ou du type des émetteurs.

$$PIRE = P_e \cdot G_e \quad (\text{II. 8})$$

Ce produit décrit la combinaison de la puissance de l'émetteur et du gain d'antenne en termes d'une source isotrope équivalente avec une puissance $P_e \cdot G_e$ watts, rayonnant uniformément dans toutes les directions [40].

II.3.1.8. Le facteur de mérite G/T

Le rapport G / T (gain / température) est une valeur de mérite utilisée pour indiquer la sensibilité de l'antenne et du récepteur de la station au sol dans un système de communication par satellite. Plus le rapport est élevé, plus la station au sol peut détecter facilement un signal satellite faible. De ce qui suit, on peut voir que cette mesure de sensibilité comprend non

seulement les effets du bruit généré dans la station au sol elle-même, mais aussi les effets du bruit généré dans tout l'environnement, terrestre et cosmique, dans lequel l'antenne de la réception de la station au sol est immergée [41].

II.3.1.9. La Capacité d'un canal

En fonction du rapport signal sur bruit (SNR), il est possible d'estimer la vitesse maximale des bits à transmettre sur un support physique tout en garantissant un certain seuil d'erreur. Cette vitesse est connue par la capacité du canal d'un système de communication. Selon la théorie de l'information, pour le canal sans bruit idéal, la capacité du canal peut être calculée par la formule de Nyquist [42]:

$$C_1 = 2B \times \log_2 M \quad (bit/s) \quad (II. 9)$$

B est la bande passante (Hz), M est la valence, qui détermine l'élément de code des signaux. La formule de Nyquist est dérivée dans des conditions idéales. Dans des conditions réelles, la vitesse de transmission maximale de l'élément de code est inférieure à la valeur obtenue dans des conditions idéales. Pour un canal de transmission bruyant imparfait, il existe des signaux d'interférence de bruit gaussien de bande passante limitée et la formule de Shannon peut être utilisée pour calculer la capacité du canal, alors la capacité du canal de ce canal de signal est [43] :

$$C_2 = B \times \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) (bit/s) \quad (II. 10)$$

II.3.1.10. Les bruits dans les liaisons satellitaires [35]

- ❖ **Le bruit thermique de la liaison montante :** Bruit généré par le propre système de réception du satellite. Le satellite lui-même a une antenne de réception et un LNA (Low noise amplifier) et a une valeur G / T. Cette valeur G / T, les pertes, la puissance transmise par la station terrienne et d'autres paramètres sont utilisés pour calculer le rapport entre la puissance du signal (ou de la porteuse) et le bruit thermique du système de liaison montante. Ce composant est appelé liaison montante C / T.
- ❖ **Le bruit d'intermodulation du transpondeur :** Le bruit de l'intermodulation par satellite est présenté comme un rapport de la puissance de la porteuse à la température du bruit, ou C/T_{im} (intermodulation) en tenant compte que ce terme est différent de la contribution du bruit thermique de la liaison montante, C / T de la liaison montante.

- ❖ **Le bruit thermique de la liaison descendante :** La partie descendante de la liaison satellite ajoute également du bruit, ceci est dominé par le G / T de la station terrienne par satellite. Le bruit thermique de la liaison descendante est défini comme le rapport de la puissance dans la porteuse qui est reçue au bruit ajouté au système par la liaison descendante, et (à nouveau) est désigné C / T .
- ❖ **Les performances globales du bruit :** La performance globale du bruit est utilisée dans l'analyse de liaison pour déterminer la quantité de bruit présente dans le signal reçu. Si le bruit combiné global est trop élevé, les performances des modems de réception se dégraderont.

II.3.1.11. La température de bruit

Dans le calcul de bilan de liaison, le terme N_0 (densité spectrale de bruit en W / Hz) ou le terme T (température de bruit) est utilisé de préférence à la puissance de bruit N , de sorte qu'il n'est pas nécessaire de spécifier la bande passante B dans laquelle le bruit est mesuré. La relation entre ces termes est :

$$N = kTB \text{ et } N_0 = N/B \quad (\text{II. 11})$$

Où k est la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ Joule / Kelvin). T doit être exprimé en degrés absolus, c'est-à-dire Kelvin (K) (température exprimée en Kelvin = température exprimée en degrés Celsius + 273).

N_0 et N sont parfois exprimés en décibels comme suit [44]:

$$N = 10 \log k + 10 \log T + 10 \log B \quad (\text{II. 12})$$

$$N_0 = 10 \log k + 10 \log T \quad (\text{II. 13})$$

Avec : $10 \log k = -228.6 \text{ dB}$

II.3.1.12. l'Efficacité spectrale

L'efficacité spectrale est définie pour quantifier l'efficacité du réseau cellulaire. Il s'agit d'une mesure de la quantité de services facturables d'information acheminés par un système cellulaire par unité de spectre. Il est mesuré en bits / seconde / Hz, ce qui inclut les effets de la méthode d'accès multiple, des méthodes de communication numérique, de l'organisation des canaux et de la réutilisation des ressources, il peut être calculé à partir de [45] [46]:

$$\eta = \frac{D_b}{B} \text{ Avec : } D_b = \frac{1}{T_b} \quad (\text{II. 14})$$

Tel que ;

B : La bande passante du système.

D_b : Le taux d'information binaire.

T_b : La durée du bit d'information.

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

L'équation de base pour calculer le rapport (C/N_0) de la liaison montante est donnée comme suit en dB [47] :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_m = PIRE_{St} - pertes + \left(\frac{G}{T}\right)_s - B + k \quad (\text{II. 15})$$

Où ;

$PIRE_{St}$: Puissance isotrope rayonnée équivalente de la station terrienne.

$pertes$: Les pertes du système.

$\left(\frac{G}{T}\right)_s$: Facteur de mérite du satellite.

B : Bande passante.

k : est la constante de Boltzmann $= 1,37 \times 10^{-23} \text{ Joules/Kelvin} = 10 \log_{10}(1,37) \times 10^{-23} = -228,6 \text{ dB J / K}$.

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

L'équation de base pour calculer le rapport (C/N_0) de la liaison montante est donnée comme suit en dB [47] :

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_d = PIRE_s - pertes + \left(\frac{G}{T}\right)_{st} - B + k \quad (\text{II. 16})$$

$PIRE_s$: Puissance isotrope rayonnée équivalente du satellite.

$pertes$: Les pertes du système.

$\left(\frac{G}{T}\right)_{st}$: Facteur de mérite de la station terrienne.

B : Bande passante.

k : est la constante de Boltzmann $= 1,37 \times 10^{-23} \text{ Joules/Kelvin} = 10 \log_{10}(1,37) \times 10^{-23} = -228,6 \text{ dB J / K}$.

II.3.4 Bilan de liaison global

L'équation de base pour calculer (C/N_0) pour le système est donnée comme [48]:

$$(C/N_0)_t = \frac{1}{\frac{1}{(C/N_0)_m} + \frac{1}{(C/N_0)_d}} \quad (\text{II. 17})$$

En décibel :

$$(C/N_0)_t = (C/N_0)_m + (C/N_0)_d \quad (\text{II. 18})$$

III.4. Influence de méthode d'accès sur le bilan d'une liaison

Le contrôle d'accès multiple (MAC), qui fournit un mécanisme de partage efficace de la ressource satellite, joue un rôle essentiel dans l'amélioration de l'utilisation des ressources radio. Afin d'optimiser efficacement l'allocation des ressources et la puissance embarquée, une nouvelle technique de contrôle d'accès au support (MAC) devrait être proposée. En outre, le cœur de la technologie MAC est constitué de schémas d'accès multiples, qui peuvent coordonner les utilisateurs partageant les ressources limitées pour obtenir une transmission efficace et fiable [49].

II.4.1 La qualité de service

La qualité de service est la capacité d'un élément de réseau (par exemple, une application, un hôte ou un routeur) à avoir un certain niveau d'assurance que ses exigences en matière de trafic et de service peuvent être satisfaites. Elle est également définie comme le résultat collectif des facteurs de performance associés au service et qui déterminent le degré de satisfaction de l'utilisateur de ce service. Il s'agit d'une définition très générale mais qui cependant traduit bien le fait que la qualité de service est une notion significative pour "l'utilisateur" (usager humain, ou service de niveau supérieur), et qu'elle dépend de très nombreux facteurs interdépendants et associés à différents constituants du réseau. On utilisera le terme consacré QoS (Quality of Service) pour désigner la qualité de service [50].

