

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Batna
Faculté de Technologie
Département d'électronique



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister en Electronique

OPTION : Micro-ondes pour Télécommunications

Thème

Etude et Modélisation de la Transmission dans les Satellites Lasers

Présenté par :

Al-Gobi Mohammed Senan Rageh

Devant le jury :

Pr. Tarek FORTAKI
Pr. Djamel BENATIA
Dr. Djemai ARAR
Dr. Karim KEMIH

Prof. U. Batna
Prof. U. Batna
M.C. U. Batna
M.C. U. Jijel

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur

Année universitaire : 2010/2011

Dédicaces

Merci au Noble « Allah » Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage, l'intelligence, la force et la patience pour réaliser ce travail.

À celle qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands hommes...

Merci ma Mère

À celui qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation...

Merci mon Père.

J'exprime ma gratitude à tous mes frères « Khaled », « Ahmed » et à ma sœur.

J'adresse également mes plus sincères remerciements à tous mes amis qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire. Entre autre « Abdallah El-Motwakel », « Ali El-Wssabi », « Balli Mouade », « Sehaïlia Salah Eddine » et « Anis Al-Awsh » ainsi que tous mes camarades algériens et yéménites.

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaite adresser ici tous mes remerciements à mon encadreur Djamel BENATIA pour l'aide et le temps qu'il m'a consacré, sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Je remercie profondément le professeur Tarek FORTAKI, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury.

Je tiens à associer à ces remerciements, Djemai ARAR maître de conférence à l'Université de Batna, et Karim KEMIH maître de conférence à l'Université de Jijel d'avoir accepté de juger ce travail.

J'exprime mes gratitude à tous les enseignants qui ont ménagé leurs efforts pour nous assurer une bonne formation.

SOMMAIRE

Introduction générale	01
Chapitre 01 : Généralités sur les communications par satellites	
I.1 Introduction	04
I.2 Description d'un system de télécommunication par satellite	04
I .2.1 Secteur terrien	05
I .2.2 Secteur spatial	05
a. Définition du satellite de communications	06
b. Constitution d'un satellite de télécommunications	06
c. Service offert par satellite	08
I.3 Les Orbites suivies par les satellites	09
I .3.1 Orbites circulaire	09
a) Orbite circulaire polaire	10
b) Orbite circulaire inclinée	10
I .3.2 Orbite elliptique	11
I.4 Les constellations de satellites	12
a) Constellation basse orbite	12
b) Constellations moyenne orbite	12
c) Constellation GEO	13
I.5 Géométrie entre la terre et le satellite	13
I.6 Bases de mécanique spatiale	15

I .6.1	Les lois de Kepler	15
a.	Première loi ou loi des orbites	15
b.	Deuxième loi ou loi des aires	16
c.	Troisième loi ou loi des périodes	16
I .6.2	Paramètres orbitaux	16
a.	Axe de référence	17
b.	Paramètres définissant la position du plan de l'orbite	17
c.	Forme et position de l'orbite	18
d.	Position du satellite sur l'orbite	19
I .6.3	Perturbations orbitales	20
a)	Perturbation du troisième corps	20
b)	Perturbation due au non sphéricité de la terre	20
c)	Perturbations dues aux frottements atmosphériques	20
d)	Perturbations dues aux radiations solaires	20
e)	Perturbations intrinsèques	21
I .6.4	Maintien et survie sur orbite	21

Chapitre 02 : la communication optique par les satellites lasers

II .1	Introduction	23
II .2	Les sources des vibrations des satellites	23
II .2.1	Les sources externes	23
II .2.2	Les sources internes	27
II .3	Le modèle de vibrations	28

II .4 Structure standard d'un système de transmission numérique dans les réseaux des satellites lasers	30
II .4.1 Sources et bruit des sources	31
II .4.2 Modulateurs	32
II .4.3 Détection	33
II .4.4 Amplification optique	35
II .5 Structure développée d'un système de transmission optique dans les réseaux des satellites lasers	41

Chapitre 03 : optimisations de la bande passante du système des communications

III .1 Introduction	45
III .2 Optimisation de l'ouverture du télescope émetteur avec les amplitudes de vibrations	45
III .3 La maximisation de la bande passante	50
III .4 Interprétation des courbes	56

Chapitre 04 : La cellule ATM dans les réseaux des satellites lasers

IV.1 Introduction	61
IV.2 Divers concepts	61
IV.3 Origine d'un concept de l'ATM	62
IV.4 L'unité de données : la cellule ATM	62

IV.5	Multiplexage et transmission des cellules ATM	63
IV.6	Identification des canaux : conduit logique et voie logique	66
IV.7	Priorité temporelle et sémantique	67
IV.8	La cellule ATM standard	68
IV.8.1	En-tête de la cellule ATM standard : structure détaillée	68
IV.8.2	L'algorithme de réception d'une cellule ATM standard	69
IV.9	La cellule ATM développée	72
IV.9.1	En-tête de la cellule ATM développée	72
IV.9.2	L'algorithme de réception d'une cellule ATM développée	74
IV.10	Comparaison entre un réseau satellite standard et un réseau satellite développée	76
Conclusion générale		78
Références bibliographiques		79

Liste de notations

La liste ci-dessous regroupe les notations employées dans les différents chapitres du mémoire suivant leurs apparitions.

UIT : Union internationale des télécommunications.

ISL : Intersatellite link (lien intersatellite).

BER : Bit Error Rate (taux d'erreur du bit).

BEP : Bit error probability (probabilité d'erreur du bit).

R_E : Rayon terrestre.

e, a : Excentricité, demi-axe de l'orbite du satellite.

Ω : Ascension droite du nœud ascendant.

ω : Argument du périhélie.

v : Anomalie vraie.

i : Inclinaison de l'orbite.

n_0 : Mouvement moyen du satellite.

T : Période de révolution du satellite sur son orbite.

G : Constante de gravitation.

M_E : Masse de la terre.

c : Distance du centre de l'ellipse au centre de la terre.

J_2 : Terme traduisant l'aplatissement polaire de la terre.

r : Distance entre le centre de la terre et le satellite.

V : Vitesse du satellite

m : Masse du satellite.

dF : Force perturbatrice.

S_a : Surface apparente en direction du soleil.

Γ : Accélération due à la pression de radiation.

FAD : Force d'origine aérodynamique s'exerçant sur le satellite.

ρ_A : Masse volumique de l'atmosphère.

CD : Coefficient de traînée aérodynamique.

A_e : Surface équivalente du satellite perpendiculaire à la vitesse.

$f(\theta_v)$: Densité de probabilité de l'erreur dans l'angle d'élévation.

σ_v : Ecart type de l'angle d'élévation.

θ_v : Angle d'élévation.

$f(\theta_H)$: Densité de probabilité de l'erreur dans l'angle azimut.

σ_H : Ecart type de l'angle azimut.

θ_H : Angle azimut.

$f(\theta)$: Densité de probabilité de l'erreur dans l'angle de pointage radial.

θ : Erreur dans l'angle de pointage radial.

σ_θ : Déviation standard de l'angle de l'erreur de pointage.

SF : Facteur d'inclinaison du système de poursuite.

SNR : Rapport signal sur bruit du système de poursuite.

WDM : Wavelength Division Multiplexing.

e : charge de l'électron.

h : constante de planck.

ν : Fréquence optique.

η : Rendement quantique.

PR : Puissance optique reçue.

PPM : Pulse Position Modulation.

OOK : On-Off Keying.

PPBM : Pulse Polarization Binary Modulation.

λ : Longueur d'onde.

P_T : Puissance optique émise.

Z : Distance entre deux satellites.

η_T, η_R : Rendement quantique de l'émetteur et de récepteur , respectivement.

G_R : Gain de récepteur.

D_R : Ouverture de télescope récepteur.

G_T : Gain de télescope émetteur adapté aux amplitudes des vibrations.

n_0 : l'indice de réfraction moyen.

\vec{r} : Un endroit dans l'espace.

$n(\vec{r})$: Le composant stochastique produit par la variation spatiale de la pression, de la température et de l'humidité.

L_A : la perte atmosphérique.

I : La puissance reçu normalisée.

RPD : la responsivité de détecteur.

$P(y/s)$: la probabilité conditionnelle.

$P(s)$: la probabilité que un bit on ou off est transmis.

$P(y)$: la probabilité a priori de y .

D_T : Ouverture de télescope émetteur après son optimisation.

$L(\theta)$: Facteur de perte.

F_G : Facteur de gain.

G_{T0} : Gain de télescope émetteur non adapté aux amplitudes des vibrations.

D_{T0} : Ouverture du télescope émetteur avant son optimisation.

$P_1(\theta)$: signal optique reçu dans le cas de l'émission du bit 1.

σ_1 : Ecart type dans le cas de l'émission du bit1.

$P_0(\theta)$: signal optique reçu dans le cas de l'émission du bit 0.

σ_0 : Ecart type dans le cas de l'émission du bit 0.

R : Sensibilité de la diode à avalanche.

M : Facteur de multiplication avalanche.

erf : Fonction d'erreur.

p : la pression atmosphérique.

T : la température.

q : l'humidité spécifique.

Introduction générale

Les télécommunications sont aujourd'hui définies comme la transmission à distance d'informations avec des moyens électroniques. Les télécommunications se distinguent ainsi de la poste qui transmet des informations ou des objets sous forme physique [1]. Le mot « télécommunication » vient du préfixe grec « tele » signifiant « loin » et du latin « communicare » qui signifie « partager ». Le terme « télécommunication » a été utilisé pour la première fois en 1904 par Edouard Estaunié [2], romancier et ingénieur français, dans son traité pratique de télécommunication électrique. Edouard Estaunié, ingénieur aux Postes et Télégraphes et directeur de 1901 à 1910 de l'école professionnelle des Postes et Télégraphes, qui ne tenait alors compte que de l'électricité dans sa définition, souhaitait rassembler sous une même discipline la télégraphie, la téléphonie et les communications radio, tenant compte de l'évolution technologique par rapport aux moyens ordinaires de communication.

De nos jours, la télécommunication est caractérisée comme suit : « l'émission, transmission à distance et réception d'informations de toute nature par fil, radioélectricité, système optique ou électromagnétique » [1]. Autrement dit, la télécommunication est d'abord et avant tout un échange d'information dans n'importe quel espace donné. La spécificité de la télécommunication, contrairement à une communication ordinaire, est que l'information est véhiculée à l'aide d'un support (matériel ou non), lui permettant d'être transmise sur de longues distances. Les communications de tous types n'ont cessé de croître de façon continue. La télévision, bien plus que la radio, symbolise le passage de l'ère industrielle à l'ère de l'information lorsqu'elle devient, à la fin des années 1940, un objet de masse. Le 4 octobre 1957, avec le lancement du premier satellite par les Soviétiques, le Spoutnik, démarre la course à l'espace ; les Américains lançant leur premier satellite l'année suivante [3].

Les premiers satellites furent d'abord passifs ; ils se contentaient simplement de réfléchir les signaux émis par les stations terrestres. L'inconvénient majeur était que ces signaux étaient diffusés dans toutes les directions et pouvaient donc être captés dans n'importe quelle partie du monde. Les deuxièmes types de satellites furent ensuite actifs. C'est-à-dire qu'ils possédaient leurs propres systèmes de réception et d'émission [2, 4].

L'idée de se communiquer entre les satellites afin de transmettre l'information fait l'objectif de plusieurs études d'où l'apparition des réseaux satellitaires [5].

Les systèmes de communication par les satellites standards utilisaient les radiations des micro-ondes comme support dans la transmission des informations, mais dans la nouvelle génération des réseaux satellites, c'est le laser (faisceau lumineux très étroit et très concentré en énergie) qui jouait le rôle de lien inter satellite et d'un support dans la communication entre les satellites connus aujourd'hui sous le nom des satellites lasers [4, 6].

Les satellites lasers offrent plusieurs avantages par rapport aux satellites standards d'où leur grande importance dans le monde de la communication. Ils ont rendu la communication entre les différentes régions du monde plus rapide et performante. La principale complexité d'un système de transmission optique par les satellites lasers est le système de pointage. Ainsi les faisceaux lasers peuvent parfois rater partiellement ou totalement le satellite récepteur à cause des vibrations continues du système de pointage dues à des sources internes et externes environnantes. Différents méthodes permettent de surmonter le problème de ces perturbations et d'améliorer par conséquent la qualité de la communication [4, 6, 7].

Dans ce travail, nous allons traiter les différentes sources internes et externes qui causent les vibrations du faisceau laser émis et les différents schémas de modulation qui assurent un rendement optimal.

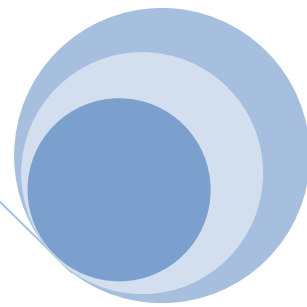
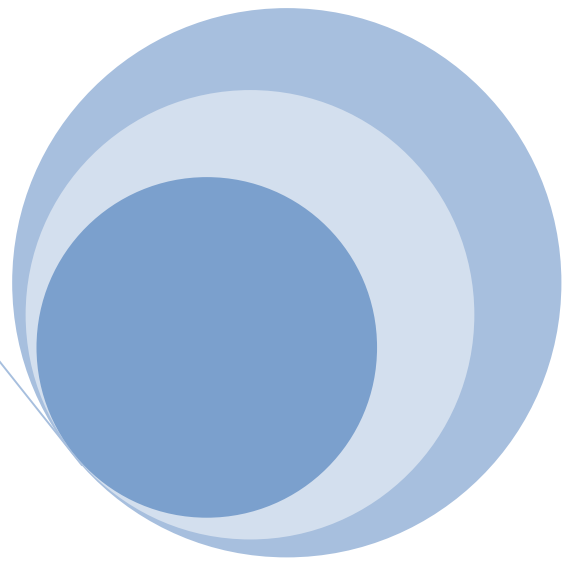
On peut résumer notre travail en quatre chapitres :

- Le premier chapitre concerne des généralités sur la transmission par satellites, constitution du satellite, les orbites, Positions des satellites, etc...
- Le second chapitre étudie les différentes sources internes et externes qui causent les vibrations du faisceau laser émis et analyse la structure standard du système de communication optique dans les réseaux de satellites lasers ainsi que la structure développée avec ses différents schémas de communications.
- Le troisième chapitre développe les modèles mathématiques qui permettent d'analyser et de maximaliser la bande passante de système de communication avec

les variations des amplitudes des vibrations en prenant exemple le télescope optique.

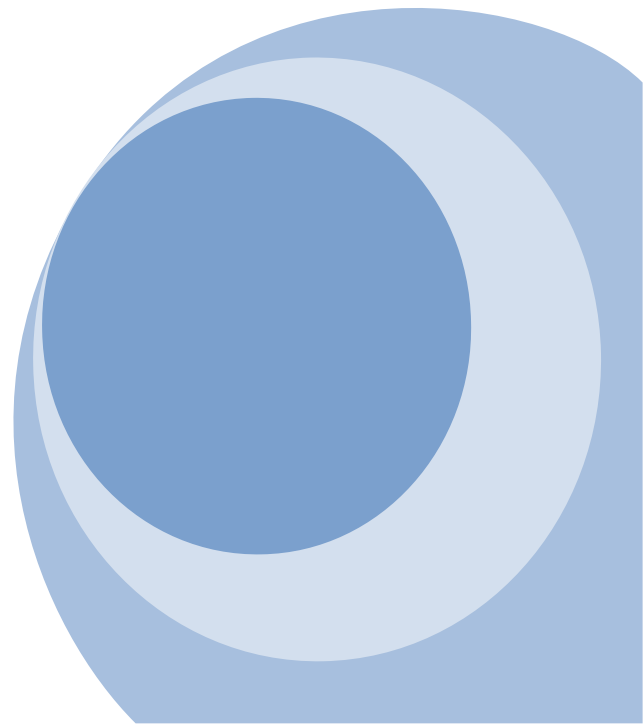
- Le quatrième chapitre concerne la transmission des informations dans les réseaux des satellites lasers par la technique de l'ATM (Mode de Transfert Asynchrone) en tenant compte des vibrations du faisceau laser émis, il comporte les divers concepts et améliorations introduites afin de surmonter les effets de vibrations et améliorer la qualité de la communication.

Finalement, une conclusion terminera ce mémoire résumant les principales tâches accomplies.



Chapitre 01

Généralités sur les communications par satellites



I.1. Introduction

Le développement des moyens de transmissions de l'information qui constitue l'une des caractéristiques principales de notre époque résulte, d'une part, d'une augmentation continue des besoins et, d'autre part, des possibilités offertes par le progrès technique.

L'un des caractères essentiels de l'évolution de notre civilisation est l'accroissement constamment accéléré du volume des échanges d'information (information écrite, verbale ou visuelle). Cet accroissement qui porte à la fois sur le volume des transferts d'information, sur leur rapidité et sur les distances couvertes contrôle profondément le développement des grands systèmes qui caractérisent la société actuelle : transports intercontinentaux, consortiums industriels internationaux, agences d'information, enceintes de confrontation politique entre nation, prévisions du temps, échanges boursiers, diffusion de la culture...

Le développement des techniques et leur mise au service des besoins de l'homme s'est fait avec une rapidité sans pareil, caractéristique de l'accélération du progrès technique. En tête de cette progression se trouvent les télécommunications par satellites qui ont pris une place prépondérante parmi les différents moyens des transmissions de l'information et qui ont très largement contribué à satisfaire les immenses besoins. Ces systèmes de télécommunications par satellites possèdent des qualités intrinsèques distinctes de celle des systèmes terrestres classiques [3, 4].

Dans un premier temps ce chapitre présente une description générale des systèmes de télécommunications par satellite en mettant l'accent sur le satellite lui-même (sa constitution, les services qu'il offre).

I.2. Description d'un système de télécommunication par satellite

Un système de télécommunication par satellites s'articule autour d'un secteur terrien (les stations terriennes), assurant la connexion aux réseaux terrestres, et d'un secteur spatial (le satellite), réalisant la jonction entre les stations.

La figure (I.1) illustre les différentes composantes d'un système de télécommunications par satellite [4].

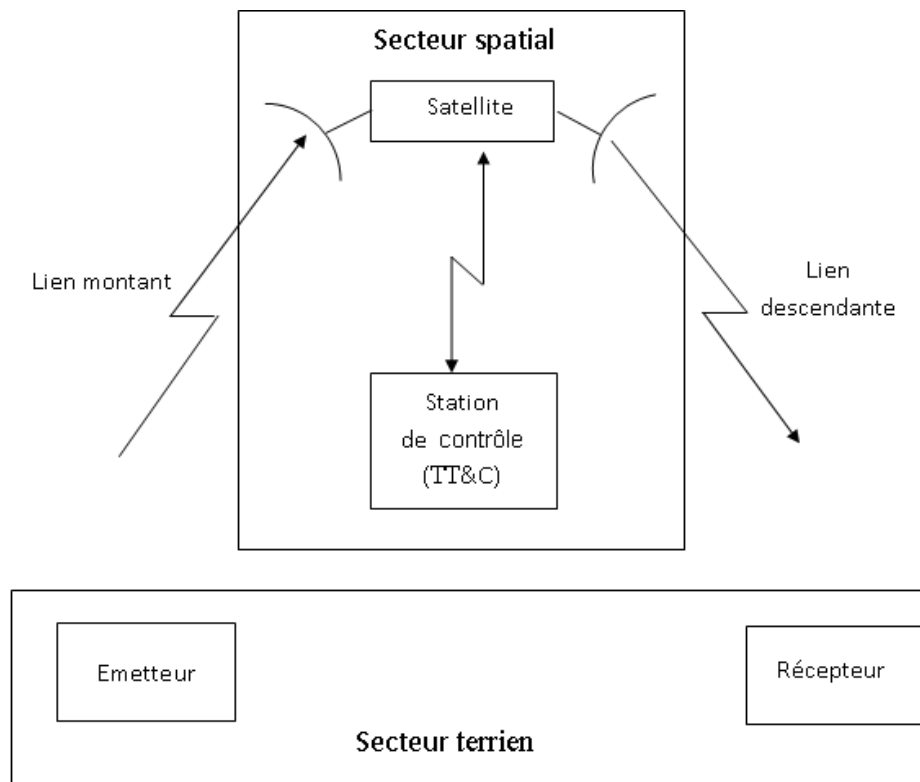


Fig. I.1 : Composante d'un système de télécommunications par satellite.

I.2.1 Secteur terrien

Le secteur terrien est constitué par l'ensemble des stations terriennes, le plus souvent raccordées aux terminaux des usagers par un réseau terrestre ou directement dans le cas de petites stations (VSAT : very small aperture terminale) et de stations mobiles. Les stations se distinguent par leur taille, qui varie selon le type de trafic (téléphone, télévision, données). On distingue en outre les stations fixes, les stations transportables, les stations mobiles. Certaines stations à la fois émettrices et réceptrices. D'autres sont réceptrices uniquement (RCVO : receive only) : c'est le cas par exemple des stations de réception d'un système de radiodiffusion par satellite, ou d'un système de distribution de signaux de télévision ou de données [2, 3]. Le coût des stations terriennes peut être déterminant dans un réseau de communication pour lequel la sécurité, la disponibilité et la fiabilité des équipements sont des exigences de premier ordre.

I.2.2 Secteur spatial

Le secteur spatial comporte le satellite et l'ensemble des moyens de contrôle situés au sol, c'est à dire l'ensemble des stations de poursuite, de télémétrie et de télécommande (TT&C : tracking, telemetry, and command), ainsi que le centre de

contrôle du satellite où sont décidées toutes les opérations liées au maintien à poste et vérifiées les fonctions vitales du satellite [8].

a. Définition du satellite de communications

Le satellite est naturellement la partie essentielle d'un système de télécommunications par satellite. Au début des années 60 époque à la quelle diverses possibilités de télécommunications spatiales étaient expérimentées [1, 2], le satellite n'était qu'un objet purement passif, une grande sphère réfléchissante se déplaçant dans le ciel dont la seule fonction était de réfléchir l'énergie reçue, mais les résultats médiocres obtenus ont entraîné l'abandon d'un tel système.

Le satellite maintenant est de type actif : il se comporte comme un véritable relais hertzien dans le ciel. Il reçoit les émissions de la terre (lien montante) et les retransmis vers la terre (lien descendante) après translation de fréquence et amplification. Il existe 5 sortes de satellites [6, 7] :

- **Les satellites astronomiques** : ils observent l'espace : comme ils sont placés au-dessus de l'atmosphère ils voient alors mieux les étoiles et les trous noirs car ils ne sont pas gênés par la couche d'air et la pollution.
- **Les satellites de navigation** : ils servent à repérer la position des navires et les courants marins.
- **Les satellites météorologiques** : ils servent à réaliser des photos de la terre, les photos permettent de prévoir la météorologie. ils sont soit géostationnaires, soit en rotation constante autour de la terre.
- **Les satellites de télécommunication** : les satellites de télécommunications servent aux communications téléphoniques, aux images des télévisions, à la radio.
- **Les satellites militaires** : il ya 2 types de satellites militaires : télécommunication et surveillance (reconnaissance terrestre et maritime) dès qu'un satellite a accompli sa mission, il existe deux façons de s'en débarrasser :
 1. on le laisse tourner autour de la terre sur une orbite plus haute.
 2. On le laisse retomber sur terre : les scientifiques calculent pour qu'il retombe dans une zone inhabitée (souvent en plein océan). S'il est petit, arrivé dans l'atmosphère il se désintègre sous l'effet du frottement avec l'atmosphère.

b. constitution d'un satellite de télécommunications

Le satellite est constitué d'une charge utile et d'une plate-forme : **La plate-forme** comporte l'ensemble des sous-systèmes permettant à la charge utile

de fonctionner. On trouve :

- **L'alimentation électrique:** tous les satellites ont besoin d'énergie pour fonctionner. Le soleil fournit l'énergie nécessaire pour la plupart des satellites en orbite. Ce système d'alimentation en énergie utilise des panneaux solaires pour convertir la lumière en énergie électrique, ainsi que des batteries pour la stocker, et un système de distribution qui transmet l'énergie électrique à chaque instrument.
- **Le système de commande:** ce système contrôle toutes les fonctions du satellite. C'est le cerveau du satellite. Le cœur de ce système s'appelle le Flight Computer. Il ya aussi un processeur d'entrée/sortie qui redirige toutes les données de contrôle qui entrent et sortent du Flight Computer
- **Le contrôle d'altitude et d'orbite et les équipements de propulsion:** ce système permet au satellite de rester stable et de toujours être orienté dans la bonne direction. Le satellite possède des capteurs qui lui permettent de connaître son orientation. De plus, le satellite a aussi besoin de pouvoir se déplacer pour corriger sa position, c'est pourquoi il possède un mécanisme de propulsion. La performance du système de contrôle d'altitude dépend de l'utilisation du satellite. Un satellite utilisé pour faire des observations scientifiques a besoin d'un système de contrôle d'une plus grande précision que pour un satellite de télécommunications.
- **Les équipements de poursuite, de télémessure et de télécommande TT&C:** ces équipements se composent d'un système émetteur, d'un système récepteur, ainsi que de diverses antennes permettant de relayer les informations entre la Terre et le satellite. La base de contrôle au sol utilise ces équipements pour transmettre de nouvelles instructions à l'ordinateur du satellite. Ce système permet aussi de transmettre des images ou autres formes de données enregistrées, aux ingénieurs se trouvant sur Terre.
- **Le contrôle thermique:** le système protège tous les équipements du satellite des dommages dus à l'environnement spatial. En orbite, un satellite est exposé à de brutaux changements de températures (de -120° lorsque le satellite est dans l'obscurité, jusqu'à 180° lorsque le satellite se trouve exposé au soleil). Le contrôle de la température utilise une unité de distribution de chaleur ainsi qu'un système de couverture thermique pour protéger les équipements électroniques du satellite de ces brusques changements de température.

La charge utile d'un satellite représente tous les équipements permettant au

satellite de réaliser la fonction pour laquelle il est destiné. Pour un satellite de communications, la charge utile peut représenter les antennes réfléchissant le signal TV ou le signal téléphonique. Pour un satellite d'observation, la charge utile est composée de caméras digitales et de capteurs d'image pour prendre des clichés de la surface de la Terre. Cette charge utile comporte un ensemble de canaux, chaque canal étant équipé d'un amplificateur d'émission opérant dans une sous bande particulière de la bande totale allouée au satellite. Cette disposition permet d'offrir, dans chaque canal, une puissance en rapport avec l'état de développement technologique des amplificateurs micro-ondes embarqués, alors que la mise en œuvre d'un seul amplificateur pour l'ensemble de la bande conduirait à une dissémination de la puissance de cet amplificateur.

