

Remerciements

Ce projet de fin d'étude a été effectué au sein de la Télé Diffusion Algérienne, dirigé par monsieur **BESTAM Rachid**. Il convient donc de le remercier vivement pour nous avoir accueillis au sein de la TDA et suivis tout au long de cette période malgré les grandes responsabilités qui pèsent sur ses épaules et son emploi du temps chargé. Il convient aussi de remercier le personnel de la TDA qui a mis à notre disposition ses connaissances pratiques, en particulier **Hamza, Mustapha, Mohammed, et Azzedine**.

Nos remerciements vont aussi à monsieur **LAGHA Mohand**, professeur à l'institut d'Aéronautique et des études spatiales, pour ses précieux conseils, et sa disponibilité.

Nous adressons notre reconnaissance et notre gratitude à monsieur **BOUKRA Fouad**, le chef du service Radar au sein de l'ENNA, pour l'intérêt qu'il a montré à notre projet et pour nous avoir si bien accueillis.

Nous tenons à remercier nos famille de nous avoir soutenu. Sachant que nous ne serons jamais assez reconnaissants envers nos parents qui ont toujours tout mis en œuvre pour qu'on s'épanouisse dans tous ce qu'on entreprend.

Nous remercions nos amis, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Nous remercions aussi les membres du jury d'avoir accepté de siéger et de juger notre travail.

Sommaire

Remerciements

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Résumé

Abstract

Introduction générale

Présentation de la TDA

Chapitre 1 :	Généralités sur la télécommunication par satellite	
.....		1
1.1.	Introduction	
.....		2
1.2.	La télécommunication par satellite	
.....		2
1.3.	Les satellites	
.....		3
1.4.	Classification des satellites	
.....		4
1.4.1.	Classification par orbites	
.....		4
1.4.2.	Classification par fonctionnement interne	
.....		5
1.5.	Zones de couverture	
.....		6

1.6.	Les systèmes de communication par satellite	7
1.7.	Les techniques d'accès aux canaux satellitaires	9
1.8.	Les services de télécommunications par satellites	10
1.9.	DVB comme norme de communication spatiale	10
1.10.	Conclusion	11

Chapitre 2 : Le standard DVB-S et son amélioration le DVB-S2

2.1.	Généralités	13
2.1.1.	Les flux de transport MPEG2-TS	14
2.1.2.	Paquets MPEG2-TS	15
2.2.	Chaîne de transmission DVB-S	17
2.2.1.	Adaptation du multiplex et brassage	17
2.2.2.	Codage Reed-Solomon	18
2.2.3.	Entrelacement	19
2.2.4.	Codage convolutif	20

2.2.5. Adaptation du signal au canal de transmission	22
2.3. La deuxième génération de DVB-S	25
2.3.1. Caractéristiques du DVB-S2	26
2.3.2. Chaîne de transmission DVB-S2	26
2.3.3. Application du DVB-S2	32
2.4. Conclusion	32
Chapitre 3 : Montage et paramétrage de chaînes de transmission DVB-S et DVB-S2	
3.1. Introduction	34
3.2. Travail effectué	34
3.3. Montage et tests	34
3.3.1. Test d'occupation spectrale	34
3.3.2. Test en boucle locale DVB-S/DVB-S2	38
3.3.3. Chaîne de transmission DVB-S/DVB-S2 sur le satellite SES4	42
3.3.4. Simulation des chaînes DVB-S et DVB-S2 en utilisant Matlab	49

3.3.5.	Courbes comparatives	54
3.4.	Conclusion	57

Chapitre 4 : La norme DVB-S en Aéronautique

4.1.	Historique	59
4.2.	Le Datalink et le concept CNS/ATM	60
4.3.	Les classes de communications sol bord	61
4.4.	Les systèmes de communications de données	63
4.4.1.	Les systèmes de communications de données pour le contrôle aérien	63
4.4.2.	Les systèmes de communication de données pour les passagers	64
4.5.	Les limites des systèmes existants et les perspectives	65
4.6.	Accès satellite DVB-S2/RCS	66
4.6.1.	Lien aller DVB-S2	66
4.6.2.	Lien retour DVB-RCS	67
4.7.	Le lien DVB-RCS comme support de données Radar	68

4.7.1. Présentation de l'Etablissement Nationale de la Navigation Aérienne	69
4.7.2. Le Service Radar de l'ENNA	69
4.7.3. Le système RADAR	69
4.7.4. Solution VSAT	71
4.7.5. Réseau VSAT de l'ENNA	72
4.7.6. Le transfert des données Radar via le VSAT	73
4.8. Solution DVB- RCS	75
4.8.1. Le système MENOS	76
4.8.2. Le système MENOS de la TDA	77
4.8.3. Le MENOS pour le transfert des données radar	77
4.9. Conclusion	79

Conclusion générale et perspectives

Bibliographie

Annexes

Liste des Figures

Figure a.1. Schéma représentant la restructuration de la RTA	4
Figure a.2. Organigramme de la TDA	5
Figure a.3. Téléport de BOUCHAOUI	6
Figure a.4. Station DSNG	7
Figure a.5. Equipement de la station DSNG	7
Figure a.6. Stations terrestres du téléport de BOUCHAOUI	8
Figure a.7. Stations TV/RO en bande C & Ku du téléport	8
Figure 1.1 : Couverture de sud Algérien via le satellite SES4@22°West	11
Figure 1.2 : Schéma synoptique d'un satellite de télécommunication	12
Figure 1.3 : Orbites LEO, MEO et GEO	13
Figure 1.4 : Couverture globale de la terre via trois satellites géostationnaires	14
Figure 1.5 : Couverture du satellite Eutelsat5WA@5°West	15

Figure 1.6 : Architecture de base d'un système de transmission par satellite	16
Figure 1.7 : Schéma synoptique d'une station terrienne	16
Figure 1.8 : Techniques d'accès aux canaux satellitaires	17
Figure 1.9 : Le système DVB-S	19
Figure 2.1 : Le standard DVB-S et ses concurrents dans le monde	22
Figure 2.2 : Multiplexage MPEG2-TS	23
Figure 2.3 : Détail d'un paquet MPEG-2 TS et son en-tête	24
Figure 2.4 : Encapsulation d'un PES dans des paquets MPEG2-TS via <i>data-streaming</i>	25
Figure 2.5 : Chaîne de transmission DVB-S	26
Figure 2.6 : Schéma de l'embrouilleur/désembrouilleur	27
Figure 2.7 : Trame DVB après codage RS	27
Figure 2.8 : Raccourcissement du code Reed Solomon	28
Figure 2.9 : Principe de l'entrelacement	29
Figure 2.10 : Principe du codage convolutif	30

Figure 2.11 : Réponse fréquentielle du filtre de Nyquist normalisée à $1/T_s$	31
Figure 2.12 : Réponse temporelle du filtre de Nyquist normalisée à T_s	31
Figure 2.13 : La modulation QPSK	32
Figure 2.14 : Schéma fonctionnel de la chaîne d'émission DVB-S2	35
Figure 2.15 : Le bloc d'adaptation	36
Figure 2.16 : Structure d'une BBFrame	36
Figure 2.17 : Format d'une trame après codage BCH	37
Figure 2.18 : Format d'une trame après codage LDPC	38
Figure 2.19 : Schéma d'entrelacement dans le cas d'une modulation 8PSK	39
Figure 2.20 : Schéma de constellation 16APSK	39
Figure 2.21 : Format de la trame de la couche physique	40
Figure 2.22 : Facteurs de Roll-Off utilisés en DVB-S2	40
Figure 3.1 : Banc d'équipement servant au test de l'occupation spectrale	44
Figure 3.2 : Bande occupée à -3dB pour une modulation QPSK/DVB-S	45

Figure 3.3 : Bande occupée à -3dB pour une modulation 8PSK/DVB-S2	45
Figure 3.4 : La chaine de transmission en boucle locale	47
Figure 3.5 : Interface du Modulateur M6100 de NEWTEC	48
Figure 3.6 : Interface d'un IRD HD RX8200 d'ERICSSON	49
Figure 3.7 : Courbes BER vs Eb/N0 pour une boucle locale DVB-S	49
Figure 3.8 : Courbes BER vs Eb/N0 pour une boucle locale DVB-S2	50
Figure 3.9 : Chaine de transmission radiofréquence	52
Figure 3.10 : Matériels utilisés pour calculer le bilan de liaison	53
Figure 3.11 : Procédure de calibrage du puissance-mètre	53
Figure 3.12 : La chaine de transmission DVB-S/DVB-S2 sur le satellite SES4 (22°W)	55
Figure 3.13 : Courbes BER vs Eb/N0 pour une transmission réelle DVB-S	56
Figure 3.14 : Courbes BER vs Eb/N0 pour une transmission réelle DVB-S2	57
Figure 3.15 : Schéma synoptique du code de la chaine d'émission/réception	59
Figure 3.16 : Interface graphique Curve Simulator DVB-S	60

Figure 3.17 : Interface graphique Curve Simulator DVB-S2	60
Figure 3.18 : Courbes du BER vs Eb/No pour la chaine DVB-S	61
Figure 3.19 : Courbes du BER vs Eb/No pour la chaine DVB-S2	62
Figure 3.20 : Courbes comparatives pour QPSK 2/3	63
Figure 3.21 : Courbes comparatives pour QPSK 3/4	63
Figure 3.22 : Courbes comparatives pour QPSK 2/3	64
Figure 3.23 : Courbes comparatives pour QPSK 3/4	64
Figure 3.24 : Courbes comparatives pour 8PSK 3/5	64
Figure 3.25 : Courbes comparatives pour 8PSK 3/4	65
Figure 4.1 : Prévisions de l'augmentation du Trafic aérien en Europe	69
Figure 4.2 : Les classes de communications sol bord	71
Figure 4.3 : Les systèmes de communications pour le contrôle aérien	72
Figure 4.4 : Réseau d'accès DVB-S2/DVB-RCS	75
Figure 4.5 : Méthode d'accès pour le lien retour DVB-RCS (MF-TDMA)	76

Figure 4.6 :	La couverture radar en Algérie	78
Figure 4.7 :	Diagramme des stations Radar (PSR, MSSR)	79
Figure 4.8 :	Principe du concept VSAT	81
Figure 4.9 :	Configuration du réseau VSAT de l'ENNA	82
Figure 4.10 :	Schéma synoptique du transfert des données radar via deux supports différents.....	83
Figure 4.11:	Répartition des porteuse VSAT sur le spectre de fréquence	85
Figure 4.12 :	Schéma synoptique du réseau MENOS basée sur le DVB-RCS	86
Figure 4.13.	Optimisation de la bande passante par l'utilisation d'un système DVB-RCS.....	88
Figure 4.14.	MDM 3300 Satellite Modem	88

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Illustration de la technique de poinçonnage	30
Tableau 2.2 : Evolution du standard de communication par satellite	34
Tableau 2.3 : Types de données pour un système de transmission DVB-S2	35
Tableau 2.4 : Paramètres de codage BCH pour une trame normale	37
Tableau 2.5 : Polynômes générateurs des codes BCH	38
Tableau 3.1 : Données du test d'occupation spectrale	44
Tableau 3.2 : Valeurs mesurées à la sortie de l'HPA	54
Tableau 3.3 : Paramètres d'émission	55
Tableau 3.4 : Paramètres de l'antenne	55
Tableau 4.1 : Evolution du nombre de canaux VHF pour les communications aéronautiques	68
Tableau 4.2 : Performances des services multimédias	73
Tableau 4.3 : Les modes FMT	77

Liste des Abréviations

8PSK	8-Phase Shift Keying.
16-APSK	16-Amplitude And Phase Shift Keying.
32-APSK	32-Amplitude And Phase Shift Keying.

A

AMRT	Accès multiple à répartition dans le temps.
AMRF	Accès multiple à répartition en fréquence.
AMRC	Accès Multiple à Répartition par Code.
ACM	Adaptative Code Mode.
ATC	Air Traffic Control.
ATS	Algérie Télécom Satellite.
ASI	Asynchronous Serial Interface.
ANASTASIA	Airborne New And Advanced Satellite Techniques And Technologies in A System Integrated Approach.
ARINC	Aeronautical Radio INCorporated.
ATM	Air Traffic Management.
ATM	Asynchronous Transfer Mode.
ACARS	Aircraft Communications Addressing and Reporting System.
ATN	Aeronautical Télécommunication Network.
APC	Aeronautical Passenger Communication.
AAC	Aeronautical Administrative Communication.
AOC	Aeronautical Operational Control.
ATSC	Air Traffic Services Communication.
ASBU	Arab States Broadcasting Union.

B

BBFRAME	Base Band Frame.
----------------	------------------

BCH	Bose-Chaudhuri-Hochquenghem Code.
BER	Bit Error Ratio.
BP	Bande Passante.

C

CDMA	Code Division Multiple Access.
CRC	Cyclic Redundancy Check.
CCM	Constant Coding And Modulation.
CCR	Centre De Contrôle Régional.
CNI	Carrier to Noise And Interference Ratio.
CNS	Communication/Navigation/Surveillance.
CPDL	Controller Pilot Data Link Communications.

D

DTH	Direct To Home.
DVB	Digital Video Broadcasting.
DVB-S	Digital Video Broadcasting By Satellite.
DVB-S2	Digital Video Broadcasting By Satellite version 2.
DVB-C	DVB-Cable.
DVB-T	DVB– Terrestrial.
DVB-RCS	DVB Return Channel by Satellite.
DF	Data Field.
DSNG	Digital Satellite News Gathering.

E

ES	Elementary Stream.
ETSI	European Télécommunications Standards Institute.
ENNA	Etablissement National de la Navigation Aérienne.

F

FEC	Forward Error Correction.
FI	Fréquence Intermédiaire.
FDMA	Frequency Division Multiple Access.
FANS	Future Air Navigation System.

G

GEO	Geostationary Earth Orbit.
GW	Gateway.

H

HPA	High Power Amplifier.
HD	High Definition.

I

IP	Internet Protocol.
IRD	Integrated Receiver Decoder.

L

LEO	Low Earth Orbit.
LDPC	Low Density Parity Check.

M

MEO	Medium Earth Orbit.
MPEG-2	Moving Picture Expert Group 2.
MPEG-2TS	MPEG2 Transport Stream.
MODCOD	Coding and Modulation.
MFTDMA	Multi Frequency Time Division Multiple Access.
MCPC	Multi Channel Per Carrier.
MRS	Management ressources satellite.

MENOS Multimedia Exchange Network Over Satellite.

MAC Media Access Control.

N

NEXTGEN Next Generation Air Transportation System.

NMS Network Management Stream.

O

OACI Organisation De L'Aviation Civile Internationale.

P

PES Packet Elementary Stream.

PID Packet Identifier.

PUSI Payload Unit Start Indicator.

PIRE Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente.

Q

QPSK Quadrature Phase Shift Keying.

R

RF Radiofréquence.

RF-LNB Radiofréquence-Low Noise Block.

RS Reed-Solomon.

RHP Radar Head Processor.

Radar Radio Detection And Ranging.

RCP Required Communication Performance.

S

SD Standard Definition.

SCPC Single Channel Per Carrier.

SDI	Serial Interface Digital.
SR	Symbol Rate.
SIT	Small Interactif Terminal.

T

TDA	Télédiffusion Algérienne.
TDMA	Time Division Multiple Access.
TEB	Taux D'erreurs Binaire.

U

UHF	Ultra High Frequency.
UPL	User Packet Length.
UMC	Unit Of Monitoring And Control.
UIT	Union Internationale des Télécommunications.
UER	Union Européenne de Radiodiffusion.
UAR	Union Africaine De Radiodiffusion.

V

VBR	Variable Bit Rate.
VHF	Very High Frequency.
VSAT	Very Small Aperture Terminal.
VDL	VHF Datalink.

Résumé

Le présent mémoire consiste en une étude de la norme DVB-S et de son amélioration DVB-S2 pour la transmission et diffusion par satellite.

De récentes études ont démontrés que ces normes seraient un moyen fiable et viable dans la résolution du problème de la saturation des canaux réservés aux communications aéronautiques et répondraient aux besoins de la communauté aéronautique en matière de sécurité, de capacité et de disponibilité. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet de fin d'étude.

Ainsi, des tests de performance ont été réalisés sur le terrain, et cela en effectuant des mesures d'émission et réception par la modification de plusieurs paramètres, comme la puissance du signal à l'émission, le type de modulation, ainsi que le FEC. Les résultats obtenus en boucle locale et en émission réelle sont comparés à des résultats de simulation faits sous Matlab.

Enfin, ce mémoire aborde le sujet du problème récurrent de synchronisation des stations VSAT au niveau de l'ENNA, et la norme DVB-RCS comme future solution.

Abstract

The actual work involves a study of the first and second generation of the Digital Video Broadcasting by Satellite standards.

Recent studies have shown that these norms would be a reliable and viable mean for the resolution of the aeronautical communication channels saturation, and would answer aeronautical community expectations in term of capacity, security, and availability. Our project takes place in this context.

Performance tests were realized on the field by making emission/reception measures, and changing several parameters like the signal power, the modulation type, and the forward error correction factor. The obtained results were then compared with those achieved by Matlab simulation.

Finally, the DVB-RCS is presented for the Aerial Navigation National Establishment as a future solution for their VSAT stations recurrent synchronization problem.

يتطرق هذا المشروع إلى دراسة جيلِيّ

دراسات حديثة أثبتت أنّ بإمكان هاذين النموذجين علاج مشكلة تشبّع سبل التواصل المخصّصة للمكالمات الجويّة. هاذين النموذجين سيسمحان لعالم الطيران بالوصول إلى مبتغاه، من حيث المقدرة .

تجارب جودة قد أنجزت في الميدان وذلك عبر القيام بعدّة قياسات بعد إجراء تعديلات على عدّة عوامل كاستط الإشارة ونوع الترميز. يتمّ بعد ذلك مقارنة النتائج المتحصّل عليها بنتائج المحاكاة.

أخيرًا يتمّ عرض هذا النموذج كحلّ لمشكلة التزامن، الموجودة على مستوى المؤسسة الوطنية للملاحة الجويّة.

Introduction Générale

Le consortium européen a lancé en 1993 un projet dont le but est de définir un ensemble de standards œuvrant à développer l'utilisation de la télévision numérique connu sous le nom du projet DVB (Digital Video Broadcasting). Ce dernier a connu dès lors un essor remarquable dans les quatre coins du globe, et s'est attaché à développer des solutions complètes pour la télévision numérique, allant de la diffusion terrestre (DVB-T), par câble(DVB-C), jusqu'à la diffusion par satellite (DVB-S). Dans notre mémoire nous-nous intéressons au type de diffusion par satellite.

En 2003, on a vu la naissance de la norme DVB-S2 pour la transmission des programmes télévisés en qualité HD. Plus tard, dans un contexte d'un besoin en lien retour pour des applications interactives la norme DVB-RCS (Return Channel by Satellite) a vu le jour.

Les normes d'accès satellitaires DVB-S2 et DVB-RCS ont récemment été adoptées par l'OACI afin d'augmenter la capacité des services ATC et fournir d'autres services interactifs pour les passagers.

Nous avons organisé notre mémoire de la manière suivante :

Le premier chapitre présente un Etat de l'art, dans lequel nous abordons le sujet des télécommunications satellitaires dans le monde de la télévision numérique.

Le deuxième chapitre définit l'architecture et les rouages du standard DVB-S et de son amélioration le DVB-S2.