II.4.2 QoS dans les satellites

Les protocoles MAC permettent à un terminal d'accéder au support de transmission dans un système de canal partagé. Les protocoles MAC doivent être en place pour la liaison montante terminale terrestre vers satellite car il s'agit des plusieurs canaux à un. En fonction

de l'environnement système, la technique MAC peut avoir un effet dominant sur la capacité du système à délivrer un contrat QoS. Un protocole MAC doit atteindre deux objectifs : la fourniture de la qualité de service et l'efficacité. Par disposition de QoS, nous entendons que le protocole MAC cible, à l'aide d'un algorithme de contrôle d'admission bien conçu, garantira le contrat de QoS négocié au moment de l'établissement de l'appel. Par efficacité, nous entendons que le protocole maximisera l'utilisation des ressources du réseau tout en garantissant la qualité de service des appels admis [46].

II.4.3 Critères de performance des protocoles MAC [51]

Le délai de la mise à jour : Nous définissons le délai de mise à jour comme le temps entre la réception de deux balises de mise à jour d'état consécutives provenant du même nœud. Le délai de mise à jour est le critère de performance le plus pertinent dans la couche MAC.

Le débit : le débit est défini comme la fraction de la capacité du canal utilisé. Il indique l'efficacité de la couche MAC. Le débit maximal est atteint lorsque le nombre de paquets correctement livrés est égal au nombre de paquets pour une charge de canal nette de 100%.

Le taux de collision : le taux de collision est défini comme la fraction de collision des messages transmis.

II.5. Le calcul du bilan de liaison

Afin de souligner l'importance du bilan de liaison on met un exemple de son calcul, on prend l'exemple du satellite LEO (Sky Bridge) pour les communications exploitées dans la bande Ku (12-14) GHz. Nous considérons ici que la puissance transmise pour LEO (Sky Bridge) est de 10 dBW. En général, pour le système LEO, la puissance émise ne doit pas dépasser 10 dBW, nous la considérons donc comme une puissance de référence [47].

❖ *Liaison montante :*

N°	Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
01	Puissance d'émission	P_e	10	dBW
02	Gain d'émission	G_e	3	dB
03	PIRE	PIRE	30	dBW
04	Bande passante	B	91.761	dBHz
05	Température	T	24.624	dBK
06	Constante de Boltzmann	K	-228.6	dBW/ K/Hz

07	Gain reçu	G_r	3	dB
08	Perte d'espace libre	L_{SF}	118.704	dB
09	Pertes atmosphériques	L_a	1	dB
10	Pertes de polarisation	L_p	3	dB
11	Pertes de désalignement d'antenne	L_{ant}	1	dB
12	Puissance reçue	P_r	-107.704	dB
13	Le rapport (G / T)	(G/T)	-21.624	dB

Tableau II. 1 : Les paramètres de la liaison montante [47].

❖ **Liaison descendante :**

N°	Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
01	Puissance d'émission	P_e	7	dBW
02	Gain d'émission	G_e	3	dB
03	PIRE	PIRE	21	dBW
04	Gain reçu	G_r	3	dB
05	La fréquence	f	201.583	dBHz
06	Perte d'espace libre	L_{SF}	117.365	dB
07	Pertes atmosphériques	L_a	1	dB
08	Pertes de polarisation	L_p	3	dB
09	Perte de désalignement de l'antenne	L_{ant}	1	dB
10	Puissance reçue	P_r	-98.365	dBW
11	Le rapport (G / T)	(G/T)	-21.624	dB

Tableau II. 2 : Les paramètres de la liaison descendante [47].

D'après les équations précédentes, nous pouvons calculer les rapports du bilan de liaison montante et descendante afin d'obtenir le bilan global de liaison.

❖ **Résultats :**

Le tableau ci-dessous donne les résultats finaux du bilan de liaison de satellite LEO (Sky Bridge).

Paramètres	Symboles	Valeurs	Unités
$(C/N)_{\text{montante}}$	$(C/N)_m$	21.512	dB
$(C/N)_{\text{descendante}}$	$(C/N)_d$	13.851	dB
$(C/N)_{\text{total}}$	$(C/N)_t$	35.363	dB

Tableau II. 3 : Les résultats finaux du bilan de liaison [47].

❖ **Remarques et commentaires :**

Nous remarquons que les résultats du rapport $(C/N)_{\text{montante}}$ sont supérieurs que les résultats du rapport $(C/N)_{\text{descendante}}$. Les résultats montrent que le bilan de liaison est affecté par les paramètres : puissance reçue P_r , puissance d'émission P_e et la PIRE.

II.6. Conclusion

Un bilan de liaison est une méthode de calcul et d'évaluation des performances d'une liaison de communication en tenant compte de tous les gains et pertes qui affectent le signal le long du trajet. Le calcul du bilan de liaison implique le calcul de nombreux paramètres tels que la puissance isotrope rayonnée effective (PIRE), la perte d'espace libre, le rapport porteuse sur bruit, le rapport de densité de bruit énergie par bit, La Capacité d'un canal et les bruits dans les liaisons satellitaires. Les bilans de liaison sont utilisés pour concevoir des systèmes de communication dès les premières étapes de la conception et sont mis à jour tout au long du processus de conception.

Le courant chapitre porte un calcul d'un bilan de liaison réel entre une station terrienne et un satellite pour expliquer aux lecteurs la manière dont ce rapport est calculé ainsi que l'impact de quelque paramètres intervenants dans la liaison sur le bilan général de puissance de cette liaison afin de tirer la conclusion sur l'état et la qualité de la liaison.

Chapitre III : Méthodes d'accès aléatoire dans les communications satellites

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une étude basée sur le modèle des chaînes de Markov, pour définir les probabilités optimales de la distribution binomiale de retransmission et d'arrivée des paquets dans le cas des protocoles d'accès multiple aléatoires Aloha et Aloha discrétisé. Cela nous permettra de définir le délai de transmission des paquets et le débit qui sont les paramètres principaux du modèle d'accès multiple aléatoire. A la fin on a fait des simulations pour évaluer les résultats de cette méthode. Pour les simulations, nous avons utilisé le simulateur Python qui est un langage de programmation puissant et facile à apprendre. Il dispose de structures de données de haut niveau et permet une approche simple mais efficace de la programmation orientée objet. Parce que sa syntaxe est élégante, que son typage est dynamique et qu'il est interprété, Python est un langage idéal pour l'écriture de scripts et le développement rapide d'applications dans de nombreux domaines et sur la plupart des plateformes.

Ce logiciel contient plein de bibliothèques intéressantes. Parmi elles on a utilisé :

- math pour les expressions mathématiques.
- numpy pour les matrices et les vecteurs.
- matplotlib.pyplot pour tracer les courbes.
- matplotlib.ticker pour tracer les entiers.

Pour cela, nous avons adopté pour le Python 3.8 avec l'environnement de développement intégré PyCharm, version 2020.1.1.

III.2. l'Aloha discrétisé

Dans un système de communication par satellite basé sur la contention, des collisions entre des paquets de données peuvent se produire en raison de l'envoi aléatoire des paquets. Un délai approprié avant chaque transmission peut réduire le taux de collision des données. En particulier, des solutions ont été conçues pour atténuer le problème des collisions de paquets dégradant gravement les performances des protocoles d'accès aléatoire.

Dans le protocole Aloha discrétisé le temps de transmission est divisé en slot (période temps de durée fixe), chaque slot étant exactement égale au temps de transmission d'un paquet. Tous les utilisateurs sont ensuite synchronisés sur ces slots, de sorte que lorsqu'un terminal utilisateur génère un paquet de données, le paquet est conservé et transmis dans le slot suivant. La synchronisation est généralement effectuée en transmettant un signal de balise périodique à partir d'une station désignée dans le réseau, qui est généralement la station de base ou le point d'accès.

Pour pouvoir évaluer les performances du système à base du protocole Aloha ; nous commençons notre étude par une synthèse sur le débit de transmission que peut offrir ces protocoles aléatoires. Pour cela, nous allons considérer les points suivants :

- 1) Nous supposons un nombre considérable d'utilisateurs qui génèrent des paquets de même taille avec un certain taux d'arrivée.
- 2) Le nombre de paquets générés par seconde par tous les utilisateurs est donné par k .
- 3) Le canal de transmission ne présente pas d'erreurs de transmission. La seule source des erreurs est la collision.
- 4) Nous négligeons le temps de propagation du signal entre les stations.
- 5) L'arrivée du trafic suit la loi de poisson avec un taux d'arrivée λ .
- 6) La probabilité que k paquets soient générés pendant un intervalle de temps t est donnée par la formule de la distribution de Poisson comme suit :

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

- 7) Le flux des paquets nouvellement générés ou réémis est supposé aussi Poissonnien de moyenne g paquets/s.