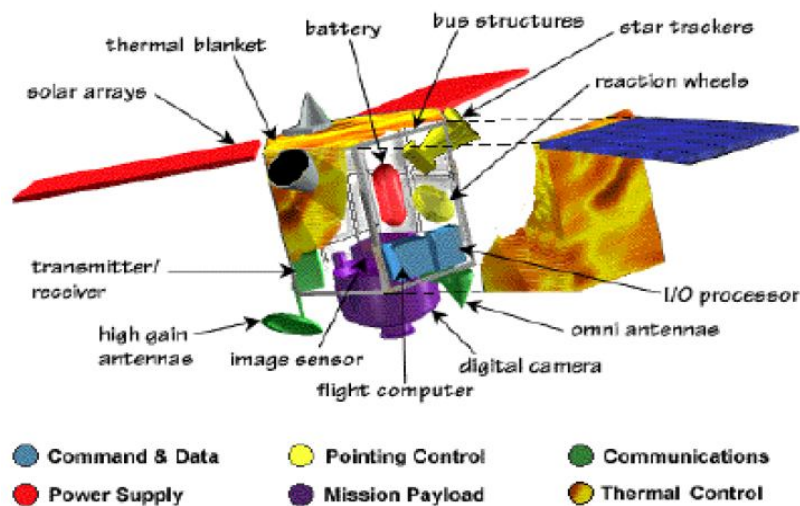


Fig. 1.2 : Structure d'un satellite.

c. Service offert par satellite

Une demande importante s'est créée en matière de services personnels et mobiles. Récemment, la notion du service *multicast*, c'est-à-dire d'une source vers un groupe déterminé d'utilisateurs, est apparue. Cette définition est à mettre en opposition avec celle diffusion (*broadcast*), qui inonde toute une région d'utilisateurs sans distinction autre que géographique. Dans tous les cas cette volonté de partage de l'information rend plus attrayants les relais depuis l'espace.

La carte de répartition entre réseaux satellitaires et réseaux terrestres est donc entrain de changer radicalement d'une manière synthétique, les avantages des satellites sont :

- Le recouvrement de grandes zones géographiques,
- La possibilité d'avoir des accès et des distinctions multiples pour une même Communication,
- La possibilité de déploiement rapide des services,
- L'adaptation à des régions sans infrastructure de télécommunications.
- Observer la terre, le climat, la végétation, les océans.
- Retransmettre les ondes: la radio, la télévision, le téléphone, internet.

Les ondes qu'ils envoient se déplacent à 300 000 km/s.

I.3. Les Orbites suivies par les satellites [8, 9]

Les satellites utilisent la force gravitationnelle de notre planète afin de se maintenir à une position et à une distance déterminée de la terre. Il est ainsi possible de définir à tout moment de quelles sont les caractéristiques du satellite pour établir des transmissions. Nous allons voir dans cette partie quels sont les types d'orbites utilisées et comment celles-ci fixent certaines limites ou contraintes dans les transmissions ou les équipements.

- L'orbite est la trajectoire idéale que suit un satellite en l'absence de perturbations.
- Les orbites sont habituellement classées en fonction de leurs altitudes moyennes et de leurs synchronisations avec la terre ou le soleil.

On peut ainsi distinguer trois types d'orbites différentes : l'orbite géostationnaire, les orbites moyennes altitude et les orbites basses altitude, chacune ayant des caractéristiques différentes des autres.

On peut aussi classer ces orbites selon leurs formes ; dans ce cas on distingue deux types : les orbites circulaires et les orbites elliptiques.

I.3.1 Orbites circulaire

Il existe une infinité d'orbites circulaires, chacune correspondant à une inclinaison par rapport au plan orbital, mais on peut en distinguer 2 sortes : l'orbite circulaire polaire

et les orbites circulaires inclinées :

a) Orbite circulaire polaire :

L'orbite polaire est une orbite circulaire qui passe par-dessus les deux pôles de la terre. L'inconvénient principal, pour les satellites inscrits dans ce type de trajectoire, est la lenteur de leur couverture mais cette faible vitesse permet tout de même au satellite de couvrir une grande partie de la surface du globe, voir la totalité de la terre, compte tenu de la rotation de la terre sur elle-même. On peut citer l'exemple des satellites d'observation français "Spot", situés à 800 km d'altitude, qui assurent la couverture de la surface totale du globe en 21 jours.

b) Orbite circulaire inclinée :

Les orbites circulaires inclinées décrivent également un cercle autour de la terre, mais chaque trajectoire est inclinée d'un certain angle par rapport au plan équatorial. Cependant, cette inclinaison présente un inconvénient majeur : étant donné que la plus haute latitude desservie par les satellites, dont les orbites sont inclinées, correspond à la déviation angulaire par rapport au plan de l'Equateur, ces satellites ne peuvent pas couvrir la totalité de la surface du globe, par contre cette orbite possède un avantage : selon l'altitude du satellite, il est possible de cibler les zones du globe, c'est-à-dire que l'on peut desservir les parties intéressantes d'un point de vue économique, militaire, ou autres applications...

Par exemple, le projet français "Globalstar" prévoit de lancer 48 satellites en orbite circulaire inclinée à 50° par rapport à l'équateur, afin d'assurer des communications mobiles dans la plupart des pays.

Ces deux types de trajectoires ont chacun des caractéristiques différentes, des usages propres suivant les inconvénients et les avantages. Néanmoins ils ne sont que très peu utilisés par rapport à l'orbite géostationnaire, qui possède actuellement le plus d'avantages aussi bien économiques que pratiques.

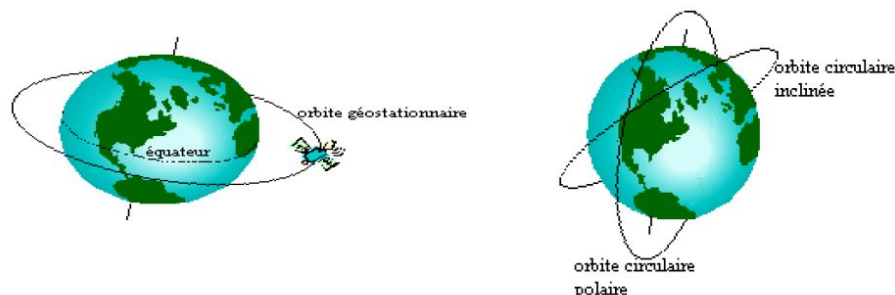


Fig. I.3 : Les orbites circulaires.

I.3.2 Orbite elliptique

Comme son nom l'indique, un satellite placé dans une orbite de ce type décrit une trajectoire en forme d'ellipse autour de la terre. La principale caractéristique de ce type d'orbite est la grande variation en vitesse que subissent les satellites. En effet, plus un satellite est loin de la terre, plus sa vitesse est faible car la vitesse "v" est inversement proportionnelle à son altitude "h" selon la relation :

$$v^2 = G * m * \left(\frac{2}{h} - \frac{1}{a} \right) \quad (I.1)$$

Où G est la constante de gravitationnelle, m la masse du satellite et a le demi grand axe de l'orbite.

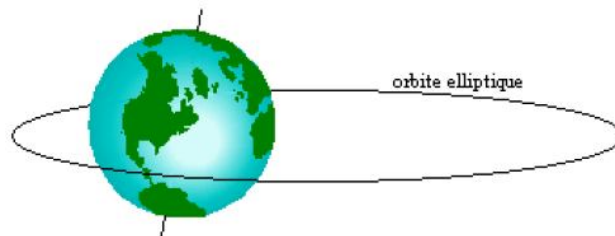


Fig. I.4 : Orbite elliptique.

Cependant, comme l'altitude varie énormément pendant sa période et que la trajectoire décrit une ellipse, la position du satellite pour un observateur terrestre n'est pas fixe. Par conséquent, le suivi de chaque satellite nécessite un équipement de stations d'émission et de réception avec des antennes mobiles, ce qui est considéré au point de vue financier et qualitatif comme un inconvénient. Néanmoins, les satellites en orbites elliptiques présentent l'avantage de pouvoir desservir des zones éloignées de l'équateur, ce qui n'est pas forcément le cas pour les orbites circulaires et géostationnaire. En effet, avec une inclinaison élevée, il est possible de survoler des territoires à la périphérie des hémisphères. La couche d'atmosphère étant plus étroite, la qualité des signaux est donc un peu meilleure.

Par exemple, dans le système "Molnya" utilisé par la Russie, 3 satellites dont les orbites sont inclinées de 63° par rapport au plan équatorial, couvrent totalement la Sibérie car leurs parties lentes correspondent au deux tiers de leur période et ils se situent alors à la verticale du territoire sibérien.

Les orbites elliptiques présentent des avantages, comme la couverture des zones éloignées de l'équateur, mais également des inconvénients tels que les aspects qualitatif et financier des équipements mobiles sur terre. Cependant pour les orbites circulaires ce type d'inconvénients n'apparaît presque pas.

I.4. Les constellations de satellites [10,11]

Une constellation de satellite peut être définie comme plusieurs satellites semblables de même type ayant la même fonction et qui sont conçus pour être similaires, complémentaires et orbités pour un but commun sous un contrôle partagé. On distingue trois types de constellation selon leurs altitudes d'orbites :

a) Constellation basse orbite

Les satellites en orbite basse décrivent des orbites elliptiques ou (plus souvent) circulaires à moins de 2.000 kilomètres de la terre. La période orbitale à ces altitudes est comprise entre 90 minutes et deux heures. Quant au rayon de la zone de couverture, il est compris entre 3000 et 4000 kilomètres.

Un satellite LEO peut rester visible jusqu'à 20 minutes pour un observateur sur la terre.

Un système de transmission global en utilisant ce type d'orbite exigé un grand nombre de satellites dans un certain nombre de plans orbitaux différents. Lorsqu'un satellite en charge d'un utilisateur donné n'est plus visible pour cet utilisateur (il passe sous l'horizon visible), le satellite doit être capable de transférer les service dont il avait la charge à un autre satellite parcourant une orbite identique ou adjacente : c'est la gestion du **hand-over**.

Les constellations LEO offrent en tout cas des retards de propagation particulièrement faibles, de l'ordre d'une vingtaine de ms, ce qui leur permet d'assurer des services de même type que ceux des réseaux filaires terrestres en fibres optiques.

b) Constellations moyenne orbite

Les satellites en orbite moyenne ICO ou MEO (Intermediate Circular Orbits, Medium earth orbits), décrivent des orbites circulaires à une altitude d'environ 10.000 kilomètres. La période orbitale est d'environ 6 heures et un observateur terrestre peut avoir une visibilité d'un satellite de quelques heures.

Un système de transmission global utilisant ce type d'orbite exige un nombre plus modeste de satellites par rapport aux constellations LEO. Il suffit de 2 à 3 plans orbitaux pour réaliser une couverture globale.

Une constellation de type MEO fonctionne de manière très semblable aux systèmes LEO ; toutefois, par structure, il est bien évidemment moins souvent besoin de faire appel à un système de **hand-over**.

Le retard de propagation est plus important que dans les constellations LEO, mais reste très inférieur à celui constaté dans les systèmes GEO.

c) Constellation GEO

Les satellites les plus couramment utilisés aux fins de télécommunication sont des satellites géostationnaires. L'altitude de ces satellites équatoriaux, telle que leur période d'orbite soit synchrone de la terre, soit une rotation en 23h 56mn 4s, sera de 36.000km environ. Trois satellites disposés à 120° sur l'orbite géostationnaire, permettent "de voir" quasiment toute la terre, à part une petite zone polaire située aux des extrêmes (Fig. I.5) le retard de propagation est plus important que dans les constellations LEO et MEO.

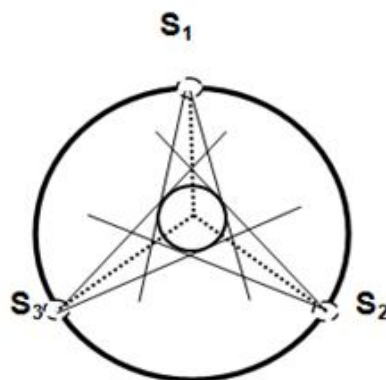


Fig. I.5 : Constellation GEO.

I.5. Géométrie entre la terre et le satellite [12,13]

Chaque satellite est défini par sa latitude et sa longitude par rapport à un point de référence p.

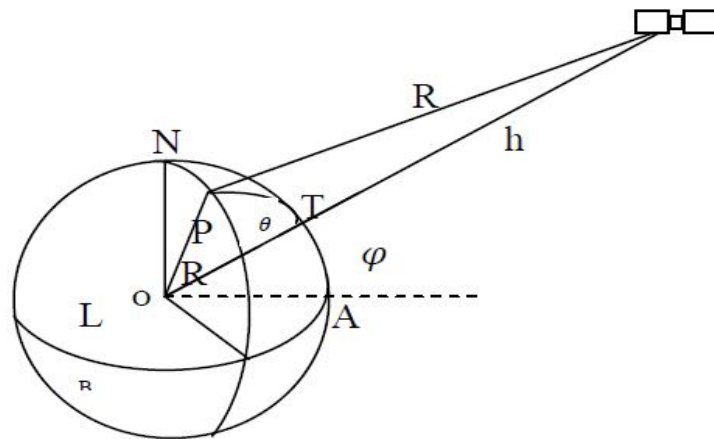


Fig. I.6 : Géométrie entre la terre et le satellite.

φ : latitude du satellite ; λ : longitude du satellite

l : latitude d'un point de longitude de satellite

Ψ : longitude de P ; $L = \Psi - \lambda$: différence de longitude de satellite et du point P

h : altitude du satellite ; $R_T = 6378 \text{ Km}$: rayon de la terre

$r = R_T + h$: distance entre le centre de la terre e le satellite

$R = \sqrt{R_T^2 + r^2 - 2R_T r \cos \varphi}$: Distance entre le satellite et le point P

Avec $\cos \varphi = \cos L \cdot \cos \theta \cdot \cos l + \sin \theta \cdot \sin l$

Deux angles pour localiser le satellite à parti d'un point P de la surface de la terre, habituellement, on utilise l'angle du site et l'azimut.

- L'angle de site E_i est l'angle entre l'horizon au point considéré et le satellite, mesuré dans le plan contenant le point considéré, le satellite et le centre de la terre.
- L'angle azimut A est l'angle, mesuré dans le plan horizontal au point P, entre la direction du Nord géographique et l'intersection du plan contenant le satellite et le centre de la terre.

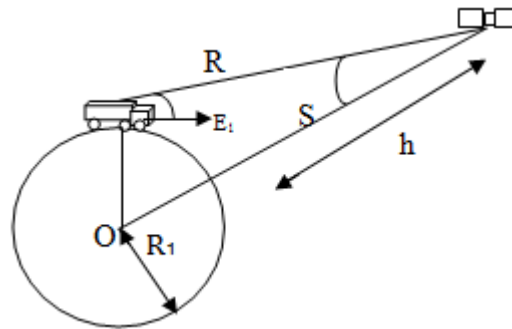


Fig. I.7 : Angle de nadir et angle de site.

Un autre angle utile est l'angle de nadir S . c'est l'angle au satellite entre la direction du centre de la terre et la direction du point de référence P .

I.6. bases de mécanique spatiale [12,14]

On considère l'évolution d'un mobile assimilé à un point matériel au voisinage d'un corps céleste. On suppose que :

- Les seules forces prises en compte sont les forces d'attraction newtonienne
- Le corps céleste est supposé à symétrie sphérique et de répartition massique constante.

Dans ces conditions, l'étude du mouvement du mobile est assimilable en première approximation à un problème à 2 corps : une particule de masse m attirée par une particule de masse M .

I.6.1. les lois de Kepler

- a) **Première loi ou loi des orbites** : dans le référentiel héliocentrique, l'orbite de chaque planète est une ellipse dont l'un des foyers est occupé par le soleil.

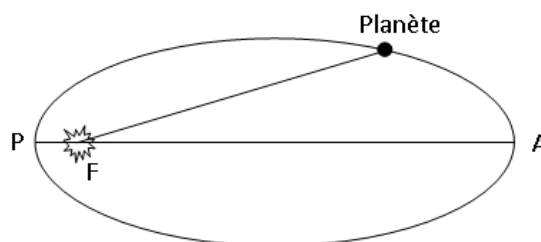


Fig. I.8 : L'ellipse.

En fait la première loi établit que toutes les orbites ont la forme d'une ellipse. Cette loi n'interdit pas les orbites circulaires, en effet ces dernières sont considérées comme des ellipses dont les deux foyers sont confondus.

b) Deuxième loi ou loi des aires : le mouvement de chaque planète est tel que le segment de droite reliant le soleil et la planète balaie des aires égales pendant des durées égales.

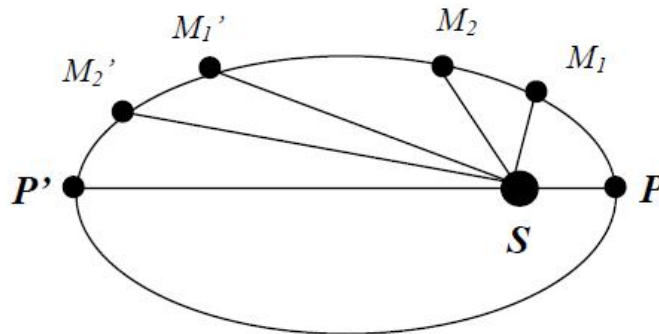


Fig. I.9 : Loi des aires.

c) Troisième loi ou loi des périodes : pour toutes les planètes, le rapport entre le cube du demi grande axe (a) de la trajectoire et le carré de la période (T) est le même.

$$\frac{T^2}{a^3} = cte \quad (1.2)$$

Cela signifie que l'on peut calculer le temps qu'il faudra au satellite pour effectuer une orbite (période) à partir de la moitié de la dimension du demi grand axe.

La loi indique que le satellite aura une vitesse plus lente aux altitudes les plus hautes et inversement une vitesse plus rapide aux altitudes plus basses.

1.6.2.paramètres orbitaux [15]

Une trajectoire elliptique est caractérisée par six éléments orbitaux (correspondant à six degrés de liberté). Deux définissent la forme de l'ellipse : a et e qui sont respectivement le demi-grand axe et l'excentricité. Trois éléments orbitaux servant à orienter la position de l'ellipse dans l'espace : w , Ω , i , respectivement l'argument du périégée, l'ascension droite du nœud ascendant et l'inclinaison.

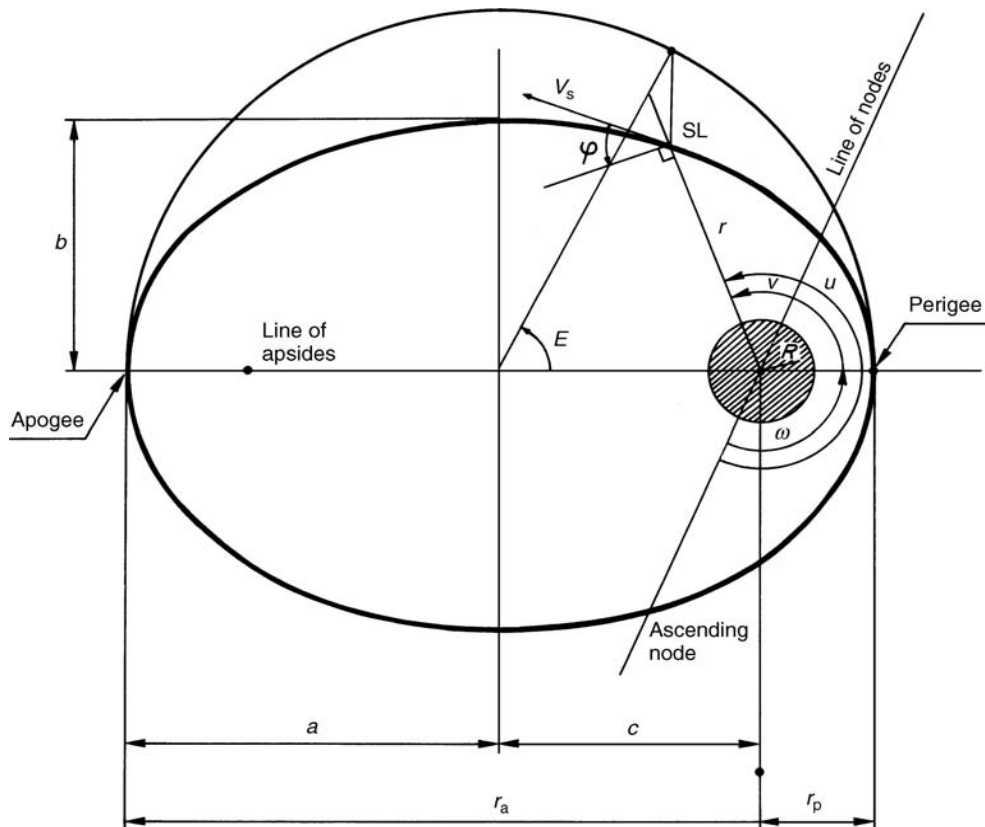


Fig. I.11 : Problème à deux corps.

a. Axe de référence :

L'orbite du satellite coupe le plan de l'équateur en 2 points appelés nœud descendant ND au point de passage du satellite de l'hémisphère nord à l'hémisphère sud, et nœud ascendant NA au point de passage du satellite de l'hémisphère sud à l'hémisphère nord. La ligne (NA, ND) est la ligne des nœuds.

b. Paramètres définissant la position du plan de l'orbite :

On sait par la première loi de Kepler que le mouvement est plan et que la trajectoire a la forme d'une ellipse.

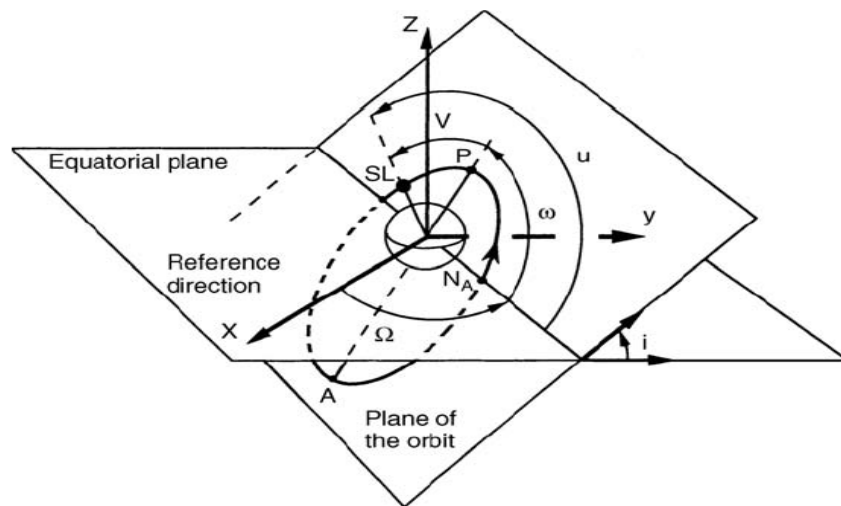


Fig. I.12 : Position du plan de l'orbite.

On peut donc définir 2 angles permettant de positionner le plan de l'orbite par rapport à un repère initial équatorial :

i = l'inclinaison par rapport à l'équateur

Ω = l'ascension droite du nœud ascendant c'est-à-dire l'angle entre l'axe X et la ligne d'intersection du plan de l'orbite avec l'équateur (longitude)

La ligne des nœuds (NA, ND) partage en deux le plan de l'équateur et le plan de l'orbite.

- L'angle i formé par le demi-plan de l'orbite contenant la trajectoire du satellite de NA vers ND et le demi-plan de l'équateur contenant la trajectoire d'un point sur l'équateur de NA vers ND, est l'inclinaison qui va de 0° à 180° . L'orbite est dite directe quand i est inférieur à 90° et rétrograde quand i est supérieur à 90° .
- L'angle Ω que forment, dans le plan de l'équateur, la ligne des nœuds et la direction du point vernal, définit l'orientation de la ligne des nœuds. C'est l'ascension droite du nœud ascendant qui se mesure de 0° à 360° , du point vernal vers le nœud l'ascendant, dans le sens de rotation de la terre ou sens direct.

c. Forme et position de l'orbite :

Dans le plan de l'orbite, l'ellipse elle-même est caractérisée par deux paramètres :

a : le demi grand axe, b : le demi petit axe.

On remplace très souvent b par l'excentricité e , sachant que

$$b^2 = a^2(1 - e^2) \quad (1.3)$$

Ensuite en définit une origine sur l'ellipse ; conventionnellement, on a l'habitude de la situer au périhélie (le point le plus proche de la terre) de l'orbite.

La position du grand axe dans le plan de l'orbite est définie par l'angle ω , formé par la ligne joignant le centre de la terre au périhélie d'une part et la ligne des nœuds d'autre part. C'est l'argument du périhélie ω qui est mesuré de 0° à 360° , du nœud ascendant vers le périhélie dans le sens de révolution du satellite.

d. Position du satellite sur l'orbite

Il faut maintenant savoir où le satellite est positionné exactement sur l'ellipse.

L'angle déterminant la position du satellite par rapport au périhélie peut s'exprimer de différentes manières :

V = l'anomalie vraie correspond en fait à une coordonnée polaire

E = l'anomalie excentrique en projetant le satellite sur le cercle principal de l'ellipse

M = l'anomalie moyenne définie par l'équation de Kepler : $M = E - e \sin E$

Cet angle fictif M permet de définir simplement le mouvement képlérien en fonction du temps par :

$$M = M_0 + n(t - t_0) \quad (1.4)$$

Où n est le moyen mouvement égale à

$$n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \quad (1.5)$$

Et constant du fait de la 3^{ème} loi de Kepler.

On a donc obtenu 6 paramètres orbitaux : $(a, e, i, \omega, \Omega, V$ ou E ou $M)$

Le principal avantage des paramètres képlérien est, si les perturbations ne sont pas prises en compte, les cinq premiers sont constants dans le temps tandis que le sixième (V, E ou M) varie linéairement avec le temps.

I.6.3. perturbations orbitales [16,17]

Un certain nombre de contributions physiques influencent la trajectoire d'un corps en orbite terrestre. On les nomme des perturbations et s'il n'est pas toujours possible de les prendre en compte analytiquement dans le calcul de l'orbite, il est nécessaire d'en tenir compte par exemple pour effectuer des corrections périodiques de la trajectoire.

Il existe différentes méthodes numériques [13] permettant d'évaluer ces perturbations

a) Perturbation du troisième corps

La présence du soleil et de lune provoque des variations de tous les éléments orbitaux, mais les effets séculaires (linéaires à long terme) se portent principalement sur l'ascension droite Ω et l'argument du périégée ω .