Le troisième chapitre illustre les résultats obtenus au cours de notre stage à la TDA (Télé Diffusion d'Algérie) ainsi que ceux obtenus par simulation Matlab.

Le dernier chapitre parle de l'application de cette norme en Aéronautique, ainsi que l'utilisation de celle-ci comme future solution aux problèmes récurrents de synchronisation des stations VSAT au niveau de l'ENNA (Etablissement National de la Navigation Aérienne).

Présentation de l'organisme d'accueil : TDA

- de l'union internationale de télécommunications (UIT) ;
- de l'union européenne de radiodiffusion (UER) ;
- de l'union des radios télévisions arabes (ASBU) ;
- de l'union des radios télévisions nationales africaines (UAR) ;
- **L'organisation de la TDA :**

Compte tenu de l'étendue et de la configuration géographique du territoire national, l'établissement est organisé de telle manière à lui permettre de maintenir un certain équilibre entre les différentes régions du pays, en ce qui concerne la couverture médiatique d'une part, et l'utilisation rationnelle et efficace des équipements de diffusion et de transmission, d'autre part. L'organigramme suivant peut résumer l'organisation de la TDA :

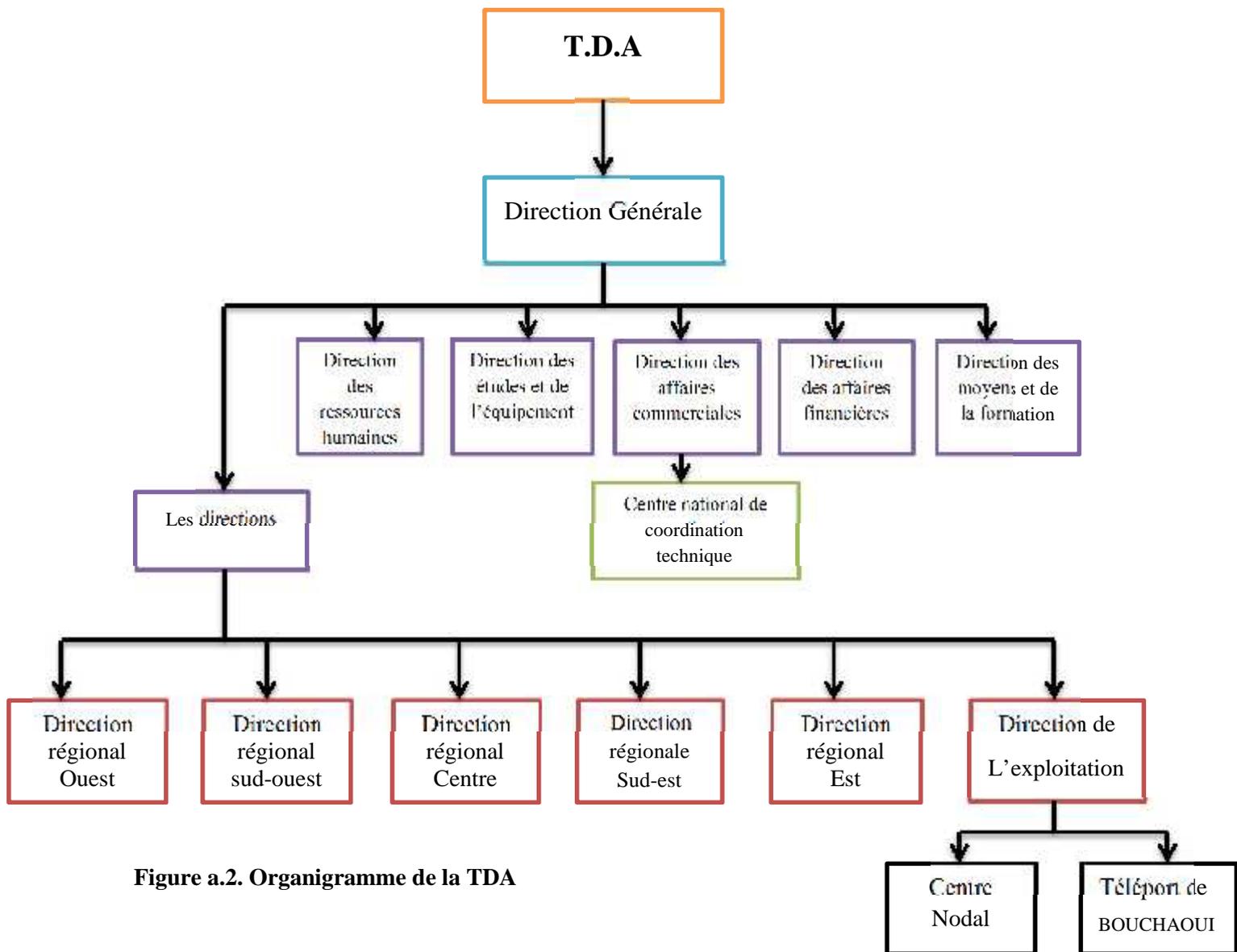


Figure a.2. Organigramme de la TDA

Dans le cadre de la préparation de diplôme d'Ingénieur en CNS/ATM (communication, navigation, surveillance/Air Traffic Management), nous sommes amenés à effectuer un projet de fin d'études qui représente l'accomplissement de notre second cycle d'études supérieures. Ce projet a été effectué au sein du Téléport de BOUCHAOUI, que nous allons le présenter dans ce qui suit :

II. Présentation du téléport de BOUCHAOUI :



Figure a.3. Téléport de BOUCHAOUI

Depuis sa création, en Juin 1971, le téléport de BOUCHAOUI a connu une progression et une extension qualitative, tendant à concrétiser l'objectif poursuivi qui est d'assurer d'une part des services de contribution et d'échanges au profit des organismes nationaux ENTV et ENRS et internationaux, tels que ASBU, UAR et UER au moyen de ses stations de réception TVRO.

La station d'émission/réception ASBU opère sur les satellites Arabsat depuis Août 2000. L'objectif atteint progressivement consiste en une présence des programmes algériens, la plus large possible, en commençant par les régions privilégiées, comme l'Europe, le Monde Arabe, l'Afrique et l'Amérique du Nord. L'Amérique Latine, l'Asie et l'Océanie pourraient constituer les cibles futures en fonction des choix politiques.

➤ **Moyens du téléport :**

1. Station mobile DSNG :

Il est important aussi de rappeler l'opportunité de l'acquisition d'une station mobile de diffusion par satellite en 1998 pour répondre essentiellement aux exigences du flux et de la ponctualité de l'information. Cette station par sa mobilité permet la retransmission par satellite des événements nationaux et internationaux instantanément, à partir des différents points. LA DSNG opère en bande K.U et C (Analogique et Numérique).



Figure a.4. Station DSNG

Cette station comprend les mêmes équipements que celles d'une station d'émission/réception terrestre c.à.d. une partie bande de base et une partie RF.



Figure a.5. Equipement de la station DSNG

CHAPITRE 1

Généralités sur la télécommunication par satellite

1.1. Introduction :

De nos jours, la télécommunication est devenue indispensable dans la vie quotidienne des citoyens car elle fournit une quantité infinie d'informations en temps réel et des services tels que la téléphonie, l'internet et l'intranet, elle contribue ainsi de façon importante au développement de la société. En général, un système de communication est composé de trois parties ; un émetteur, un support de transmission (câble ou canal de transmission) et un récepteur. Parmi les supports de transmission existants, le satellite occupe une place importante dans ce domaine, car il a le privilège d'assurer une grande couverture via sa position spatiale.

Dans ce chapitre, on fait rappeler quelques bases sur les satellites ainsi que leur rôle dans le domaine des télécommunications. Ensuite, on fait introduire le DVB comme norme de communication spatiale.

1.2. La télécommunication par satellite :

Les communications par satellite sont le fruit de recherches menées dans le domaine des télécommunications et des technologies spatiales. La course vers l'espace débutera en **1957** par le lancement d'un premier satellite nommé *Sputnik*. En **1965**, l'entreprise Intelsat a lancé le premier satellite commercial appelé *EarlyBird* sur l'orbite géostationnaire [1]. Le problème de ces premiers satellites était le coût élevé des stations terriennes ainsi que le satellite lui-même. Les avancées importantes dans le domaine des transmissions et techniques de codage ont permis à ce relais de devenir compétitif en tant que réseau d'accès, car il ne nécessite pas d'infrastructures lourdes et coûteuses.

Aujourd'hui, et via la numérisation de l'information, les satellites offrent des bouquets de services et sont aussi utilisés pour relier deux ou plusieurs points distants, et ce afin de compléter la couverture des réseaux terrestres dans des points où l'accès est difficile. Cela est intéressant vu la grande zone de couverture des satellites. Cet avantage est utilisé par la télédiffusion algérienne TDA afin d'assurer la couverture du sud algérien où le réseau terrestre devient coûteux vu la grande surface. Pour cela une station terrienne a été installée en **2000** au téléport de BOUCHAOUI pour arroser les émetteurs au sud et aux points d'ombre via le satellite *SES4@22°West*. Cette configuration est illustrée dans la figure 1.1.

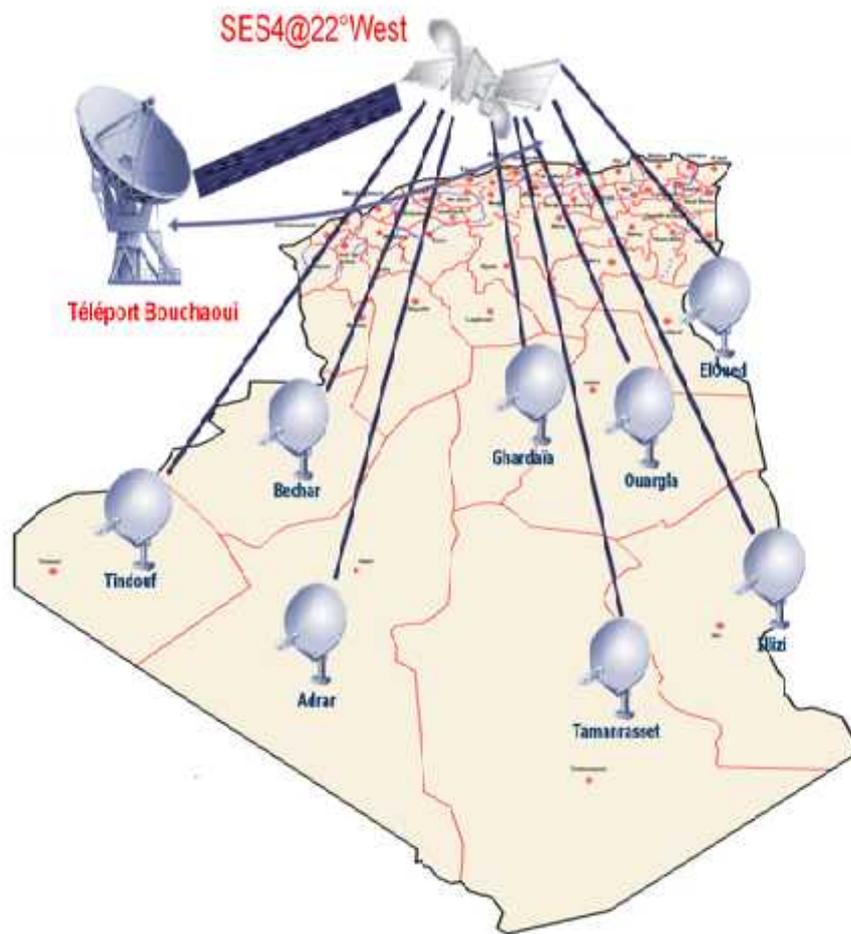


Figure 1.1 Couverture de sud Algérien via le satellite SES4@22°West

1.3. Les satellites :

Un satellite est constitué d'une plateforme « *service module* » qui permet de le garder en poste dans l'espace et d'une charge utile « *Payload* » permettant de remplir sa mission. Pour un satellite de télécommunication, elle est constituée d'antennes et de plusieurs transpondeurs de capacité allant de 36 jusqu'à 72 MHz, qui ont comme rôle de recevoir, amplifier et retransmettre les signaux vers la terre sur différentes fréquences. Les bandes de fréquences utilisées par les satellites de communication en réception et émission sont ; la bande C de 3.4 à 7 GHz, la bande Ku de 10.70 à 14.50 GHz et la bande Ka de 26 à 40 GHz [2].

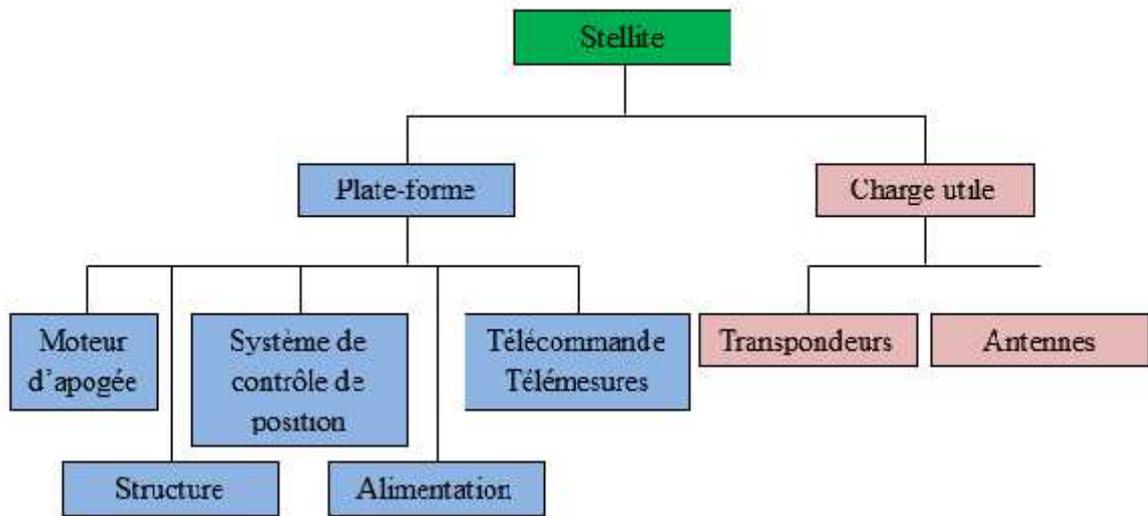


Figure 1.2. Schéma synoptique d'un satellite de télécommunication

1.4. Classification des satellites :

Les satellites sont classés en fonction de deux paramètres ; suivant la hauteur de leurs orbites et leurs fonctionnements interne :

1.4.1. Classification par orbites :

En générale, les satellites sont nommés par rapport à leurs orbites de rotation. On peut distinguer plusieurs orbites qui sont caractérisées par leurs hauteurs par rapport à la surface de la terre, la figure 1.3 montre les principales orbites utilisées pour la télécommunication spatiale :

1. Les satellites **LEO** (Low Earth Orbit), représente les satellites en orbites basse de plusieurs centaines de kilomètres ;
2. Les satellites **MEO** (Medium Earth Orbit), évoluant sur des orbites de hauteur médiane de 8 000 à 12 000 Km ;
3. Les satellites **GEO** (Geostationary Earth Orbit), ayant une trajectoire calée sur celle de la terre dans un plan voisin de l'équateur. Ils évoluent à une altitude de 35 838 Km et tournent avec une vitesse qui suit celle de la terre [3].

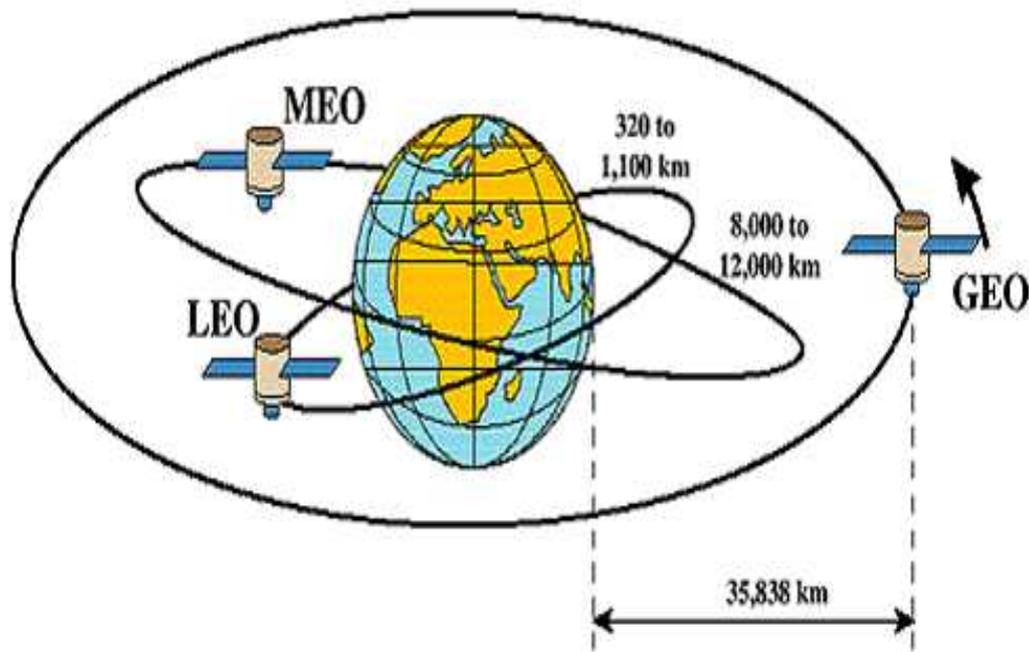


Figure 1.3. Orbites LEO, MEO et GEO

1.4.2. Classification par fonctionnement interne :

On peut aussi classer les satellites suivant leur fonctionnement interne. Les satellites les plus simples sont nommés transparents, ce qui signifie que leur charge utile ne fait aucun traitement sur le signal, sauf sa réception, amplification et son émission sur une autre fréquence. Un satellite avec une intelligence embarquée est qualifié de régénératif car il décode le signal reçu pour pouvoir effectuer un traitement (recodage, multiplexage, etc.) et le réémettre vers la terre sur une autre fréquence. Il existe des satellites qui font le fonctionnement hybride, c'est-à-dire qu'ils réalisent le traitement sur une partie du trafic total, le reste sera transposé sans traitement. Comme exemple, il existe chez la TDA une station qui diffuse sur le satellite Hotbird@13°Est avec une technologie SKYPLEX (FLEXIBLE DIGITAL SATELLITE TELECOMMUNICATION) leur charge utile permet de multiplexer les signaux reçus après décodage. La station au sol est équipée d'un système de poursuite très poussé et d'une partie responsable de la synchronisation entre le multiplexeur du satellite et les équipements de la station afin de permettre la variation des débits au niveau des codeurs, car le multiplexage du satellite est en VBR (Variable Bit rate).

1.5. Zone de couverture d'un satellite :

La zone de couverture dépend de la hauteur de l'orbite qui abrite le satellite, plus la distance terre-satellite est importante plus la zone de couverture devient large. Aussi un satellite peut avoir plusieurs zones de couverture qui dépendent du nombre d'antenne constituant la charge utile. Avec trois satellites géostationnaires distants de 120° entre eux on peut assurer une couverture globale de la terre comme montre la figure 1.4 [4].