III.2.1. l'Aloha classique (pur)

Le débit utile (S) : est défini comme étant la proportion du temps pendant laquelle le canal transporte des données utiles avec succès. Avec un processus de distribution de Poisson pour les temps d'arrivée des paquets ; si un paquet est transmis, alors la probabilité qu'aucun paquet supplémentaire n'arrive pendant la période $t_0 - T, t_0 + T$ ou $t = 2T$ est donnée en substituant $k = 0$ et $t = 2T$ en [52] :

$$P[X = 0] = e^{-\lambda 2T} \frac{(\lambda 2T)^0}{0!} \quad (\text{III. 2})$$

La probabilité pour qu'un paquet soit reçu avec succès dans le temps $2T$ est :

$$P_{\text{succès}} = e^{-\lambda 2T} \quad (\text{III. 3})$$

Le débit d'un système Aloha s'exprime alors:

$$S = \lambda T P_{\text{succès}} = \lambda T e^{-2\lambda T} \quad (\text{III. 4})$$

Soit $G = \lambda T$, la charge normalisée, alors :

$$S = Ge^{-2G} \quad (\text{III. 5})$$

Le délai d'accès (W) : est considéré comme étant le temps écoulé entre l'instant de génération d'un paquet et l'instant où ce paquet est reçu avec succès par la station centrale.

On décompose le délai d'accès moyen [53] comme suit :

$$W = T_R + T + \tau, \text{ et} \quad (\text{III. 6})$$

$$T_R = R(T_{BO} + T + T_{ACK} + 2\tau) \quad (\text{III. 7})$$

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 (backoff).
- On suppose qu'il n'y a pas de limites au nombre de retransmissions.

Le nombre moyen de retransmissions R se calcule comme suit :

$$\begin{aligned} R &= P_{succès}(1 - P_{succès}) + 2P_{succès}(1 - P_{succès})^2 + \dots \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} nP_{succès}(1 - P_{succès})^n \\ &= \frac{1 - P_{succès}}{P_{succès}} \\ R &= e^{2G} - 1 \end{aligned} \quad (\text{III. 8})$$

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

$$T_{BO} = \frac{K_t + 1}{2} T \quad (\text{III. 9})$$

- On en déduit :

$$W = (e^{2G} - 1)((K_t + 3)T/2 + 2\tau + T_{ACK}) + T + \tau \quad (\text{III. 10})$$

III.2.2. l'Aloha discrétisé

Le débit utile (S) : Avec un processus de distribution de Poisson pour les temps d'arrivée des paquets ; si un paquet est transmis, alors la probabilité pour qu'aucun paquet supplémentaire n'arrive pas pendant la période $t_0, t_0 + T$ ou $t = T$ est donnée en substituant $k = 0$ et $t = T$ en [52] :

$$P[X = 0] = e^{-\lambda T} \frac{(\lambda T)^0}{0!} \quad (\text{III. 11})$$

$$P_{\text{succès}} = e^{-\lambda T} \quad (\text{III. 12})$$

Alors,

$$P_{\text{succès}} = e^{-\lambda T} \quad (\text{III. 13})$$

Le débit est ;

$$S = \lambda T P_{\text{succès}} = \lambda T e^{-\lambda T} \quad (\text{III. 14})$$

Soit $G = \lambda T$, la charge normalisée :

$$S = G e^{-G} \quad (\text{III. 15})$$

Le délai d'accès (W) :

$$W = T_R + \tau + T + T_a \quad (\text{III. 16})$$

$T_a = \frac{T}{2}$: est le temps moyen entre l'instant de génération et le début du prochain slot.

On en déduit [53] :

$$W = (e^G - 1)((k + 3)T/2 + 2\tau + T_{\text{ACK}}) + 3T/2 + \tau \quad (\text{III. 17})$$

III.3. Les chaînes de Markov

Les chaînes de Markov sont des modèles matriciels probabilistes qui décrivent la dynamique des systèmes dans lesquels le passage d'un état à un autre est un processus probabiliste. La transition d'une variable d'un état au temps t à un autre état au temps $(t+1)$ dépend de l'état de la variable au temps t , mais est indépendante de l'état de la variable en $(t-1)$. En d'autres termes, le modèle suppose que la dynamique du système dépend de l'état actuel, mais est indépendante du chemin qui a amené le système à cet état.

Définition 1 [54] : Soit $\{X_n\}_{n \geq 0}$ une suite de variables aléatoires prenant des valeurs dans un ensemble fini ou dénombrable infini $\mathcal{L}$. On dit que c'est une chaîne de Markov si :

$$P\left(\underbrace{X_{n+1} = x_{n+1}}_{\text{le future}} \middle| \underbrace{X_0 = x_0, \dots, X_n = x_n}_{\text{le passé et le présent}}\right) = P\left(\underbrace{X_{n+1} = x_{n+1}}_{\text{le future}} \middle| \underbrace{X_n = x_n}_{\text{le présent}}\right) \quad (\text{III. 18})$$

Pour tout choix du nombre non négatif n et $x_0, \dots, x_{n+1} \in \mathcal{L}$. Nous supposons toujours que $\mathcal{L}$ est un sous-ensemble des entiers. Les probabilités conditionnelles $P(X_{n+1} = y | X_n = x)$ sont appelées probabilités de transition de la chaîne. La chaîne de Markov est dite stationnaire si les probabilités de transition sont indépendantes de n :

$$P(X_{n+1} = y | X_n = x) = P(x, y). \quad (\text{III. 19})$$

III.3.1. La matrice de transition

Une matrice de transition associée à une chaîne de Markov à n états est un $n \times n$ matrice T avec les entrées $a_{ij} (1 \leq i \leq n ; 1 \leq j \leq n)$ [57] :

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 20})$$

Ayant les propriétés suivantes :

- 1) $a_{ij} \geq 0$ pour tout i et j .
- 2) La somme des entrées dans chaque colonne de T est 1.

Puisque $a_{ij} = P(\text{état } i | \text{état } j)$ est la probabilité d'occurrence d'un événement, il doit être non négatif, et c'est précisément ce qu'implique la propriété 1. La propriété 2 découle du fait que la transition à partir de l'un quelconque des états actuels doit se terminer dans l'un des n états de l'étape suivante de l'expérience. Toute matrice carrée satisfaisant les propriétés 1 et 2 est appelée matrice stochastique.

Un avantage de la représentation des probabilités de transition sous la forme d'une matrice est que nous pouvons utiliser les résultats de la théorie des matrices pour nous aider à résoudre des problèmes impliquant des processus de Markov.

III.3.2. Le vecteur de distribution

Supposons que nous ayons un processus de Markov dans lequel il y a n états possibles à chaque étape de l'expérience. Supposons en outre que la probabilité que le système soit initialement dans l'état 1, état 2, . . . , l'état n est donné par $p_1, p_2, \dots, p_n$, respectivement. Cette distribution peut être représentée par un vecteur à n dimensions, appelé vecteur de distribution, tel que :

$$X_0 = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} \quad (\text{III. 21})$$

Si T représente la matrice de transition $n \times n$ associée au processus de Markov, alors la distribution de probabilité du système après m observations est donnée par:

$$X_m = T^m X_0 \quad (\text{III. 22})$$

III.3.3. La matrice stationnaire pour une chaîne de Markov

La matrice d'état $S = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n]$ est une matrice stationnaire pour une chaîne de Markov avec une matrice de transition T si :

$$S \times T = S \quad (\text{III. 23})$$

Où $s_i \geq 0$, $i = 1, \dots, n$, et $s_1 + s_2 + \dots + s_n = 1$, tel que :

$$\begin{aligned} S_0 &= S_0 T_{0,0} + S_1 T_{0,1} + S_2 T_{0,2} + S_3 T_{0,3} + \dots + S_n T_{0,n} \\ S_1 &= S_0 T_{1,0} + S_1 T_{1,1} + S_2 T_{1,2} + S_3 T_{1,3} + \dots + S_n T_{1,n} \\ S_2 &= S_0 T_{2,0} + S_1 T_{2,1} + S_2 T_{2,2} + S_3 T_{2,3} + \dots + S_n T_{2,n} \\ &\vdots \\ S_n &= S_0 T_{n,0} + S_1 T_{n,1} + S_2 T_{n,2} + S_3 T_{n,3} + \dots + S_n T_{n,n} \end{aligned} \quad (\text{III. 24})$$

III.3.4. Le graphe de transition

Le graphe de transition d'une chaîne de Markov à temps discret est défini comme un graphe orienté dans lequel les nœuds représentent les états du processus et les arcs correspondent aux transitions possibles, c'est-à-dire pour lesquelles les probabilités de transition a_{ij} sont strictement positives [55].