Pour des satellites d'orbites assez circulaires et d'attitude plus élevée qu'une géostationnaire, c'est cette perturbation qui prédomine.

b) Perturbation due au non sphéricité de la terre

Pour des satellites dont l'orbite est d'altitude inférieure ou égale à une géostationnaire, c'est l'effet de l'aplatissement de la terre aux pôles qui domine en provoquant des variations sur l'ascension droite et l'argument du périégée.

c) Perturbations dues aux frottements atmosphériques

Il s'agit de la principale force d'origine non gravitationnelle qui affecte les satellites en orbite basse (LEO). Ces frottements leur font perdre de l'énergie cinétique et donc de l'altitude. Par conséquent ils peuvent finir par une rentrée dans l'atmosphère si la trajectoire n'est pas compensée.

d) Perturbations dues aux radiations solaires

A des altitudes supérieures à 800 Km une autre perturbation prend le pas sur les

frottements atmosphériques : la pression due aux radiations solaires qui provoque une accélération, appliquée dans la direction du soleil, égale à :

$$a = -4.5. 10^{-8}A/m \quad (1.6)$$

Où A est la surface exposée au soleil et m la masse du satellite.

e) Perturbations intrinsèques

Il existe toute une série de perturbations qui dépendent directement de la construction du satellite. Parmi elles on peut relever :

- Les incertitudes sur le centre de gravité,
- Les incertitudes sur la propulsion,
- Les modes vibratoires de la structure.

Ces perturbations intrinsèques concernent principalement l'attitude (la position angulaire du satellite et sa variation par rapport au temps) du satellite mais peuvent aussi indirectement influencer la trajectoire orbitale.

I.6.4 Maintien et survie sur orbite [14]

La terre contient des champs magnétiques importants, ce qui a des répercussions sur son voisinage. Plus précisément, certaines zones au-delà de la surface terrestre présentent des radiations suffisamment importantes pour endommager les composants électroniques qui les franchissent.

A haute altitude, le champ magnétique terrestre est fortement déformé par la pression du vent solaire.

A basse altitude et (LEO), il est approximativement celui d'un dipôle incliné d'environ 11.5 degrés par rapport à l'axe de rotation du globe terrestre.

Un des effets du champ magnétique terrestre les plus importants, du point de vue de l'ingénierie est du aux **ceintures de Van Allen**, du nom du physicien Américain qui les découvrit en 1958. Il s'agit de deux zones toriques, où la concentration d'électrons et de protons est très importante car ils ont été piégés par le champ magnétique [19].

La première ceinture est comprise entre 600 et 90000 Km d'altitude pour une latitude comprise entre +40° et -40°.

La seconde se situe à une altitude valant environ quatre fois le rayon terrestre et recouvre largement la première.

On distingue quatre régions principales de mise en orbite des satellites :

- La zone LEO (Low Earth Orbit), entre la fin de l'atmosphère et la première ceinture de Van Allen, de 400Km à 1500 Km d'altitude ;
- La zone MEO (Medium Earth Orbit), entre les deux ceintures de Van Allen, de 5000 Km à 13 000Km d'altitude ;
- La zone HEO (High Earth Orbit), dont l'apogée est au-delà des ceintures de Van Allen, mais qui, dans le cadre des orbites elliptiques, embrasse une ou plusieurs zones précédentes ;
- La zone GEO (Geostationary Earth Orbit), qui pourrait se voir comme un cas particulier de HEO, pour les satellites géostationnaires, à une altitude de 35 786 Km.

Il n'est pas intéressant de placer un satellite à orbite elliptique dans la zone LEO, étant donné le peu de marge que l'on a (le demi-axe principal et le demi-petit axe sont alors tous deux compris entre 7 000 Km et 8 000 Km). Il reste la possibilité de les placer en orbite, ou de leur faire franchir les ceintures de Van Allen, ce qui réduit la durée de vie des composants électroniques. En résumé, La classification de la figure (I.13) peut être considérée.

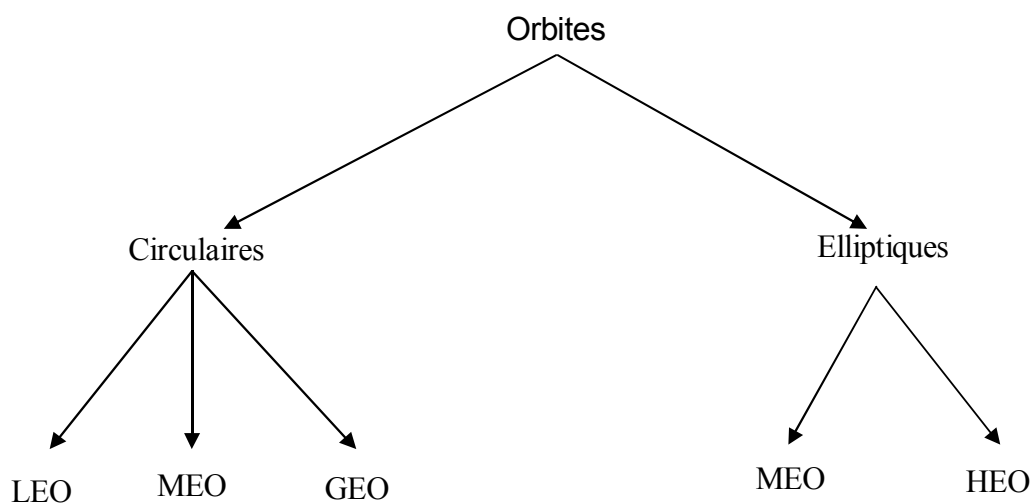
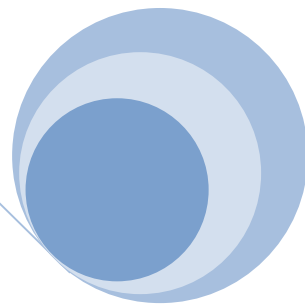
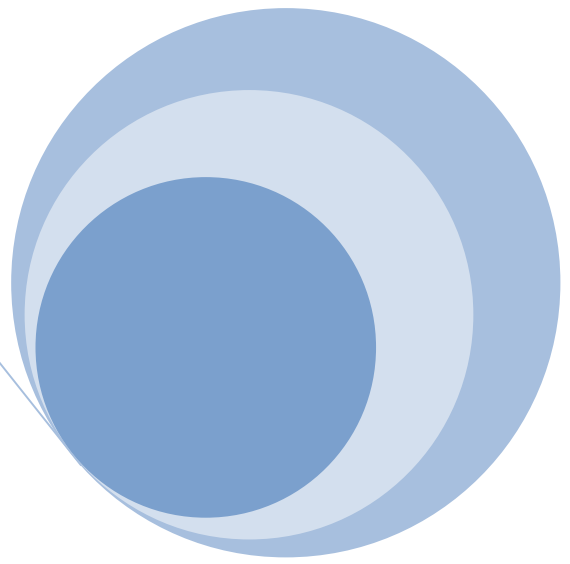
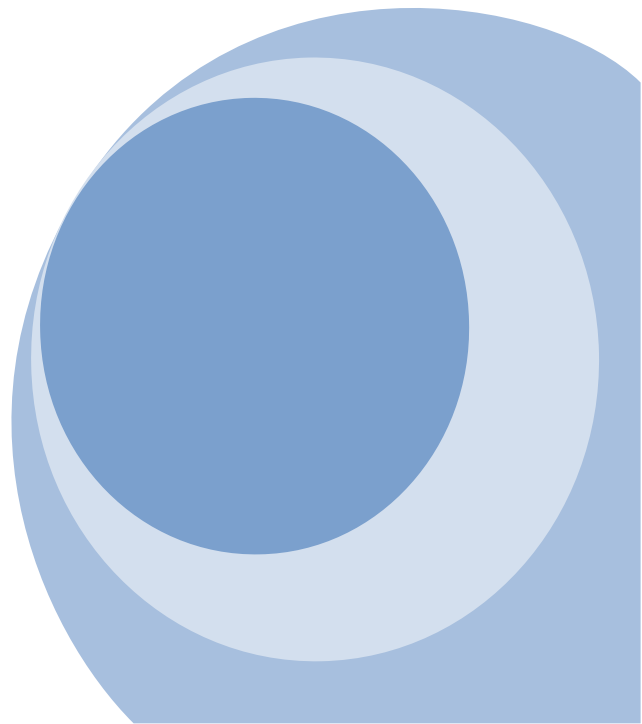


Fig. I.13: Classification des différents types d'orbites exploitables.



Chapitre 02

La communication optique par les satellites lasers



II.1 Introduction

Parmi les plusieurs avantages offerts par les réseaux des satellites lasers par rapport aux réseaux des satellites standards est la simplicité de leurs structures, mais le principale inconvénient rencontré dans de tels réseaux, c'est que ces derniers souffrent continuellement des vibrations du système de pointage a cause des influences des sources internes et externes environnantes. Différents méthodes permettent de surmonter le problème de ces perturbations et d'améliorer par conséquent la qualité de la communication.

Dans ce chapitre, nous allons traiter les différentes sources internes et externes qui causent les vibrations du faisceau laser émis et aux différents schémas de modulation qui assurent un rendement optimal.

II.2 Les sources des vibrations des satellites

Les satellites lasers vibrent continuellement à cause des sources environnantes. Les sources sont divisées en deux types : des sources externes et des sources internes.

II.2.1 Les sources externes

Ces sources sont nombreuses et distinctes et on peut citer quelques unes [9,21] ;

- L'asymétrie de l'attraction terrestre ;
- L'attraction du soleil, de la lune, de la terre et des autres corps célestes ;
- La pression de la radiation solaire ;
- La traînée aérodynamique ;
- La dilatation et le rétrécissement de la structure du satellite a cause des variations des température ;
- L'impact des micro-météores.

- **Asymétrie de l'attraction terrestre**

La terre n'est pas un corps sphérique et homogène. Le potentiel terrestre en un point de l'espace ne dépend pas seulement de la distance r au centre de masse donné par l'équation [20] :

$$r = a \frac{(1-e^2)}{(1+e \cdot \cos \theta)} \quad (II.1)$$

Il dépend aussi de l'altitude et de la longitude du point considéré, et du temps en raison des irrégularités de la rotation de la terre et de la répartition des masses. L'asymétrie de l'attraction terrestre produit des effets sur l'ensemble des paramètres orbitaux. Les effets prédominants sont :

- Une régression nodale

$$\frac{d\Omega}{dt} = -\frac{3}{2} n_0 \cdot A \cdot J_2 \cdot \cos(i) \quad (II.2)$$

- Une rotation absidale :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{4} n_0 \cdot A \cdot J_2 \cdot [5 \cos^2(i) - 1] \quad (II.3)$$

$$A = \frac{R_e^2}{a^2 \cdot (1 - e^2)^2}$$

$$e = \frac{c}{a}$$

R_e : rayon terrestre soit 6378 km ;

e, a : excentricité, demi-grand axe de l'orbite du satellite ;

i : inclinaison de l'orbite ;

n_0 : mouvement moyen du satellite définit par l'équation :

$$n_0 = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\mu/a^3} \quad (II.4)$$

T : la période de révolution du satellite sur son orbite ;

$\mu = GM_E = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$

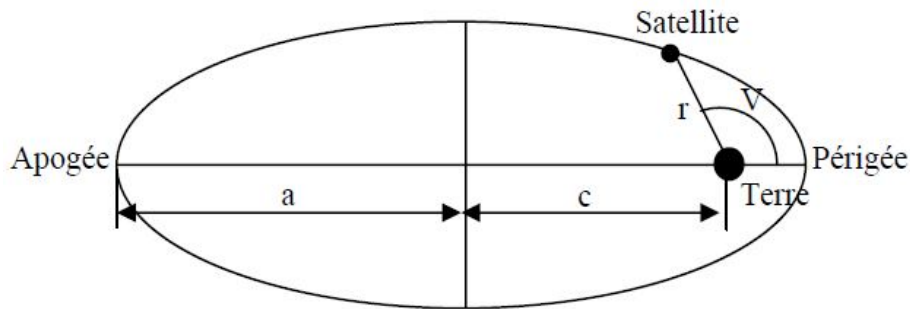


Fig. II.1 : Détermination de la forme de l'ellipse et de la position du satellite sur l'orbite.

La position du satellite sur l'orbite est définie par l'anomalie vraie v . C'est l'angle qui a pour sommet le centre de la terre et qui fixe la direction du satellite par rapport à la direction du périgée. La distance r (m) entre le centre de la terre et le satellite est donné par :

$$r = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cdot \cos(V)} \quad (\text{II.5})$$

La vitesse V (m/s) du satellite est donnée par :

$$V = \mu^{1/2} \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)^{1/2} \quad (\text{II.6})$$

- **Attraction de lune et du soleil**

La lune et le soleil créent chacun une force attractive, d'autant plus importante que le satellite est proche de la lune ou du soleil. Ces forces varient tout au long de l'orbite et tous se passe, pour le système terre-satellite, comme s'il existait une force perturbatrice $d F$ agissant sur la moitié de l'orbite dans une direction, et sur l'autre moitié dans la direction opposée comme indiqué sur la figure (II.2).

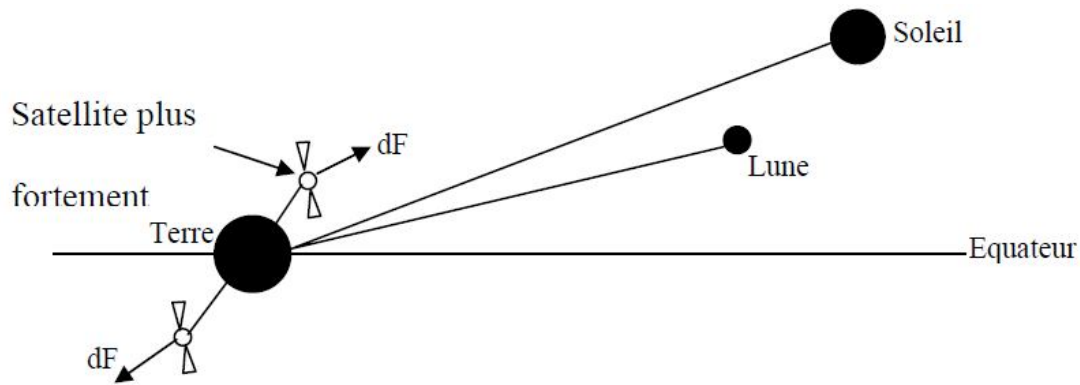


Fig. II.2 : Effet de l'attraction de la lune et du soleil.

L'effet sur l'orbite du satellite dépend des paramètres orbitaux. Il est faible pour des satellites en orbite basse. Pour un satellite géostationnaire, il se traduit par une dérive de l'inclinaison de l'orbite de l'ordre de 0.85 degrés par an.

- **Pression de radiation solaire**

Un élément de surface du satellite orienté du côté du soleil est soumis à une pression fonction de la réflectivité de la surface. Un satellite de masse m , de surface apparent S_a en direction du soleil, de réflectivité égale à 0.5 (valeur typique), subit une accélération Γ (m/s^2) due à la pression de radiation égale à :

$$\Gamma = 6,77 \cdot 10^{-6} S_a / m \quad (II.7)$$

Les panneaux solaires constituent pratiquement la surface apparente du satellite. Pour des satellites en orbite basse, le rapport S_a/m est de l'ordre de $2 \times 10^{-2} m^2/kg$; l'accélération due à la pression de radiation est de l'ordre de $10^{-7} m/s^2$, et son effet est limité. Pour des satellites de télécommunication géostationnaires de forte puissance électrique sur lesquels seront montés des panneaux solaires de grande taille (surface de $100 m^2$ pour une masse de $1000 kg$ par exemple) le rapport S_a/m est de l'ordre de $0.1 m^2/kg$; l'effet essentiel dans ce cas est de modifier l'excentricité de l'orbite, qui évolue cycliquement avec une période d'un an.

- **Trainée aérodynamique**

Cette trainée s'exerce sur les satellites en orbite basse. La force d'origine aérodynamique s'exerce sur le satellite en sens inverse de sa vitesse et est de la forme :

$$F_{AD} = -\frac{1}{2}\rho_A \cdot A_e \cdot C_D \cdot V^2 \quad (II.8)$$

Où ρ_A est la masse volumique de l'atmosphère. Le coefficient de trainée aérodynamique, la surface équivalente du satellite perpendiculaire à la vitesse, V la vitesse du satellite par rapport à l'atmosphère donné par L'équation (II.6)

L'effet principal du frottement atmosphérique est une décroissance du demi-grand axe de l'orbite due à une diminution de l'énergie de l'orbite. Une orbite circulaire reste circulaire, mais son altitude diminue tandis que la vitesse du satellite s'accroît. Pour une orbite elliptique, l'altitude de l'apogée (le point de l'orbite le plus éloigné du centre de la terre) restant pratiquement constante : l'excentricité diminue et l'orbite tend à devenir circulaire.

II.2.2 Les sources internes

Ces sources comportent [6, 13, 18, 21]

- Les vibrations et les impacts dus aux bruits internes ;
- Les vibrations des antennes du système de pointage ;
- Le bruit du système de poursuite ;
- Les opérations des sous-ensembles constituant le satellite.

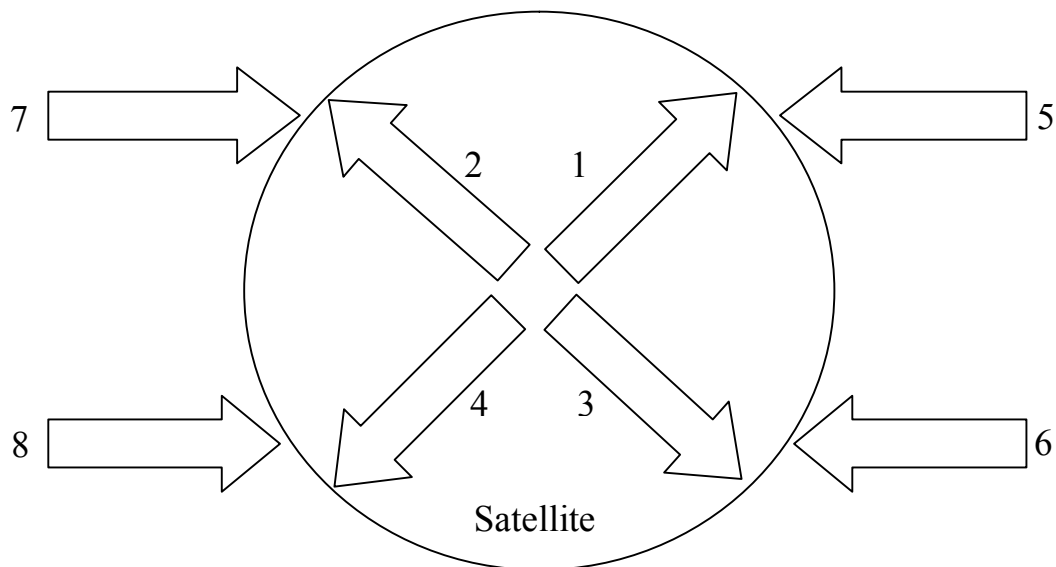


Fig. II .3 : Les sources des vibrations

- 1- Les opérations des sous-ensembles constituant le satellite ;
- 2- Les impacts et les vibrations dus aux différents bruits internes ;
- 3- Les bruits du système de poursuite ;
- 4- Les vibrations des antennes du système de pointage ;
- 5- La traînée aérodynamique ;
- 6- La pression de la radiation solaire ;
- 7- L'attraction du soleil, de la lune et des autres corps célestes ;
- 8- L'asymétrie de l'attraction terrestre.

II.3 Le modèle de vibrations

Pour établir une communication optique entre deux satellites, le satellite émetteur doit fixer précisément la position du satellite récepteur, pour cela le satellite émetteur utilise d'une part des données éphémérides (la position du satellite suivant l'équation de l'orbite) afin d'obtenir un pointage approximatif. Et il utilise d'autre part un système de poursuite qui lui permet d'établir un pointage plus exacte vers le

satellite récepteur, mais à cause des bruits dans le système de poursuite et les vibrations mécaniques des satellites, le faisceau laser libre [6,19].

L'erreur dans l'angle d'élévation suit une loi de distribution normale avec une densité de probabilité par l'équation :

$$f(\theta_v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v^2}} \exp\left(-\frac{\theta_v^2}{\sigma_v^2}\right) \quad (\text{II.9})$$

Où

σ_v : L'écart type de l'angle d'élévation

θ_v : L'angle d'élévation

L'erreur dans l'angle azimut suit une loi de distribution normale avec une densité de probabilité donnée par l'équation :

$$f(\theta_H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_H^2}} \exp\left(-\frac{\theta_H^2}{\sigma_H^2}\right) \quad (\text{II.10})$$

Où

σ_H : L'écart type de l'angle azimut ;

θ_H : L'angle azimut.

L'erreur dans l'angle de pointage est donnée par l'équation :

$$\theta = \sqrt{\theta_v^2 + \theta_H^2} \quad (\text{II.11})$$

Par symétrie nous avons :

$$\sigma_v = \sigma_H = \sigma_\theta \quad (\text{II.12})$$

L'erreur dans l'angle de pointage suit une loi de Rayleigh avec une densité de probabilité donnée par l'équation :

$$f(\theta) = \frac{\theta}{\sigma_{\theta}^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_{\theta}^2}\right) \quad (\text{II.13})$$

Dans le système de pointage, les amplitudes des vibrations qui représentent à la fois les déviations du signal de pointage sont données par l'équation [12]

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{SF \cdot \sqrt{SNR}} \quad (\text{II.14})$$

Où

SF : le facteur d'inclinaison du système de poursuite :

SNR : le rapport signal sur bruit du système de poursuite.

II.4 Structure standard d'un système de transmission numérique dans les réseaux des satellites lasers [6,18]

La figure (II.4) représente la structure standard d'un système de transmission numérique dans les réseaux des satellites lasers.

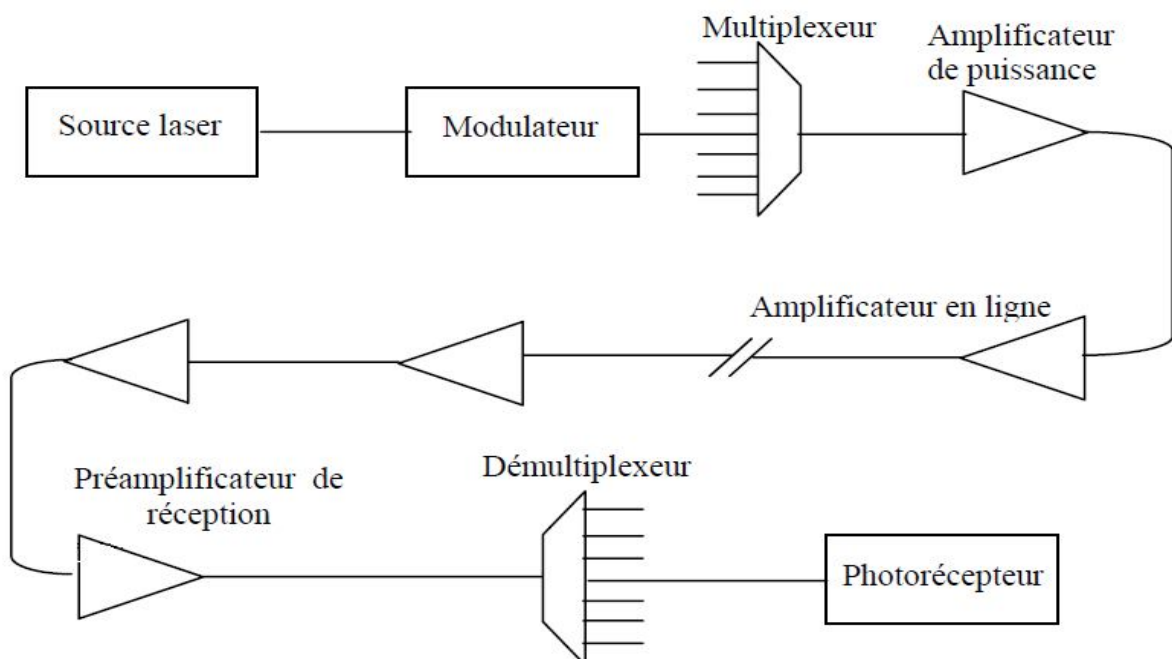


Fig. II.4 : structure générale d'un système de transmission optique dans les réseaux des satellites lasers.

Un système de transmission numérique dans les réseaux des satellites lasers comporte les dispositifs et composants suivant :

- Une source (diode laser) et un modulateur permettant d'imprimer l'information à transmettre sur la porteuse optique. La modulation utilisée est une modulation par tous ou rien, l'un des états de la donnée binaire étant associé à la transmission d'une certaine intensité, l'autre à l'absence de signal. En pratique, l'émetteur est caractérisé par un taux d'extinction, écart (en décibel) entre la puissance transmise dans chacun des deux états, qui n'est pas fini. Dans le cas d'un système WDM (Wave length Division Multiplexing) où chaque fibre transporte un multiplex de N canaux, on compte autant de sources que de canaux ;

- Dans le cas d'un système WDM, un multiplexeur qui permet de juxtaposer les différents canaux dans la bande ;

- En général, un amplificateur de puissance permettant d'injecter dans la fibre une puissance suffisante ;

- Des amplificateurs en ligne insérés le long de la fibre pour en compenser l'atténuation. La distance entre amplificateurs, est une caractéristique essentielle de la liaison.

- En général un préamplificateur (optique) de réception ;

- Dans le cas d'un système WDM, un dé multiplexeur qui permet de séparer les différents canaux ;

- Pour chaque canal, un photorécepteur qui convertit le signal optique en un signal électrique qui après filtrage et échantillonnage, permet de restituer l'information transmise.

II.4.1 Sources et bruit des sources [22]

Comme tout oscillateur électromagnétique, un laser ne délivre jamais une onde sinusoïdale parfaite. Celle-ci est affectée par des bruits d'amplitude et de phase qui contribuent à dégrader les performances des systèmes de communication dans

les satellites lasers [21]. Les fluctuations d'amplitude sont habituellement caractérisées par le bruit relatif d'intensité (RIN Relative Intensity Noise), défini comme le rapport de la densité spectrale de puissance de fluctuations de puissance normalisée à la puissance moyenne émise. Si la puissance émise est exprimée comme $\langle P_T \rangle + \Delta P_T$ où $\langle P_T \rangle$ est la puissance moyenne et ΔP_T la fluctuation aléatoire autour de celle-ci, $rin(f)$ est défini comme :

$$rin(f) = \frac{1}{(\langle P_T \rangle)^2} \int \langle \Delta P_T(t) \cdot \Delta P_T(t - \tau) \rangle \cdot \exp(-2i\pi\tau) d\tau \quad (II.15)$$

Et le paramètre utilisé en pratique est $RIN(f)$ défini comme $10 \log rin(f)$, exprimé en dB/Hz. Les meilleurs lasers aujourd'hui disponibles présentent des valeurs de RIN inférieures à -155 dB/Hz.