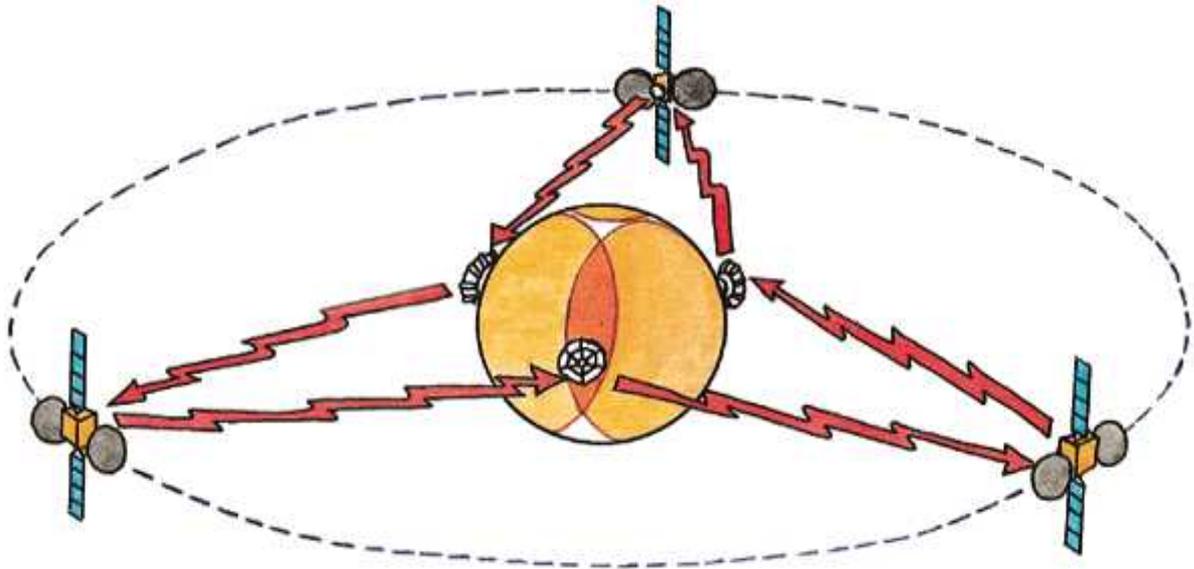


Figure 1.4. Couverture globale de la terre via trois satellites géostationnaires

Pour chaque zone de couverture il existe un diagramme de rayonnement correspondant, ce diagramme dessine les contours des niveaux de réception au sol (voir figure 1.5) [5]. Plus la zone de couverture est grande plus la puissance reçue au sol est faible, ce qui implique une utilisation d'une antenne de réception plus grande. Le diagramme de rayonnement d'un satellite dépend de la forme et le gain de l'antenne, de l'unité utile ainsi que du canal de transmission. La puissance reçue au sol peut être calculée comme suit :

$$P_r(\text{dB}) = P_e(\text{dB}) + G_a - \text{Att}(\text{dB}) \quad (1.1)$$

Sachant que :

P_e : Représente la puissance d'émission du satellite.

G_a : Le gain d'antenne de l'unité utile.

Att : L'atténuation du canal plus celle du couplage.

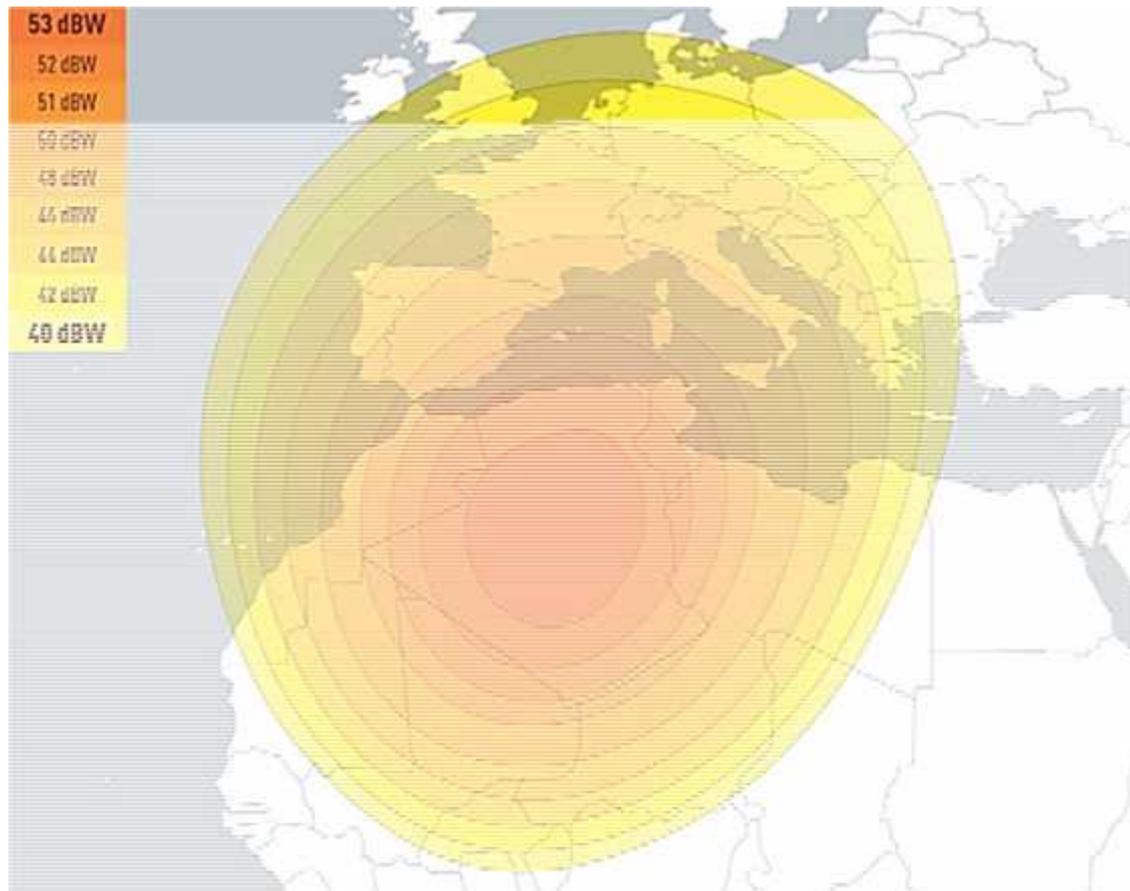


Figure 1.5. Couverture du satellite Eutelsat5WA@5°West

Vue les puissances importantes délivrées par ce satellite, la TDA a acquis un transpondeur de 36 MHz en bande Ku, pour assurer une diffusion DTH (Direct To Home) et la distribution au niveau national en même temps. La station terrienne diffuse actuellement 59 services avec les paramètres de réception suivants : la fréquence 11059 MHz, polarisation verticale et un facteur de correction d'erreur (FEC) égale à 3/4.

1.6. Les systèmes de communication par satellite :

En générale, l'architecture de base d'un système de transmission par satellite s'articule autour d'un secteur terrien représenté par les stations terriennes réparties dans des endroits distants, d'un secteur spatial représenté par le satellite et sa station de contrôle qui assure la connexion des différentes stations terriennes hébergées dans sa zone de couverture comme le montre la figure 1.6.

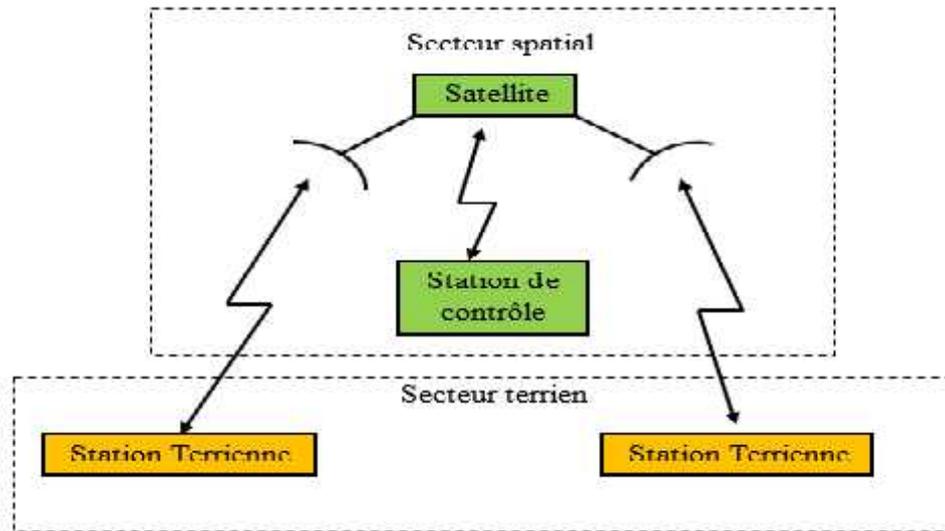


Figure 1.6. Architecture de base d'un système de transmission par satellite

La figure 1.7 représente les principaux blocs d'une station terrienne permettant de faire l'émission ainsi que la réception du et vers le satellite.

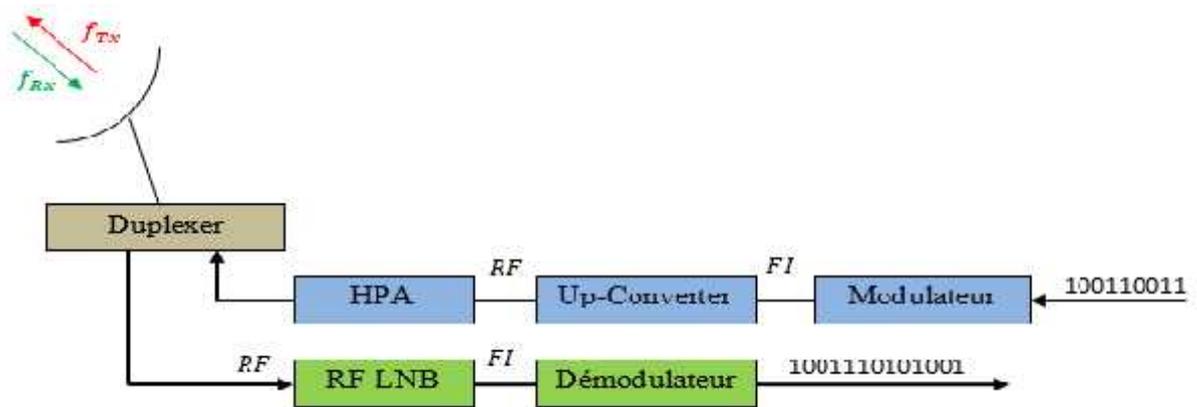


Figure 1.7. Schéma synoptique d'une station terrienne

Les blocs en bleu constituent la chaîne d'émission alors que les blocs en vert représentent la partie réception.

1. Partie émission :

1. Modulateur : comprend deux parties, une première qui assure un traitement numérique afin d'insérer les bits de codage du canal, et une deuxième responsable de la transposition du

signal numérique vers un signal analogique (création de la porteuse) de fréquence FI (fréquence intermédiaire).

2. Up-Converter : c'est un mélangeur de fréquence, il transpose la fréquence reçue depuis le modulateur (fréquence intermédiaire) vers une fréquence RF (Radio fréquence).

3. HPA (High Power Amplifier) : ça assure l'amplification du signal radio pour le rendre plus résistant aux différentes atténuations du canal de transmission.

2. Partie réception :

1. RF-LNB (Low Noise Block) : cet élément assure l'amplification et la transposition des signaux radio reçus depuis le satellite vers des signaux en fréquence FI.

2. Démodulateur : il fait le travail inverse du modulateur ; transpose les signaux analogiques en signaux numériques qui seront décodés par la suite.

3. Duplexeur : c'est un filtre passif qui assure la séparation des signaux RF de la partie émission et ceux de la partie réception afin d'éviter un chevauchement entre les deux bandes Rx et Tx.

1.7. Les techniques d'accès aux canaux satellitaires :

La politique d'accès aux canaux satellitaires est mise en place afin de permettre à plusieurs utilisateurs d'accéder à un même canal de transmission, afin d'assurer une exploitation maximale des transpondeurs avec le moins d'interférences possibles. C'est pourquoi, il est souhaitable de mettre en œuvre des techniques de partage des ressources spatiales communes. Les trois grandes politiques d'accès aux canaux satellitaires sont : AMRF, AMRT, AMRC, comme c'est montré dans la figure 1.8 [6].

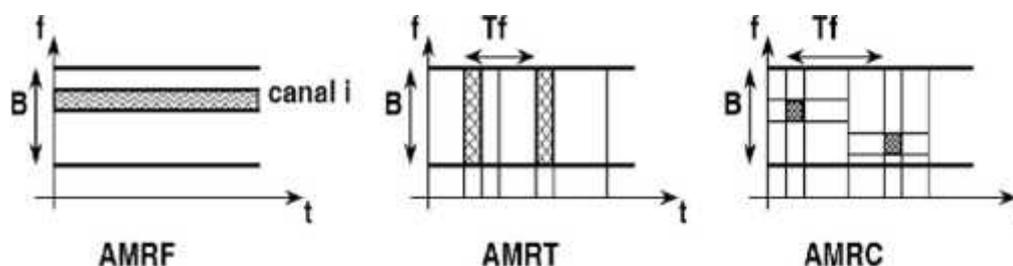


Figure 1.8. Techniques d'accès aux canaux satellitaires

1.7.1. L'AMRF (FDMA) : (Accès multiple à répartition en fréquence)

Cette méthode a été l'une des premières utilisées. Pour N stations, on découpe la bande passante du transpondeur en N sous-bandes. Chaque sous-bande est assignée à une station et lui permet d'émettre simultanément mais indépendamment des autres stations.

1.7.2. L'AMRT (TDMA) : (Accès multiple à répartition dans le temps)

Cette méthode est à l'heure actuelle la plus utilisée dans le domaine de la transmission par satellite. Son principe est de découper le temps en plusieurs tranches qui seront affectées aux stations terriennes. Le problème qui se pose est que si la station n'utilise pas sa tranche de temps pour émettre, il y a une perte de la tranche. D'où la nécessité de l'AMRT dynamique pour corriger ce problème.

1.7.3. L'AMRC (CDMA) : (Accès Multiple à Répartition par Code)

Le principe de cette méthode est d'allouer un canal par durée et non pas par paquet, ceci en utilisant un code identifiant chacune des stations du système de communication [7].

1.8. Les services de télécommunications par satellites :

Les satellites de télécommunications peuvent ainsi être classés en fonction des services qu'ils sont appelés à rendre : le service fixe et le service mobile par satellite. Le service fixe par satellite désigne une communication entre une station terrienne située en un emplacement fixe donné et un satellite. Tandis que le service mobile par satellite est un service entre des stations terriennes mobiles et une ou plusieurs stations spatiales, ou entre des stations spatiales utilisées par ce service. Les services regroupent les services de la téléphonie, les services de télédiffusion et enfin les services de transmission de données. Une telle classification pourrait être obsolète dans quelques années avec le développement attendu des systèmes satellitaires multimédia qui pourraient, en théorie, véhiculer n'importe quel service [6].

1.9. DVB comme norme de communication spatiale :

Comme indiqué déjà en introduction, la nature diffusante, la couverture et la grande capacité font vite des satellites géostationnaires, un support de choix pour la télévision numérique. Et avec l'arrivée du standard MPEG-2 proposant une compression réaliste pour la transmission d'un flux vidéo numérique, un standard de communication émerge en Europe

nommé « Digital Video Broadcasting » (DVB) qui se positionne comme un standard très ouvert et largement répandu [8].

Nous nous concentrons maintenant sur le fonctionnement des réseaux satellite les plus communs reposant sur les standards DVB, L'application la plus importante est donc un service de télévision utilisant un lien satellite GEO, s'appelle DVB-S (digital vidéos broadcasting-satellite) qui repose sur la norme MPEG2, et est aussi possible de transporter n'importe quel type de données (vidéos, audio, Data).

Il s'agit donc d'un système global, composé de trois éléments : un émetteur nommé passerelle ou "Gateway", qui diffuse des flux vidéo via un satellite transparent vers des terminaux récepteurs-décodeurs des programmes. Sachant que la gateway code, module et envoie ces trames en TDMA (Time Division Multiple Access) vers le satellite qui répète le signal vers les terminaux comme c'est montré dans la figure 1.9.

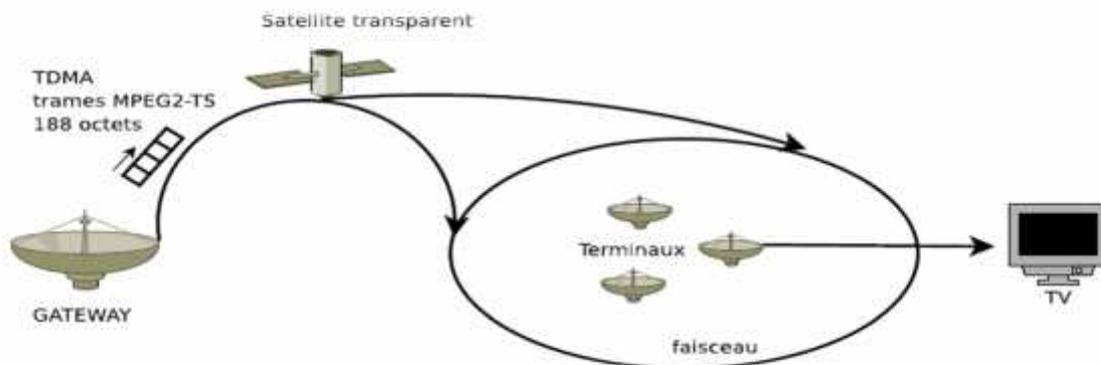


Figure 1.9. Le système DVB-S

Le besoin en interactivité est apparu avec la demande de la connectivité à Internet nécessitant un lien bidirectionnel [9]. La norme traduisant le choix du satellite pour une voie retour est le DVB-RCS (Return Channel by Satellite), utilisé pour les applications interactives, dans le cadre des systèmes DVB-S ou son amélioration DVB-S2 actuels. [10] L'utilité de cette architecture sera illustrée dans le chapitre 4 'Application Aéronautique'.

1.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé le sujet de la convergence des télécommunications vers des liaisons satellitaires. Nous avons montré les nombreuses qualités qui ont fait du satellite un moyen indispensable dans le contexte de la télévision numérique. Pour renforcer cette idée, nous avons pris la télédiffusion algérienne comme exemple qui, en dépit des nombreux supports de transmission (faisceau hertzien, fibre optique) dont elle dispose n'a pas hésité à adopter le lien satellitaire reposant sur la norme DVB.

Dans le deuxième chapitre, nous allons expliquer le fonctionnement des réseaux satellitaires les plus communs reposant sur le standard DVB.

CHAPITRE 2

Le Standard DVB-S et son amélioration DVB-S2

2.1.Généralités :

Quel que soit le type de données émis à destination des terminaux satellites (son, vidéo ou données), elles sont encapsulées dans des paquets MPEG2-TS de taille fixe (188 octets) dont la séquence crée un flux de transport MPEG2-TS. On parle également de multiplexe puisqu'il regroupe plusieurs canaux de données au sein d'une seule voie de communication. Plusieurs méthodes sont disponibles afin d'encapsuler différents types de données. Notre intérêt ici se porte à la diffusion de flux vidéo et audio qui a fait le succès du DVB-S dans le cadre de la télévision numérique. La figure 2.2 illustre les éléments participant au multiplexage des différents programmes.