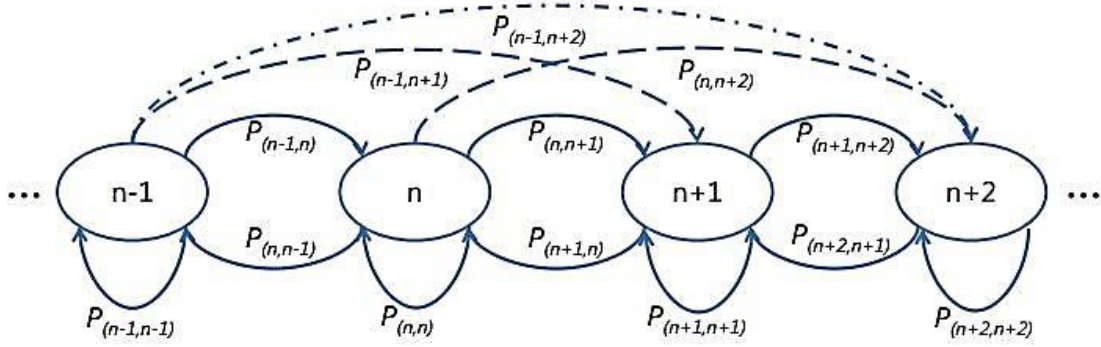


Figure III.1 : Chaîne de Markov globale du système [56].

III.4. Modélisation de l'ALOHA discrétisé par les chaînes Markov

Nous considérons un canal à collision partagé par m mobiles sans buffer et transmettant à un récepteur central, c'est-à-dire, les mobiles ne génèrent pas de nouveaux paquets jusqu'à ce que l'actuel est transmis avec succès. Cette hypothèse est bien entendu réaliste dans le contexte de la signalisation. En effet, il est naturel de supposer que la source ne doit pas commencer à générer de nouveaux paquets de signalisation tant que le paquet en cours n'est pas transmis avec succès. Par la suite, nous étudions ALOHA discrétisé comme un problème d'optimisation, où tous les mobiles cherchent à optimiser la même fonction objective (maximiser le débit totale ou minimiser le délai moyen).

Nous définissons le mécanisme de priorité suivant : Chaque mobile m transmet ses nouveaux paquets avec la probabilité p_a^i alors qu'il retransmet ses paquets 'en attente de retransmission : ATDR' avec la probabilité q_r^i (il s'agit bien d'un processus de Bernoulli de paramètre q_r^i). Ce nouveau mécanisme permet donc de : mieux gérer l'ordonnancement des transmissions, définir la priorité des paquets selon l'application sollicitée et le trafic du système et soulager la charge instantanée du système. Pour étudier cette méthode d'accès au canal, nous étendons le modèle markovien traité en [57].

Tel que, la probabilité d'arrivée des paquets à la source i suit un processus de Bernoulli de paramètre q_a (c'est à dire, au début de chaque slot, un nouveau paquet arrive à une source libre avec la probabilité q_a). Lorsqu'une source ne réussit pas la transmission du paquet en cours, les nouveaux arrivés seront bloqués et perdus (parce que nous considérons des sources sans buffer). Les chaînes de Markov utilisées présentent les caractéristiques suivantes :

- L'état du système change à des intervalles réguliers,

- Cet intervalle est déterminé par la taille de l'emplacement dans la variation ALOHA discrétisé et la distribution de probabilité de l'état après.
- La transition suivante ne dépend que de l'état actuel.

III.4.1. Le flux d'arrivée et de retransmission

La distribution binomiale des probabilités détermine les probabilités pour j transmissions ou arrivées dans i paquets à retransmettre [57], tel que :

$$P_r(j \text{ transmission dans un slot}/i \text{ paquet à retransmettre}) = \binom{i}{j} \alpha^j (1 - \alpha)^{i-j} \quad (\text{III. 25})$$

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

Où α représente la probabilité de retransmission et $(1 - \alpha)$ la probabilité de non retransmission. Alors :

$$P_a(j \text{ arrivé dans un slot}/i \text{ paquet à retransmettre}) = \binom{N-i}{j} \sigma^j (1 - \sigma)^{N-i-j} \quad (\text{III. 26})$$

$$j = 0, 1, \dots, N - i$$

Tel que,

σ : la probabilité de générer un paquet dans le slot disponible

$(1 - \sigma)$: la probabilité de ne pas générer un paquet dans le slot disponible.

N : le nombre des utilisateurs (nœuds).

III.4.2. Les états des probabilités de transition

Il est important de souligner que l'état du système est représenté par une matrice de transition stochastique. Tel que la matrice de transition d'état est construite avec les paramètres suivants :

$$t_{ij} = P(j \text{ paquets à retransmettre slot } n / i \text{ paquet retransmettre slot } n - 1) \quad \dots \dots \quad \text{III. 27}$$

t_{ij} : L'état du time slot (les paquets à retransmettre 'ATDR').

P : la probabilité de transition.

❖ Définition des différents états possibles :

➤ L'état 0 : (il n'y a pas des paquets à retransmettre)

Nous supposons que la première ligne de la matrice avec aucun paquet à retransmettre, et un système vide sera dans cet état.

- Pour rester dans le même état il faut qu'on ait :

→ 0 arrivé ou 1 arrivé, donc :

$$\begin{aligned} t_{0,0} &= P_a(0, N) + P_a(1, N) \\ &= (1 - \sigma)^N + N\sigma(1 - \sigma)^{N-1} \end{aligned} \quad (\text{III. 28})$$

• **Vers l'état 1 :**

- Dans cet état on a un seul paquet alors c'est impossible de faire une collision avec lui-même, donc :

$$t_{0,1} = 0 \quad (\text{III. 29})$$

• **Vers l'état j :**

- Si deux utilisateurs ou plus du canal génèrent un paquet dans le même slot, il y aura une collision, mais ces paquets restent dans le système. Ensuite, le reste des valeurs de la première ligne de la matrice de transition est calculé avec l'équation suivante [61] :

$$t_{0,j} = P_a(j, N) \quad (\text{III. 30})$$

$$t_{0,j} = \binom{N}{j} \sigma^j (1 - \sigma)^{N-j} \quad (\text{III. 31})$$

$$j = 2, 3, \dots, N$$

$$t_{0,j} = 0 \quad \text{Si : } j > N$$

➤ **L'état j :** (j paquets à retransmettre)

• **Vers l'état $j - 1$:**

- Dans cet état :

→ 0 arrivé et 1 retransmission, donc :

$$t_{j,j-1} = P_a(0, N)P_r(1, N) \quad (\text{III. 32})$$

$$t_{j,j-1} = (1 - \sigma)^N j \cdot \alpha^j (1 - \alpha)^{j-1} \quad (\text{III. 33})$$

• **Le même état :** (les paquets dans slot n et slot $n - 1$ sont les mêmes)

- Pour rester dans le même état on a 3 cas possibles :

→ 0 arrivé et 0 retransmission

Ou

→ 1 arrivé et 0 retransmission

Ou

→ 0 arrivé et ≥ 2 retransmissions. On peut alors écrire :

$$\begin{aligned}
 t_{j,j} &= P_a(0, N)P_r(0, N) + P_a(1, N)P_r(0, N) \\
 &\quad + P_a(0, N)[1 - (P_r(0, N) + P_r(1, N))] \\
 &= (1 - \sigma)^N(1 - \alpha)^j + N\sigma(1 - \sigma)^{N-1}(1 - \alpha)^j + (1 - \sigma)^N[1 - (1 - \alpha)^j \\
 &\quad - j \cdot \alpha (1 - \alpha)^{j-1}]
 \end{aligned} \tag{III. 34}$$

• Vers l'état $j + 1$:

- Dans cet état on a :

→ 1 arrivé et ≥ 1 retransmission.

$$\begin{aligned}
 t_{j,j+1} &= P_a(1, N) \cdot [1 - (P_r(0, N))] \\
 &= N\sigma(1 - \sigma)^{N-1} \cdot (1 - (1 - \alpha)^j)
 \end{aligned} \tag{III. 35}$$