Les fluctuations d'amplitude ne sont pas un facteur limitatif pour les systèmes de communication numérique à haut débit. En revanche, dans les systèmes utilisant des multiplex de sous-porteuses en modulation analogique, le bruit d'intensité des lasers est un paramètre très critique, et c'est la mise au point de ces systèmes qui a suscité des efforts de recherche importants pour produire des lasers avec de très faibles valeurs de RIN.

II.4.2 Modulateurs

- Modulateur directe

La modulation directe, c'est-à-dire la modulation du courant qui traverse un laser à semi-conducteur s'accompagne inévitablement d'une modulation de fréquence parasite (chirp) : en effet toute modulation de la densité de porteurs dans la cavité laser cause des fluctuations de l'indice de réfraction et donc de la fréquence de l'onde émise [4, 21]. On peut montrer, que si $P_T(t)$ est la puissance optique émise dépendant du temps, l'écart entre la fréquence instantanée $\nu(t)$ et sa valeur moyenne $\langle \nu \rangle$ est donnée par :

$$\nu(t) - \langle \nu \rangle = -\frac{\alpha_H}{4\pi} \left[\frac{d(\ln p_T(t))}{dt} + k_0 \cdot p_T(t) \right] \quad (II.16)$$

k_0 est une constante liée aux paramètres physiques du laser. Le facteur d'élargissement dynamique ou facteur de Henry α_H caractérise le degré de conversion amplitude-fréquence de la source. Il vaut typiquement -5 ou -6 pour les lasers usuels.

- Modulation externe

Le champ émis par la source n'est pas modulé et passe par un circuit optique spécial où l'on peut provoquer une modulation de phase ou d'amplitude. Les modulateurs d'amplitude ne présentent aucune propriété de linéarité mais introduisent beaucoup moins de conversion amplitude-fréquence. Le signal modulé envoyé dans la fibre est donc nettement moins affecté par ce phénomène mais également moins puissant que dans le cas de la modulation directe. L'un des principes physiques utilisés dans ces modulateurs externes est la variation de l'absorption du matériau avec le champ électrique.

II.4.3 Détection

- Principe de base de la détection directe

Les fluctuations de puissance optique qui portent l'information sont converties en fluctuations de courant électrique dans le photo détecteur, qui peut être une diode PIN ou une diode à diode à avalanche. Les photons incidents illuminant la jonction du photo-détecteur créent des photoélectrons. Dans le cas de la photodiode PIN, la valeur moyenne de la photo courant I est donné par :

$$I = \frac{e \cdot \eta}{h \cdot \nu} \cdot p_R = R \cdot p_R \quad (\text{II.17})$$

Avec

e : La charge de l'électron ;

h : Constante de Planck ;

ν : Fréquence optique ;

η : Rendement quantique ;

p_R : Puissance reçue.

Le coefficient de conversion R est usuellement de l'ordre de 0.7 ou 0.8 A/W. Le terme η , inférieur à l'unité, traduit le fait que dans un photorécepteur, tous les photons incidents ne donnent pas naissance à un électron : $\eta = 0.8$ signifie, par exemple, qu'en moyenne 80% des photons incidents donnent naissance à des électrons dont le flux constituera le photon courant.

La relation (II.17) montre que le processus de détection est quadratique, puisque le courant est proportionnel à la puissance optique, c'est-à-dire au carré du module du champ électromagnétique. Les fluctuations de la photo courant autour de sa valeur moyenne constituent le bruit de grenaille qui résulte de la nature corpusculaire du photo courant. C'est un bruit blanc dont la densité spectrale de puissance bilatérale est donnée par la formule de Schottky :

$$\sigma_{sg}^2 = e \cdot I = \frac{e^2 \cdot \eta}{h \cdot \nu} p_R \quad (\text{II.18})$$

La puissance de bruit recueillie dans une bande de fréquence de largeur B est égale par conséquent à 2dB. On notera que le bruit de grenaille est un bruit lié au signal, qui n'existe qu'en présence de ce dernier. Le photo détecteur est suivi d'un amplificateur électronique qui ajoute un courant de bruit thermique, caractérisé par sa densité spectrale de bruit thermique (exprimé en A^2/Hz) au signal reçu. A la sortie de l'amplificateur, après filtrage, un circuit de décision compare le signal à l'instant d'échantillonnage par rapport à un seuil pour déterminer la donnée transmise. Le bruit de grenaille et le bruit thermique contribuent ensemble à créer des erreurs.

- Calcule de la probabilité d'erreur en détection directe

Dans le cas de données binaire, supposées dans toute la suite prendre leurs deux valeurs avec la même probabilité, la valeur moyenne du signal en sortie du photorécepteur prend deux valeurs I_0 ou I_1 , selon la donnée transmise. Les contributions de bruit sont respectivement le bruit de grenaille dépendant du signal et le bruit thermique additif. La puissance de bruit est donc différente selon la donnée émise et on appellera respectivement σ_0^2 et σ_1^2 les deux variances correspondant à chacun des états.

Pour exprimer la probabilité d'erreur, il faut déjà connaître la statistique du bruit : on la supposera gaussienne. De plus, elle dépend de la position du seuil de décision. Si l'on suppose que ce dernier est placé de manière optimale, la probabilité d'erreur peut être exprimée par la relation suivante [21,23]:

$$p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{I_1 - I_0}{(\sigma_1 + \sigma_0) \cdot \sqrt{2}} \right] = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{Q}{\sqrt{2}} \right] \quad (\text{II.19})$$

Sachant que :

$$\sigma_k^2 = 2 \cdot e \cdot I_k \cdot B + \sigma_{th}^2 \quad k = 0 \text{ ou } 1$$

Où σ_{th}^2 est la puissance de bruit thermique et $\operatorname{erfc}(x)$ la fonction d'erreur complémentaire donnée par :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2) dt = \frac{\exp(-x^2)}{x \cdot \sqrt{\pi}} \quad \text{pour } x \geq 3 \quad (\text{II.20})$$

La valeur de la puissance nécessaire en réception pour garantir une certaine valeur de référence de la probabilité d'erreur est appelée sensibilité du récepteur (relative à la valeur de référence choisie). Une valeur typique est de -20 dBm pour une probabilité d'erreur de 10^9 cette valeur peut être notablement abaissée par l'utilisation d'un préamplificateur optique.

II.4.4 Amplification optique

L'amplification est une fonction essentielle en transmission et d'importants efforts de recherche ont été consacrés au cours de quarante dernières années à la mise au point d'amplificateurs optiques. L'amplificateur à semi-conducteurs, qui a fait l'objet de nombreux travaux depuis le début des années 1970, n'a pas connu beaucoup de développements en tant qu'amplificateur inséré dans un système de transmission, si l'on excepte quelques démonstrations dans la fenêtre des 1.3 μm , où il n'existe pas d'amplificateurs à fibre dopée industriellement disponibles. En revanche, ses caractéristiques lui offrent un large domaine d'utilisation dans tout ce qui touche au traitement optique du signal (multiplexage et démultiplexage, régénération ...), la réalisation de ces fonctions mettant en œuvre des effets non linéaires.

L'amplificateur à fibre dopée, apparu à la fin des années 1980, et très rapidement passé au stade industriel : il constitue aujourd'hui un dispositif clé de tous les futurs réseaux de télécommunications optiques [21, 24]. Outre sa fiabilité, ses qualités reposent sur deux caractéristiques essentielles, d'une part sa linéarité (au sens où sa constante de temps ne le rend sensible qu'à la puissance moyenne des signaux qui le traversent, ce qui évite toute distorsion de ces derniers), d'autre part son bruit faible et voisin des limites théoriques.

D'abord, l'amplificateur optique permet de dépasser la limite imposée l'atténuation de la fibre puisque la puissance envoyée en ligne peut être considérablement augmenté et que le signal peut être ré amplifié au cours de sa propagation, au prix il est vrai de l'addition de bruit ; cette utilisation a conduit à la notion de système amplifié, indissociable de la technique de multiplexage en longueur d'onde. L'amplificateur en ligne se substitue aux répéteurs-régénérateurs intermédiaires.

Ensuite, utilisé comme préamplificateur, il améliore considérablement la sensibilité des photorécepteurs, en dépassant la limite imposée par le bruit thermique. C'est cette propriété qui a enlevé la plus grande partie de leur intérêt aux recherches sur la réception. En contrepartie, comme il a déjà été indiqué, les niveaux de puissance injectés dans les fibres donnent naissance à des effets non linéaires qui constituent une source de dégradation supplémentaire, mais peuvent aussi être utilisés de manière bénéfique [25].

- Description générale de l'amplificateur optique à fibre

Comme n'importe quel amplificateur [22, 26], un amplificateur optique absorbe l'énergie fournie par un système extérieur désigné par le terme de pompe. Il la restitue au signal pour le renforcer, l'amplifier. Les amplificateurs à fibre qui sont disponibles commercialement fonctionnent dans la fenêtre de transmission à la longueur d'onde de 1.55 μm . Un de leurs avantages est la simplicité du dispositif .Ils se composent pour l'essentiel d'une fibre active de quelques mètres de longueur, dopé des ions appropriés et connectés à la fibre de ligne, d'une pompe et d'un dispositif de couplage de la lumière de la pompe vers la fibre dopée. Dans la plupart des cas la pompe est un laser à semi-conducteur. Le couplage de la lumière de la

pompe dans la fibre est obtenu à l'aide d'un multiplexeur. Il est habituel d'ajouter deux isolateurs, un en entrée, l'autre en sortie, qui ne laissent passer la lumière que dans un seul sens afin d'éviter toutes les réflexions qui pourraient créer une cavité, faire osciller le dispositif et le transformer en laser.

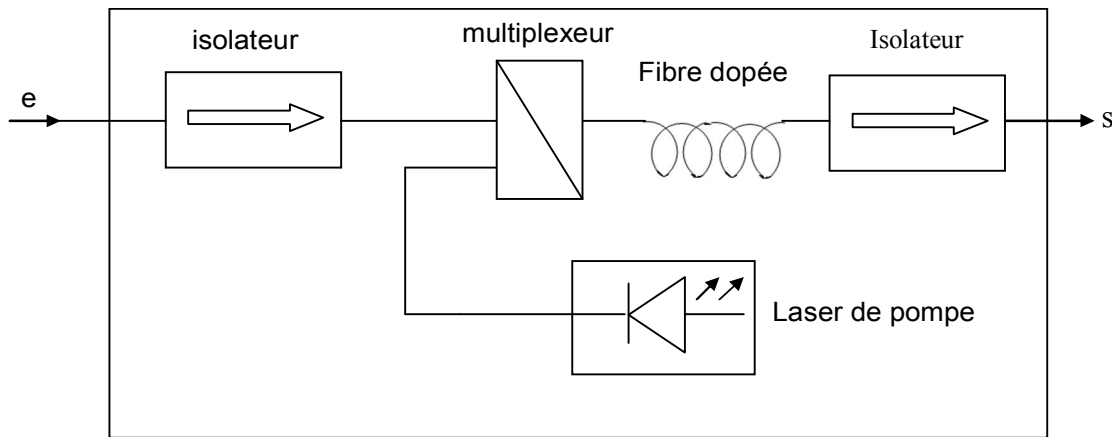


Fig. II.5 : Schéma d'un amplificateur optique à fibre dopée

- Mécanisme d'amplification

Un amplificateur optique à fibre amplifie la lumière grâce au mécanisme d'émission stimulée [23, 24]. Les éléments sont le plus couramment des ions erbium. Les électrons associés aux ions erbium peuvent avoir des énergies que nous avons fait figurer d'une façon schématique sur la figure (II.6)

Si un photon interagit avec un électron dans l'état métastable, un effet quantique de résonance produit la redescende de l'ion dans l'état fondamental et un photon est émis avec la même longueur d'onde et la même phase que le photon incident. A partir d'un photon on en obtient ainsi deux : c'est la base de l'amplification optique. Le phénomène inverse peut également se produire : c'est l'absorption. Mais l'amplification l'emporte si les photons rencontrent plus d'ions dans l'état métastable que dans l'état fondamental. Cette condition est désignée par le terme (d'inversion de population) et est obtenue par l'opération de pompage par exemple à la longueur d'onde de 980nm figure (II.6). Les photons de la pompe excitent les électrons et font passer les ions de l'état fondamental à l'état supérieur. Cet état supérieur ayant une durée de vie très courte, les électrons retombent très rapidement au niveau métastable.

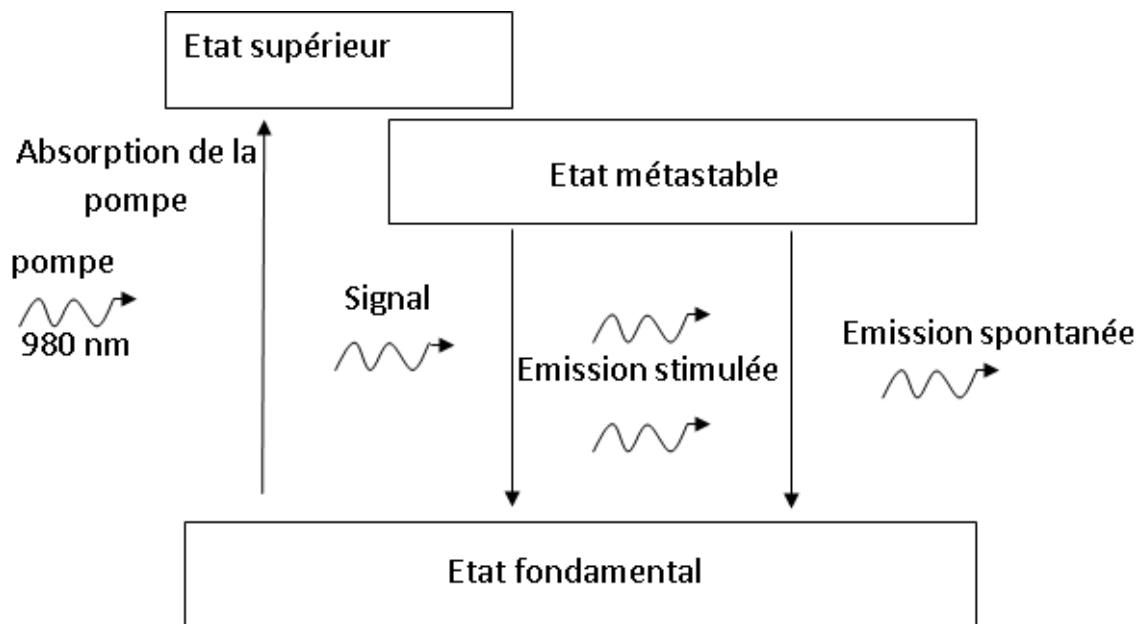


Fig. II.6 : Représentation schématique du pompage, de l'émission stimulée et de l'émission spontanée.

- Principe de fonctionnement du laser [27]

L'invention du laser a débouché sur la découverte de ses très nombreuses applications aussi bien dans des domaines spécialisés que dans notre vie quotidienne.

Le concept du laser remonte aux travaux d'Einstein en 1917 en mécanique quantique sur l'émission stimulée d'ondes lumineuses. C'est en 1960 qu'a été réalisé le premier laser par Théodore Maiman. Dès 1965, les industries l'utilisent pour réaliser des usinages en 15 minutes seulement alors que la durée était auparavant de 24 heures. Sa première apparition grand public est le code barres avec l'essor qu'on lui connaît à présent. Puis, en 1982, il entre chez le particulier grâce au disque compact. Cependant, le laser n'a pas livré tous ses secrets et fait encore l'objet de recherches actives.

Un laser est une source lumineuse entièrement cohérente, se distinguant ainsi d'un faisceau lumineux classique. En effet, tous les photons qui contribuent au rayonnement laser ont même fréquence et même phase (cohérence temporelle), ce qui se traduit, pour une lumière visible, par une seule couleur, dite monochromatique. Par ailleurs, tous les photons se propagent dans la même direction (cohérence spatiale). Les nombreuses applications du laser viennent de ces deux cohérences.

Les premières utilisations du laser étaient industrielles pour des raisons de coûts et de place. Les professionnels l'utilisent pour tous les travaux d'usinage et de traitements qui nécessitent une grande finesse. Il a de nombreux autres usages, parfois inattendus, comme l'analyse de l'atmosphère ou la détection de doses infinitésimales de produits toxiques ou polluants.

Le laser est très employé en médecine pour des traitements bénins (épilation, suppression de tatouage...) ou, à l'inverse, pour des opérations nécessitant une très grande précision. Ainsi, une nouvelle technique utilise un laser à impulsion ultra-courte pour corriger une myopie. Les lasers à impulsion femto-seconde permettent d'observer le comportement de molécules biochimiques complexes. Les domaines de la défense et de la sécurité sont eux aussi très intéressés par les possibilités des lasers. Les plus connues sont la désignation d'objectifs à l'aide de lasers infrarouges et les viseurs « point rouge » sur les armes à feu. Les artificiers utilisent des lasers de grande puissance pour désamorcer des explosifs : ces derniers sont sublimés par un rayon intense avant d'avoir le temps d'exploser. Enfin on peut évoquer les contremesures défensives contre les missiles ou les satellites en orbite basse.

Les applications scientifiques restent les plus nombreuses. Les lasers servent à mesurer des distances très longues et des durées très brèves.

La distance terre-lune se mesure à partir du temps de parcours aller-retour d'un rayon laser. Les horloges atomiques atteignent la précision d'une seconde pour un milliard d'années en refroidissant des atomes piégés par six faisceaux lasers convergents. Enfin, il existe des lasers d'une telle puissance qu'ils peuvent amorcer des réactions de fusion thermonucléaire (lasers mégajoules). Ils seront à la base des prochaines générations de centrales électriques.

Le laser ne s'est pas cantonné aux applications industrielles et scientifiques : on le retrouve au quotidien. Il est omniprésent et pourtant on le remarque à peine. À commencer par les télécommunications, où il intervient dans les liaisons à grande distance ou à haut débit entre des satellites ou dans les fibres optiques. Sa grande pureté fréquentielle permet de multiplexer plusieurs faisceaux dans une seule fibre.

- Exemple d'utilisation du laser sur les satellites [27]

Les satellites génèrent de plus en plus de données qui doivent être envoyées sur Terre pour y être exploitées. Habituellement, ces données sont transmises par ondes radio. Les équipes du satellite Terra SAR-X – développé et fabriqué par

Astrium – et du satellite américain NFIRE viennent d'ouvrir la voie à une accélération sans précédent du transfert de données : une liaison de données optique laser d'un débit de 5,5 Gbit/seconde a été établie et maintenue, sans perte, entre les deux satellites alors distants de 5 000 km. Ce débit équivaut tout de même à 200 000 feuillets A4 en une seconde ou à 400 DVD en une heure !

Ce transfert concluant de données s'est déroulé via deux terminaux laser fournis à l'Agence aérospatiale allemande (DLR) par Tesat-Spacecom, filiale d'Astrium à Backnang, en Allemagne. En plus de leurs excellentes performances, les terminaux lasers de Tesat ont démontré qu'ils étaient encore plus efficaces que leurs prédécesseurs, et ce malgré leur plus petite taille.

- Essais dans des conditions rigoureuses

Les terminaux laser devaient résister à l'accélération et aux vibrations du lancement, ainsi qu'aux conditions inhospitalières de l'espace – comme l'exposition à des rayonnements et à des amplitudes thermiques extrêmes. C'est pourquoi les sous-ensembles des terminaux lasers avaient été testés au sol, dans des conditions tout aussi rigoureuses : des températures de -35 °C à 60 °C, des accélérations égales à 1 300 fois l'accélération de la pesanteur et des expositions aux rayons gamma. Pour une utilisation dans l'espace, chacun de ces modules devait être petit, léger et efficace au niveau énergie. Ce poids réduit a été obtenu grâce à un choix minutieux des matériaux et à un boîtier bien étudié. Tout ce qui n'était pas absolument nécessaire a été éliminé. Pendant la transmission de données, de 5,5 gigabit par seconde sur une distance de 5 000 km, les terminaux lasers n'ont eu besoin que de 130 watts pour fonctionner, soit un peu plus qu'une ampoule électrique.

- Une connexion laser de 20 minutes

Les satellites NFIRE et TerraSAR-X évoluent en orbite basse autour de la Terre et se croisent plusieurs fois par jour. Une connexion laser de 20 minutes peut être établie à chaque rencontre. L'une des opérations les plus délicates consiste à diriger le laser de manière très précise sur le deuxième satellite, qui évolue à une distance pouvant atteindre 5 000 km pour une vitesse d'environ 25 000 km/h. Obtenir l'angle nécessaire reviendrait, sur Terre, à tenter de viser le hublot d'un passager d'avion de ligne en vol et de suivre cette cible.

- Une grande expérience des technologies de communication laser

Tesat-Spacecom et Astrium possèdent déjà une grande expérience des technologies de communication laser. Les tests menés avec succès sur le terminal SILEX, produit par Astrium, en service sur le satellite Artemis, par exemple, ont été une première en Europe. Artemis, depuis l'orbite géostationnaire, transmet des données par laser à un débit de 50 Mbit/s grâce au terminal SILEX, vers le satellite Spot-4 en orbite basse. Une nouvelle génération des terminaux SILEX a été mise en service en 2006 lors du programme d'étude LOLA : le terminal LOLA construit par Astrium a été intégré sur un avion de ligne et a pu également communiquer avec Artemis.

- Tesat-Spacecom, à la pointe de la technologie au niveau mondial

A l'avenir, les liaisons à large bande par satellite seront nécessaires aussi bien pour la mise en réseau des satellites géostationnaires que pour la communication avec des plates-formes en orbite moins élevée, si l'on veut répondre au besoin grandissant en capacité de transfert de données dans les domaines des télécommunications, de la navigation, de l'observation de la Terre, de la météorologie et des vols habités. D'où l'importance de continuer à développer et à utiliser les possibilités techniques de la communication laser et les compétences acquises dans ce domaine. Ces performances placent ainsi Tesat-Spacecom à la pointe de la technologie au niveau mondial.

II.5 Structure développé d'un système de transmission optique dans les réseaux des satellites lasers [28]

A cause des vibrations continues du faisceau laser émis dans les réseaux des satellites lasers, plusieurs améliorations ont été introduites dans leurs structures standards afin de réduire les effets de ces vibrations et améliorer la qualité de communication.

Les figures (II.7.a) et (II.7.b) représentent les structures développées de l'émetteur et du récepteur dans les réseaux des satellites lasers [6, 28].

Le modèle de récepteur (II.7.b) comporte : un télescope, un filtre passe bande optique, un amplificateur optique, un filtre passe bande optique, une photodiode (PIN), un amplificateur électrique, un filtre électrique et un circuit de décision.

Le modèle de l'émetteur (II.7.a) comporte : un émetteur laser, télescope à éléments en phase (telescope phased array), unité de contrôle et un générateur des vibrations aléatoires.

Le message arrive à l'entrée de l'émetteur, ce dernier convertit le signal électrique en un signal optique en utilisant le laser, ensuite le télescope émetteur colmate les radiations lasers vers la direction du satellite récepteur. L'unité de contrôle adapte le gain du télescope émetteur aux amplitudes des vibrations aléatoires, ce qui fait diminuer les effets de ces dernières et améliorer la qualité de la communication. Le télescope récepteur focalise les radiations envoyées par l'émetteur vers un filtre optique, ce dernier empêche une grande quantité du bruit de grenaille de pénétrer dans l'étage suivant du récepteur. Après le filtrage, le signal optique sera amplifié par un amplificateur optique se trouvant à la sortie du filtre optique, cet amplificateur ajoute au signal amplifié un bruit thermique dont une importante partie sera éliminée par un filtre optique se trouvant à la sortie de l'amplificateur optique. Après le filtrage, le signal optique sera converti par une photodiode en un signal électrique, ce dernier va être amplifié par un amplificateur électrique avant de subir une autre opération de filtrage par un filtre électronique afin de supprimer une partie du bruit thermique créé par l'amplificateur électrique, enfin le circuit de décision décide selon l'amplitude du signal électrique obtenu le type du bit reçu 1 ou 0.

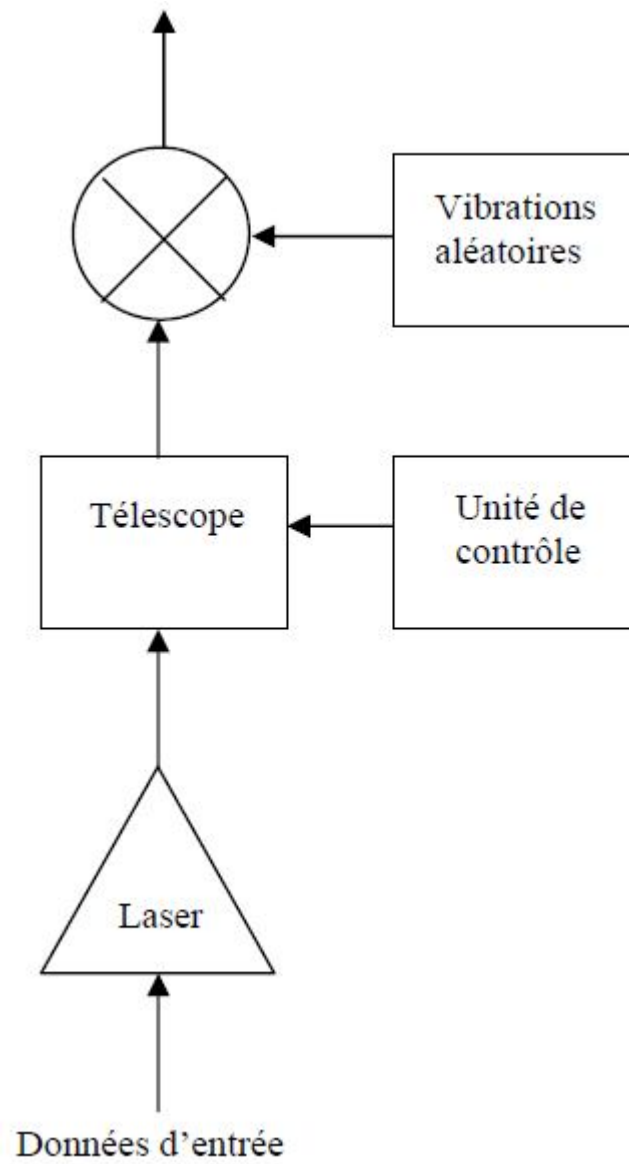


Fig. II.7.a : Modèle de l'émetteur.