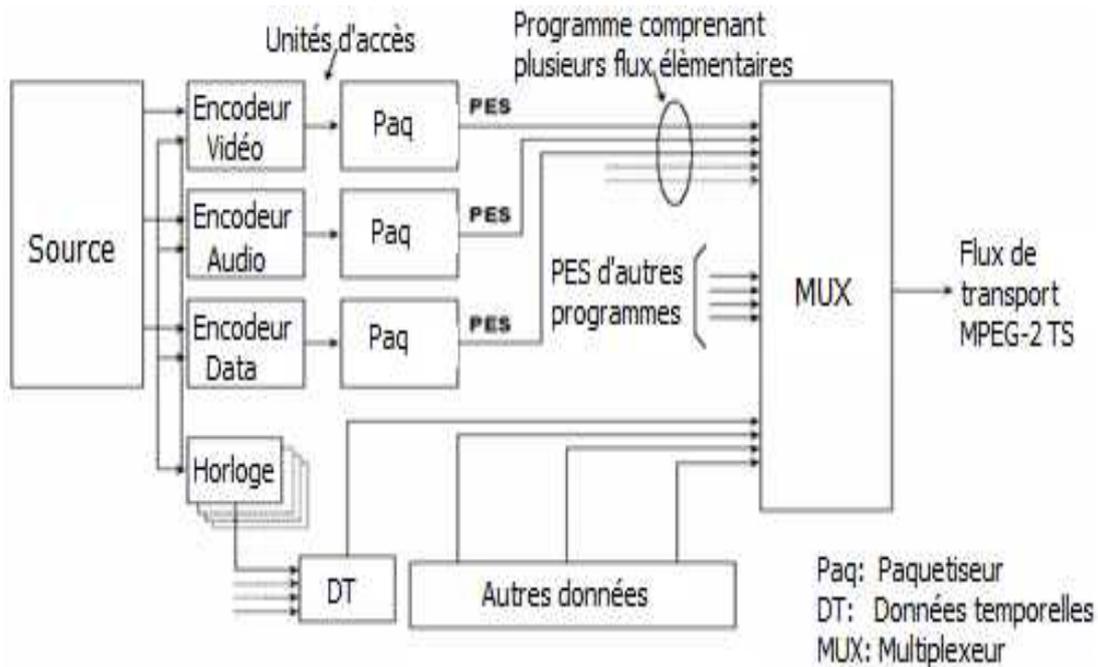


Figure 2.2. Multiplexage MPEG2-TS

Imaginons un bouquet satellite offrant différents programmes télévisuels à l'abonné. Chaque programme est constitué d'une source vidéo, d'une ou plusieurs sources audio et de données synchronisées sur la même horloge de référence (Program Clock Reference). Chaque source est compressée séparément et donne un signal brut en sortie de compression que l'on nomme flux élémentaire (ES : Elementary Stream). Ces flux élémentaires audio et vidéo continus sont ensuite encapsulés en paquets (PES : Packet Elementary Stream) selon une base temporelle commune. Chaque paquet contient ainsi une estampille temporelle et un identificateur de flux. La taille de ce paquet dépend du type d'application et peut atteindre plusieurs centaines de kilo-octets. L'ensemble des programmes du bouquet satellite décomposé en autant de PES est enfin multiplexé au sein d'un flux de transport MPEG2-TS.

Les paquets constituant ce multiplexe sont des conteneurs MPEG-2 indépendants du type de trafic véhiculé (source native MPEG2, ou IP). La méthode d'encapsulation implémentée est le *Data Streaming*. Selon ce principe, les PES sont fragmentés et insérés dans les paquets MPEG2-TS. Un paquet PES devant toujours coïncider avec le premier octet de la charge utile d'un paquet MPEG2-TS, des bits de bourrage sont alors nécessaires [12].

2.1.2. Paquets MPEG2-TS :

Les paquets MPEG2-TS sont de courts paquets de taille fixe, 188 octets. Le paquet a un en-tête de 4 octets et une charge utile de 184 octets. Toutefois l'en-tête du paquet peut être augmenté grâce à des champs optionnels, diminuant du même coup la charge utile du paquet. La figure 2.3 détaille le paquet MPEG-2 TS et son en-tête standard de 4 octets.

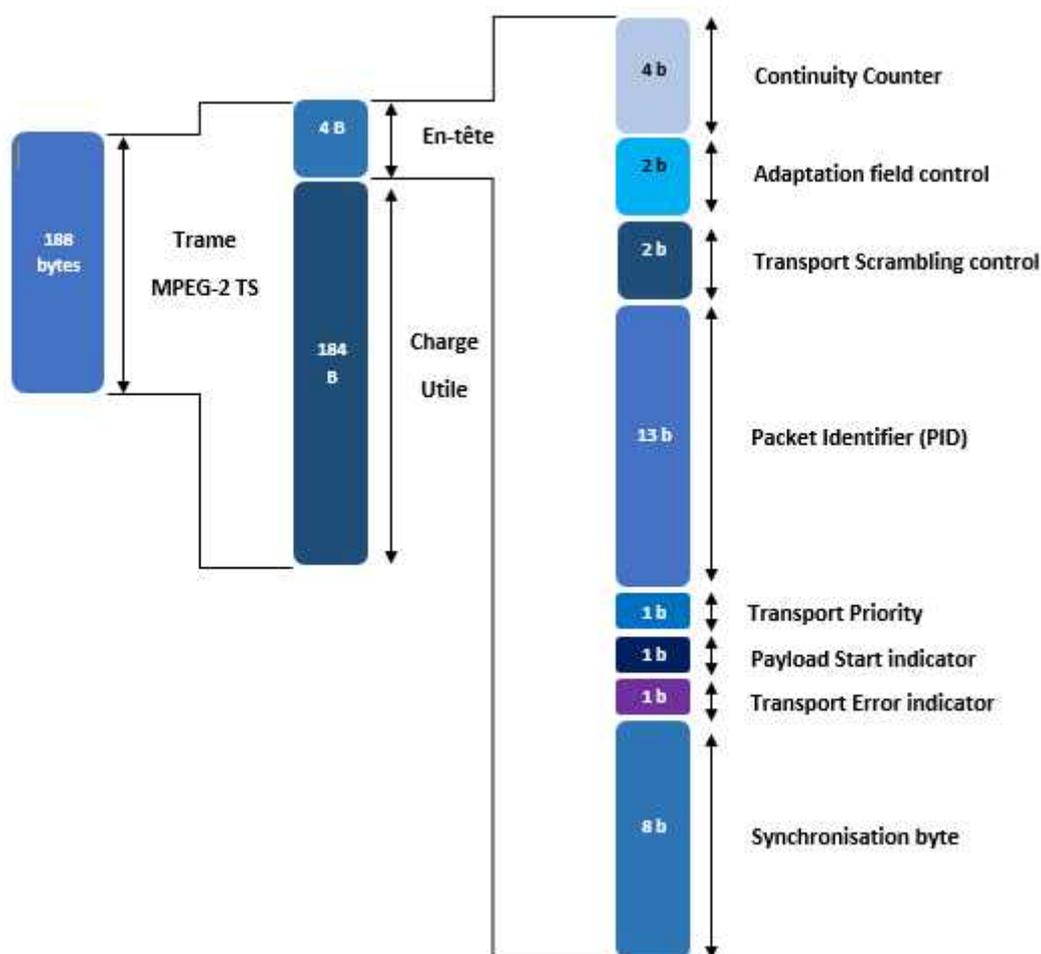


Figure 2.3. Détail d'un paquet MPEG-2 TS et son en-tête

Le format de l'en-tête MPEG-2 TS reste le même quel que soit la méthode d'encapsulation. Les champs principaux sont :

- **Synchronisation byte** : l'octet de synchronisation qui prend pour valeur 0100 0111 (0x47) et permet ainsi de détecter le début d'un nouveau paquet.
- **Payload unit start indicator** : le PUSI (1 bit) indique si le début d'un PES est présent dans ce paquet. Plus généralement, son utilisation est indiquée pour savoir si le début d'une donnée encapsulée par MPEG-TS est présent dans ce paquet.
- **PID** : composé de 13 bits, il permet d'identifier un canal logique au sein d'un multiplexe.
- **Adaptation Field Control** : ce champ (2 bits) permet de savoir si un en-tête optionnel, nommé champ d'adaptation, suit l'en-tête standard :
 - 00 : réservé pour des utilisations futures,
 - 01 : pas de champ d'adaptation, seulement des données,
 - 10 : seulement un champ d'adaptation, pas de données,
 - 11 : champ d'adaptation suivi de données.

L'encapsulation d'un flux de PES se fait en utilisant le data-streaming comme illustré dans la figure 2.4. Dans ce type d'encapsulation, le PUSI n'est pas utilisé et on comble le paquet MPEG-2 TS avec du bourrage. Ainsi dans un même paquet il ne peut y avoir qu'un élément d'un unique PES. Le PID des paquets sera le même pour un PES donné ainsi que pour le même flux de PES, c'est-à-dire l'ES original [13].

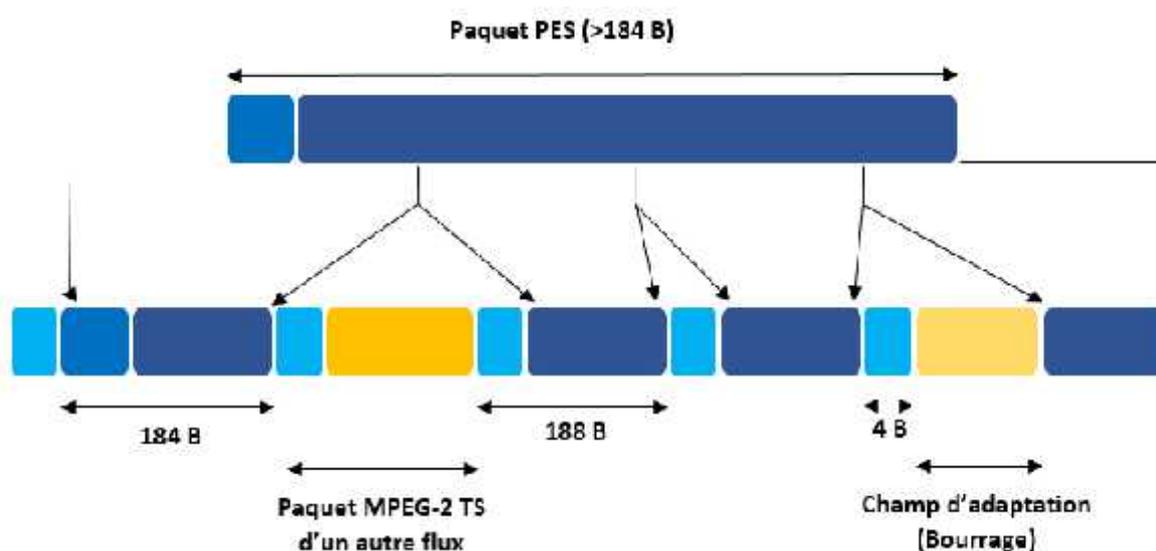


Figure 2.4. Encapsulation d'un PES dans des paquets MPEG2-TS via data-streaming

2.2. Chaîne de transmission DVB-S :

La chaîne de transmission du standard DVB-S au niveau de la couche physique est décrite sur la figure 2.5.

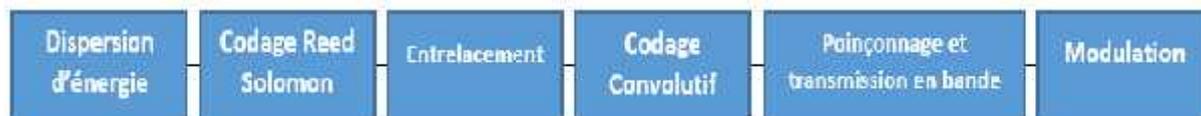


Figure 2.5. Chaîne de transmission DVB-S

En premier lieu, la dispersion d'énergie permet une répartition homogène des bits. Ensuite, la chaîne de transmission fait apparaître le code correcteur d'erreur en mode bloc Reed-Solomon (codage externe) avec des tailles de bloc avant codage de 188 octets et 204 octets après. L'entrelacement a pour objectif d'étaler sur une plus longue période de temps les rafales d'erreurs introduites par le canal. Le codage convolutif (ou codage interne) appliqué par la suite corrige d'autres types d'erreurs et permet d'atteindre des seuils de taux d'erreurs binaires inférieurs à 10^{-10} . La seule modulation prévue par la norme est une modulation de phase à quatre états, QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) avec une réponse en fréquence en cosinus surélevé de 0,35 [14]. L'ensemble des blocs sera détaillé par la suite.

2.2.1. Adaptation du multiplex et brassage :

Il peut arriver qu'un train binaire MPEG-2 contienne une longue suite de 0 et de 1. Cela peut gêner la récupération du rythme à la réception. Pour rendre ce train binaire aléatoire (même probabilité d'obtenir un 0 ou un 1), un brassage est réalisé par une séquence pseudo aléatoire.

Le polynôme générateur de cette séquence est $1 + X^1 + X^1$. Le générateur est composé de 15 registres à décalage. A chaque top d'horloge, on fait la somme (OU exclusif) des 14ème et 15ème registres, le bit résultant étant rebouclé sur le premier registre après décalage vers la droite de tous les registres comme illustré sur la figure 2.5. Une séquence d'initialisation est nécessaire. Celle spécifiée par la norme DVB est : **100101010000000**.

Chaque bit ainsi calculé est ensuite ajouté (OU exclusif) à un bit des données en entrée, ce qui revient à ajouter, à chaque mot de 15 bits des données d'entrée, un mot de la séquence pseudo aléatoire. Le flux d'entrée est ainsi rendu statistiquement quasi aléatoire.

Ce code n'est pas exactement un code RS : pour pouvoir corriger 8 octets, la trame devrait contenir 255 octets au total, dont 16 de redondance (code RS (255, 239, T=8)). Mais afin de garder la structure des paquets MPEG-2 (188 octets avant codage) pour des questions de synchronisation, on doit raccourcir le code. Pour ce faire, on calcule les 16 octets de redondance en ajoutant 51 octets mis à zéro au début du paquet MPEG-2. Une fois ces 16 octets calculés, on retire les 51 octets nuls et on rajoute la séquence de redondance après les 188 octets du paquet.

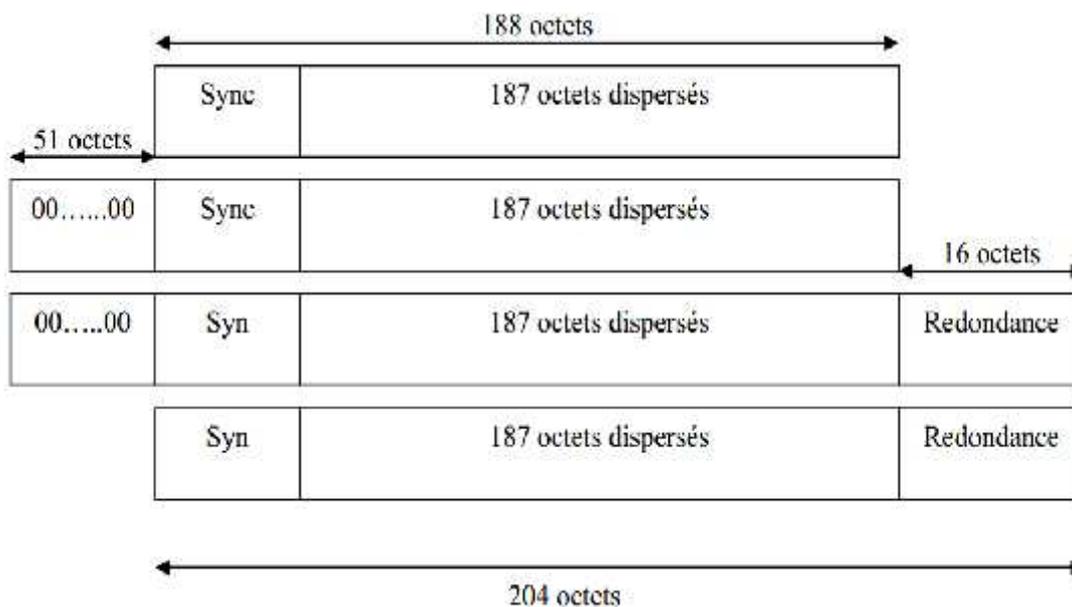


Figure 2.8. Raccourcissement du code Reed Solomon

La trame ainsi formée fait partie d'un code particulier et à éléments finis. A la réception, le décodeur vérifie si la trame reçue fait bien partie du code.

2.2.3. Entrelacement :

Le pouvoir de correction du code Reed-Salomon a ses limites : il ne peut corriger que 8 octets sur un paquet de 188 octets. Ainsi, pour éviter d'avoir des paquets d'erreurs trop long, on utilise l'entrelacement des trames DVB.

A l'émission, les octets d'un paquet sont répartis dans d'autres paquets, ce qui permet d'éviter d'avoir à corriger une longue suite de bits (ou octets) faux consécutifs. L'entrelacement permet de répartir les erreurs sur plusieurs paquets, facilitant ainsi la détection et la correction d'erreurs du décodeur RS.

La figure 2.13 montre chaque paire possible de bits de données représentée par un angle de phase différent et un exemple de signal QPSK.

A cause de l'utilisation du QPSK, le débit des données est exprimé en débit symbole (symbol rate) plutôt qu'en débit binaire (bit rate). Dans ce cas de figure, le débit binaire est deux fois le débit symbole. Par exemple un SR de 20MS/s (20 Méga symboles par seconde) équivaut à un débit binaire de 40Mb/s (40 Mbits par seconde) [21] [22].

2.2.5.3. Calcul du débit utile :

La largeur d'un canal satellite à -3 dB est de 36 MHz. De part, le filtrage de Nyquist, le débit du signal binaire transporté sera donné par la formule suivante :

$$Déb\ b = \frac{L}{1+r} \times \frac{d\ c\ s}{o} \quad (2.4)$$

Dans une transmission satellitaire, le Roll Off a été choisi égal à 0.35 (C'est le compromis entre une bonne efficacité du filtre et un bon rendement). Ainsi, pour une largeur de canal de 36MHz, on obtient un débit utile de 26,6 Mbit/s. En pratique, on prend une largeur de canal un peu plus importante, ce qui permet d'obtenir un débit binaire de 27.5 Mbit/s. Cette valeur étant le débit en sortie du modulateur, elle est égale au Débit Symbole (ou Symbol Rate) du transpondeur. On peut alors calculer le débit utile à partir de la formule suivante :

$$Déb\ u = déb\ b \times r \times \frac{d\ c\ H}{K \times r} \times d\ C \quad (2.5)$$

Le rendement du code Reed Solomon est égal à 188/204 et celui du code convolutif est égal au FEC. Il sera choisi par l'opérateur, en fonction de critères techniques et économiques [19].

2.3. La deuxième génération de DVB-S :

Le standard DVB-S2, comme spécifié par l'ETSI EN 302 307 représente une évolution majeure de la diffusion numérique par satellite pour la télévision.

Avec les nouveautés apportées, nous avons gagné en efficacité spectrale d'une valeur de l'ordre de 30% à 40% par rapport aux standards existants équivalents, en plus des nouvelles applications introduites. Cet apport par le standard DVB-S2 s'explique par les modifications introduites au niveau des techniques de codage et de modulation. Le tableau 2.2 représente les principales différences entre le DVB-S2 et le DVB-S [23].

Année	1994	2003
Standard	DVB-S	DVB-S2
MODCOD	CCM	ACM
Codage	Viterbi, Reed Solomon	LDPC, BCH
Modulation	QPSK	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK
Format des données	MPEG-2	MPEG-2, MPEG-4, données

Tableau 2.2. Evolution du standard de communication par satellite

La vaste gamme d'efficacité spectrale et de configurations en termes de rapport porteuse à bruit (C/N) ont rendu la norme DVB-S2 d'une telle souplesse qu'elle est compatible avec toutes les fonctionnalités des répéteurs satellite.