• Vers l'état $j + k$:

→ k arrivés et toute retransmission.

$$\begin{aligned}
 t_{j,j+k} &= P_a(k, N) \\
 &= \binom{N}{k} \sigma (1 - \sigma)^{N-k} \quad , \quad \text{Avec : } 1 < k \leq N
 \end{aligned} \tag{III. 36}$$

$$t_{j,j+k} = 0 \text{ Si : } k > N$$

• Vers l'état $j - k$:

- Dans cet état ce n'est pas logique d'avoir un nombre des paquets à retransmettre dans slot n inférieure deux fois ou plus au le nombre des paquets à retransmettre dans slot $n - 1$; Exemple : $t_{2,0}$ → On a 0 paquets à retransmettre dans slot n et 2 paquets à retransmettre dans slot $n - 1$. Donc :

$$t_{j,j-k} = 0 \tag{III. 37}$$

Maintenant, d'après tous les états ou les probabilités qu'on a cherchées on obtient la matrice de transition suivante :

$$t_{i,j} = \begin{bmatrix} t_{0,0} & 0 & t_{0,2} & \dots & t_{0,j} \\ t_{1,0} & t_{1,1} & t_{1,2} & \dots & t_{1,j} \\ 0 & t_{2,1} & t_{2,2} & \dots & t_{2,j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & t_{j,j} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 38})$$

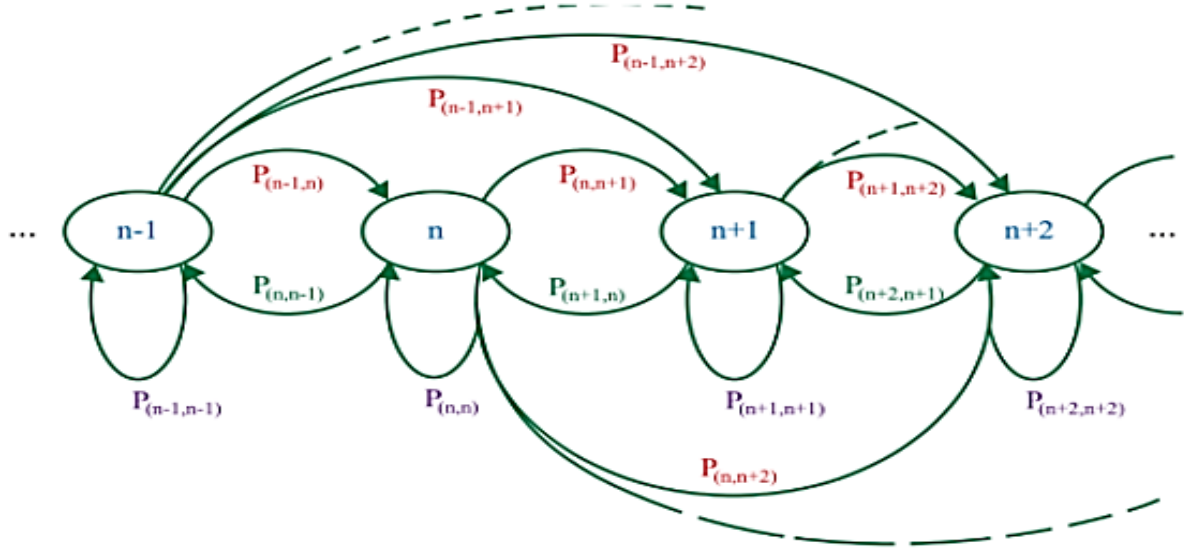


Figure III.2 : Chaîne de Markov de l'ALOHA discrétisé [58].

```
[ [0.1875    0.    0.3125    0.3125    0.15625  ]
  [0.015625  0.09375  0.078125  0.3125    0.15625  ]
  [0.    0.0078125  0.0625    0.1171875  0.15625  ]
  [0.    0.    0.00292969  0.04785156  0.13671875]
  [0.    0.    0.    0.00097656  0.04003906]]
```

Figure III.3 : La matrice de transition du système sous Python.

III.4.3. L'état stationnaire (stable)

L'une des étapes les plus importantes du calcul consiste à trouver les valeurs de l'état stationnaire (stable) de la matrice de transition. Pour une chaîne irréductible récurrente positive, les π_j forment la solution unique des équations d'équilibre suivantes [57] [59] :

$$\pi_j = \sum_{i \in \chi} \pi_i P_{i,j} \text{ Pour tout } j \in \chi, \quad \sum_{i \in \chi} \pi_i = 1. \quad (\text{III. 39})$$

Sous forme matricielle : $\pi P = \pi$ et $\pi 1^t = 1$, Où : $\pi = (\pi_0, \pi_1, \dots)$.

Afin de résoudre la matrice décrite précédemment, nous utilisons les équations suivantes :

$$P_i = \begin{cases} \sum_{j=0}^{i+1} P_j t_{ij} & 0 \leq i \leq N-1 \\ \sum_{j=0}^N P_j t_{iN} & i = N \end{cases} \quad (\text{III. 40})$$

$$P_{i+1} = \frac{P_i - \sum_{j=0}^i P_j t_{ji}}{t_{i+1,i}} \quad (\text{III. 41})$$

Où $P_1, P_2, P_3, P_4, \dots, P_N$, sont les probabilités de l'état stationnaire (stable) des paquets à retransmettre dans le système.

Le nombre moyen des paquets à retransmettre dans le système est déterminé par l'équation :

$$\bar{K} = \sum_{i=0}^N i P_i \quad (\text{III. 42})$$

Le nombre moyen des paquets en attente du prochain slot pour leur transmission est trouvé par équation :

$$S_{in} = \sigma(N - \bar{K}) \quad (\text{III. 43})$$

III.4.4. Les performances du système optimisé

Délai d'accès (W) : le délai moyen des paquets du canal ALOHA discrétisé peut être calculé par l'équation :

$$W = 1 + \frac{\bar{K}}{\sigma(N - \bar{K})} \quad (\text{III. 44})$$

Débit utile (S) : Le débit est défini comme étant le nombre des paquets transmis avec succès en terme de temps ; nous obtenons le nombre des paquets transmis avec succès dans deux cas, si on a :

→ 1 arrivé et aucune retransmission

Ou

→ 1 retransmission

$$P_{succès} = P_a(1, N) + P_r(1, N) \quad (\text{III. 45})$$

$$P_{succès} = \sigma(1 - \sigma)^{N-i-1} + \alpha(1 - \alpha)^{i-1} \quad (\text{III. 46})$$

Les paquets transmis avec succès sont mesuré en paquet, et le délai de transmission est mesuré en seconde, alors le débit sera en paquet/seconde [60]. Selon la loi de Little on peut conclure que le débit peut être calculé suivant la formule suivante :

$$S_s = \frac{P_{succès}}{W \times 2} \quad (\text{III. 47})$$

III.5. Résultats et interprétations

Les figures III.4 et III.5 montrent la probabilité de distribution binomiale pour le nombre de transmissions et arrivées générées dans un slot lorsqu'il y a i paquets à retransmettre. La variation de la probabilité de retransmission qui concerne les paquets à retransmettre, provoque par conséquent une variation de la distribution binomiale. Cette dernière est tenue par le nombre total des paquets à retransmettre qui peut affaiblir la probabilité de retransmission par slot à son augmentation.

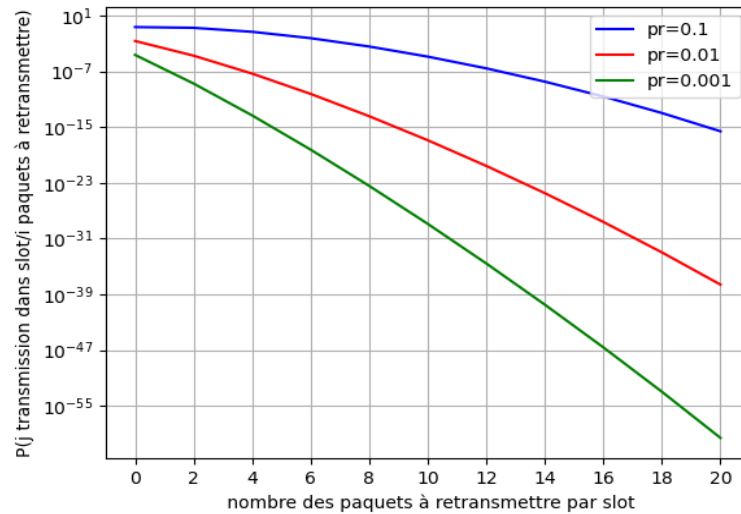


Figure III.4 : La probabilité de retransmission par slot.