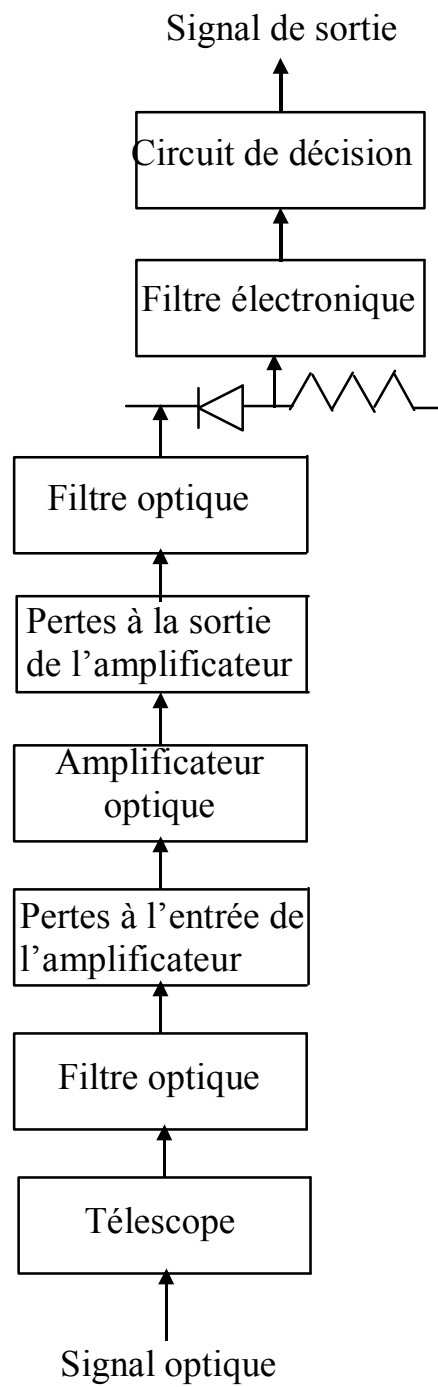
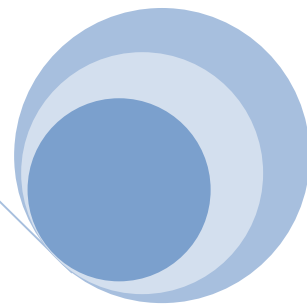
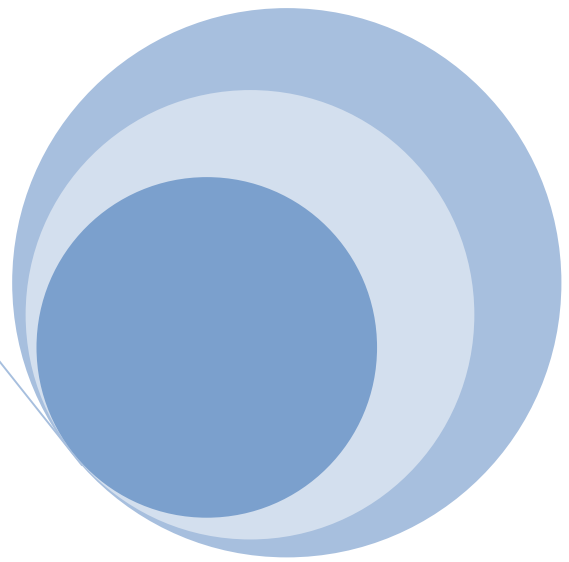
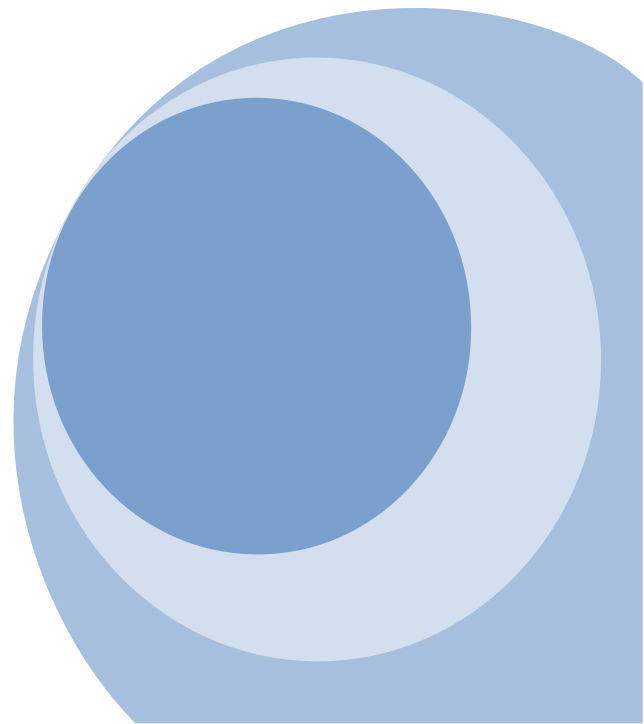


Fig. II.7.b : Modèle de récepteur.



Chapitre 03

**Optimisation de la bande passante
dans les systèmes des
communications**



III.1. Introduction

La communication entre les satellites peut rendre possible la communication à haute vitesse entre les différents endroits sur terre. Le principe de communication nécessite au moins deux satellites. Dans le but de se communiquer, le satellite émetteur doit suivre la balise du satellite récepteur afin d'avoir un meilleur rendement.

Faute de vibrations, le satellite récepteur reçoit moins d'énergie. Cet effet limite la bande passante de système. Le taux de bit d'erreur B.E.R (Bit Error Rat) désigne une valeur relative au taux d'erreur mesuré lors de réception du signal, relative aux perturbations du système.

Dans ce chapitre, nous allons développer des modèles mathématiques qui permettent d'analyser et de maximiser la bande passante du système de communication avec les variations des amplitudes de vibrations.

III.2. Optimisation de l'ouverture du télescope émetteur avec les amplitudes de vibrations

- **Modèle des équations**

La puissance optique reçue par le satellite récepteur P_R est donnée par l'équation [27, 31] :

$$p_R = K \cdot l \quad (\text{III.1})$$

Le facteur K est défini par l'équation suivante :

$$K = \eta_T \cdot \eta_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot Z} \right)^2 \cdot G_R \cdot G_T \cdot P_T \quad (\text{III.2})$$

Où

λ : La longueur d'onde ;

P_T : La puissance optique émise ;

Z : La distance entre les satellites ;

η_T : Le rendement quantique de l'émetteur ;

η_R : Le rendement quantique du récepteur ;

G_R : Le Gain du récepteur, défini par l'équation.

Avec :

$$G_R = \left(\frac{\pi \cdot D_R}{\lambda} \right)^2 \quad (III.3)$$

D_R : L'ouverture du télescope récepteur ;

G_T : Le Gain du télescope émetteur adapté aux amplitudes des vibrations, définies par l'équation :

$$G_T = \left(\frac{\pi \cdot D_T}{\lambda} \right)^2 \quad (III.4)$$

D_T : L'ouverture du télescope émetteur après son optimisation avec les amplitudes des vibrations.

L : Le facteur des pertes, il définit l'atténuation du signal reçu à cause des vibrations du faisceau laser émis et il est donné par l'équation [19] :

$$L = \exp(-G_T \cdot \theta^2 \cdot F_G) \quad (III.5)$$

Où

θ : L'erreur dans l'angle de pointage ;

F_G : Le facteur du gain définit par l'équation :

$$F_G = \frac{G_T}{G_{T0}} \quad (III.6)$$

G_{T0} : Le gain de l'émetteur non adapté aux amplitudes des vibrations, définit par l'équation :

$$G_{T0} = \left(\frac{\pi \cdot D_{T0}}{\lambda} \right)^2 \quad (III.7)$$

D_{T0} : L'ouverture de télescope émetteur avant son optimisation avec les amplitudes des vibrations.

On suppose que le récepteur comprend un photo détecteur avec le mode de détection directe. Dans de tel système la valeur du taux de bit d'erreur BER est donnée par [24] :

$$BER \approx \frac{1}{2} \int_0^\infty \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{R(P_1(\theta) - P_0(\theta))}{\sqrt{2}(\sigma_1(\theta) + \sigma_0(\theta))} \right) \right) f(\theta) d\theta \quad (III.8)$$

Où

$P_1(\theta)$: Le signal optique reçu dans le cas de l'émission du bit 1 ;

$\sigma_1(\theta)$: L'écart type du bruit reçu dans le cas de l'émission du bit 1 ;

$P_0(\theta)$: Le signal optique reçu dans le cas de l'émission du bit 0 ;

$\sigma_0(\theta)$: L'écart type du bruit reçu dans le cas de l'émission du bit 0 ;

R : Le coefficient de conversion du photo détecteur.

La fonction d'erreur est donnée par l'équation :

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy \quad (\text{III.9})$$

En remplaçant dans, l'équation devient :

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \left(1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-y^2) dy \right) \right) f(\theta) d\theta \quad (\text{III.10})$$

Tel que :

$$x = \frac{R(P_1(\theta) - P_0(\theta))}{\sqrt{2}(\sigma_1(\theta) + \sigma_0(\theta))} \quad (\text{III.11})$$

En remplaçant (II.13) dans (III.10), on obtient l'équation suivante :

$$\text{BER} = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^\infty \left[\int_0^x (\exp(-y^2) dy) \right] \cdot \frac{\theta^2}{\sigma_\theta^2} \times \exp\left(-\frac{\theta^2}{\sigma_\theta^2}\right) d\theta \quad (\text{III.12})$$

Pour simplifier l'équation (III.12), nous faisons trois approximations :

$$H = \frac{\sigma_1(\theta)}{\sigma_0(\theta)} \quad (\text{III.13})$$

$$P_0(\theta) = 0 \quad (\text{III.14})$$

$$P_1(\theta) = P_R \quad (\text{III.15})$$

A partir des approximations faites au dessus, l'équation (III.11) devient :

$$\frac{R(P_1 - P_0)}{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_0)} = \frac{R.P_R}{\sqrt{2}\sigma_0(1+H)} \quad (\text{III.16})$$

En remplaçant l'expression de P_R dans (III.16), on obtient l'équation suivante :

$$\frac{R(P_1 - P_0)}{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_0)} = \frac{R P_T \eta_T \cdot \eta_R \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi Z}\right)^2 \cdot G_R \cdot G_T \cdot \exp(-G_T \cdot \theta^2 \cdot F_G)}{\sqrt{2}\sigma_0(1+H)} \times \frac{G_T}{G_{T0}} \quad (\text{III.17})$$

L'équation (III.17) peut s'écrire d'une autre façon :

$$\frac{R(P_1-P_0)}{\sqrt{2}(\sigma_1+\sigma_0)} = \frac{R.P_T.\eta_T.\eta_R.\left(\frac{\lambda}{4.\pi.Z}\right)^2.G_R.G_{T0}}{\sqrt{2}\sigma_0(1+H)} \times \frac{G_T}{G_{T0}} \exp(-G_T.\theta^2.F_G) \quad (III.18)$$

En simplifiant (III.18) on obtient :

$$\frac{R(P_1-P_0)}{\sqrt{2}(\sigma_1+\sigma_0)} = Q.F_G.\exp(-G_T.\theta^2.F_G) \quad (III.19)$$

Tel que Q est le facteur de qualité donné par l'équation :

$$Q = \frac{R.P_T.\eta_T.\eta_R.\left(\frac{\lambda}{4.\pi.Z}\right)^2.G_R.G_{T0}}{\sqrt{2}\sigma_0(1+H)} \quad (III.20)$$

D'après les équations (III.19) et (III.20). BER peut être exprimé sous une forme plus simple :

$$BER \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \left[\int_0^{(Q.F_G.\exp(-G_T.\theta^2.F_G))} (\exp(-y^2) dy) \right] \cdot \frac{\theta^2}{\sigma_\theta^2} \times \exp\left(-\frac{\theta^2}{\sigma_\theta^2}\right) d\theta \quad (III.21)$$

Suivant Chan et Gardner [19], nous définissons une nouvelle variable :

$$u = \frac{\theta}{\sqrt{2}\sigma_\theta} \quad (III.22)$$

En remplaçant (III.22) dans (III.21), l'expression de BER devient [28]:

$$BER \approx \frac{1}{2} - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \left[\int_0^{(Q.F_G.\exp(-2\sigma_\theta^2.G_T.u^2.F_G))} (\exp(-y^2) dy) \right] \cdot u.\exp(-u^2) du \quad (III.23)$$

Nous définissons deux nouvelles variables S et k tel que :

$$k = Q.F_G \quad (III.24)$$

$$S = \frac{2\sigma_\theta^2.G_T}{Q} \quad (III.25)$$

D'après l'équation (II.14), l'équation (III.25) peut s'écrire de la façon suivante :

$$S = \frac{2.G_T}{Q} \frac{1}{SF^2.SNR} \quad (III.26)$$

En remplaçant (III.24) et (III.25) dans (III.23), on obtient l'équation suivante :

$$BER \approx \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \left[\int_0^{(k \cdot \exp(-S \cdot k \cdot u^2))} (\exp(-y^2) dy) \right] \cdot u \cdot \exp(-u^2) du \quad (III.27)$$

En dérivant l'expression de BER par rapport à la variable k, on obtient :

$$\frac{\partial BER}{\partial k} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial k} \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \left[\int_0^{(k \cdot \exp(-S \cdot k \cdot u^2))} (\exp(-y^2) dy) \right] \cdot u \cdot \exp(-u^2) du \right] = 0 \quad (III.28)$$

En simplifiant l'équation (III.28), on obtient :

$$\frac{\partial BER}{\partial k} = 0 \Leftrightarrow \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \left[\frac{\partial}{\partial k} \int_0^{(k \cdot \exp(-S \cdot k \cdot u^2))} (\exp(-y^2) dy) \right] \cdot u \cdot \exp(-u^2) du \right] = 0 \quad (III.29)$$

En utilisant les lois de Leibniz pour la dérivation des intégrales, l'équation (III.29) devient :

$$\frac{\partial BER}{\partial k} = 0 \Leftrightarrow \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \left[u(1 - k \cdot S \cdot u^2) \cdot \exp(k^2 \cdot \exp(-2 \cdot k \cdot S \cdot u^2)) - u^2(1 + k \cdot S) \right] \cdot du \right] = 0 \quad (III.30)$$

Cette dérivation définit la valeur de k pour laquelle on obtient un bit de taux d'erreur minimal.

En résolvant numériquement l'équation (III.30), nous trouvons une relation entre S et $k_{optimal}$:

$$k_{optimal} = \frac{1.56}{\sqrt[3]{S}} \quad 0.01 \leq S \leq 0.1 \quad (III.31)$$

Où $k_{optimal}$ est la valeur de k pour laquelle on obtient un taux de bit d'erreur BER minimal pour une valeur donnée de S.

A partir des équations (III.24), (III.25) et (III.31), nous obtenons :

$$F_G = \frac{1.24}{(\sigma_{\theta} \cdot Q \cdot \sqrt{G_{T0}})^2} \quad (III.32)$$

A partir des équations (II.14) et (III.32), on obtient l'expression du facteur du gain d'émission optimal en fonction du rapport SNR du système tel que :

$$F_G = \frac{G_T}{G_{T0}} = 1.24^3 \sqrt{\frac{SF^2 \cdot SNR}{Q^2 \cdot G_{T0}}} \quad (III.33)$$

En remplaçant les expressions de G_T et de G_{T0} qui sont définis par les équations (III.4) et (III.7) dans l'équation (III.33), nous trouvons l'expression de l'ouverture optimale du télescope émetteur en fonction du rapport du SNR du système tel que :

$$D_T = 1.11 \left(\left(\frac{SF}{Q} \right)^2 \cdot \frac{SNR}{G_{T0}} \right)^{\frac{1}{6}} \cdot D_{T0} \quad (III.34)$$

A partir des équations (II.14) et (III.34), on obtient l'expression de l'ouverture optimale du télescope émetteur D_T en fonction des amplitudes des vibrations σ_θ^2 tel que :

$$D_T = 1.11 \left(\frac{1}{Q^2 G_{T0} \sigma_\theta^2} \right)^{\frac{1}{6}} \cdot D_{T0} \quad (III.35)$$

III.3. La maximisation de la bande passante [6, 28]

- **Modèle des équations**

On suppose toujours que le récepteur comprend un photo détecteur avec un mode de détection directe. Dans de tel système la valeur de BER est donnée par :

$$BER = \frac{1}{2} \int_0^\infty \left(1 - erf \left(\frac{(I_1(\theta) - I_0(\theta))}{\sqrt{2}(\sigma_1(\theta) + \sigma_0(\theta))} \right) \right) f(\theta) d\theta \quad (III.36)$$

Où

I_1 : Le signal électrique reçu dans le cas de l'émission du bit 1 ;

σ_1 : L'écart type du bruit reçu dans le cas de l'émission du bit 1 ;

I_0 : Le signal électrique reçu dans le cas de l'émission du bit 0 ;

σ_0 : L'écart type du bruit reçu dans le cas de l'émission du bit 0 ;

Pour simplifier l'équation (III.36), nous posons :

$$I_0(\theta) = 0 \quad (III.37)$$

$$I_1(\theta) = I(\theta) = C_1 G_T \exp(-G_T \theta^2) \quad (III.38)$$

$$\sigma_0(\theta) = C_3 B^{0.5} (G_T) \quad (III.39)$$

$$\sigma_1(\theta) = C_3 B^{0.5} (G_T) \cdot \sqrt{1 + G_T C_2 \exp(-G_T \theta^2)} \quad (III.40)$$

Où C_1, C_2, C_3 sont des constantes en fonction des paramètres du système, B la bande passante du système et G_T est le gain du télescope émetteur.

A partir des simplifications faites au dessus et en utilisant l'équation (II.13), l'équation (III.36) devient :

$$BER \approx \frac{1}{2} \int_0^\infty \left(1 - \operatorname{erf}(Q(\theta))\right) \cdot \frac{\theta}{\sigma_\theta^2} \cdot \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right) d\theta \quad (\text{III.41})$$

Q : Est le facteur de qualité défini par l'équation :

$$Q(\theta) = \frac{I(\theta)}{\sqrt{2}(\sigma_1(\theta) + \sigma_0(\theta))} \quad (\text{III.42})$$

$$Q(\theta) = \frac{C_1 G_T \exp(-G_T \theta^2)}{C_3 \sqrt{2B^{0.5}(G_T)} (1 + \sqrt{1 + G_T C_2 \exp(-G_T \theta^2)})} \quad (\text{III.43})$$

Où définissons une nouvelle variable :

$$u = \frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2} \quad (\text{III.44})$$

En remplaçant (III.44) dans l'équation (III.41), on obtient :

$$BER \approx \frac{1}{2} \int_0^\infty \left(1 - \operatorname{erf}\left(Q\left(\sqrt{2\sigma_\theta^2 u}\right)\right)\right) \exp(-u) du \quad (\text{III.45})$$

En dérivant l'équation (III.45) par rapport à G_T , nous trouvons l'équation suivante :

$$\frac{\partial BER}{\partial G_T} \approx \frac{\partial}{\partial G_T} \left(\frac{1}{2} \int_0^\infty \left(1 - \operatorname{erf}\left(Q\left(\sqrt{2\sigma_\theta^2 u}\right)\right)\right) \times \exp(-u) du \right) \quad (\text{III.46})$$

En utilisant la loi de Leibniz pour la dérivation des intégrales, on obtient l'équation :

$$\frac{\partial BER}{\partial G_T} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \left[\frac{\partial}{\partial G_T} \left(\frac{\partial}{\partial G_T} \right)_{B(G_T)} Q\left(\sqrt{2u\sigma_\theta^2}\right) \right] \times \exp\left(-Q\left(\sqrt{2 \cdot u \cdot \sigma_\theta^2}\right)^2\right) \exp(-u) du \quad (\text{III.47})$$

Où

$$\frac{\partial}{\partial G_T} \left(Q\left(\sqrt{2u\sigma_\theta^2}\right) \right) = \frac{h_1(1-h_0)h_3 - \frac{1}{2} \left(h_3 \frac{\partial B(G_T)}{\partial G_T} + C_2 G_T \left(\frac{B(G_T)}{h_2} \right)^{0.5} h_1(1-h_0) \right)}{h_3^2} \quad (\text{III.48})$$

Où

$$h_0 = 2G_T \sigma_\theta^2 u \quad (\text{III.49})$$

$$h_1 = \exp(-h_0) \quad (\text{III.50})$$

$$h_2 = C_2 G_T h_1 + 1 \quad (\text{III.51})$$

$$h_3 = B^{0.5} (h_2^{0.5} + 1) \quad (\text{III.52})$$

Pour déterminer la valeur maximale de la bande passante B qui dépend du gain du télescope émetteur G_T , nous posons :

$$\frac{\partial B(G_T)}{\partial G_T} = 0 \quad (\text{III.53})$$

A partir de l'équation (III.53), l'équation (III.48) devient :

$$\frac{\partial}{\partial G_T} \left| \left(\frac{\partial}{\partial G_T} \right) B(G_T) \right| Q \left(\sqrt{2u\sigma_\theta^2} \right) = \frac{h_1(1-h_0)h_3 - \frac{1}{2} \left(C_2 G_T \left(\frac{B(G_T)}{h_2} \right)^{0.5} h_1(1-h_0) \right)}{h_3^2} \quad (\text{III.54})$$

En résolvant simultanément les équations (III.41) et (III.47) en considérant G_T et $B(G_T)$ comme des inconnus, nous obtenons la valeur du gain du télescope émetteur pour laquelle la bande passante de système est maximale.

Le gain du télescope émetteur obtenu à partir des équations (III.41) et (III.47) doit être inférieur au gain de diffraction du télescope émetteur donnée par l'équation (III.4).

- **Définition des constantes C_1 , C_2 , C_3 [28] :**

Dans le cas où le récepteur comporte une photodiode PIN de coefficient de conversion R définit par l'équation :

$$R = \frac{q\eta}{h\nu} \quad (\text{III.55})$$

Où

q : La charge de l'électron ;

η : Le rendement quantique de la photodiode ;

ν : Fréquence optique.

Le signal électrique I_1 peut s'exprimer sous la forme :

$$I_1 = R \cdot G \cdot P_R \quad (\text{III.56})$$

Où

G : Le gain de l'amplificateur optique ;

P_R : La puissance optique reçue défini par l'équation (III.1).

D'autre part, nous avons vu que I_1 est défini par l'équation (III.38) tel que :

$$I_1 = C_1 G_T \exp(-G_T \theta^2) \quad (\text{III.57})$$

En comparant les équations (III.56) et (III.57), nous trouvons que :

$$C_1 = \frac{R.G.K}{G_T} \quad (\text{III.58})$$

Les constantes C_2 et C_3 sont donnée par les équations :

$$C_3 = \left[\frac{\sigma_{dc}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{sp-sp}^2 + \sigma_{bg}^2 + \sigma_{ESA}^2}{B} \right]^{0.5} \quad (\text{III.59})$$

$$C_2 = \left[\frac{(\sigma_{sg-sp}^2 + \sigma_{sg}^2 + \sigma_{RIN}^2) \cdot C_3^2}{B} \right]^{0.5} \quad (\text{III.60})$$

Tel que :

σ_{dc}^2 est la densité spectrale de puissance du bruit du courant d'obscurité à la sortie du photorécepteur donné par l'équation :

$$\sigma_{dc}^2 = 2qI_d B \quad (\text{III.61})$$

Où

q : La charge de l'électron ;

I_d : Le courant d'obscurité de la photodiode ;

B : La bande passante du système.

σ_{th}^2 est la densité spectrale de puissance du bruit thermique ou le bruit de Jonshon à la sortie du photorécepteur donné par l'équation :

$$\sigma_{th}^2 = \frac{4K_B T \cdot F}{R_L} B \quad (\text{III.62})$$

R_L : La résistance de la charge ;

T : La température du bruit du système électrique ;

F : Le facteur de bruit ;

K_B : La constante de Boltzmann.

σ_{sp-sp}^2 est la densité spectrale de puissance du battement spontané-spontané amplifié à la sortie du photorécepteur :

$$\sigma_{sp-sp}^2 = 8(R \cdot L_{out}(G - 1) \cdot n_{sp} h\nu)^2 B_{opt} B \quad (III.63)$$

L_{out} : Le facteur des pertes à la sortie de l'amplificateur optique ;

n_{sp} : Coefficient d'émission spontanée ;

B_{opt} : La bande passante du filtre optique dans le domaine des fréquences. Définit par l'équation :

$$B_{opt} = \frac{\Delta\lambda \cdot c}{\lambda} \quad (III.64)$$

Où

$\Delta\lambda$: La bande passante du filtre optique.

σ_{bg}^2 est la densité spectrale de puissance du bruit de grenaille amplifié à la sortie du photorécepteur donné par l'équation :

$$\sigma_{bg}^2 = 2q \cdot G \cdot R \cdot P_B \cdot B \quad (III.65)$$

P_B : est la puissance du bruit de grenaille optique tel que :

$$P_B = N \cdot \Delta\lambda \cdot \frac{D_R^2}{4} \pi \quad (III.66)$$

N : Irradiance du bruit de grenaille ;

D_R : L'ouverture du télescope récepteur.

σ_{ESA}^2 est la densité spectrale de puissance du bruit d'émission spontanée amplifiée (ESA) à la sortie du photorécepteur, il est défini par l'équation :

$$\sigma_{ESA}^2 = 4R \cdot q \cdot h \cdot \nu \cdot n_{sp} (G - 1) L_{out}^2 \cdot B_{opt} \cdot B \quad (III.67)$$

σ_{sg-sp}^2 est la densité spectrale de puissance du battement signal-spontané amplifié à la sortie du photorécepteur, il est donné par l'équation :

$$\sigma_{sg-sp}^2 = 4R^2 \cdot P_R \cdot G \cdot L_{in} \cdot L_{out}^2 \cdot (G - 1) \cdot n_{sp} \cdot h \cdot \nu \cdot B \quad (III.68)$$

L_{in} : Le facteur des pertes à l'entrée de l'amplificateur optique.

σ_{sg}^2 est la densité spectrale de puissance du bruit de grenaille amplifié à la sortie du photorécepteur qui résulte des fluctuations du photo courant à cause de sa nature corpusculaire, définit par l'équation :

$$\sigma_{sg}^2 = 2q \cdot G \cdot R \cdot P_R \cdot B \quad (\text{III.69})$$

σ_{RIN}^2 est la densité spectrale de puissance du bruit relatif d'intensité amplifié à la sortie du photorécepteur, il est donné par l'équation :

$$\sigma_{RIN}^2 = 10^{\frac{RIN}{10}} (R \cdot G \cdot P_R)^2 \cdot B \quad (\text{III.70})$$

RIN : Le bruit relatif d'intensité.

III.4. Interprétation des résultats

La figure (III.1) représente les variations des amplitudes des vibrations en fonction du rapport signal sur bruit du système SNR.