De plus, elle n'est pas limitée au codage vidéo et audio MPEG-2, mais conçue pour gérer un éventail de formats audio et vidéo évolués que le projet DVB définit actuellement. La DVB-S2 prend en charge n'importe quel format entrant, y compris les flux de transport MPEG simples ou multiples, les flux binaires continus ainsi que les paquets IP et ATM.

2.3.1. Caractéristiques du DVB-S2 :

Le DVB-S2 adopte un codage canal avancé, qui est une concaténation d'un code en bloc BCH (Bose-Chaudhuri-Hochquenghem code) et d'un code LDPC (Low Density Parity Check). La performance du codage interne LDPC se situe à l'intérieur de 1 dB de la performance maximale théorique de la limite de Shannon [32], ce qui équivaut à une amélioration du seuil de 2 à 3 dB par rapport à la norme DVB-S pour un débit d'information donné.

Le standard adopte aussi un ordre supérieur de modulation (QPSK, 8PSK, 16APSK, et 32APSK) ainsi que plusieurs formats de données dont le MPEG-4, et les formats génériques tels que l'IP et l'ATM.

Afin de garantir la qualité de service requise, le DVB-S2 offre en plus de la modulation et du codage variable un MODCOD adaptatif (Adaptive Coding and Modulation). Cette technique permet une plus grande protection des canaux et une augmentation de la capacité de transmission, en plus de l'introduction de nouveaux services [25] [26]. Les techniques de codage et de modulation seront détaillées par la suite.

2.3.2. Chaîne de transmission DVB-S2 :

2.4. Conclusion :

Nous arrivons à présent à la fin de ce deuxième chapitre dans lequel nous avons parlé du projet DVB et des différents standards que ça a occasionné. Nous avons dans un premier temps abordé la norme DVB-S d'une manière plus ou moins détaillée, en insistant sur l'architecture de la chaîne de transmission au niveau de la couche physique et sur la méthode d'encapsulation de données MPEG-2 TS. Ensuite, nous avons exposé la deuxième génération du DVB-S, ainsi que les différentes améliorations qu'a connues celle-ci et ses domaines d'application.

Cette étude nous a fait comprendre le fonctionnement des chaînes d'émission - réception DVB-S et DVB-S2. Chose qui nous permettra de passer à la deuxième étape, en l'occurrence, la concrétisation de ces notions théoriques. C'est là toute l'utilité du troisième chapitre, dans lequel nous exposons la réalisation de ces chaînes, ainsi que des tests de performances au sein d'un même standard, ou entre les deux standards précédemment cités.

CHAPITRE 3

Montage et paramétrage d'une chaine de transmission DVB-S et DVB-S2

3.1. Introduction :

La modélisation d'un système de communication est un moyen efficace et rapide pour mettre en lumière les performances et les principales difficultés de conception de ce dernier. En se servant du matériel mis à notre disposition dans la station, on va passer d'un modèle en boucle locale vers un modèle d'une transmission réelle d'un opérateur de diffusion des chaînes TV, radios, Data (DVB-S/DVB-S2), pour tester ses performances en terme de taux d'erreur binaire (TEB) et de bande passante (W). Les modifications introduites pour le standard DVB-S2, mentionnées dans le chapitre précédent, ont permis d'attendre une performance remarquable que nous allons détailler par la suite.

3.2. Travail effectué :

Ce chapitre consistera alors à faire un montage, paramétrage d'une chaîne de transmission en boucle locale et relever les résultats du BER en fonction de différents niveaux de réception E_b/N_0 , différents facteurs de corrections FEC et différents types de modulation.

Ensuite passer du modèle boucle locale niveau laboratoire vers le modèle réel d'un opérateur de diffusion, en émettant le signal vers le satellite. On procède à refaire les mêmes mesures et tracer des courbes comparatives avec les résultats précédemment obtenus et déduire le taux d'atténuation que le signal a subi sur une liaison satellitaire à grandeur réelle. Et finalement, comparer ces résultats avec ceux obtenus par simulation Matlab.

3.3. Montage et tests :

Pour mener à bien cette étude, nous proposons une démarche par étapes pour nos tests.

3.3.1. Test d'occupation spectrale :

Selon l'étude théorique du système dans le chapitre précédent, le standard amélioré (DVB-S2) offre jusqu'à 40% de bande passante supplémentaire par rapport aux standards traditionnels.

Pour vérifier cette information, il suffit d'analyser les performances de la norme DVB-S en terme de largeur de bande à -3dB. Pour cela on effectue la procédure va suivre. A l'aide d'un codeur, un flux de données (vidéos, audio, data) de type SDI (c.à.d. un flux non compressé), va être injecté dans le décodeur. Ensuite d'une sortie ASI du décodeur vers l'entrée d'un modulateur (DVB-S/DVB-S2).

Il s'agit donc de jouer sur le type de modulation et le FEC, tout en fixant le débit binaire, ensuite visualiser l'occupation spectrale sur l'analyseur de spectre pour chaque norme.

- **Le montage :**

La figure 3.1 illustre le montage réalisé au cours de ce test.



Figure 3.1. Banc d'équipement servant au test de l'occupation spectrale

- **Les Données du test :**

Largeur du canal	36MHz
Types de modulations	QPSK (DVB-S), 8PSK (DVB-S2)
FEC utilisé	3/4
Roll-off	0.35
La fréquence d'émission	14000 MHz
Bit Rate	8Mbps

Tableau 3.1. Données du test d'occupation spectrale

- Résultats du test :
 - a. Pour une modulation QPSK (DVB-S) :

Le débit symbole est de 5.787234 Méga bauds, avec une bande occupée de largeur égale à 7.81 MHz. La figure 3.2 montre ces résultats.

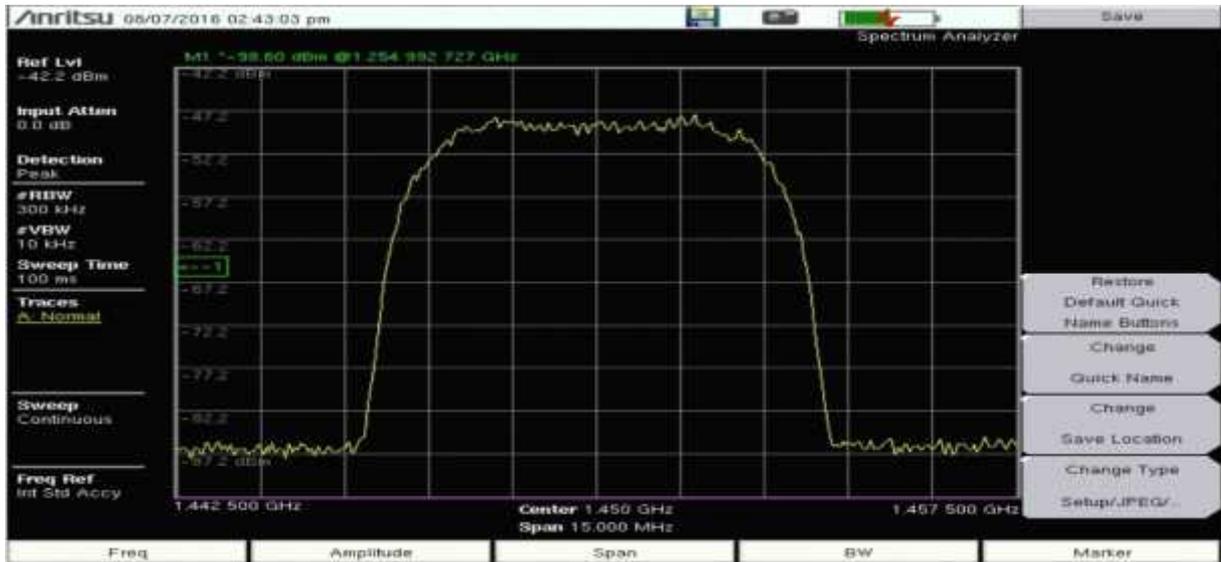


Figure 3.2. Bande occupée à (-3dB) pour une modulation QPSK/DVB-S

- b. Pour une modulation 8PSK (DVB-S2) :

Le débit symbole est de 3.590465 Méga bauds et la bande occupée est d'une largeur égale à 4.84 MHz. La figure 3.3 montre les résultats obtenus.

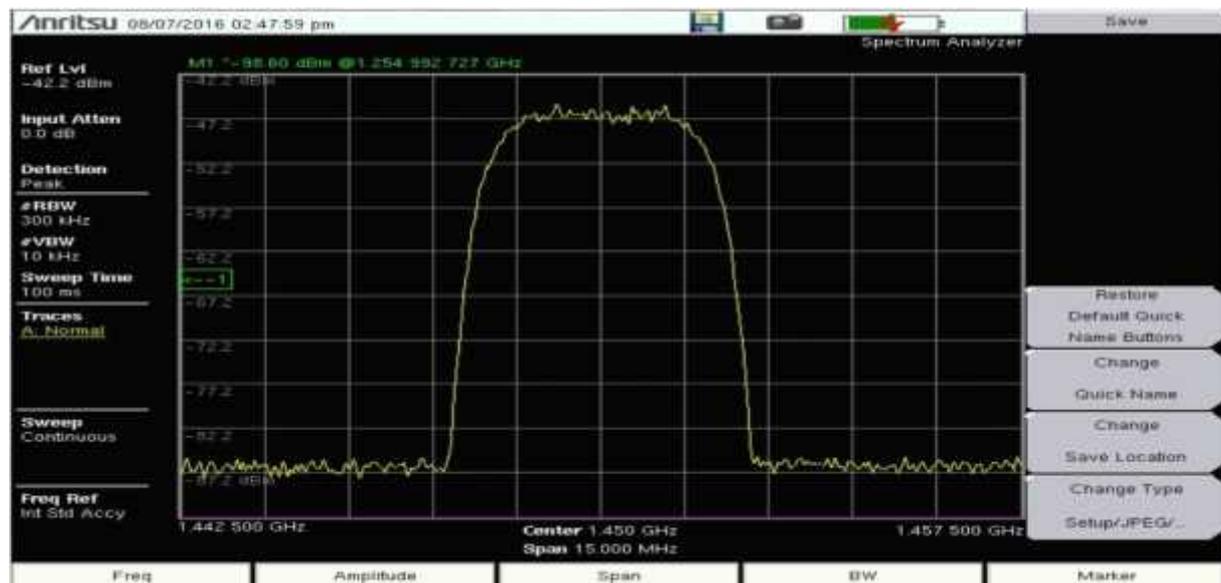


Figure 3.3. Bande occupée à (-3dB) pour une modulation 8PSK/DVB-S2

- **Interprétation des résultats :**

En se basant sur les résultats obtenus, avec un FEC constant et égale à 3/4, un Roll-Off égal à 35%, et un débit constant de 8Mbps, on peut remarquer que :

- Dans le cas d'une modulation QPSK (DVB-S) : un débit symbole de 5.787234 Méga bauds occupant une bande de 7.81MHz ;
- Dans le cas d'une modulation 8PSK (DVB-S2), un débit symbole de 3.590465 Méga bauds occupant une bande de 4.84MHz.

On peut donc déduire que :

- Lors du passage du DVB-S au DVB-S2, le débit symbole diminue et la bande occupée est réduite aussi ;
- La bande occupée augmente au fur et à mesure qu'on augmente le débit symbole, ce qui implique l'expression (3.1) de la bande passante en fonction du symbole rate et du roll-off :
$$\mathbf{W = S \times (1 + \alpha)}$$
 (3.1)

Si on part du principe qu'une bande de largeur égale à 7.81MHz représente 100% de la bande passante, on peut calculer le pourcentage correspondant à une bande de largeur égale à 4.84 MHz. Et ce, selon la formule suivante. Sachant que x représente ce pourcentage.

$$x = \frac{4.84 \times 100\%}{7.81} = 61.97\%$$

La largeur de bande gagnée par le standard amélioré DVB-S2 peut donc être interprétée comme la différence entre le pourcentage représentant la bande occupée en DVB-S (QPSK) et le pourcentage représentant la bande occupée en DVB-S2 (8PSK) :

$$\text{BP} = 100\% - 61.97\% = 38.03\% \quad 40\%$$

- **Conclusion :**

Selon les résultats obtenus de ce test on peut conclure que la nouvelle norme DVB-S2 présente de manière significative une amélioration en termes d'efficacité spectral pour n'importe quel type de données transmises (vidéos, audio, etc.).

3.3.2. Test en boucle locale DVB-S/DVB-S2:

Il s'agit d'établir une chaîne de transmission en boucle locale avec les mêmes paramètres que ceux d'une chaîne de transmission réelle. Le banc d'équipements utilisé comprend le matériel suivant :

- **Un modulateur (DVB-S/DVB-S2)** : utilisé comme émetteur ;
- **Un IRD (HD)** : utilisé comme récepteur ;
- **Un convertisseur de fréquence** : entrée FI, et sortie en bande L ;
- **Un canal bruité** : à l'aide d'un atténuateur pour mettre la chaîne à des conditions similaires que celles de la transmission réelle ;
- **Un flux ASI** : constant égale à 8Mbps ;
- **Deux PC** : l'un pour exécuter les paramètres d'émission et l'autre pour visualiser les résultats au niveau du récepteur.

- **Le montage :**

La figure suivante définit la chaîne de transmission en boucle locale.



Figure 3.4. La chaîne de transmission en boucle locale

- **Procédure :**

Dans le but de tracer les courbes de variation du BER en fonction d' E_b/N_0 pour différents niveaux de puissance, différents types de modulations et de FEC, on fait varier au niveau du modulateur la puissance du signal émis, le type modulation et le FEC jusqu'à ce qu'on arrive à un BER constant et optimal, c'est-à-dire assez petit pour un verrouillage de l'IRD à un niveau de réception E_b/N_0 minimal.

Remarque1 : Un changement dans le type de modulation et du FEC implique un changement dans le débit symbole. Il est donc nécessaire de synchroniser l'émetteur et le récepteur sur une même valeur de ce paramètre.

Après paramétrage de la chaîne au niveau de l'interface du modulateur montrée dans la figure 3.5, nous émettons le signal et recevons les différentes valeurs du BER et E_b/N_0 au niveau du récepteur dans une interface illustrée sur la figure (3.6). Ces valeurs sont nécessaires pour tracer les courbes en boucle locale.



Figure 3.5. Interface du Modulateur M6100 de NEWTEC

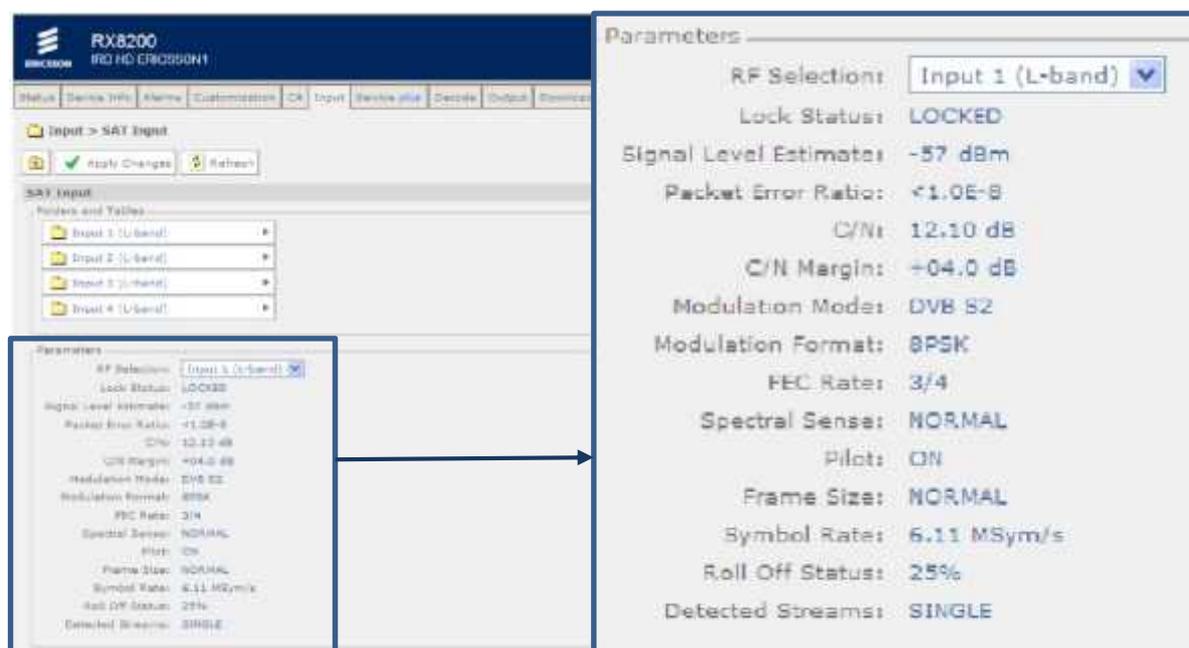


Figure 3.6. Interface d'un IRD HD RX8200 d'ERICSSON

- Résultats du test :
 - a. Résultats obtenus pour le standard DVB-S :

Les résultats obtenus sont représentés sous formes de courbes illustrées dans la figure suivante.

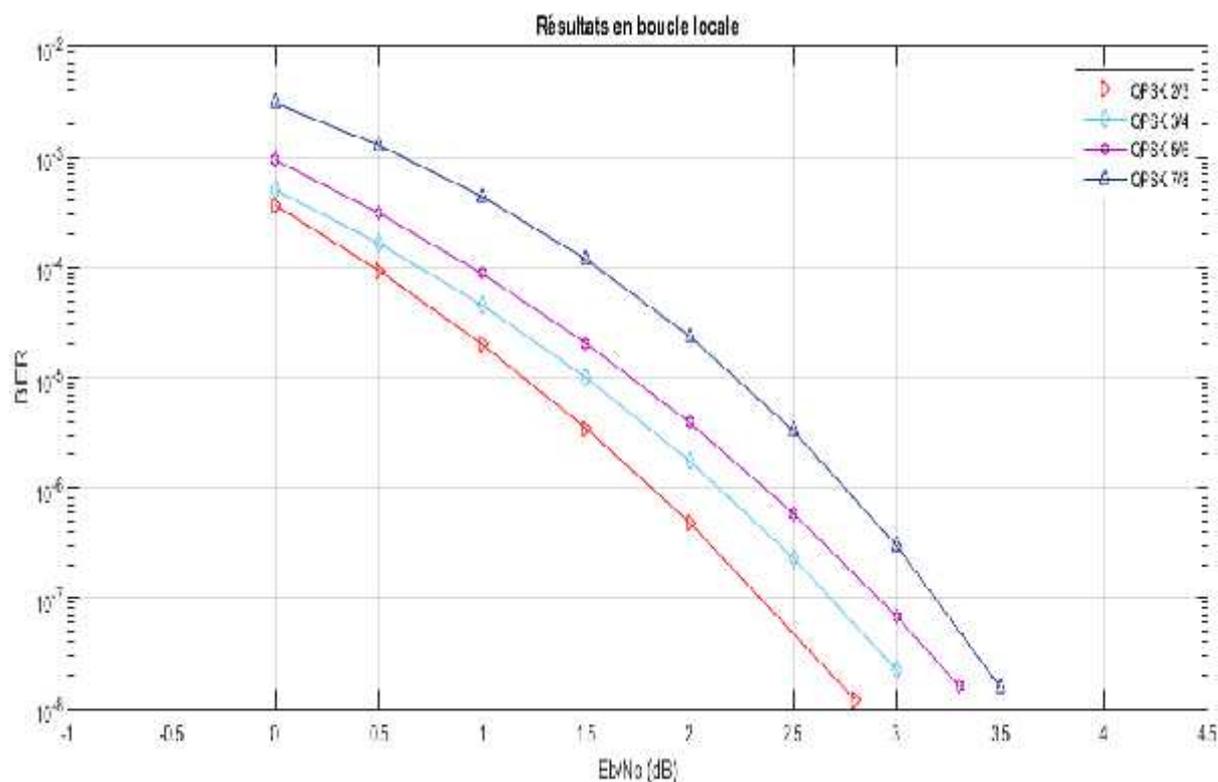


Figure 3.7. Courbes BER vs E_b/N_0 pour une boucle locale DVB-S

• Interprétation des résultats :

Selon les résultats obtenus, on peut remarquer que :

- Pour un même E_b/N_0 : **$BER_{QPSK\ 2/3} < BER_{QPSK\ 3/4} < BER_{QPSK\ 5/6} < BER_{QPSK\ 7/8}$**
- Les différents types de ModCod possèdent des niveaux de verrouillage différents. Le signal le plus robuste se verrouille en premier, ici en l'occurrence, on parle de celui avec le ModCod QPSK 2/3. Le gain entre deux modulations consécutives est à peu près égal à 0.25 dB ;
- On peut obtenir une bonne réception (c.à.d. avec un $BER = 1e^{-8}$) pour les quatre types de ModCod mais avec des niveaux de réception différents. Dans le cas pratique, utiliser le signal le plus robuste nous permet de minimiser la puissance d'émission du signal, mais en contrepartie, occuper une plus grande largeur de bande. Par contre, l'utilisation du signal le moins robuste demande une énorme puissance d'émission, ceci dit ce genre de signal épargne d'une manière considérable la bande passante.