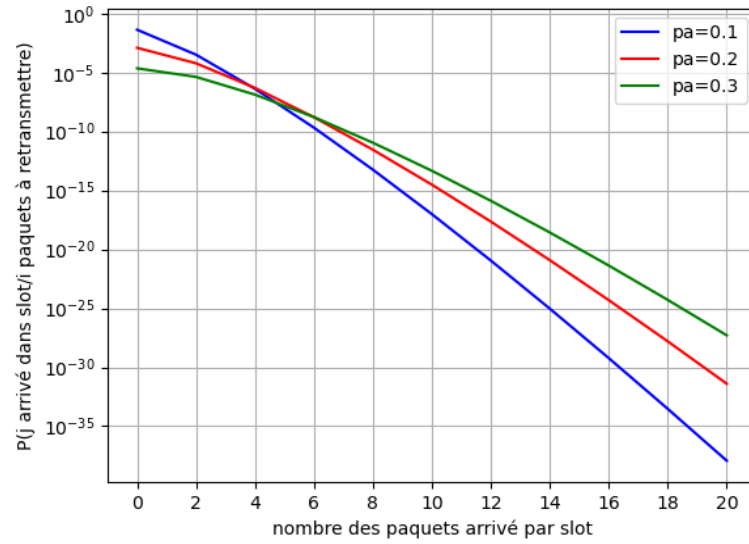


Figure III.5 : La probabilité d'arrivé par slot.

De même pour la probabilité d'arrivé par slot et qui concerne les nouvelles transmissions (nouveaux paquets), la figure III.5 expose le principe de la loi binomiale gérée par le nombre des paquets à transmettre devant un nombre i des paquets à retransmettre. En effet, un grand nombre des paquets à transmettre affaiblit bien évidemment la probabilité de chacun de gagner un slot libre pour assurer son transmission.

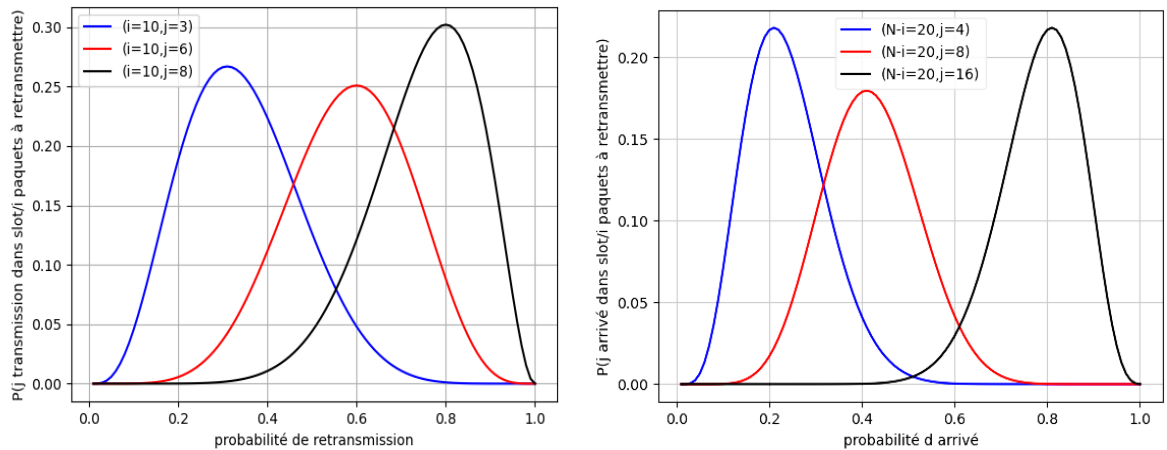


Figure III.6 : Les variations des distributions binomiales en fonction de la probabilité de retransmission et d'arrivé.

La figure III.6 montre les variations de la distribution binomiale de transmission et d'arrivé en fonction de la probabilité de retransmission et d'arrivé respectivement. Les courbes ont la même allure, de sorte que la probabilité augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne une certaine valeur, puis diminue. Bien que la probabilité de transmission et d'arrivé augmente constamment, cela ne donne pas de changement spécifique, tel qu'on peut constater que les courbes variées aléatoirement avec le changement des P_r et P_a .

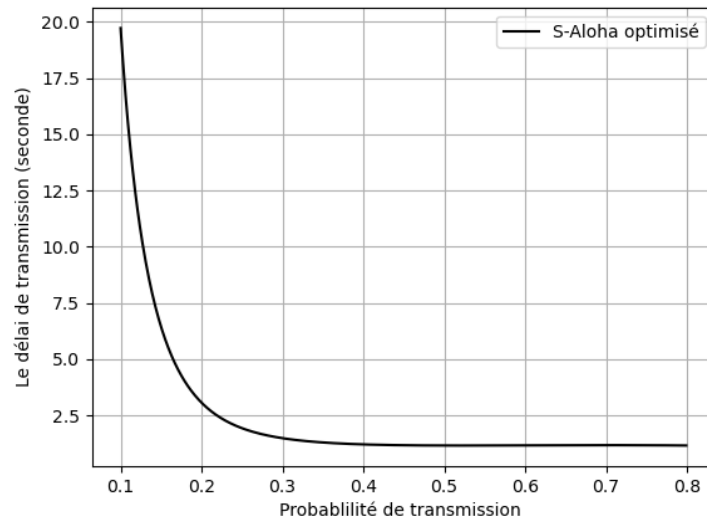


Figure III.7 : Le délai de transmission des paquets en fonction de la probabilité de transmission.

La figure III.7 montre la variation du délai de transmission en fonction de la probabilité de transmission. Nous remarquons une variation inversement proportionnelle ; lorsque la probabilité de transmission augmente le délai de transmission diminue et l'inverse. En fait, une probabilité de transmission supérieure au taux de réussite plus élevé, et donc un délai de transmission plus court.

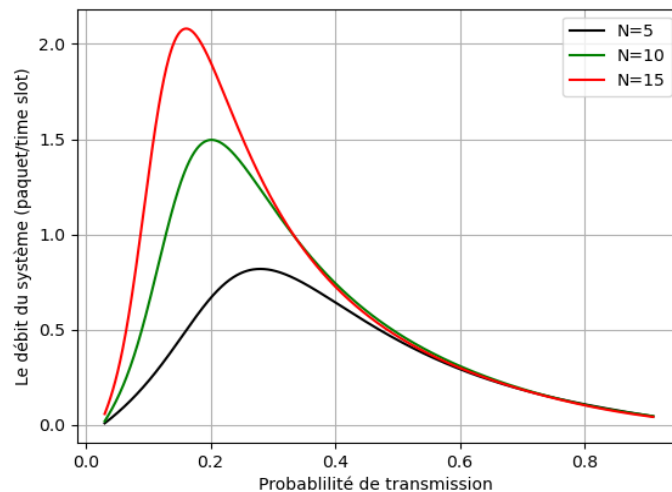


Figure III.8 : Le débit du système en fonction de la probabilité de transmission.

La figure III.8 présente le débit par rapport la probabilité de transmission pour un nombre des utilisateurs égale à 5, 10 et 15. Le débit change en fonction de la probabilité de transmission et aussi en fonction de nombre des utilisateurs. Par une gestion plus efficace des paquets sur le réseau ; un grand nombre des utilisateurs explique un nombre plus grand de paquets à transmettre par unité de temps, et alors un débit meilleur. Aussi, la diminution du

débit malgré l'augmentation est expliquée par le fait d'avoir des collisions entre les paquets en cours de transmission (retransmission) sur le réseau.

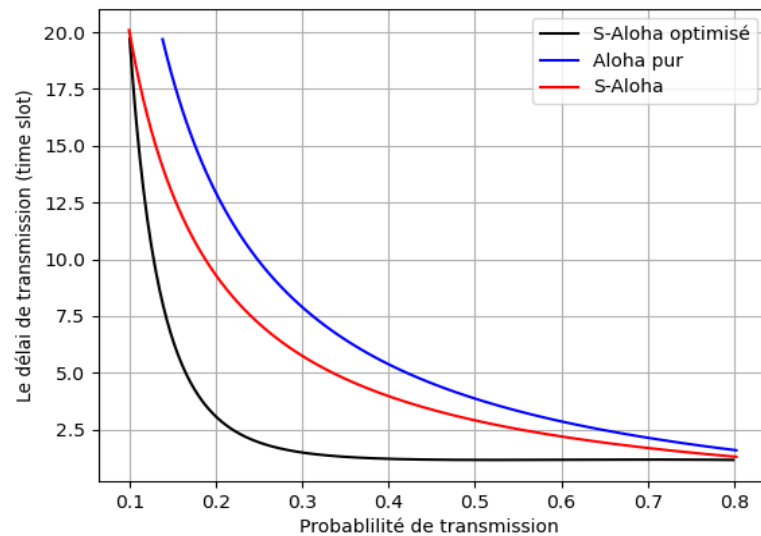


Figure III.9 : Le délai de transmission en fonction de la probabilité de transmission pour les différents protocoles.