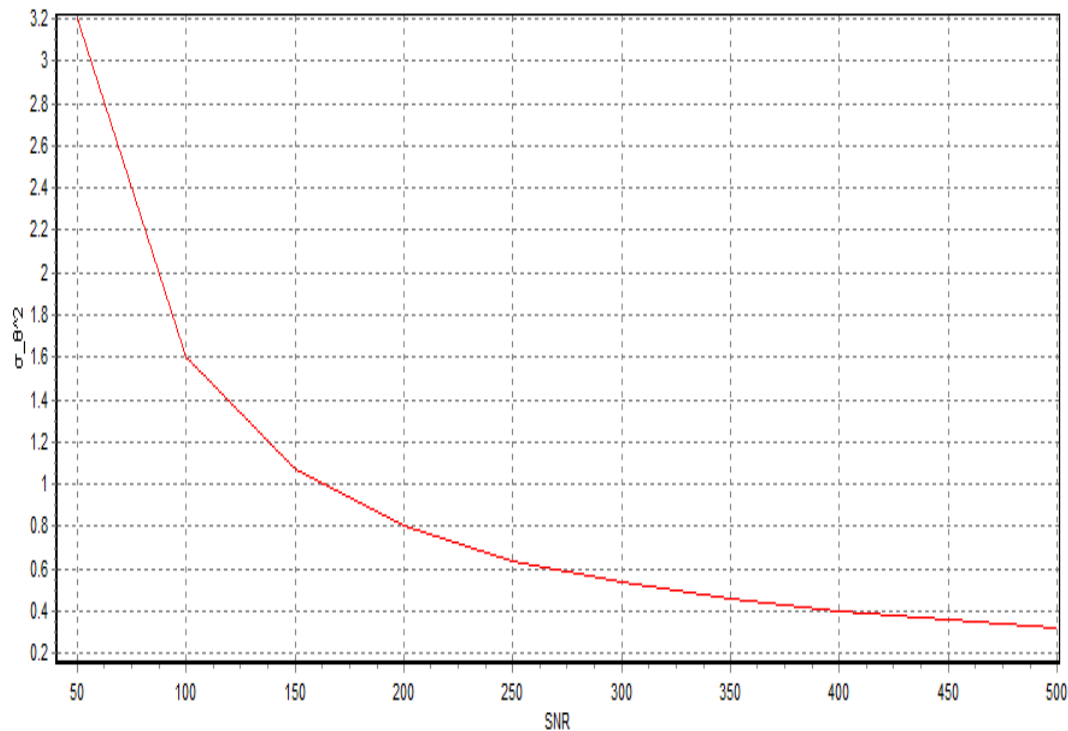


Fig. III.1: Les amplitudes des vibrations en fonction de SNR

A partir de cette courbe, il est constaté que les amplitudes des vibrations varient inversement avec le rapport SNR du système et cela est dû au fait que lorsqu'un corps interstellaire tel que : le soleil, la lune, la terre ou l'une des étoiles se trouve dans le champ de poursuite du satellite, la puissance du bruit augmente, ce qui démunie le rapport SNR du système d'une part et augmente les amplitudes des vibrations du faisceau laser émis dans le plan récepteur d'autre part.

La figure (III.2) représente les variations de k_{optimal} en fonction de S .

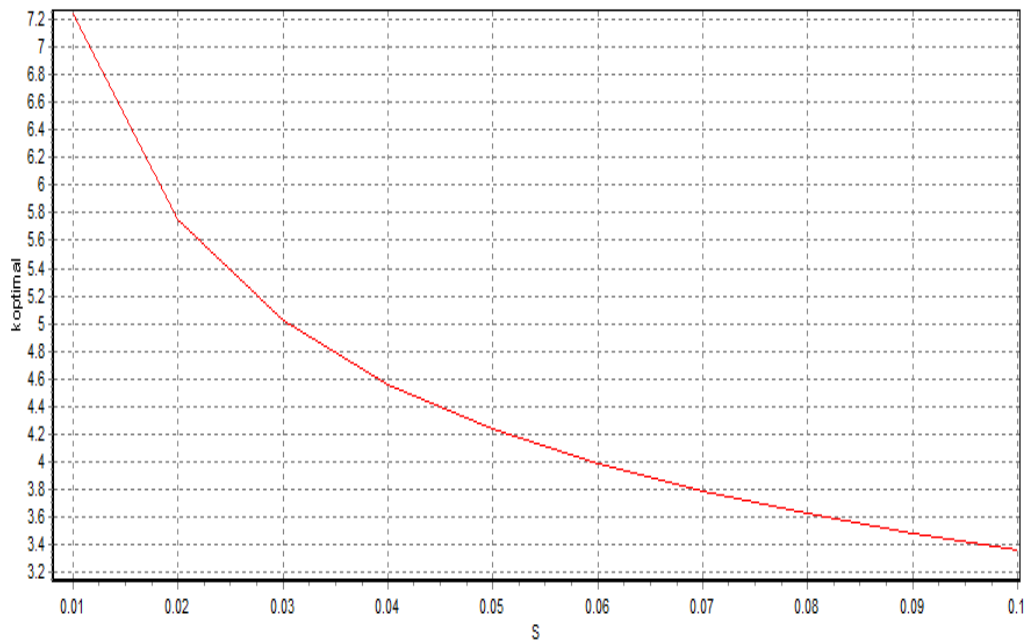


Fig.III.2 : k_{optimal} en fonction de S

A partir de cette courbe on peut constater que le facteur k_{optimal} varie inversement avec S . Pour des valeurs de S variables de 0.01 à 0.1, le facteur k_{optimal} varie de 7.2 à 3.4.

La figure (III.3) représente les variations du facteur du gain optimal F_G qui est défini comme le rapport entre G_T (le gain du télescope émetteur adapté aux amplitudes des vibrations) et G_{T0} (le gain du télescope émetteur non adapté aux amplitudes des vibrations) en fonction du rapport signal sur bruit SNR du système.

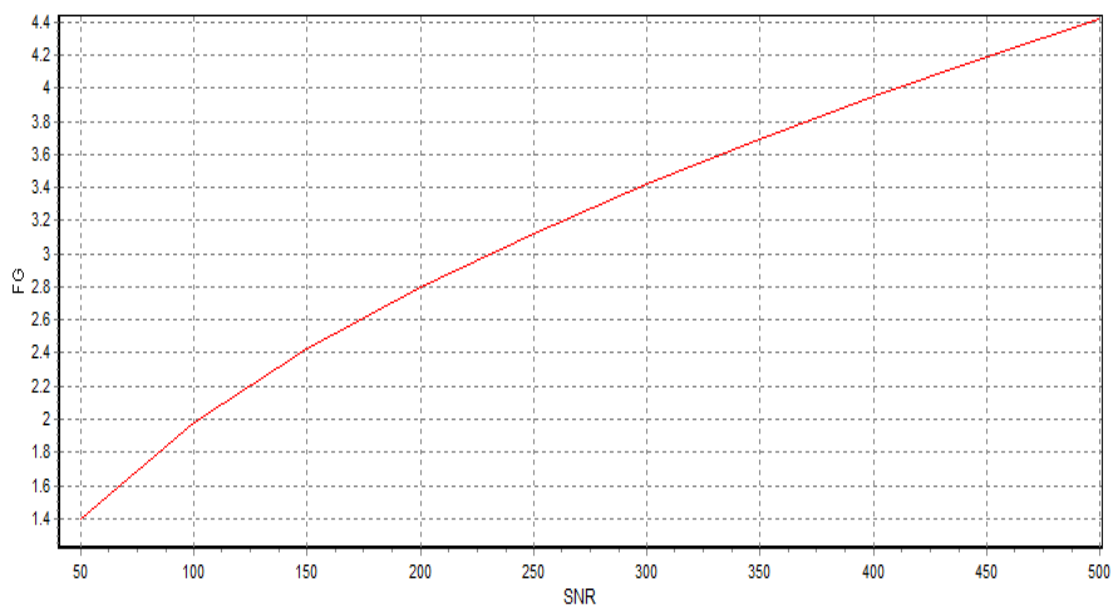


Fig.III.3 : Le facteur du gain optimal F_G en fonction de SNR

A partir de la figure III.3, on remarque que le facteur F_G varie proportionnellement avec SNR, donc on peut conclure que le gain G_T n'est pas constant comme il est le cas pour le gain initial G_{T0} , mais varie proportionnellement avec SNR pour s'adapter aux variations de ce rapport.

La figure (III.4) représente les variations du facteur du gain optimal F_G en fonction des amplitudes des vibrations.

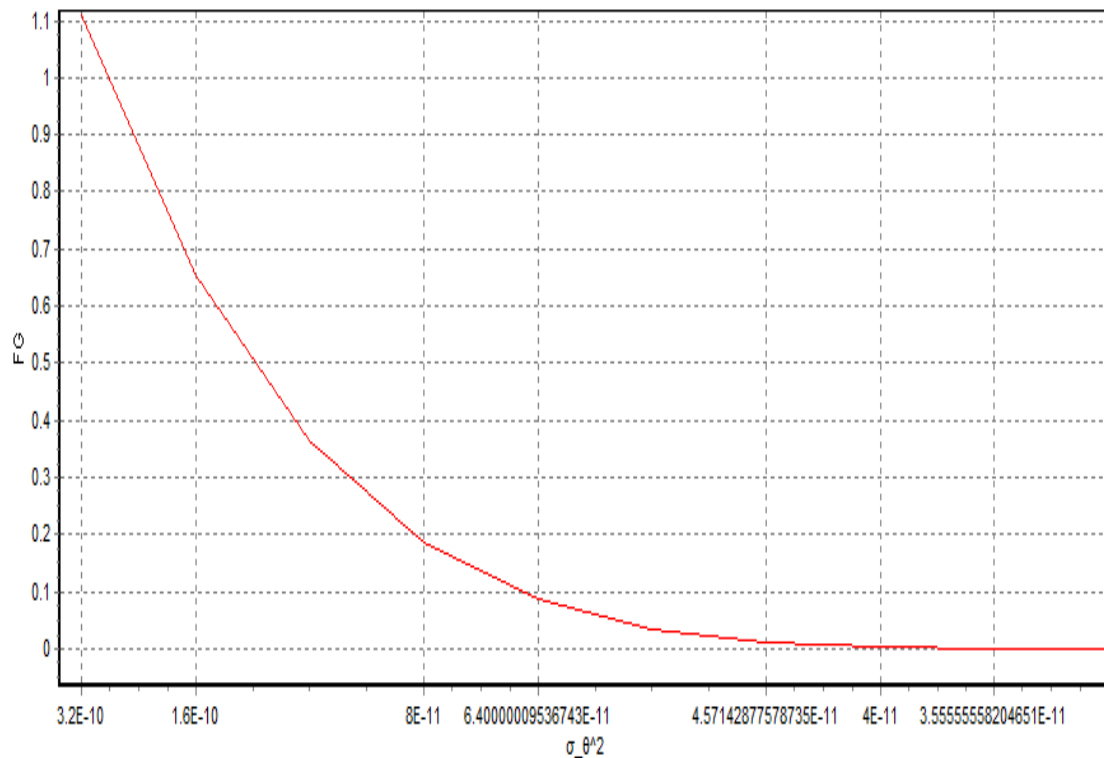


Fig.III.4 : Le facteur du gain optimal F_G en fonction des amplitudes des vibrations

A partir de cette courbe, on remarque que le facteur F_G n'est pas constant, mais varie inversement avec les amplitudes des vibrations pour que le gain de télescope émetteur G_T puissent s'adapter aux variations aléatoires.

La figure (III.5) représente les variations de l'ouverture optimale du télescope émetteur D_T en fonction des variations des amplitudes des vibrations.

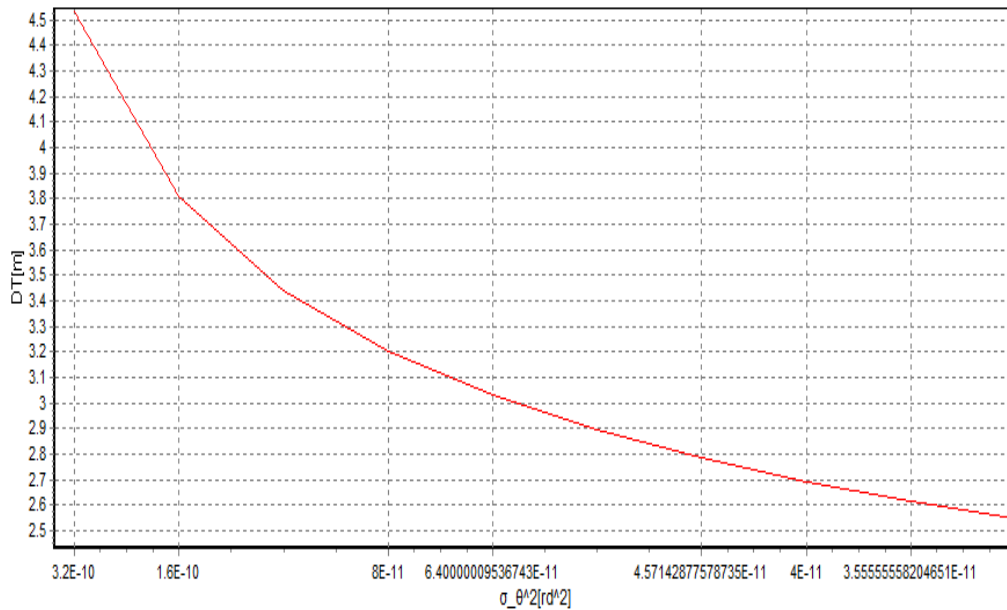


Fig.III.5 : L'ouverture optimale du télescope émetteur D_T en fonction de σ_θ^2

A partir de cette courbe, on remarque que l'ouverture optimale du télescope émetteur D_T n'est pas constante comme il est le cas pour D_{T0} (l'ouverture de télescope émetteur avant l'adaptation), mais varie inversement avec les amplitudes des vibrations pour s'adapter aux variations.

La figure (III.6) représente les variations du gain du télescope émetteur G_T en fonction des variations des amplitudes des vibrations.

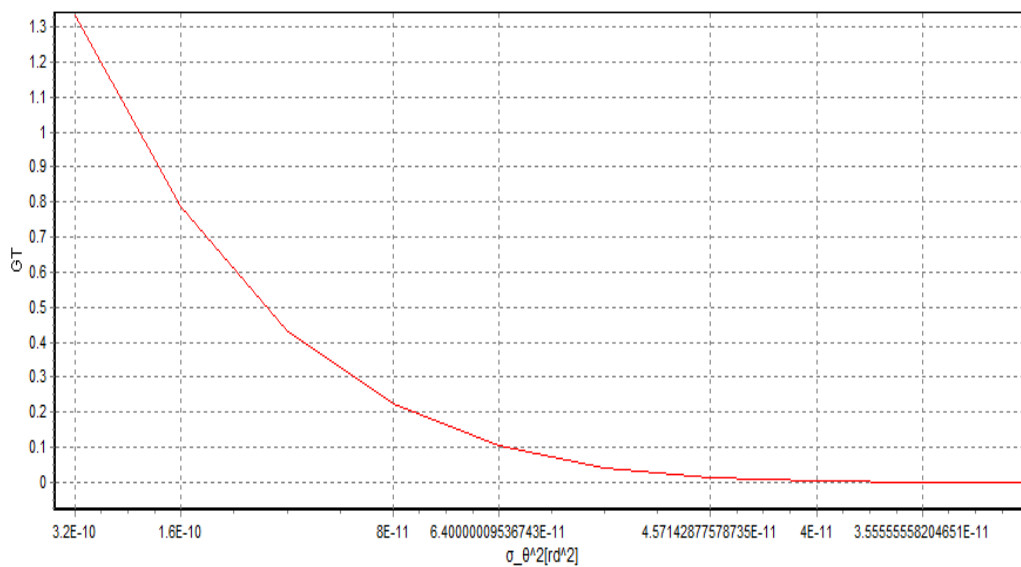


Fig.III.6 : Le gain du télescope émetteur G_T en fonction de σ_θ^2

A partir de cette courbe on remarque que :

- 1) Le gain de télescope diminue continuellement pour s'adapter à l'augmentation des amplitudes des vibrations.
- 2) Les valeurs du gain G_T représentées de cette courbe sont inférieures toujours à la valeur $6.16 \cdot 10^{11}$ qui correspond à la valeur du gain de diffraction du télescope émetteur calculée à partir de l'équation, ce qui affirme que les résultats théorique obtenus auparavant sont valides.

La figure (III.7) représente les variations de la bande passante de système en fonction des variations des amplitudes des vibrations pour un système adapté. A partir de cette courbe, on peut constater que la bande passante du système reste maximale pour les différentes valeurs de vibrations, donc on peut conclure que le système adapté est performant puisqu'il offre une bande passante toujours importante malgré les différentes vibrations qui les subit.

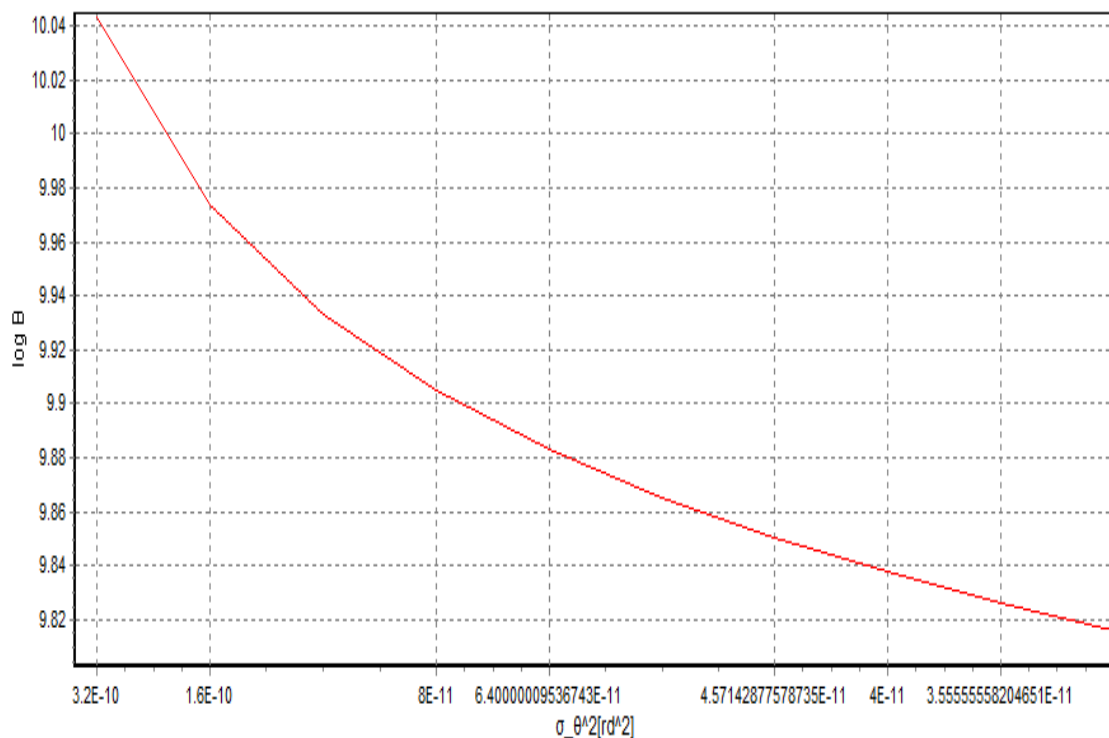
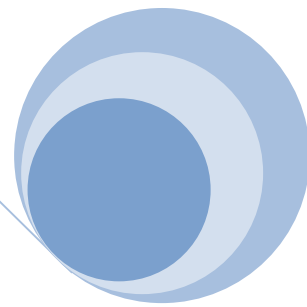
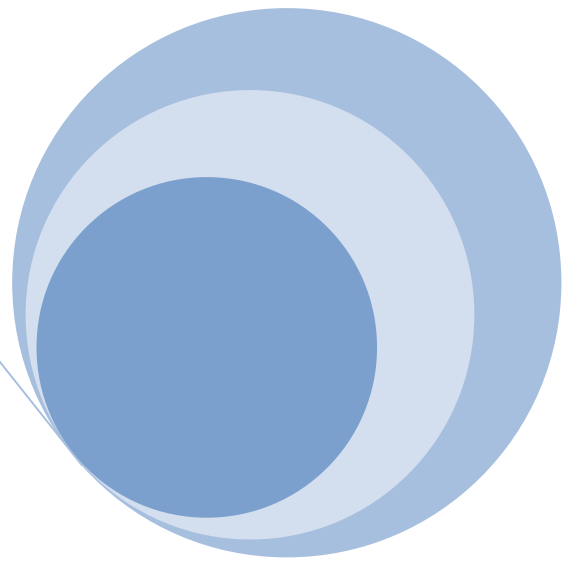
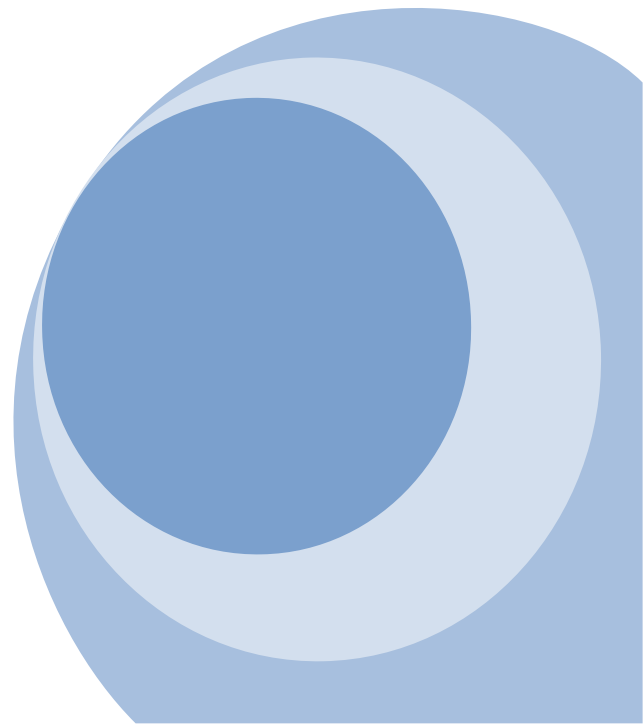


Fig.III.7 : La bande passante du système en fonction de σ_{θ}^2



Chapitre 04

La cellule ATM dans les réseaux de satellites lasers



IV.1. Introduction

En cours d'introduction dans le réseau mondial, l'ATM (transfert temporel asynchrone) a pour but de permettre, en s'adaptant au débit instantané, d'écouler avec le maximum de rendement des débits beaucoup plus élevés. Les réseaux basés sur l'ATM pourront acheminer n'importe quel type de service avec le maximum de souplesse et d'efficacité, parmi ces réseaux, les réseaux des satellites lasers. Mais comme il a été indiqué auparavant, ces derniers souffrent continuellement des vibrations dues aux différentes sources internes et externes environnantes, c'est ce qui fait augmenter le taux de bit d'erreur BER (Bit Error Rate) dégradant ainsi la qualité de communication.

Dans ce chapitre, nous allons voir les divers concepts qui ont été proposés afin de surmonter les effets des vibrations et les différentes améliorations introduites dans la cellule ATM standard au niveau d'un algorithme pour la réception de ces cellules afin de réduire le taux de perte de transmission des informations, et ensuite nous allons comparer les performances des réseaux des satellites standards qui utilisent les cellules ATM standards dans la transmission de leurs données avec celle des nouveaux réseaux satellites développés qui exploitent les cellules ATM développées.

IV.2. Divers concepts

Plusieurs moyens de communication utilisent différents chemins de propagation indépendants afin de transmettre la même information [29,30], cette méthode est utilisée surtout dans le cas où la liaison risque d'être perturbée brutalement et d'une manière aléatoire et surtout lorsque nous disposons de plusieurs trajets en même temps.

Dans les réseaux de satellites, chaque deux satellites peuvent être connectés via différentes routes, donc si l'un des routes est détériorée à cause des vibrations, l'information peut être transmise à travers une autre vers sa destination. Donc en augmentant le nombre des routes de propagation entre le satellite émetteur et le satellite récepteur le taux de perte des informations au cours de la transmission sera diminué. Pour accomplir ces concepts dont le but est de surmonter les effets des vibrations, des améliorations considérables ont été introduites dans la cellule ATM standard ainsi qu'un nouvel algorithme de réception de ces cellules a été développé.

IV.3. Origine d'un concept de l'ATM

En tant que principe de multiplexage et de communication pour des véritables réseaux multiservices et donc multi débits et temps réel, l'ATM a été développé par le CNET à partir de 1982 (centre national d'étude des communications de Lannion) sous le nom d'**ATD** (Asynchronous Time Division). C'est une amélioration de la commutation de paquets permettant de mieux exploiter les liens à haut débit et de s'adapter aux exigences des nouvelles applications. Différents travaux convergents ont été effectués par ailleurs menant à la définition de protocoles de commutation de paquets rapide (**Fast Packet Switching**). L'ATM se présente aujourd'hui comme une technique de transfert d'information, concept qui recouvre le multiplexage et la commutation.

IV.4. L'unité de données : la cellule ATM

L'unité de données du protocole ATM sera donc un paquet : une étiquette permet d'identifier à qui appartient l'information et de l'acheminer convenablement [29, 31]. Le champ d'information associé est transféré de manière transparente de l'accès à la destination. Reste à traiter de la question du temps réel, ou plus précisément de la capacité d'un réseau en mode paquet d'assurer les performances en termes de délai et de taux de perte qui réclament certaine application telle que le son de haut qualité, pour cela le paquet que l'on appellera cellule (Fig. IV.1) pour bien en marquer l'originalité, sera court est de longueur fixe.

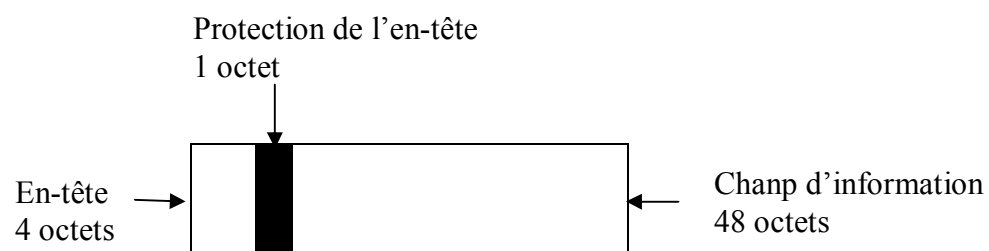


Fig. IV.1 : Cellule ATM

Deux principales raisons justifient la taille fixe et courte des cellules. Les caractéristiques de comportement temporel d'un réseau de files d'attente se comptent en temps de service, temps nécessaire à l'émission d'une unité de données sur une liaison. La taille courte des cellules est donc de nature à limiter les

délais de propagation comme leur fluctuations, ce qu'ont bien vu les concepteurs de l'ATM. Ce qui n'apparaîtra que plus tard à l'analyse du comportement en trafic, C'est que la longueur fixe de la cellule ATM est gage de la capacité à garantir de performances autant en termes de délais que de taux de perte, dans un réseau en mode paquet ou le contrôle de flux au niveau de l'émission des unités de données est très difficile. Cette taille fixe des cellules simplifie de plus considérablement les mécanismes mise en œuvre dans le réseau.