Remarque2 : Les résultats obtenus dans ce cas de figure nous ont fait comprendre l'utilité de l'utilisation d'un ModCod QPSK $3/4$ au niveau de la TDA. En effet, le QPSK $3/4$ se trouve être un compromis entre une occupation optimale de la bande passante et une utilisation raisonnable de la puissance d'émission.

b. Résultats obtenus pour le standard DVB-S2 :

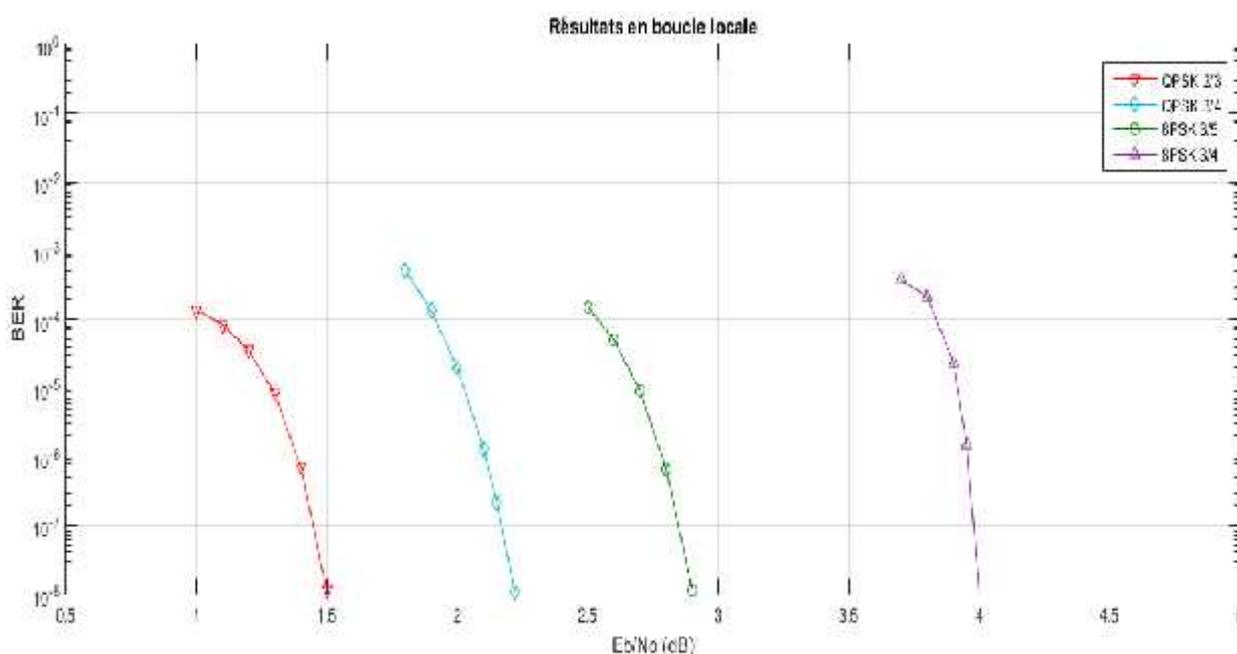


Figure 3.8. Courbes BER vs E_b/N_0 pour une boucle locale DVB-S2

- **Interprétation des résultats :**

A partir de ces courbes, on peut remarquer que :

📊 Pour obtenir le même niveau de BER pour les différents types de ModCod, nous avons besoin d' E_b/N_0 différents. La relation peut être représentée comme suit :

$$E_b/N_0_{\text{QPSK } 2/3} < E_b/N_0_{\text{QPSK } 3/4} < E_b/N_0_{\text{8PSK } 3/5} < E_b/N_0_{\text{8PSK } 3/4}$$

📊 L'allure des courbes montre que dans le cas du standard DVB-S2 le passage d'un BER de l'ordre de $1e^{-3}$ à un BER de $1e^{-8}$ est rapide, c.à.d. que l'intervalle E_b/N_0 requis est petit ;

📊 Le gain en E_b/N_0 entre deux ModCod consécutifs est à peu près égal à 0.8 dB.

3.3.3. Chaîne de transmission DVB-S/DVB-S2 sur le satellite SES4 :

A l'aide d'une station mobile (DSNG), on a pu établir une liaison satellitaire entre le téléport de BOUCHAOUÏ et le satellite SES4 (22°W) et faire la réception au niveau du pupitre de la station.

La chaîne d'émission/réception comprend les mêmes équipements que ceux de la boucle locale (c.à.d. partie bande de base et partie radio fréquence), à l'exception des atténuateurs. L'air est dans ce cas de figure, le canal de transmission.

Avant de commencer la procédure de transmission, il faut d'abord calculer le bilan de puissance correspond à cette liaison :

- **Bilan de liaison :**

Lorsque les ondes se propagent, elles s'affaiblissent notablement. La qualité d'une liaison dépend fortement de la puissance de l'onde électromagnétique reçue au niveau du satellite. Pour cela Il est important de calculer un bilan de liaison à l'avance pour pouvoir effectuer la transmission avec la qualité requise, suivant l'équation (3.2) :

$$PIRE \text{ [dBW]} = P_e \text{ [dBW]} + G \text{ [dBi]} - Att \text{ [dB]} \quad (3.2)$$

Sachant que :

- ✓ La PIRE (*Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente*): est la puissance rayonnée par rapport à une antenne isotrope pour laquelle $G=1$, donnée par l'opérateur ;
- ✓ P_e : est la Puissance démission= puissance mesurée + le facteur de couplage
- ✓ G : est le Gain de l'antenne ;
- ✓ Att : désigne les Pertes de transmission (perte du guide d'onde) ;

Il s'agit de mesurer le niveau de puissance de chaque étage de la chaîne montrée dans la figure (3.9) en se servant du matériels de la figure (3.10), puis mesurer le niveau de puissance à la sortie de l'HPA 1 et l'HPA2 et calculer la PIRE correspond à chaque chaîne, ensuite comparer les valeurs trouvées avec celles données par l'opérateur.

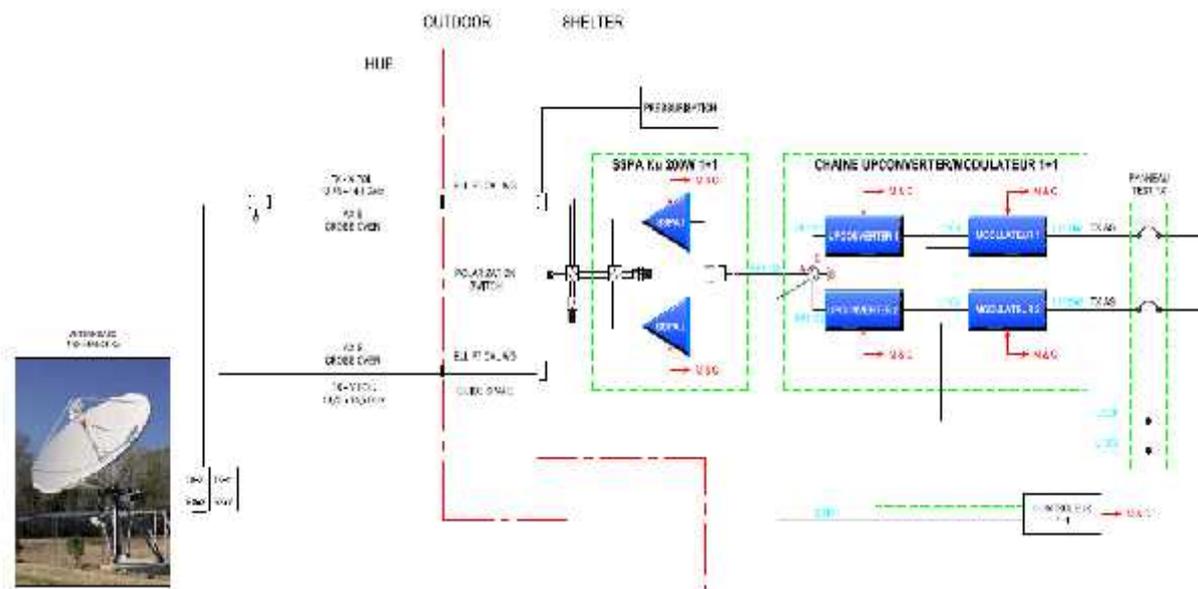


Figure 3.9. Chaîne de transmission radiofréquence



Figure3.10. Matériels utilisés pour calculer le bilan de liaison

Dans un premier lieu, calibrer le puissance-mètre sur une puissance référence $P=0$ dBm, puis insérer manuellement la fréquence d'émission qui égale à 1400MHz (figure 3.11), ensuite commencer les mesures.



Figure3.11. Procédure de calibrage du puissance-mètre

Sachant que :

- La PIRE donnée par l'opérateur pour l'HPA1 est égale à 65.5dBW ;
- La PIRE donnée par l'opérateur pour l'HPA2 est égale à 65.1dBW ;

Et la puissance mesurée avec le puissance-mètre à la sortie de l'HPA :

- Est égale à -2.9dBm pour l'HPA1 ;
- Est égale à -4.9dBm Pour l'HPA2 ;

Ainsi que le gain d'antenne est de 59dBi et les pertes du guide onde est de 2dB.

Après avoir relevé tous les mesures du tableau (3.2) :

HPA 1		HPA 2	
Puissance mesurée en (dBm)	-2.9	Puissance mesurée en (dBm)	-4.9
Facteur de couplage	41.4	Facteur de couplage	43
Niveau réel de l'HPA en (dBm)	38.5	Niveau réel de l'HPA en (dBm)	38.1

Tableau 3.2.Valeurs mesurées à la sortie de l'HPA

Remarque :

Le niveau de puissance réel de l'HPA est la puissance d'émission P_e c.à.d. la puissance mesurée plus le facteur de couplage.

On peut donc calculer la PIRE des 2 HPA suivant la loi (3.2) :

- HPA 1 :

$$\text{La PIRE} = 38.5 - 30[\text{dBW}] + 59[\text{dBi}] - 2[\text{dB}] = 65.5 \text{ dBW}$$

- HPA 2 :

$$\text{La PIRE} = 38.1 - 30[\text{dBW}] + 59[\text{dBi}] - 2[\text{dB}] = 65.1 \text{ dBW}$$

Conclusion :

Selon les résultats obtenus de ces mesures, on peut remarquer que la PIRE calculée est la même que celle donnée par l'opérateur pour les 2 HPA de la chaîne radiofréquence. Donc on peut effectuer la liaison vers le satellite SES4.

- **Procédure :**

Dans un premier temps, nous déployons l'antenne de la station mobile (bande Ku) et la positionnons vers la direction 22°W. Nous utilisons un analyseur de spectre pour sélectionner la porteuse de la montée sur satellite. Ensuite, nous faisons entrer les paramètres d'émission.

Puissance d'émission	17 Dbw
Fréquence en bande L	1355 MHz
Fréquence d'émission (bande Ku)	14 155 MHz
Type de modulation	DVB-S(QPSK), DVB-S2 (QPSK ; 8PSK)
Bit Rate	8Mbps

Tableau 3.3. Paramètres d'émission

Il est aussi nécessaire de paramétrer l'antenne. Le tableau 3.4 montre ces paramètres.

Azimut	+38.6
Polarisation	-57.7
Elévation	+35.5

Tableau 3.4. Paramètres de l'antenne

La chaîne d'émission/réception est représentée dans la figure 3.12.



Figure 3.12. La chaîne de transmission DVB-S/DVB-S2 sur le satellite SES4 (22°W)

Après avoir exécuté ces paramètres, il suffit d'effectuer les mêmes étapes que celles de la boucle locale (c.à.d. pour différents niveaux de puissance d'émission, types de modulation, et FEC) puis relever les valeurs du BER et E_b/N_0 à la réception. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes.

a. Chaîne DVB-S :

La largeur de la bande passante que nous allons occuper nous permettra d'utiliser deux types de ModCod, en l'occurrence QPSK 2/3 et QPSK 3/4. Les résultats obtenus pour cette chaîne sont illustrés dans la figure 3.13.

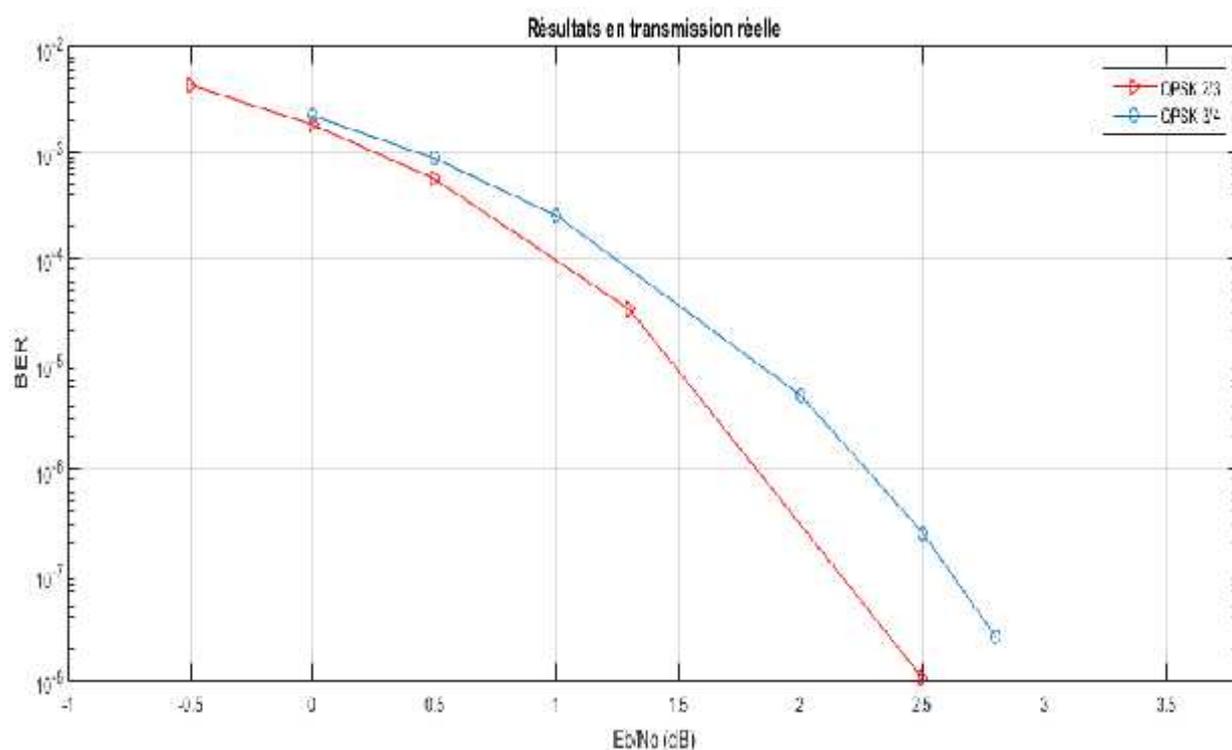


Figure 3.13. Courbes BER vs E_b/N_0 pour une transmission réelle DVB-S

- **Interprétation des résultats :**

Selon les résultats obtenus, on peut remarquer que :

- Les valeurs du BER pour le ModCod QPSK 3/4 dans l'intervalle E_b/N_0 sont supérieures à celles du QPSK 2/3.
- Le verrouillage du récepteur pour un ModCod QPSK 2/3 se fait pour $E_b/N_0 = -0.5$ dB pour un BER égale à 4×10^{-3} . Tandis que pour le ModCod QPSK 3/4, le récepteur verrouille à un $E_b/N_0 = 0$ dB pour un BER = 1.8×10^{-3} .

Les deux types de ModCod permettent d'atteindre un bon niveau de réception.

Remarque3 : La TDA utilise le QPSK 3/4 pour la transmission dans les conditions normales, mais dès qu'il est question d'intempéries, un signal plus robuste est utilisé en appliquant le ModCod QPSK 2/3.

b. Chaîne DVB-S2 :

La figure 3.14 montre les résultats obtenus pour ce type de transmission.