Les figure III.9 et III.10 montre une comparaison entre les protocoles Aloha pur, Aloha discrétisé et Aloha optimisé en termes de délai et de débit de transmission. Le protocole optimisé dans ce mémoire, offre des performances meilleures. L'avantage se voit plus clairement dans le débit lorsqu'il augmente rapidement à une valeur plus grande avec un écart très considérable.

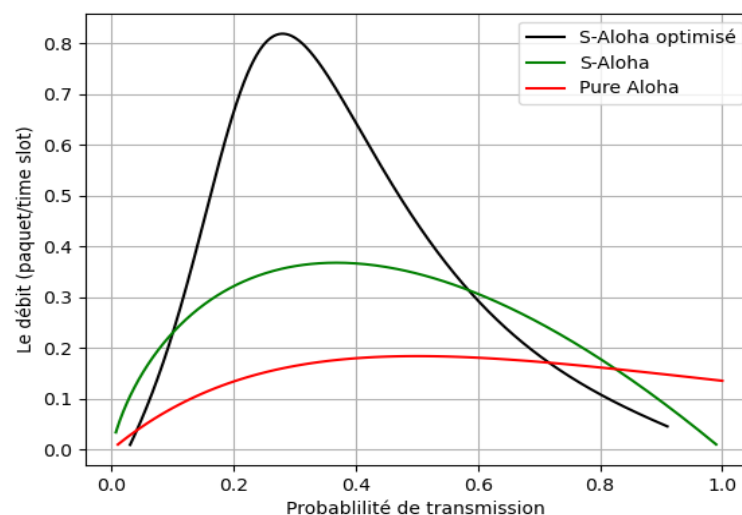


Figure III.10 : Le débit en fonction de la probabilité de transmission pour les différents protocoles.

En fait, l'augmentation de débit et du délai de transmission signifie que les performances du protocole étudié sont améliorées en donnant une qualité meilleure de transmission. Une amélioration dans le débit et le délai de transmission mène à une stabilité plus prolongée du réseau par une méthode plus efficace pour gérer les situations de collisions et de saturation dans le réseau.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons utilisé les chaînes de Markov pour gérer et contrôler les communications satellitaires dans les différentes situations possibles. En fait, pour prévenir le système à passer à la zone de saturation ; le modèle présenté dans ce travail offre une gestion plus efficace du réseau par la mise en considération des paquets soit nouvellement transmis ou ceux à retransmettre. Les simulations ont montré une amélioration au niveau du débit et délai de transmission, ce qui avantage le système proposé qui peut assurer une qualité de transmission meilleure avec une stabilité plus longue. En fin, nous confirmons les résultats trouvés dans l'article [57].

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le bilan de liaison est le moyen pour évaluer l'état de la liaison, et donc la faisabilité et la qualité de la liaison. Une communication satellitaire est soumise à de nombreux facteurs et phénomènes qui affectent son bilan de liaison. La gestion de l'accès au canal de transmission est parmi les moyens les plus sérieux pour contrôler la liaison. Elle est assurée par des protocoles à accès aléatoire afin d'acquérir une allocation rapide et facile de la bande passante. Et malgré les améliorations portées sur ces protocoles, la collision persiste toujours et fait des problèmes majeurs sur la qualité et la stabilité des communications satellitaires.

Notre travail expose bien en détail cette problématique, et défend l'intérêt de mettre en place des méthodes plus adéquates pour le contrôle et la bonne gestion des situations de saturations lorsque le taux de collision devient craignant. Pour cela, nous avons employé les chaînes de Markov qui traitent avec précision et suivant les situations qui peuvent survenir l'état du canal et mettre conséquemment des solutions adéquates pour s'en sortir de l'état de saturation et de mener à la stabilité du canal avec un débit et un délai de transmission plus stables.

Le traitement développé a fondé une matrice de transition capable de prescrire des décisions convenables à la situation en exercice, et accorder par conséquence des performances meilleures de la liaison en termes de débit et de délai de transmission. Le travail conclut par un ensemble de simulations faites par Python pour démontrer l'avantage de ce modèle mathématique qui s'appuie essentiellement sur les chaînes de Markov. Les simulations établies expliquent des améliorations claires sur le débit ainsi que le délai de la transmission. Notre travail confirme alors les résultats obtenus dans [57].

En fait, cette étude nous a poussés 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 aussi 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.

Références Bibliographies

- [1] A.Abdelali, *"Modélisation d'un système de contrôle aérien par satellites"*, Thèse de doctorat en science en électronique, université hadj lakhdar, Batna, Algérie, 2015.
- [2] A.K.Maini et V.Agrawal, *"Satellite technology"*, principes and applications, 3eme Edition, 2014,
- [3] P.K.Ganguly, *"Principles of electronics"*, Delhi, 2015.
- [4] G.Maral, *"VSAT networks"*, 2eme Edition, France, 2003.
- [5] Un peu de vulgarisation : le satellite, <https://www.scoop.it/topic/les-satellites-de-la-nasa/p/4056290127/2015/12/04/cnes-un-peu-de-vulgarisation-le-satellite>, Consulté le 04 décembre 2015.
- [6] J.Ben Salem, *"Systèmes de communication"*, support de cours, institut supérieur des études technologiques de Nabeul, Tunisie, 2014.
- [7] W.L.Rahal, *"étude de l'orbitographie des satellites artificiels et exploitation de leurs données"*, Thèse de doctorat en sciences en physique, université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf, Oran, Algérie, 2013.
- [8] O.Ringar, *"Utilisation des techniques avancées d'émission / réception multi-antennes pour une transmission optique large bande"*, thèse de doctorat, électronique des hautes fréquences, photonique et systèmes, université cheick anta diop, Limoges, France, 2015.
- [9] M.Richharia et L.D.Westbrook, *"satellite systems for personal applications"*, concepts and technologie, X.Shen, university of waterloo, Canada Y.Pan, Georgia state university, USA, British, 2010.
- [10] A.Al Youssef, *"Etude par modélisation des évènements singuliers (SET/SEU/SEL) induits par l'environnement radiatif dans les composants électroniques"*, thèse de doctorat, Microélectronique spatiale, automatique et traitement du Signal, Université Toulouse III - Paul Sabatier, France, 2017.
- [11] N.E.Hedjazi, *"Modélisation et contrôle du Handover dans les satellites de communication"*, Thèse de doctorat en Sciences en électronique, université hadj lakhder, Batna, 2015.
- [12] L.J.Ippolito, *"Satellite communications systems engineering"*, atmospheric effects, satellite link design and system performance, X.Shen, university of waterloo, Canada, Y.Pan, Georgia state university, USA, 2008.
- [13] M.Boudjellal, *"Les Satellites et leurs applications "*, support de cours, Université Saad Dahlab, Blida, Algérie, 2007.
- [14] V.S.Bagad, *"Telecommunication system"*, 3eme Edition, India, 2009.