Quatre octets d'en-tête qui portent les informations nécessaires à l'acheminement de la cellule à travers le réseau, un octet de protection de cet en-tête contre les erreurs de transmission, 48 octets de champ d'information qui transportent l'information d'utilisateur et les éléments de protocole associés : tel est le format de la cellule ATM sur lequel le CCITT (International Telegraph and Telephone consultative Committee) se mettra finalement d'accord après de longs débats. En jeu la multiplicité des fonctions proposées pour être portées par l'en-tête, l'adéquation de taille du champ d'information au transport des données, mais aussi au transport de la voix, avec les problèmes de temps de propagation et d'écho que pose l'accumulation des octets pour constituer une cellule, en jeu encore le sur débit qui représente l'en-tête par rapport au champ de l'information, la nécessité de protéger l'étiquette d'acheminement contre les erreurs de transmission, sans oublier les questions de technologie de réalisation d'un traitement au vol des en-tête des cellules, au total un ensemble de contraintes contradictoires qui expliquent la valeur inattendue de 53 octets : un nombre premier.

IV.5. Multiplexage et transmission des cellules ATM

A l'extrémité d'émission, le multiplexage asynchrone a pour objet d'entrelacer et d'insérer le flux de cellules ATM, créés par les application ou commutées, à l'intérieur d'une ressource de transmission, tramée ou non d'une manière telle que ce flux puisse être récupéré et correctement restitué sous forme de cellules à l'extrémité de réception [32,33]. Ce multiplexage comporte trois fonctions essentielles : l'entrelacement, la justification et la délimitation.

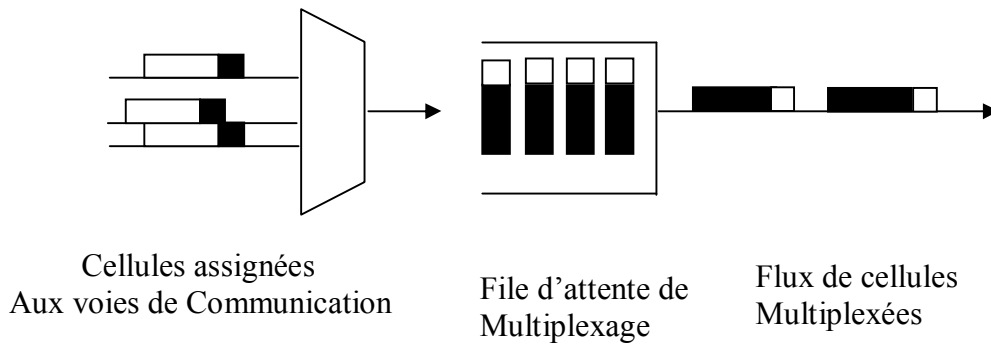


Fig. IV.2 : Multiplexage : entrelacement

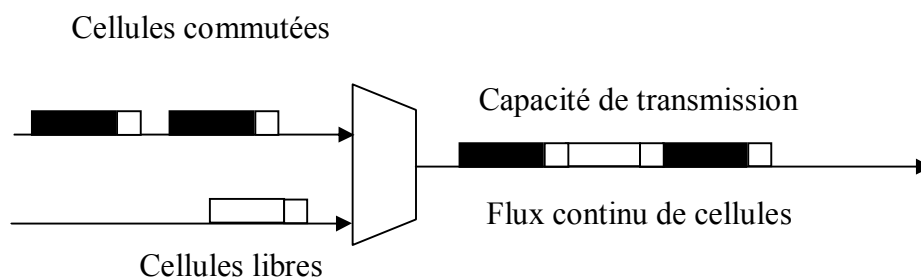


Fig. IV.3 : Cellules libres et adaptation de débit

L'entrelacement est le fait d'une file d'attente qui règle les conflits d'accès à la ressource de transmission commune en sérialisation les cellules ATM utiles (Fig. IV.2). Cette fonction impose une contrainte, propre à tous les réseaux de files d'attente : la charge offerte doit être strictement inférieure à la capacité disponible. Les cellules ATM utiles ne suffisent donc pas à remplir à elles seules la ressource de transmission. D'où la fonction dite de **justification** qui adapte le débit offert à la ressource, en insérant à l'émission et autant que de besoin des cellules libres (Fig. IV.3), que l'on distingue des cellules utiles par une configuration binaire spécifique et qui seront éliminées à la réception [33,34], le résultat de cette opération de justification est un flux continu d'unités de données au format de la cellule ATM, qu'il s'agisse de cellules utiles ou des cellules libres. Ce flux continu est perçu par l'extrémité de réception comme un flux de bits indifférenciés, à partir duquel il faut récupérer individuellement les cellules utiles en vue de les démultiplexer ou de les commuter. Cette opération de récupération des unités de données multiplexées, dite opération de cadrage, est présente dans tout les systèmes de multiplexage temporel : **délimitation** des paquets, des trames ou des cellules selon différentes méthodes dans les modes asynchrones.

Le mécanisme de cadrage doit détecter puis maintenir une délimitation correcte des unités de données. Détection rapide et sûre du cadrage (même en présence d'imitations dans le flux de données). Détection rapide des pertes de cadrage réelles (due par exemple à un saut de phase de signal numérique reçu), protection contre les erreurs de transmission (tolérance du mécanisme face à des erreurs affectant l'information de cadrage), indépendance (ou transparence) vis-à-vis du flux d'information (le mécanisme ne doit pas faire peser de contrainte sur le contenu des unités de données) sont les principales propriétés d'un bon mécanisme de délimitation.

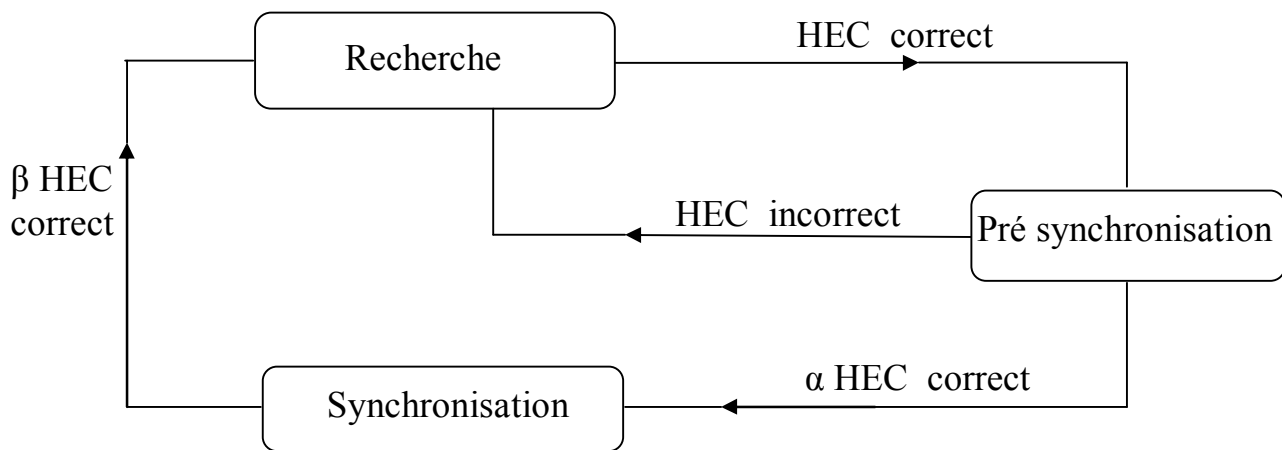


Fig. IV.4 : Délimitation des cellules ATM – utilisation du HEC

L'ATM (fig. IV.4) utilise pour la délimitation des cellules le format tout à fait particulier de l'en-tête, dans lequel cinquième octet est le résultat d'un calcul de redondance sur les quatre octets précédents, associé à une machine à état et à un embrouillage qui garantissent les propriétés citées à l'instant : détection rapide, l'information nécessaire au cadrage apparaissent en tête de chaque cellule, sécurité par la spécificité de la configuration binaire recherchée par un mécanisme de confirmation s'étendant sur plusieurs (α) cellules consécutives, protection contre des décadres provoqués par des simples erreurs de transmission, l'absence du motif en position nominale devant être confirmée sur plusieurs (β) cellules consécutives, protection contre les imitations enfin par embrouillage du champ d'information [35].

IV.6. Identification des canaux : conduit logique et voie logique

Il existe trois principaux modes de multiplexage par étiquette, qui diffèrent par la nature de l'information d'identification portée par cette étiquette. En mode data gramme, elle contient une adresse de destination et chaque paquet est acheminé individuellement : plusieurs paquets consécutives d'une même communication peuvent emprunter des chemins différents. En auto acheminant, l'étiquette contient une description des actions de commutation successive le long du trajet du paquet, par exemple sous la forme d'une succession d'adresse de sortie des nœuds traversés : les paquets successifs d'une communication suivent donc le même chemin physique. Par contre c'est au prix d'une longueur d'étiquette variable, parfois importante, le numéro de voie logique ATM est scindé en deux identificateurs complémentaires qui différencient deux entités hiérarchisées d'organisation de l'acheminement (fig. IV.5) ; Le conduit logique par **VPI** (Virtual Path Identifier), numéro de conduit virtuel. La voie logique VC par son **VCI** (Virtual Circuit Identifier) qui un numéro de canal virtuel. Ce canal virtuel permettra d'acheminer individuellement les cellules. Lors de l'établissement, un canal virtuel ("contenu" dans un conduit virtuel) est réservé. L'adressage d'un circuit virtuel ATM est donc un couple VPI/VCI. Ce système permet d'effectuer un routage très facilement : un circuit virtuel n'est en fait qu'une suite de couples VPI/VCI qui permet d'aller de routeur en routeur, jusqu'au destinataire. En fait, lors de l'établissement de la connexion, chaque routeur du réseau ATM qui compose le circuit virtuel crée une table de routage qui permet de faire transiter les cellules arrivant vers le conduit virtuel adéquat.

L'ATM utilise le troisième mode, dans lequel l'étiquette porte un numéro de voie logique, qui identifie la communication sur un multiplexe donné. Ce numéro peut être modifié à chaque opération de commutation. Un tel choix résulte de plusieurs contraintes ; en imposant aux cellules ATM de suivre le même chemin physique à travers le réseau, il garantit que la séquence d'émission de ces cellules est préservée à travers le réseau, il est compatible avec une longueur d'étiquette fixe et relativement courte tout en offrant une capacité d'identification important plus de deux cent soixante millions de voies par multiplex [33,36].

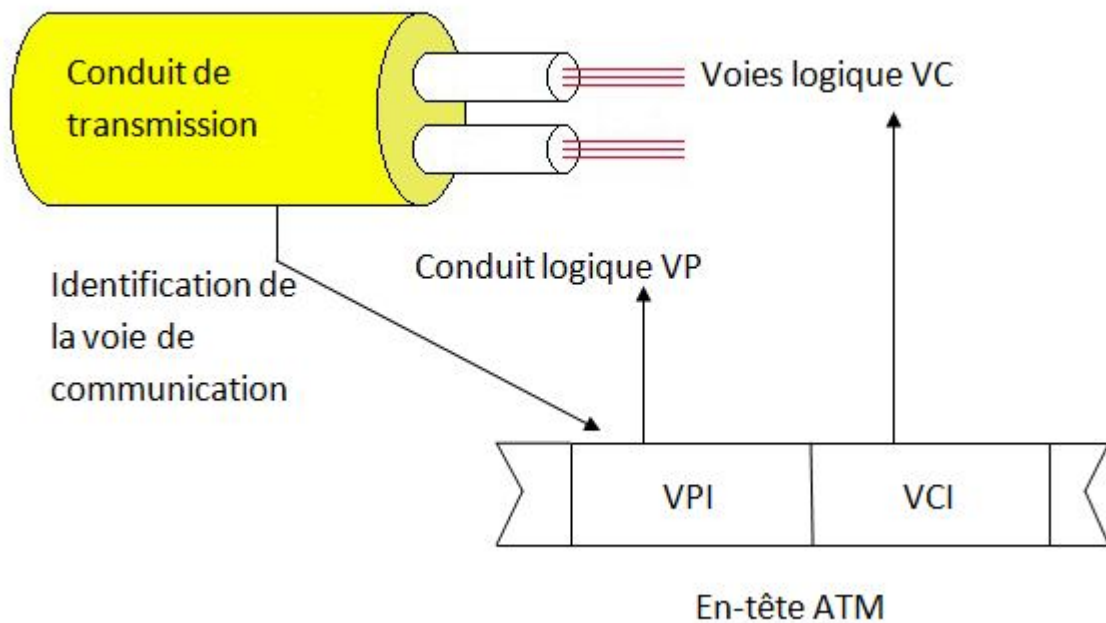


Fig. IV.5 : Conduit logique VP et voie logique VC

IV.7. La priorité temporelle et sémantique

La priorité temporelle a été suggérée pour séparer les services à forte contrainte de temps réel des services moins exigeants, les premiers étant systématiquement servis d'abord [34,36]. On doit répercuter cette séparation dans la constitution physique des files d'attente si l'on veut éviter toute perturbation des flux de cellules priorités par les flux cellules non prioritaires. Par contre, la mise en œuvre des priorités de cette nature ne peut pas reposer sur une information de priorité qui serait portée par l'en-tête des cellules ATM ; il serait en effet contradictoire de garantir le maintien en séquence de toutes les cellules d'une même voie et d'allouer une priorité temporelle à certaines d'entre elles, leur permettant ainsi implicitement d'en doubler d'autres moins prioritaires. Cette notion de priorité temporelle n'intervient d'ailleurs que dans des machines de multiplexage ou de commutation.

La priorité sémantique - on parle aussi de destruction sélective - intervient lorsque le réseau est amené à détruire des cellules, faute de place dans ses files d'attente : les cellules de faible priorité sont détruites en premier lieu. Cet attribut aurait également pu être attaché au numéro de voie logique. Il est en réalité individuellement affecté à la cellule dans l'en-tête : deux cellules de la même voie peuvent avoir des priorités

différentes, ce qui permet d'espérer garantir à la même voie logique deux taux de perte de cellules différenciés.

IV.8. La cellule ATM standard

IV.8.1 En-tête de la cellule ATM standard : structure détaillée

En plus des champs d'identification VPI et VCI, on trouve donc dans l'en-tête ATM (Fig. IV.6) :

- Un bit de priorité sémantique, ou CLP (cell loss priority).
- Un champ de trois bits de type de contenu, ou PTI (payload type identifier), qui porte les notifications de congestion vers l'avant EFCI (Explicit Forward Congestion Indication) et les identificateurs propres aux voies logique en plus d'un bit d'identification d'utilisateur à disposition de l'application.

Le contenu de l'en-tête ATM, qui porte l'identité de la voie logique est évidemment d'une importance vitale pour l'acheminement de la cellule. Un champ de huit bits le complète donc : le champ de protection ou HEC (header error control), qui contient un code de redondance calculé à partir de ses quatre autres octets. Cette redondance ne protège que l'en-tête [29,36].

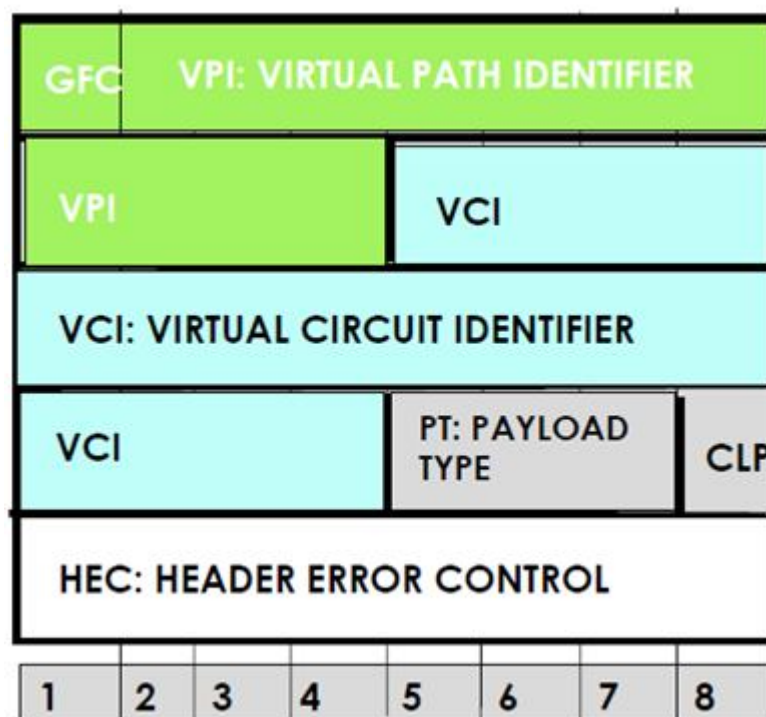


Fig. IV.6 : En-tête de la cellule ATM

IV.8.2. L'algorithme de réception d'une cellule ATM standard

Si la transmission numérique permet un taux d'erreur très faible en temps normal (de l'ordre de 10^{-9} même avec un rapport signal/bruit assez faible), les erreurs de transmission, tolérables en téléphonie, peuvent être inacceptables en transmission de données [33,35]. Il est nécessaire que le système de transmission soit capable de détecter ses propres erreurs et de les corriger.

La figure (IV.8) représente l'algorithme de réception des cellules ATM standards. La nouvelle cellule ATM reçue par le satellite récepteur va subir trois tests. Le premier test est celui du HEC qui va détecter toutes les erreurs possibles existantes dans l'en-tête de la cellule selon une procédure a deux états qui permet une correction des erreurs simples et une protection renforcée contre les erreurs multiples (Fig. IV.7).

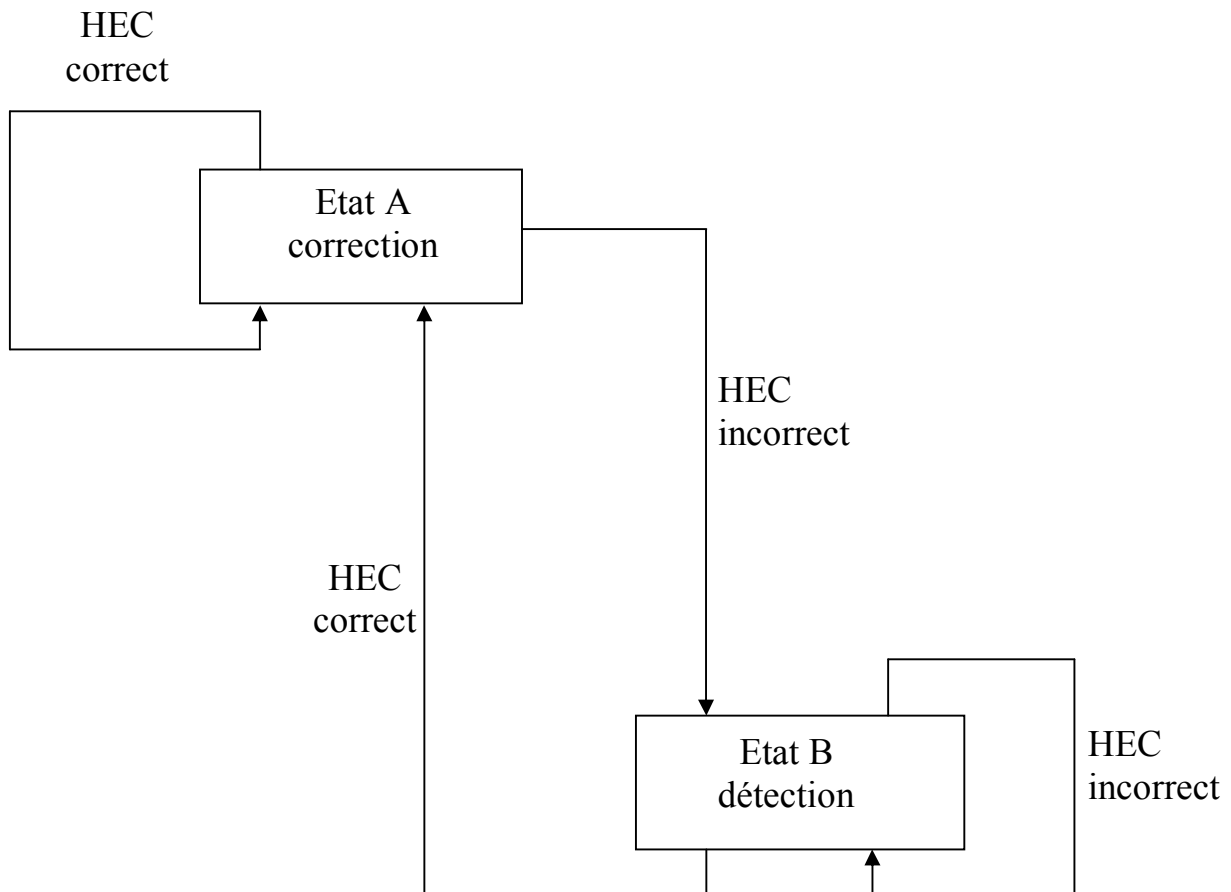


Fig. IV.7 : Protection de l'en-tête

Dans l'état de correction, la redondance du HEC permet de corriger les erreurs simples et de détecter les erreurs multiples. Un premier HEC incorrect fait passer dans l'état de détection. La même redondance en détection pure est alors plus efficace en termes d'erreurs simultanées détectées. L'hypothèse implicite est que les systèmes de transmission optique présentent soit des erreurs simples qui seront corrigées, soit d'importants paquets d'erreurs, pour lesquels il faut un mécanisme de détection puissant.

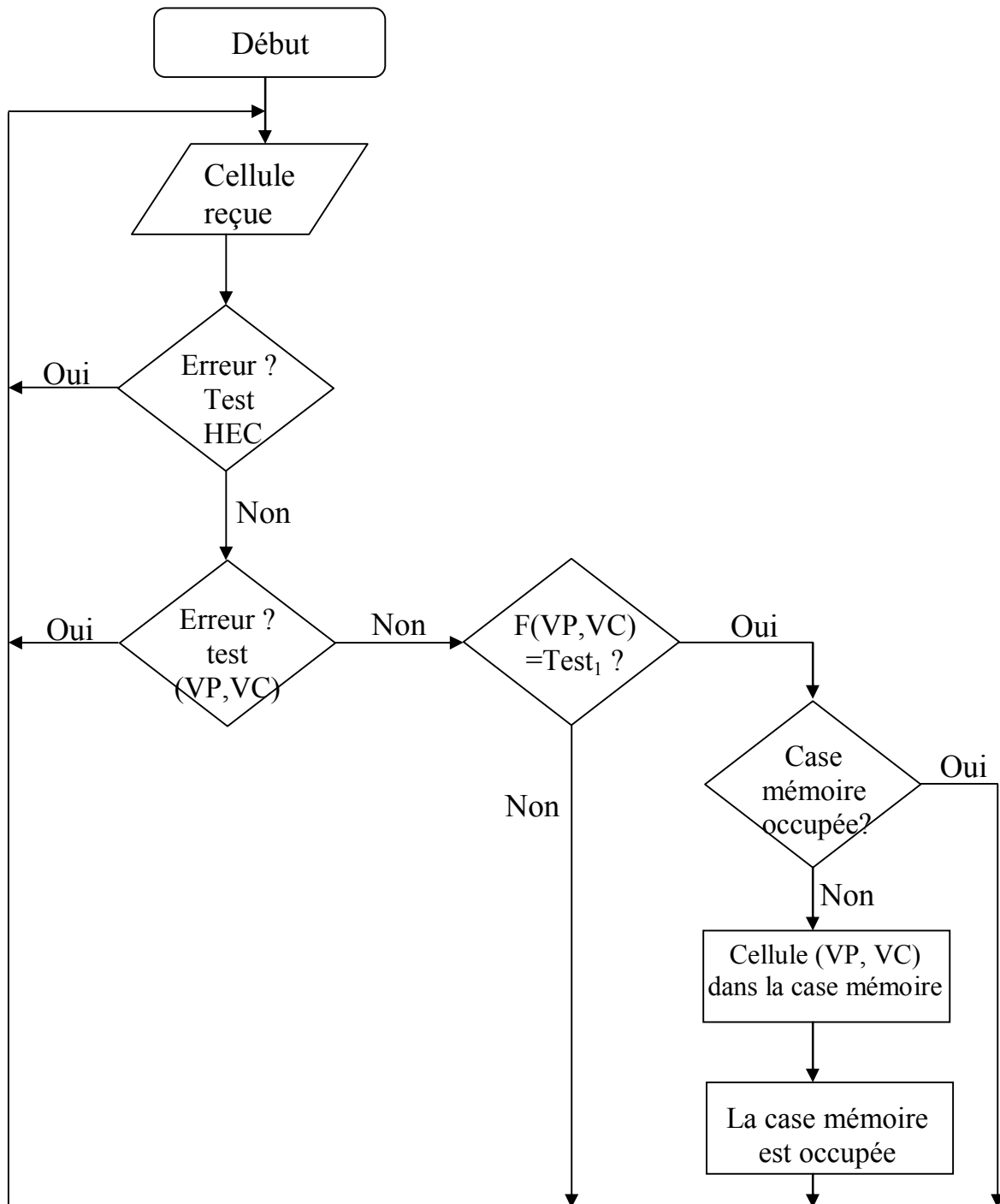


Fig. IV.8 : L'algorithme de réception de la cellule ATM standard

Dans le second test, nous vérifions s'il n'y a pas des erreurs dans le numéro de la voie logique, qui identifie la communication sur un multiplex donné, enfin dans le troisième test nous comparons le temps d'arriver de la cellule avec le temps de propagation estimé et qui est donné par l'équation [29] :

$$T_{est1} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^n Z_i + \sum_{i=1}^n \tau_i \quad (IV.1)$$

Où

c : La vitesse de la lumière dans l'espace libre;

n : Le nombre des satellites dans le réseau;

Z_i : La distance entre le satellite i et le satellite $i+1$;

τ_i : Le retard de propagation de la cellule.

Si la cellule passe successivement les trois tests, nous vérifions si la case mémoire appropriée dans la mémoire tampon est vide, si c'est le cas, la cellule est sauvegardée dans cette case et cette dernière est marquée : occupée. Maintenant l'algorithme est prêt à recevoir la prochaine cellule transmise.

La probabilité de détection des cellules ATM standards est donnée par l'équation [32] :

$$P_1 \approx N_1 BER^{I_{HEC}+1} \quad (IV.2)$$

Où

$$N_1 = 52 \times 8 + 1 + N_{HEC} \quad (IV.3)$$

N_{HEC} : le nombre des bits du code HEC ;

I_{HEC} : la capacité de HEC à la détection des erreurs de la cellule ATM standard ;

BER : la valeur du bit de taux d'erreur.