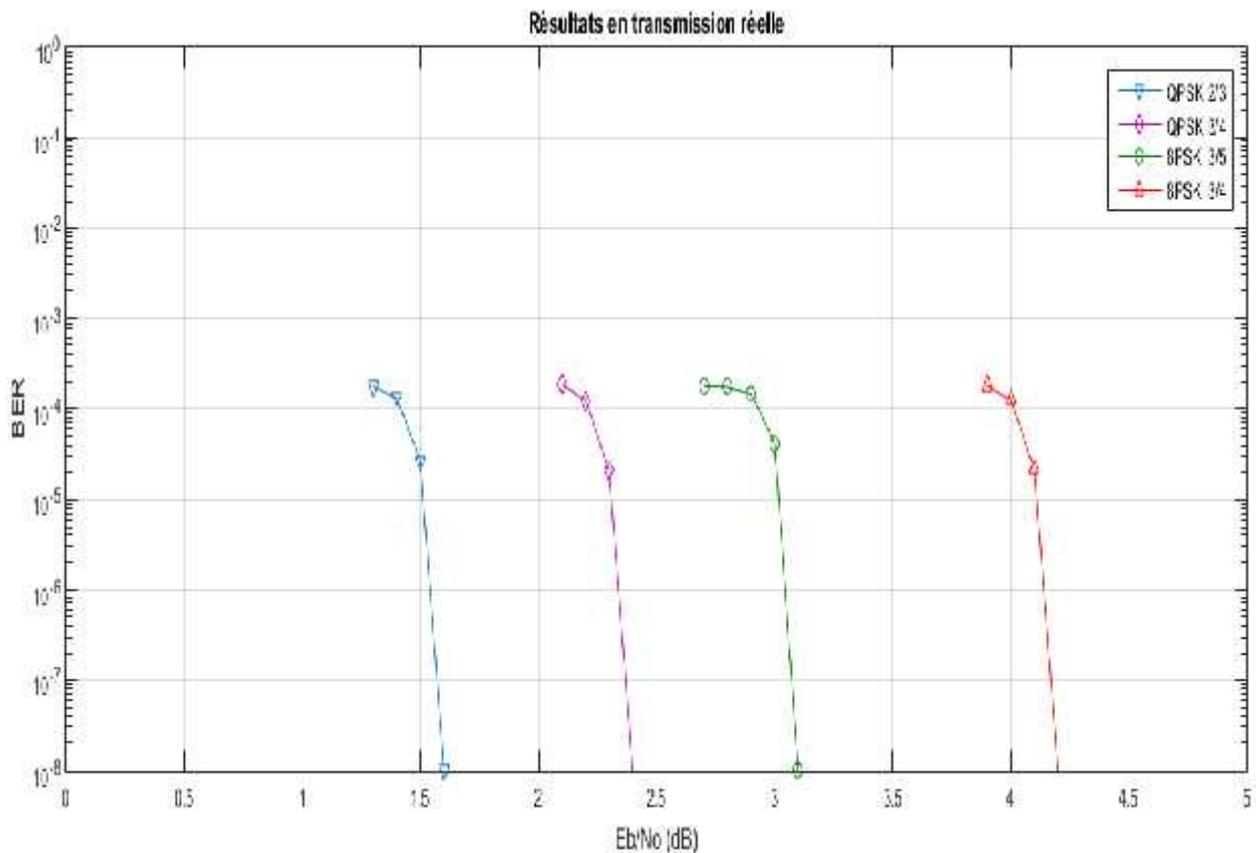


Figure 3.14. Courbes BER vs Eb/No pour une transmission réelle DVB-S2

- **Interprétation des résultats :**

En se basant sur les courbes qu'on a obtenu, nous pouvons dire que :

- Le récepteur se verrouille dans le cas des signaux les plus robustes pour des valeurs d' E_b/N_0 minimales. La relation entre ces ModCod pour une même BER peut être exprimée par : $E_b/N_0_{\text{QPSK } 2/3} < E_b/N_0_{\text{QPSK } 3/4} < E_b/N_0_{\text{8PSK } 3/5} < E_b/N_0_{\text{8PSK } 3/4}$
- Les différentes ModCod permettent d'atteindre les niveaux de réception requis.

Remarque4 : La TDA utilise le ModCod 8PSK 3/4 pour la transmission avec la norme DVB-S2, et le ModCod 8PSK 3/5 pour un signal plus robuste en cas de mauvaises conditions météorologiques. La modulation QPSK est rarement utilisée dans ce cas de figure.

3.3.4. Simulation des chaînes DVB-S et DVB-S2 en utilisant Matlab :

- **Procédure :**

La modélisation informatique de systèmes de communication est un moyen efficace et rapide pour mettre en lumière les performances et les principales difficultés de conception de ces derniers. En se servant de bibliothèques, un outil de simulation comme Matlab permet de modéliser de façon très pédagogique des chaînes de transmissions, pour en analyser par exemple les performances en termes de taux d'erreur binaire (BER).

Cette partie consistera alors à simuler les chaînes d'émission/réception DVB-S et DVB-S2 afin de tracer des courbes théoriques de l'évolution du BER en fonction de l'E_b/N₀.

Dans un contexte de simplicité et de convivialité, nous avons jugés utile de simuler les chaînes DVB-S et DVB-S2 à l'aide d'interfaces graphiques réalisées sous Matlab.

- a. Interface de simulation des courbes DVB-S :**

Dans la figure 3.15 , nous pouvons voir un schéma synoptique présentant la structure du code de simulation de la chaîne DVB-S à l'émission. Le schéma inverse est réalisé en réception en intégrant un code de calcul de la BER en fonction des valeurs du vecteur E_b/N₀.

Pour résumer, on crée un nombre déterminé de trames de 188 octets. Ces trames seront transformés selon les corps de Galois pour pouvoir être traité par le codeur Reed Solomon. A la sortie du codeur, nous avons des trames de 204 octets qui seront converties en binaire avant de pénétrer l'étage de l'entrelaceur convolutif. L'étage du codeur convolutif rend le message plus résistant aux erreurs. Ce dernier sera modulé, puis filtré avant de passer dans un canal à bruit blanc. A la réception, le message sera démodulé, décodé par l'algorithme de Viterbi, désentrelacé, puis décodé à nouveau dans l'étage du décodeur Reed Solomon. Un algorithme spécifique calcul le nombre de bits erroné, ce nombre sera divisé par le nombre de bits émis pour avoir le taux d'erreur binaires.

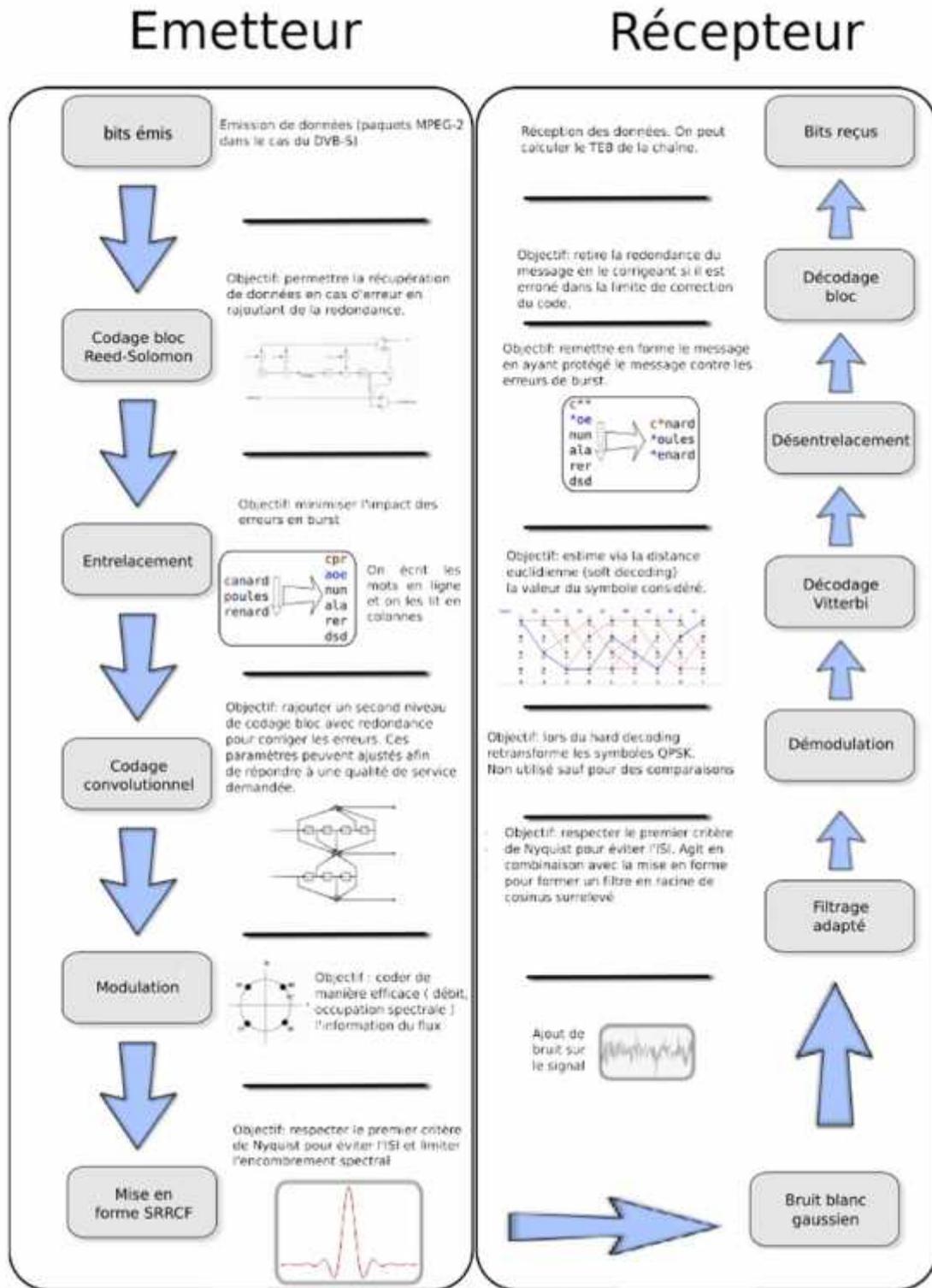


Figure 3.15. Schéma synoptique du code de la chaîne d'émission/réception

La figure 3.16 montre l'allure de l'interface graphique, disposant de champs pour la sélection du type de modulation et du FEC, des zones de textes pour saisir le vecteur E_b/N_0 et le nombre de trames à émettre, ainsi que de boutons pour activer la fonction BERfit et sauvegarder les anciennes courbes.

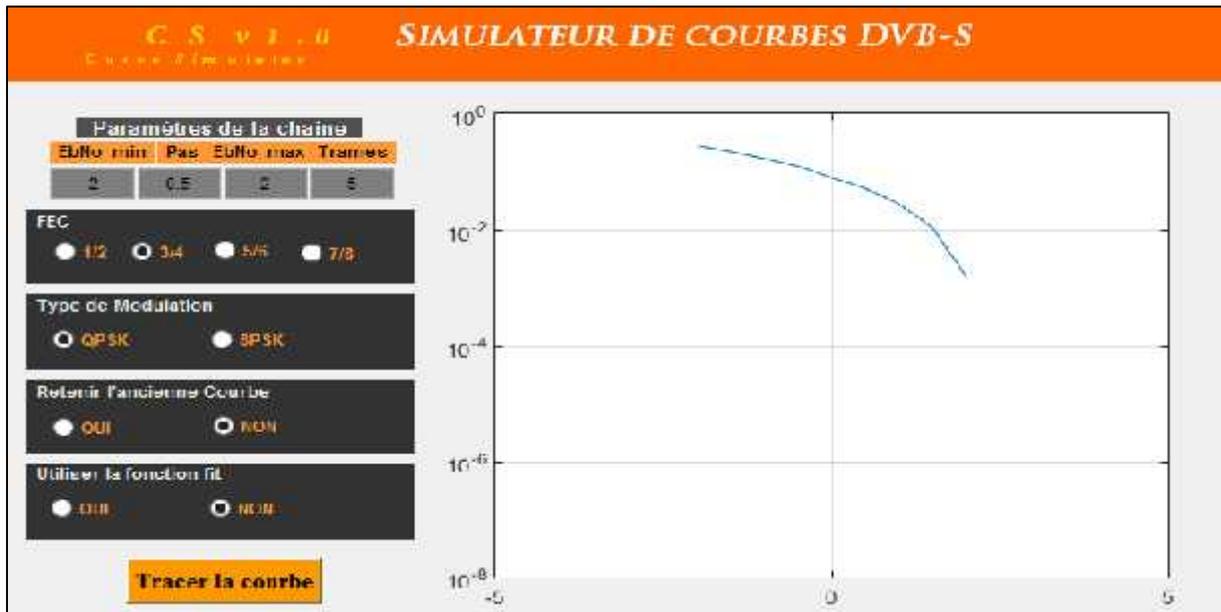


Figure 3.16. Interface graphique Curve Simulator DVB-S

b. Interface de simulation de courbes DVB-S2 :

La structure de ce code spécifie que chaque trame de 188 octets aléatoires générée, passera par l'étage du codeur interne BCH, puis par le codeur interne LDPC. Le message une fois codé passera par l'entrelaceur, puis par le modulateur. Du bruit blanc lui sera ajouté au niveau du canal Gaussien. Plus tard, il sera démodulé, désentrelacé, décodé, et le calcul du BER sera effectué.

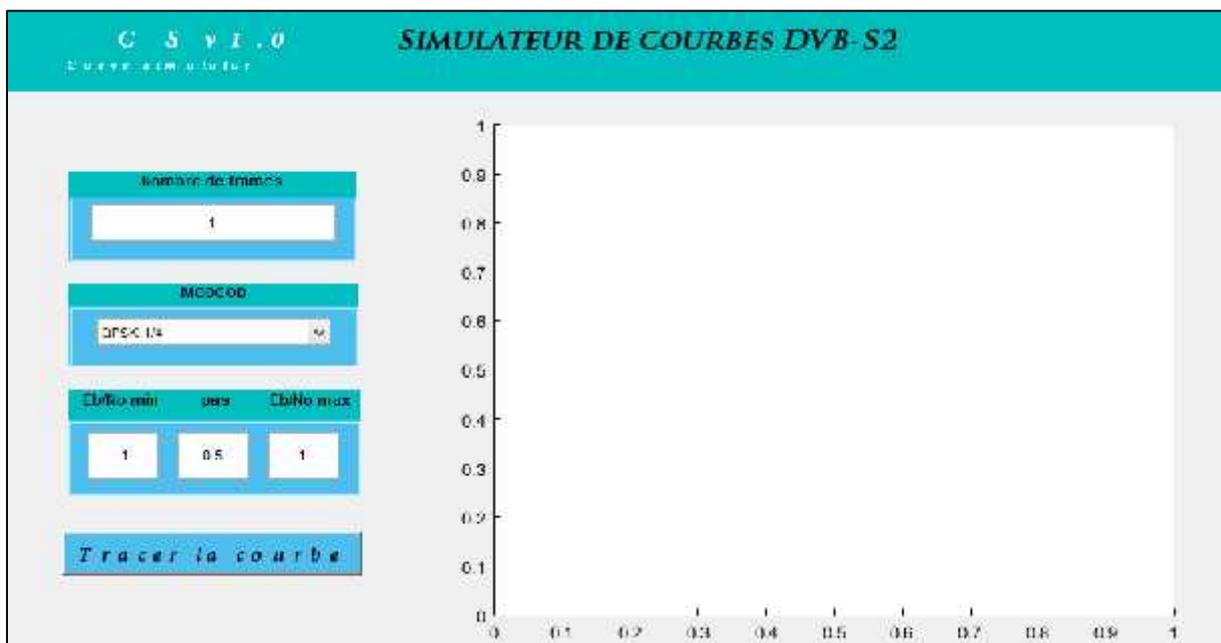


Figure 3.17. Interface graphique Curve Simulator DVB-S2

- **Résultats et interprétation :**

- a. Pour la chaîne DVB-S :**

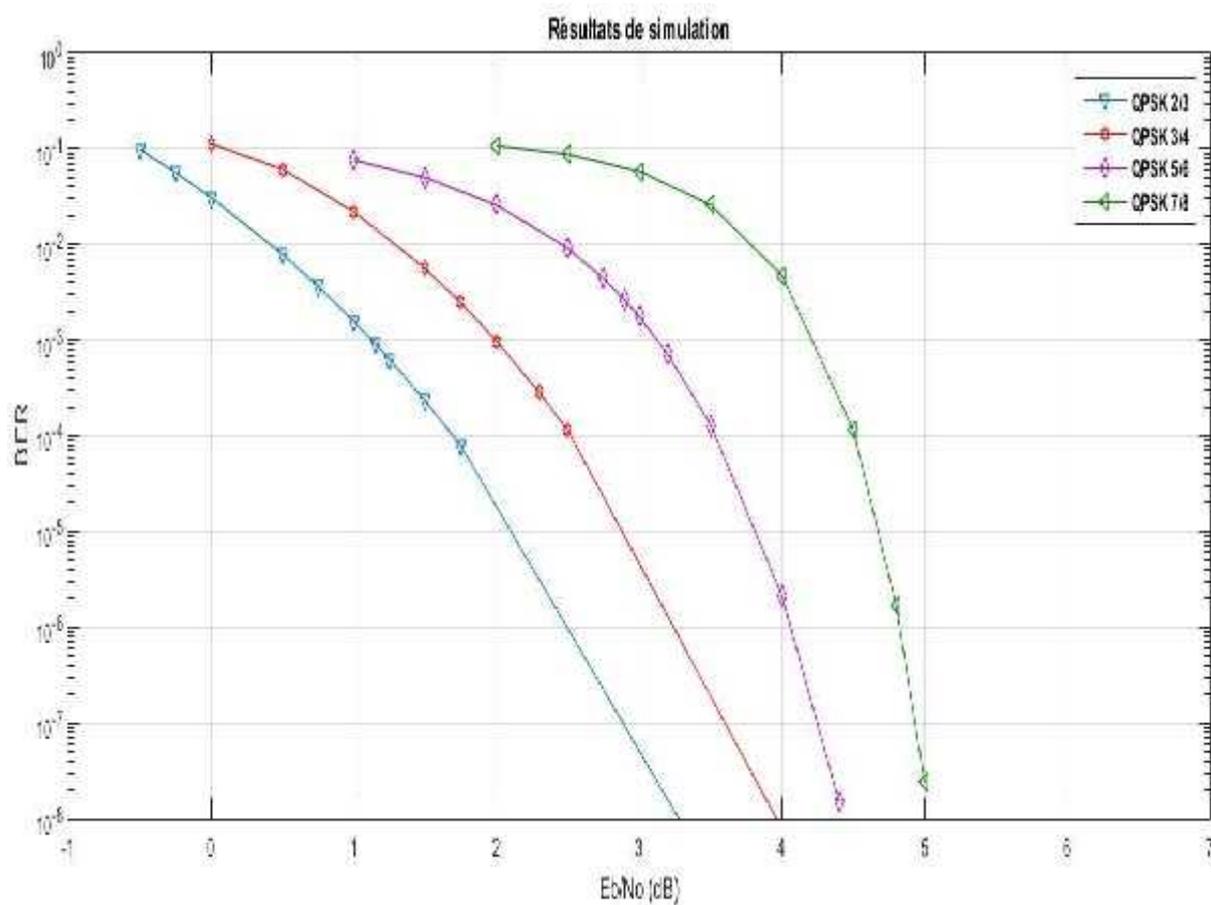


Figure 3.18. Courbes du BER vs Eb/No pour la chaîne DVB-S

- **Interprétation des résultats :**

A partir de ces résultats nous pouvons remarquer que :

- Plus les signaux possèdent des ModCod élevés plus ils atteignent un niveau de réception satisfaisant pour des puissances moins importantes ;
- Les résultats sont parfaitement cohérents avec ceux trouvés en transmission réelle et en boucle locale.

b. Pour la chaîne DVB-S2 :

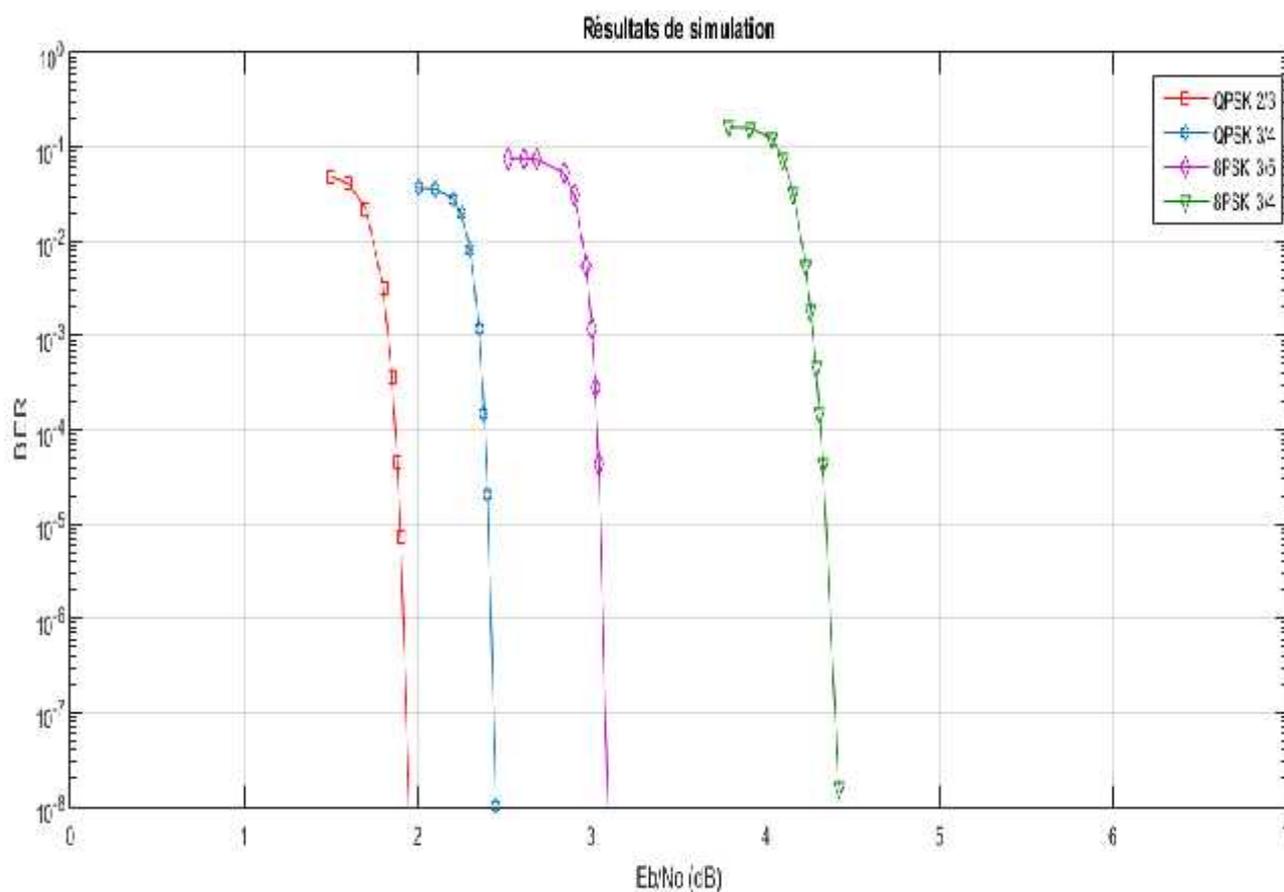


Figure 3.19. Courbes du BER vs Eb/No pour la chaîne DVB-S2

• **Interprétation des résultats :**

Les résultats de la simulation montrent que :

- Les valeurs du BER diminuent avec l'augmentation de la valeur d' E_b/N_o ;
- Les courbes simulées possèdent la même allure que celles obtenues dans le cas réel et la boucle locale ;
- Dans ce cas de figure le passage d'un BER élevé vers un BER idéale se fait sur un intervalle E_b/N_o réduit.