- [15] R.Erne, *"Les télécommunications spatiales et les ressources de l'espace extra-atmosphérique"*, thèse de doctorat, institut universitaire de hautes études internationales, université de Genève, Genève, Suisse, 2007.
- [16] K.Nacer, *"Les débats "*, votre quotidien national, Algérie, 2017.
- [17] Alcomsat 1, <https://www.n2yo.com/satellite/?s=43039>, Consulté le 10 décembre 2017.
- [18] O.E.Djar et A.Zoughbi, *"Optimisation de la bande passante d'une transmission par satellite en utilisant la technologie Carrier-In-Carrier"*, Mémoire de master, Institut d'Aéronautique et études Spatiales, université de Blida, Algérie.
- [19] J. Galtier, *"Geographical reservation for guaranteed handover and routing in low earth orbit constellations"*, telecommunication systems, pp. 2-3, 2001.
- [20] M.O.Kolawole, *"Satellite communication engineering"*, 2eme Edition, London New York, 2014.
- [21] I.Abbas, *"Protocoles d'accès multiple orientés qualité de service en constellation de satellite à orbite basse"*, Thèse de doctorat, Traitement du signal et de l'image, Télécom Paris Tech, 2002, France.
- [22] C.R.Welti, *"satellite basics for everyone"*, an illustrated guide to satellites for non-technical and technical people, 2012.
- [23] J.Penttinen et T.Jyrki, *"The telecommunications handbook"*, engineering guidelines for fixed, mobile and satellite systems, India, 2015.
- [24] Global Positioning System: A Generation of Service to the World, <https://www.afspc.af.mil/News/Article-Display/Article/731130/global-positioning-system-a-generation-of-service-to-the-world/> , Consulté le 25 june 2015.
- [25] P.Simoneau, *"The OSI model: understanding the seven layers of computer networks"*, support de cours, 2006.
- [26] Het OSI Model, https://www.hoedan.nu/computers_elektronica/netwerken/het-osi-model/, Consulté le 19 janvier 2017.
- [27] P.Leppanen, K.Pahlavan et S.L. Kota, *"Broadband satellite communications for internet access"*, New York, 2004.
- [28] Y.Zhang, *"Internetworking and computing over satellite networks"*, New York, 2003.
- [29] L.J.Ippolito, *"Satellite communications systems engineering"*, atmospheric effects, satellite link design and system performance, X.Shen, university of waterloo, Canada, Y.Pan, Georgia state university, pp.10, USA, 2017.
- [30] Principe d'une liaison satellitaire, <https://serge-labreze.blogspot.com/2014/04/principe-dune-liaison-satellitaire.html>, Consulté le 27 avril 2014.
- [31] J.Shen et L.Song, *"Evolved cellular network planning and optimization for UMTS and LTE "*,pp. 203,USA, 2011.

- [32] W. Fischer, *"Digital television"*, A practical guide for engineers, pp.200, Germany, 2004.
- [33] A.Bourkane, *"Estimation du rapport signal à bruit d'un signal GPS par filtrage non linéaire"*, thèse de doctorat, génie Informatique, automatique et traitement du Signal, université Abdel malek Essaadi, Tanger, Maroc, 2015.
- [34] D.Minoli, *"Innovations in satellite communications and satellite technology"*, the industry implications of DVB-S2X, high throughput satellites, Ultra HD, M2M, and IP, pp.56, USA, 2015.
- [35] D.Minoli, *"Satellite systems engineering in an IPv6 environment"*, 2009, London.
- [36] F.Lassabe, F.Spies, O.Baala, P.Canalda et P.Chatonnay, *"A Friis-based calibrated model for WiFi terminals positioning"*, pp.06, 2005.
- [37] P.A.Randriamantsoa, T.N.M.Ralaibozaka et T.R.Rajaonarison, *"Modélisation des canaux à évanouissement indoor et outdoor"*, Vol.2, pp.132, 2016.
- [38] G.S.N.Raju, *"Antennas and wave propagation"*, support de cours, department of electronics and communications engineering college of engineering, Andhra university visakhapatnam who, pp.239-240, India.
- [39] D.Pahlevie et W.Pamungkas, *"Analizing influence of earth station antenna pointing to receiving signal parameter at down link power budget"*, ICT development for the Knowledge based society, pp.204, 2009.
- [40] J.Allnutt et T.Pratt, *"Satellite communications"*, 3eme Edition, India, pp.126, 2020.
- [41] C.K.S. Miller, D.F. Wait, M. Kanda et W.C.Daywitt, *"A study of the measurement of GA using cassiopeia"*, Colorado, pp.04, 1974.
- [42] S.Ferouini, *"Traitement d'antennes adaptatives pour l'optimisation des performances des systèmes MIMO-OFDM dans les Réseaux de télécommunications sans fil"*, thèse en doctorat, département du génie électrique et électronique, université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, Algérie, 2014.
- [43] T.Liu et Y.Li, *"Electromagnetic information leakage and countermeasure technique"*, china, pp.26, 2019.
- [44] R.W.Jones, *"Handbook on satellite communications"*, New York, pp.49, 1985.
- [45] M.Ergen, *"Mobile broadband: including WiMAX and LTE"*, USA, pp.25, 2009.
- [46] D.LeRuyet et M.Pischella, *"Digital communications 1"*, source and channel coding, USA, 2015.
- [47] B.B.sahoo et S.Dey, *"Link budget of LEO satellite (Sky Bridge) for communication operated at Ku band frequency range (12-14) GHz"*, International journal of innovations in engineering and technology (IJET), Vol.4, no.1, pp.174-175, 2014.
- [48] R.L.Freeman, *"Radio system design for telecommunications"*, 3eme edition, pp.335, Canada, 2007.

- [49] G.Liu, W.Kang et X.Fang, *"IDMA-Based MAC protocol for satellite networks with consideration on channel quality"*, the scientific world journal, China, 2014.
- [50] K.Pahlavan, P.Leppanen et S.L.Kota, *"Broadband satellite communications for internet access"*, New York, pp.124-125, 2004.
- [51] A.Lehner, C.R.Garcia, P.Robertson et T.Strang, *"Performance of MAC protocols in beaconing mobile Ad-hoc multibroadcast networks"*, 2010.
- [52] T.L.Singal, *"Wireless communications"*, India, pp.284-287, 2010.
- [53] M.Coupechoux, *"Performances des protocoles MAC"*, support de cours, Département informatique et réseaux, pp.11-23, france, 2010.
- [54] A. Pickett, j.M.Facelli et T.Steward, *"Markovian chains and the role of history in succession "*, journal trends in ecology\& evolution, vol. 5, no. 1, 1990.
- [55] C.J.Stocker, K.E.Byleen, M.R.Ziegler et R.A. Barnett, *"Finite mathematics"*, for business economics life sciences and social sciences, 4eme Edition, USA, 2019.
- [56] S.Bassel, *"Processus stochastiques pour l'ingénieur"*, 1ere Edition, Bretagne, pp.173, 2006.
- [57] E.A.Andrade-Gonzalez, J.A.Tirado-Mendez, H.J.Aguilar et M.Reyes-Ayala, *"Markovian Chain Analysis in ALOHA for Satellite Applications"*, international journal of communications, vol.1, pp.170-173, 2007.
- [58] H.Batatia, M.Benslama et M.L.Boucenna, *"Coopération dans les réseaux ad hoc par application de la théorie des jeux"*, Britain, 2015.
- [59] P.L'Ecuyer, *"Chaines de Markov en temps discret"*, support de cours, Université de Montreal, Canada.
- [60] E.Bouyakhf, E.Sabir, R.El-Azouzi et T.Jimenez, *"Modeling Slotted Aloha as a Stochastic Game with Random Discrete Power Selection Algorithms"*, Journal of Computer Systems, Networks, and Communications, Vol.2009, 2009.

RÉSUMÉ

Ce travail consiste à étudier les communications par satellite. L'objectif de cette étude est d'améliorer les performances des protocoles d'accès au canal tel que l'Aloha discrétisé, par l'emploi des chaines de Markov afin de bien gérer le canal de transmission. La modélisation du canal de transmission par les chaines de Markov a mené à des performances meilleures de la transmission, traduites en termes de débit et délai de la transmission.

Mots clé : Satellite, Transmission satellitaire, Méthodes d'accès, Protocoles MAC, Bilan de liaison, Chaines de Markov, Aloha optimisé.

ABSTRACT

This work consists of studying satellite communications. The goal of this study is to improve the performances of random access protocols used to access the medium like Slotted Aloha, by employing of Markov chains to control the use of the medium. Modeling satellite transmissions by Markov chains leads to improve transmission performances via the throughput and the transmission delay.

Keywords: Satellite, Satellite communication, Access methods, MAC protocols, Link budget, Markov chain, Optimized Aloha.

ملخص

يتمحور هذا العمل حول دراسة الاتصالات عبر الأقمار الصناعية. الهدف من هذه الدراسة هو تحسين أداء بروتوكولات الوصول إلى القنوات مثل الواها منفصلة الأزمنة، عبر استعمال سلاسل ماركوف. هذه الدراسة مكنت من تحسين خصائص هذا البروتوكول و منه تحسين خصائص الاتصالات من حيث سرعة التدفق و زمن الاتصال.

الكلمات المفتاحية: الأقمار الصناعية، الاتصالات عبر الأقمار الصناعية، طرق الوصول إلى الوسائط، بروتوكول MAC، ميزانية الاتصال، سلاسل ماركوف، الواها المحسنة.