Lorsqu'une cellule est reconnue fautive, on peut parfois demander sa retransmission. Il existe différentes procédures :

- Attente avant d'envoyer une nouvelle cellule, que la cellule précédente ait été acquittée par le destinataire : méthode très sûre mais très lente ;
- Transmission continue et reprise à partir de la cellule erronée lorsqu'on reçoit une demande de répétition ;
- Transmission avec répétition sélective de la cellule erronée, méthode plus complexe, mais plus efficace lorsque le temps de propagation est élevé sur la

liaison (par exemple dans le cas des liaisons par satellite, le temps de propagation peut être équivalent à des milliers de cellules).

IV.9. La cellule ATM développée

IV.9.1. En-tête de la cellule ATM développée

Comme il a été cité auparavant, la cellule ATM standard comporte une en tête de 5 champs (VCI, VPI, CLP, PTI, HEC) et un champ d'information de 48 bits [30,36].

Pour obtenir la cellule ATM développée, on commence tout d'abord par supprimer le champ de protection ou HEC de l'en tête de la cellule ATM standard, ensuite nous compressons la cellule obtenue dans le domaine temporelle (Fig. IV.9), après nous ajoutons à la nouvelle cellule compressée un second champ composé de plusieurs unités.

La procédure de la compression de la cellule est utilisée pour maintenir la taille de la cellule fixe.

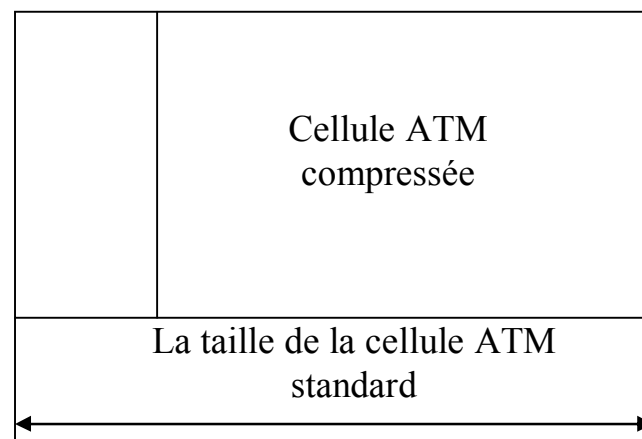


Fig. IV.9 : cellule ATM compressée

La structure d'une cellule ATM développée (Fig. IV.10) comporte une cellule ATM standard à l'exception du champ de protection HEC, CN (cell number), RN (route number) et CRC (cyclic redundancy check).

- Le CN indique la position de la cellule ATM transmise dans le flux des données
- Le RN indique l'adresse de la route à travers laquelle la cellule passe. On note que plus le nombre des routes augmente, plus la bande passante du réseau devient plus importante.
- Le CRC est utilisé pour la détection des erreurs dans la cellule.

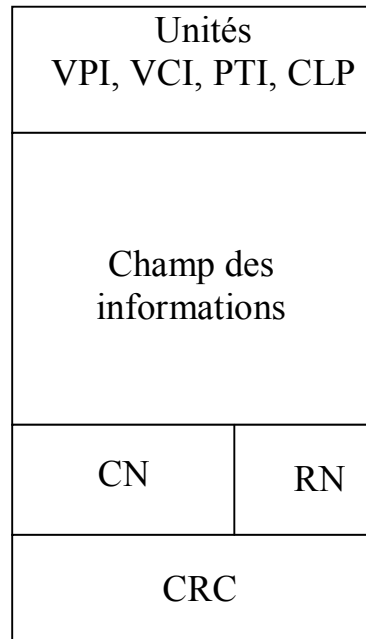


Fig. IV.10 : cellule ATM développée

Le nombre minimum des bits du CN est donné par l'équation :

$$N_{CN} \geq \left\lceil \log_2 \left(\frac{R}{\max_{RN}[T_{est2}] - \min_{RN}[T_{est2}]} \right) + 1 \right\rceil \quad (IV.4)$$

Tel que :

$$T_{est2} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^n Z_i(RN) + \sum_{i=1}^n \tau_i(RN) \quad (IV.5)$$

Où

R : le taux des cellules transmises.

$Z_i(RN)$ la distance entre le satellite i et le satellite $i+1$ suivant a la route RN .

$\tau_i(RN)$ le retard de propagation de la cellule suivant de la route RN .

En pratique, le nombre des routes indépendantes disponible dans les réseaux des satellites lasers sera inférieur ou égale à quatre routes. Cette limitation est due d'une part au retard maximum permis dans la transmission des données et d'autre part au coût de la bande passante, de ce fait le nombre des bits N_{RN} sera limité seulement à 2 bits. Il est important de noter que l'utilisation de toutes les routes possibles ne se fait que dans le cas des applications exigeant un facteur de qualité $Q_{0.5}$ important, dans le cas des applications demandant un facteur $Q_{0.5}$ standard, nous pouvons utiliser seulement un ou deux routes.

La probabilité de détection des cellules ATM développée est donnée par l'équation :

$$P_2 \approx N_2 BER^{I_{CRC}+1} \quad (IV.6)$$

$$N_2 = 52 \times 8 + N_{CN} + N_{RN} + N_{CRC} \quad (IV.7)$$

N_{CN} Le nombre des bits du CN ;

N_{RN} Le nombre des bits du RN ;

N_{CRC} Le nombre des bits du CRC

I_{CRC} La capacité de CRC a la détection des erreurs de la cellule ATM développée.

Pour pouvoir calculer N_{CRC} , nous devons d'abord déterminer la valeur désirée de p_2 et ensuite résoudre simultanément les équations (IV.6) et (IV.7).

IV.9.2. L'algorithme de réception d'une cellule ATM développée

Cet algorithme (Fig. IV.11) est appliqué à chaque cellule reçue. La nouvelle cellule accueillie par le récepteur va subir trois tests successives. Le premier test est celui du CRC qui va détecter tout les erreurs possibles existantes dans la cellule en comparant le mot de contrôle reçu avec celui qui est recalculé par le récepteur. Dans le second test, nous vérifions s'il n'y a pas des erreurs dans le choix de la route (R), du conduit logique (VP) et de la voie logique (VC) dans la séquence d'émission des cellules et enfin dans le troisième test nous comparons le temps d'arrivée de la cellule avec le temps de propagation estimé et qui est donnée par l'équation :

$$T_{bst2} = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^n Z_i(RN) + \sum_{i=1}^n \tau_i(RN) \quad (IV.8)$$

Si la cellule passe successivement les trois tests, nous vérifions si la case mémoire appropriée dans la mémoire tampon est vide, si c'est le cas la cellule est sauvegardée dans cette case et cette dernière est marquée : occupée. Maintenant l'algorithme est prêt pour recevoir la prochaine cellule transmise.

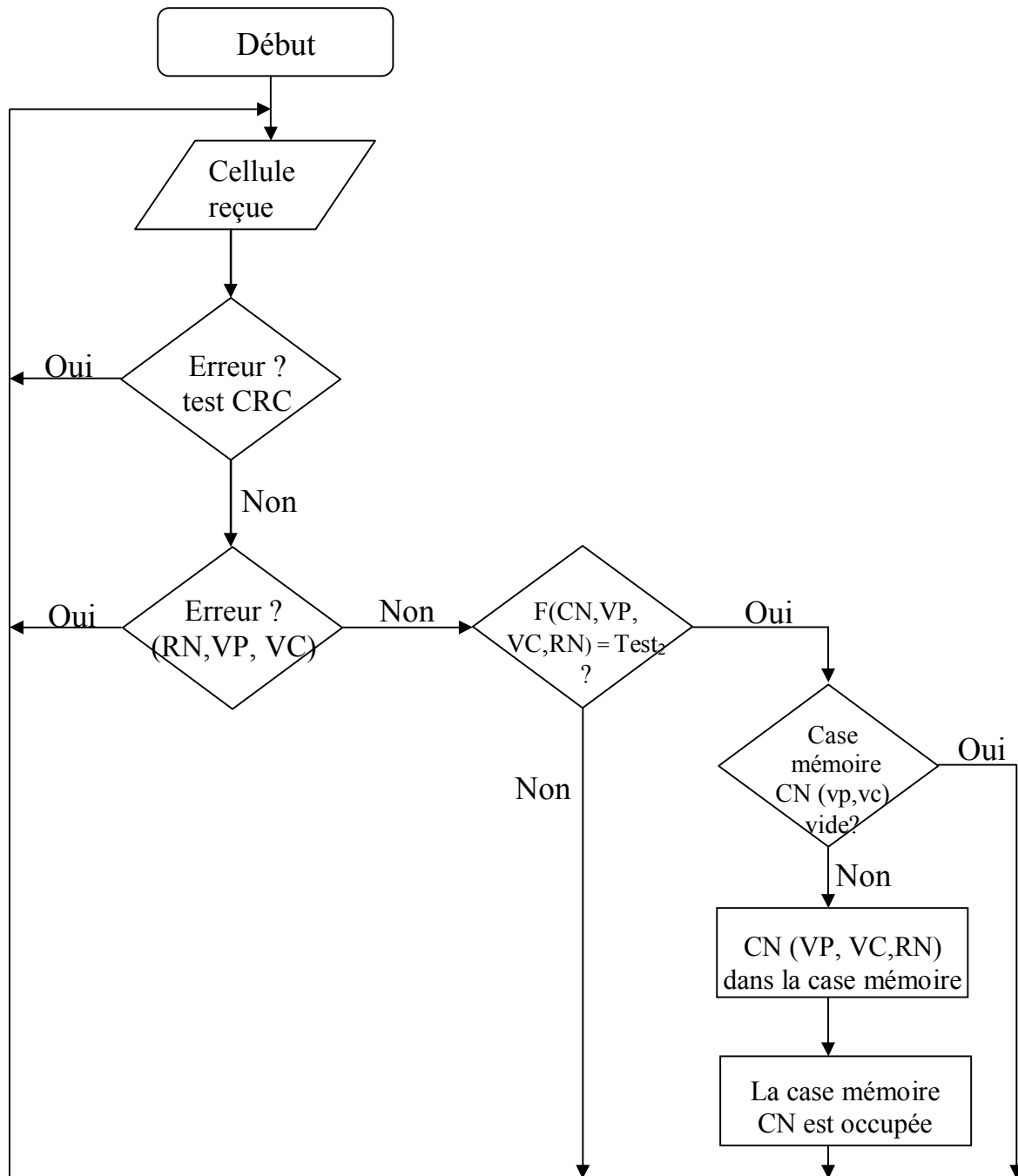


Fig. IV.11 :l'algorithme de réception de la cellule ATM développée

IV.10. Comparaison entre un réseau satellite standard et un réseau satellite développée

Dans ce paragraphe nous allons comparer les performances de deux réseaux satellites différents : un réseau standard et un réseau développé. Le réseau standard comporte trois satellites : un émetteur, un router et un récepteur (Fig. IV.12.a) et utilise pour la transmission de ses données la cellule ATM standard ainsi que l'algorithme de réception standard par contre le réseau développée comprend quatre satellites : un émetteur, deux routes et un récepteur (Fig. IV.12.b) et transmis ses information en utilisant la cellule ATM améliorée avec l'algorithme de réception développée.

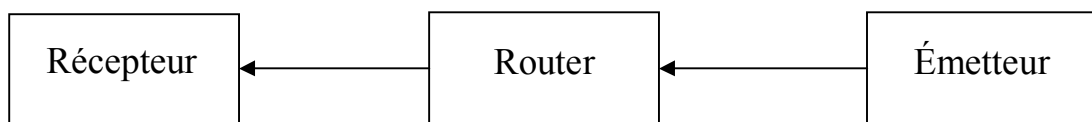


Fig. IV.12.a : réseaux standard

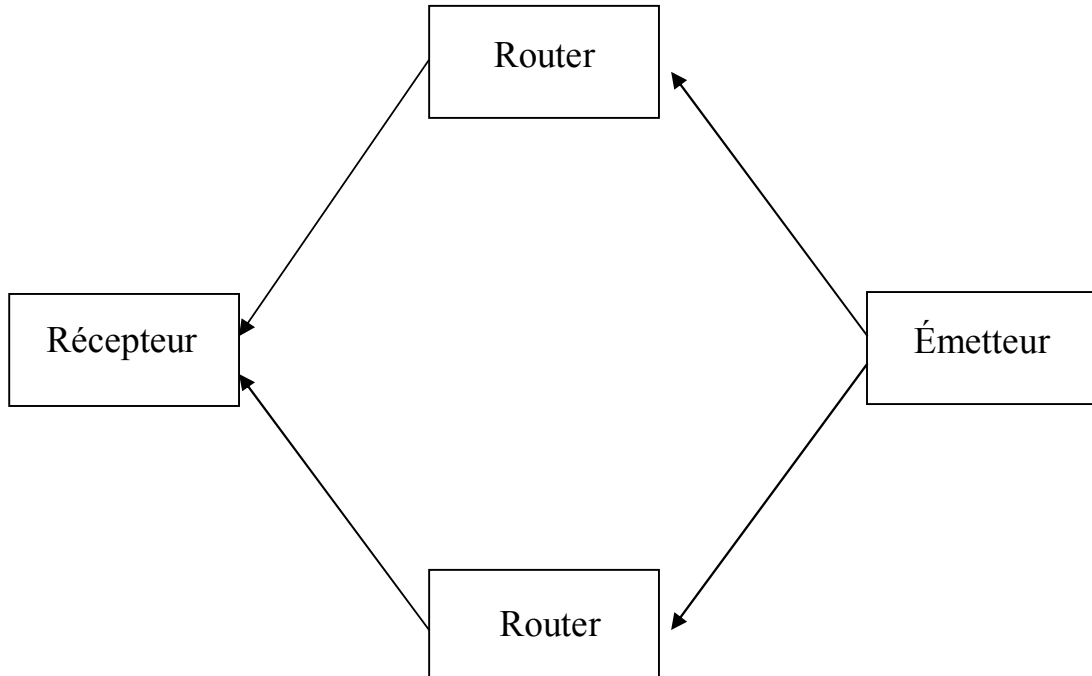


Fig. IV.12.b : réseaux développée

Après simulation nous avons obtenu les courbes suivantes :

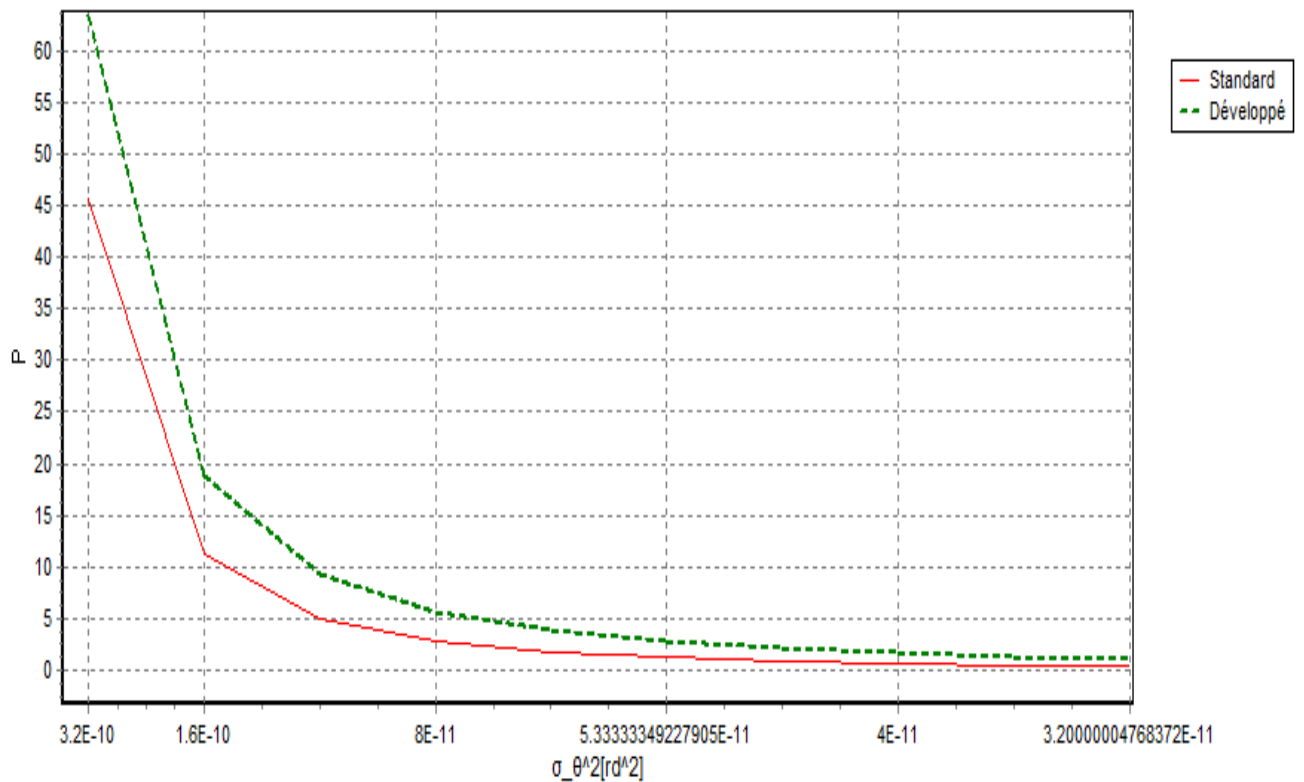


Fig. IV.13: la probabilité de détection des cellules ATM en fonction des amplitudes des vibrations.

La courbe (Fig. V.13) représente les variations de la probabilité de détection des cellules transmises en fonction des amplitudes des vibrations pour un réseau satellite standard et un réseau satellite développé.

A partir des deux courbes obtenues on constate que les valeurs de P pour un réseau satellite développe sont plus importantes que celle d'un réseau standard, donc on peut conclure que le taux des pertes des cellules lors de la transmission dans le réseau satellite standard utilisant les cellules ATM standard ainsi que l'algorithme de réception standard est plus important que dans le réseau développé qui exploite les cellules ATM améliorées avec le nouveau algorithme de réception, le taux des pertes peut atteindre jusqu'à des millions de cellules perdues pour un taux de données transmises égale à plusieurs Gbits par seconde pendant une durée de vibration de quelques millisecondes seulement, donc l'utilisation de l'algorithme de réception développé réduit énormément les pertes des cellules transmises et par conséquent améliore les performances du réseau satellite.

Conclusion générale

Les satellites lasers offrent plusieurs avantages par rapport aux satellites standards, mais le principal obstacle rencontré dans de tels satellites, c'est ce que ces derniers souffrent continuellement des vibrations du faisceau laser émis à cause des différentes sources internes et externes environnantes, c'est ce qui fait dégrader la qualité de la communication. Afin de réduire les effets de ces vibrations et améliorer la qualité de la communication, plusieurs mesures ont été prises.

Des améliorations considérables ont été introduites dans la structure standard du réseau satellite, parmi ces améliorations, c'est l'utilisation du télescope en éléments en phase (Telescope Phased Array) dont le gain est adapté aux amplitudes des vibrations par une unité de control, c'est ce qui fait réduire le taux de perte des informations lors de la transmission.

Plusieurs modèles mathématiques ont été développés pour adapter l'ouverture et le gain du télescope émetteur aux variations aléatoires des amplitudes des vibrations. Nous avons pu constater que le système ayant une ouverture du télescope émetteur optimisée donnait des résultats plus performants par rapport au système standard.

Ce travail va constituer une plateforme qui pourra prendre des directions de recherches variées. On peut espérer que le niveau des vibrations sera d'autant mieux géré au fur et à mesure des avancées qui auront été réalisées.

Comme l'ATM est considérée comme une technique de transmission des informations, plusieurs améliorations considérables ont été introduites dans la cellule ATM standard ainsi qu'un nouvel algorithme de réception de ces cellules a été développé d'où l'acquisition d'une bande passante plus importante avec un taux de perte plus faible que le réseau standard.

Bibliographie

- [1] L.J. Libois, "La genèse des télécommunications et les grandes mutations techniques", in Réalités industrielles (Annales des Mines), avril 1993.
- [2] R. E. Bruce, "Introduction to Satellite Communication", third edition, Artech House, 2008.
- [3] J. Pares et V. Toscer, "Les systèmes de télécommunications spatiales," Ecole nationale supérieure de techniques avancées, Paris, 1975.
- [4] G. Maral, "Système de télécommunications par satellite", Technique de l'ingénieur E 7560, 1995.
- [5] P. Morreale and K. Terplan, "CRC Handbook of Modern Telecommunications", Second Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, 2010.
- [6] M. Kermani, "Modélisation des vibrations dans la communication optique par les satellites lasers", Thèse de magister, Université de Constantine, 2001.
- [7] H. Hemmati, "Near-Earth Laser Communications", CRC Press Taylor & Francis Group, 2008.
- [8] A. Jamalipour, "Low earth orbital satellites for personal communication networks", Artech House, Boston. London, 1998.
- [9] S. Ohmori, H. Wakana and S. Kawase, "Mobile satellite communications", Artech House, Boston. London, 1998.
- [10] U. Scialom, "Optimization of Satellite constellation reconfiguration", Massachusetts institute of technology, August 2003.
- [11] G. Maral, M. Bousquet and Z. Sun, "Satellite communications systems", Fifth Edition Wiley, 2009.
- [12] R. Guiziou, "Etude des trajectoires des satellites", Université Marseille, 2001.
- [13] A. Kinane, "Optimisation de la mise a poste d'une constellation de satellites", Thèse de magister, Université de Constantine, 2006.
- [14] E. Altman, A. Ferraira and J. Galtier, "Les réseaux satellitaires de télécommunications technologie et services", Edition DUNOD, Paris, 1999.
- [15] O. Mahri, "Prédiction et adaptations du changement de la fréquence Doppler dans les systèmes de communication par satellites de type LEO", Thèse de magister, Université de Constantine, 2006.
- [16] J.R. Wertz and W.J. Larson, "Space Mission Analysis and Design", Space Technology Library ed: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [17] A. E. Roy, "Orbital Motion", 3rd ed : Adam Hilder, Bristol and Philadelphia, 1988.

Bibliographie

- [18] M. Ouacifi, "Modélisation des vibrations au niveau des satellites lasers", Thèse de magister, Université de Batna, 2009.
- [19] C. C. Chen and C. S. Gardner, "Impact of random pointing and tracking errors on the design of coherent and ncoherent optical intersatellite communication links", IEEE Trans. Commun, Vol. 37, pp. 252-260, 1989.
- [20] Tanenbaum, "Computer Network", 3rd ed Prentic-Hall, 1996.
- [21] S. Arnon and N. S. Kopeika, "Laser satellite networks- vibration effects and possible solutions", Proceedings of IEEE, Vol. 85, No. 10, pp. 1646-1661, 1997.
- [22] P. Halley, "Les systems à fibres optiques", Edition Eyrolles 1985.
- [23] S. Arnon, S. R. Rotman and N. S. Kopeika, "The Performances limitations of free space optical communication satellite network due to vibrations: direct detection digital mode", Opt Eng 36, 11, pp. 3148-3157, 1997.
- [24] S. Arnon, S. Rotman, and N. S. Kopeika, "Optimum transmitter optics aperture for satellite optical communication", IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systeme, Vol. 34, No. 2, 1998.
- [25] E. Yablonivitch et al, "Optoelectronic Quantum Telecommunication Based On Spins In Semiconductors", Proceedings of the IEEE, Vol. 91, No. 5, 2003.
- [26] S. Arnon, "Optical wireless communication", Chapter in the Encyclopedia of Optical Engineering (EOE).
- [27] Les activités du leader spatial européen Astrium
<http://www.astrium.eads.net/node.php?articleid=1656>
- [28] S. Arnon, S. Rotman, and N. S. Kopeika, "Bandwidth Maximization for Satellite Laser Communication", IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systeme, Vol. 35, No. 2, 1999.
- [29] R. Händel, M.N. Huber et S. Schröder, " Comprendre ATM: concepts, protocols, applications", Addison-Wesley, France, 1995.
- [30] A. Dada et A. Bennis, "Algorithme de Contrôle Réactif de la Congestion sur un Nœud ATM", Rapport de Recherche, RIST Vol.14, No. 2, 2004.
- [31] A. Huang and C. Moreland, "Wright, Advanced Traffic Management for Multiservice ATM Networks". N.E.T. White Paper, Network Equipment Technology, Inc. USA 1998.
- [32] E.P. Rathgeb, "Modeling and Performance Comparison of Policing Mechanisms for ATM Networks", IEEE Journal on selected areas in communications, Vol. 9, No. 3, pp. 325-334, 1991.

Bibliographie

- [33]** H. Hofmann, “ Essais WAN en Mode ATM d’Applications de Radiodiffusion“, UER – Revue Technique - Hiver 1998.
- [34]** Guide to ATM Technology For the Catalyst 8540 MSR, Catalyst 8510 MSR, and LightStream 1010 ATM Switch Routers. Cisco Connection Online.
- [35]** G. Pujolle, “ Les Réseaux“, Editions Eyrolles, Paris, 2001.
- [36]** Laboratoire interfaces Capteurs & Microélectronique - Université Paul Verlaine-Metz –France. www.licm.fr/IMG/pdf/ChapitreATM.pdf.

Résumé

De nos jours, les satellites lasers sont largement utilisés du fait de leur grande importance et leurs avantages dans le monde de la communication par exemple : satellite Terra SAR-X et le satellite américain 'NFIRE'

Malgré leurs avantages, ils souffrent continuellement des vibrations à cause des sources internes et externes environnantes ce qui réduit leurs efficacités. Le fait que plusieurs études ont été faites dans le but de réduire ces pertes comme par exemple : la cellule ATM développé.

Summary

Nowadays, laser satellites are permanently used because of their huge importance and their advantages in communication world. For example Terra SAR-X satellite and the American satellite 'NFIRE'

However its advantages, they suffer permanently from vibrations due to internal and external environmental sources that reduce their efficacy.

Many studies are done in order to reduce those loss for example developed ATM cell.

ملخص

عرف العصر الحديث استعمالا واسعا للأقمار الصناعية الليزرية بسبب أهميتها البالغة وفوائدهم الجمة في عالم الاتصالات وكمثال على ذلك القمر تيرا سار اكس و القمر الأمريكي نفاير.

بالرغم من كل هذه الفوائد إلا ان الأقمار الصناعية الليزرية تعاني وباستمرار من الاضطرابات بسبب عوامل داخلية وخارجية محيطة وهذا ما يسبب نقص في استقبال وإرسال المعلومات.

عدة دراسات أقيمت بهدف الحد من كمية فقدان المعلومات وتحسين درجة كفاءة القمر وكمثال على ذلك تطوير خلية 'ATM'.