3.3.5. Courbes comparatives :

a. Courbes comparatives DVB-S :

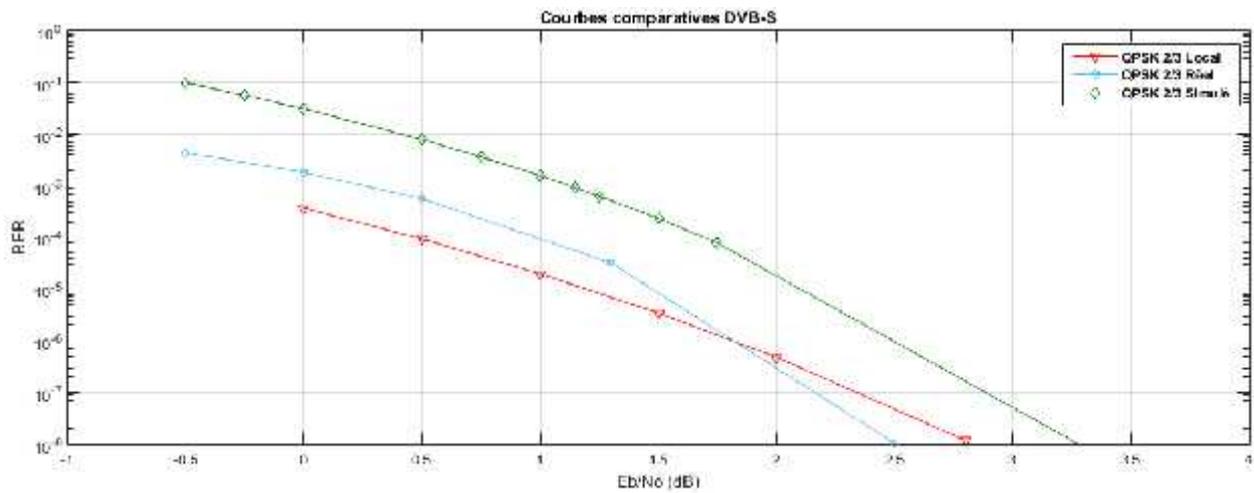


Figure 3.20. Courbes comparatives pour QPSK 2/3

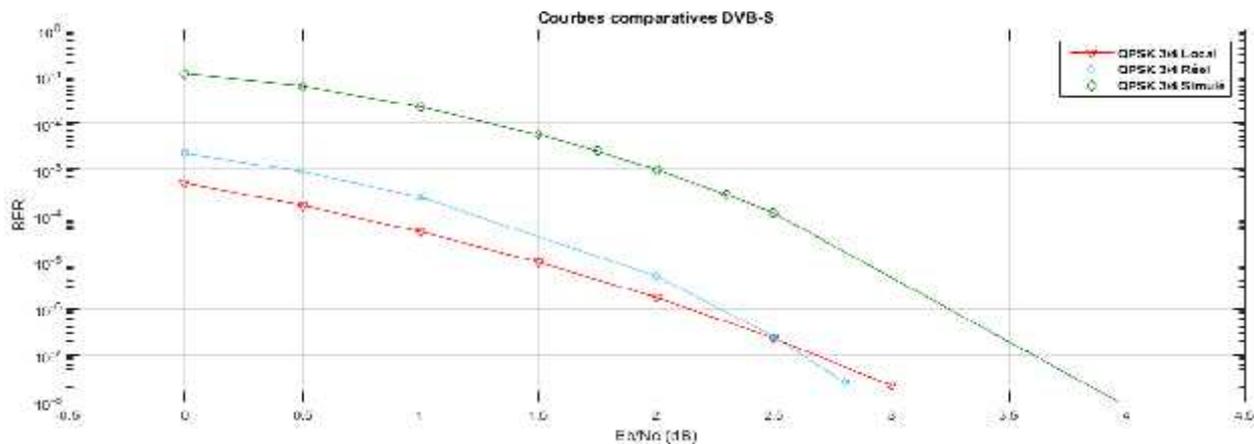


Figure 3.21. Courbes comparatives pour QPSK 3/4

- **Interprétation des résultats :**

D'après ces courbes, nous pouvons remarquer que :

- Les résultats obtenus en transmission réelle, ceux de la boucle locale, et ceux trouvés par simulation possèdent la même allure ;
- Les courbes de la transmission réelles et celles de la boucle locale sont très proches les unes des autres et se chevauchent même à un certain point ;
- Les courbes ne sont pas superposées en raison de plusieurs facteurs. On peut citer à titre d'exemple : Les erreurs liées à de fausses mesures, les imperfections liées à la chaîne de transmission, ainsi que la variation du bruit.

b. Courbes comparatives DVB-S2 :

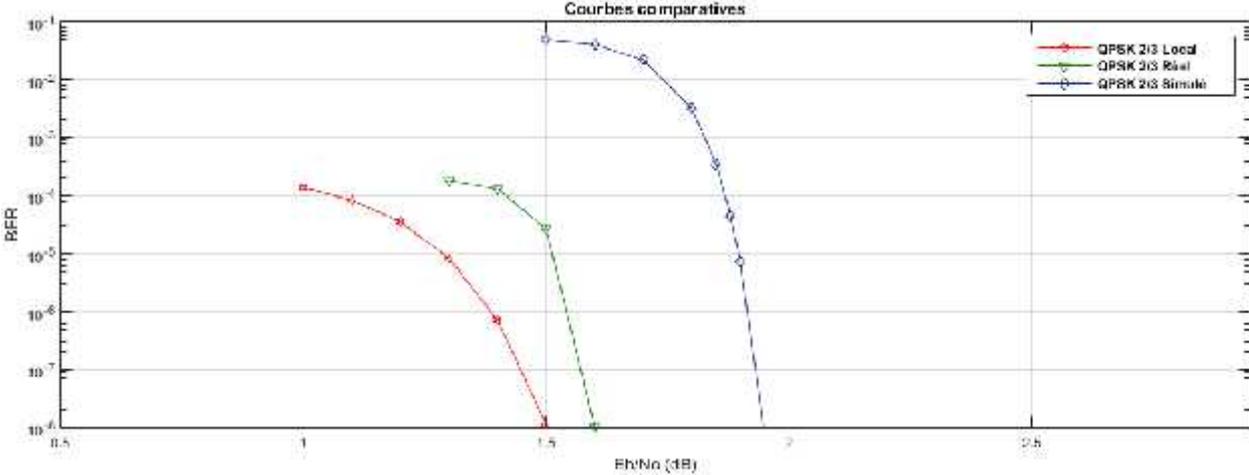


Figure 3.22. Courbes comparatives pour QPSK 2/3

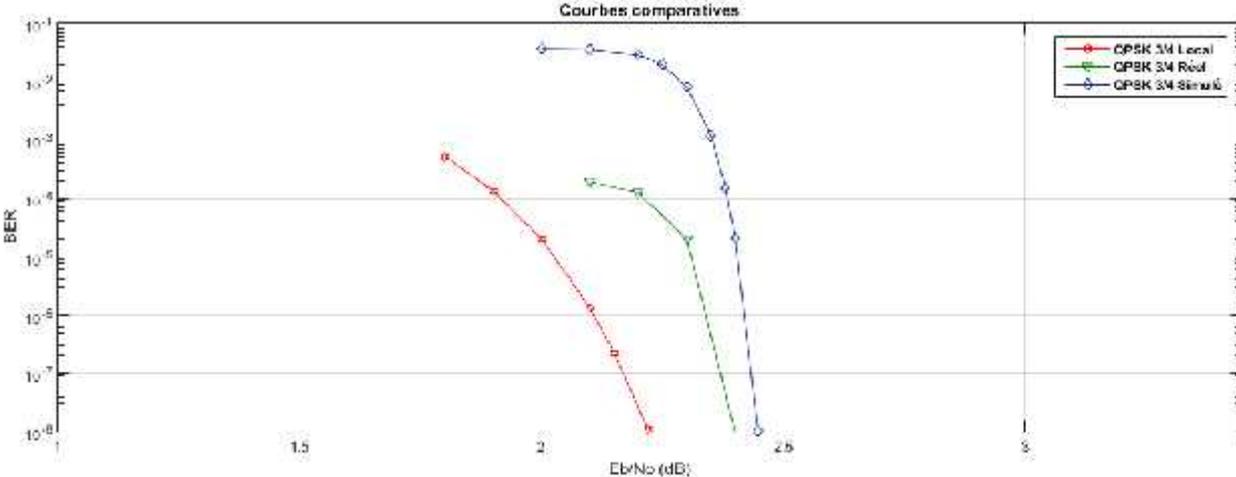


Figure 3.23. Courbes comparatives pour QPSK 3/4

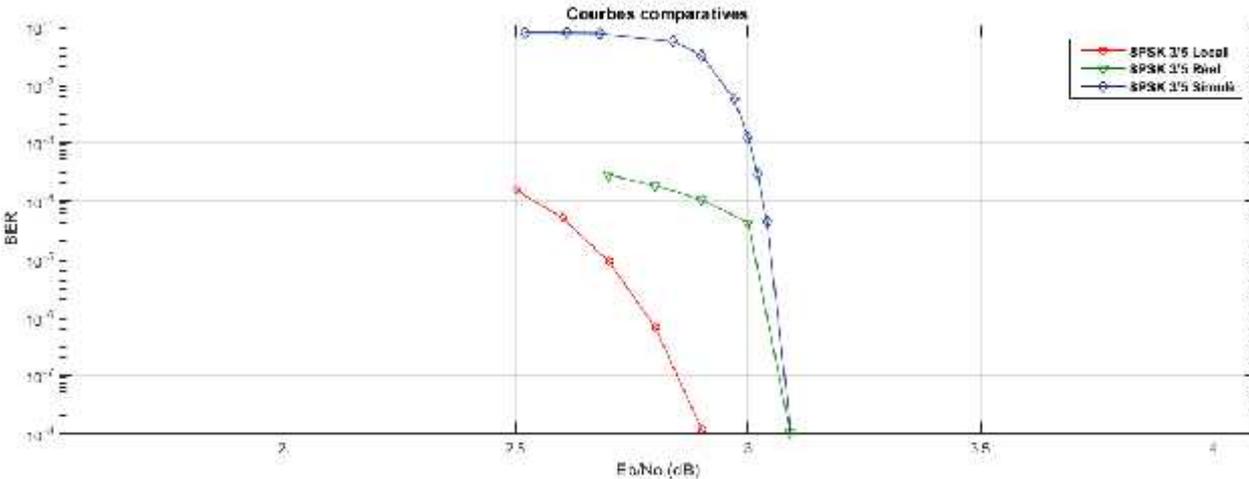


Figure 3.24. Courbes comparatives pour 8PSK 3/5

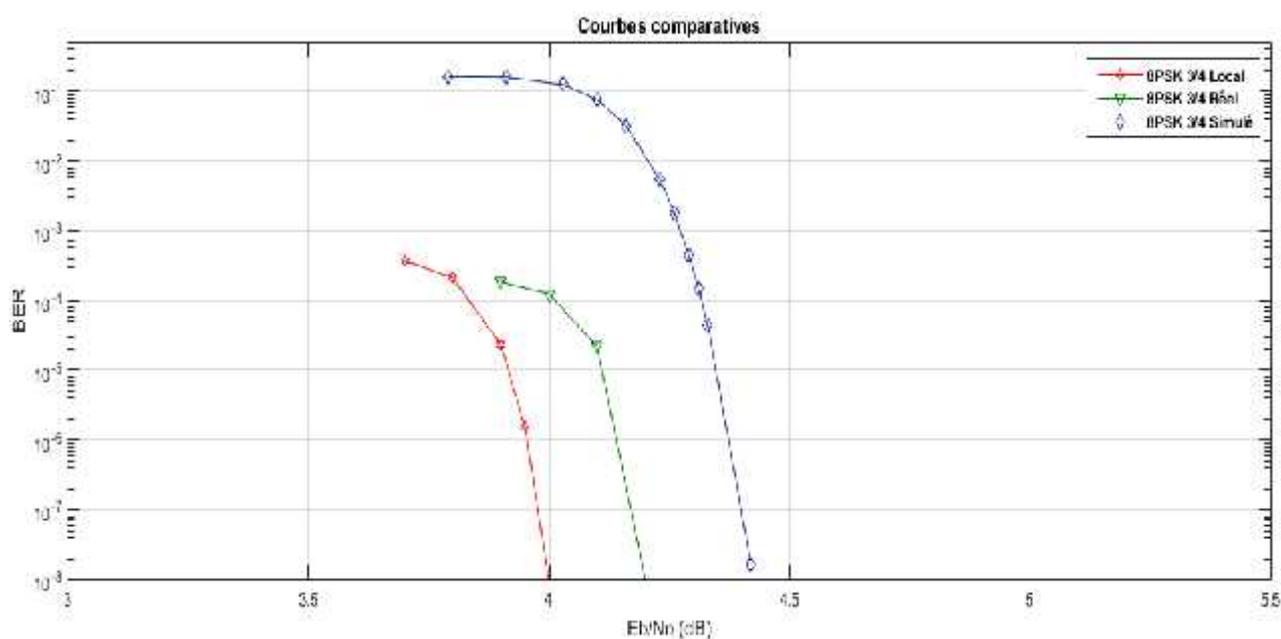


Figure 3.25. Courbes comparatives pour 8PSK 3/4

- **Interprétation des résultats :**

En comparant les différents résultats obtenus nous sommes en mesure de dire que :

- Les courbes de la chaîne de transmission réelle, celles de de la boucle locale, et celles effectuées par simulation Matlab possèdent des allures similaires, et se chevauchent même dans certains points, même si ces dernières sont quelque peu décalées les unes des autres ;
- Les raisons qui ont engendrés ce décalage sont notamment liées à des facteurs d'ordre physique. On peut citer à titre d'exemple les imperfections liées aux équipements de la réalisation, les erreurs de mesures, ainsi que les variations imprévisibles du bruit du au changement continu de la condition météorologique.

3.4. Conclusion :

Nous avons présentés dans ce chapitre une partie très importante de notre projet de fin d'étude, celle du montage et du paramétrage de chaînes de transmission DVB-S et DVB-S2, suivie de plusieurs tests de performance, surtout en matière d'occupation spectrale et de variation du taux d'erreur binaire en fonction de l' E_b/N_0 . Les résultats qu'on a obtenus sont le fruit de nombreux mois d'acharnement. En effet, il fallait en premier lieu se familiariser avec les différents équipements, pour ensuite entamer le montage, puis le paramétrage de la chaîne. La montée sur satellite fût une toute autre expérience, et l'erreur était interdite.

Cette étude nous a apporté non seulement des connaissances théoriques, mais également des connaissances d'ordre technique et professionnel. Et ça a répondu à nombreuses de nos questions, surtout celles concernant l'utilité de ces normes dans le domaine des télécommunications aéronautiques.

Dans le dernier chapitre, nous parlerons des télécommunications aéronautiques d'une manière générale, puis des nécessités actuelles, ensuite de l'introduction de ces normes comme moyen d'accès satellitaire en Europe. Finalement, nous allons aborder le problème de synchronisation des stations VSAT au niveau de l'ENNA et les risques que ça implique, puis proposerons une solution basée sur la norme DVB-RCS.

Chapitre 4

La norme DVB-S en Aéronautique

4.1. Historique :

Les premières liaisons radios aéronautiques remontent au début du XXe siècle. A cette époque les ballons dirigeables et les avions communiquaient en radiotélégraphie dans la bande aéronautique des 900 mètres. Depuis, les systèmes utilisés n'ont cessé d'évoluer au gré des avancées technologiques et des nouveaux besoins émergents.

Ces communications entre les aéronefs et le sol se sont rapidement avérées indispensables pour améliorer la sûreté et l'efficacité des vols. En 1917, le premier émetteur récepteur radio pour avion a été inventé et la première communication radio entre un avion et le sol a été effectuée. Mais ce n'est qu'au début des années 1930 qu'il est devenu techniquement et commercialement possible d'installer une radio à bord des avions. C'est d'ailleurs à cette même époque que la société ARINC (Aeronautical Radio INCorporated), un acteur important du domaine, a été fondée.

Après la deuxième guerre mondiale, l'aéronautique a connu une évolution majeure avec l'apparition de l'aviation commerciale et le transport des passagers. En 1947, l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) a été créée pour veiller au développement sûr et ordonné de l'aviation civile internationale. C'est aussi en 1947, lors de la conférence mondiale des radiocommunications, organisée par l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), que la bande VHF de 118 à 132 MHz est allouée aux services aéronautiques mobiles. Cette bande est alors divisée en 70 canaux de 200 kHz. Ce nombre n'a cessé d'augmenter depuis, pour atteindre son maximum en 1994. Le tableau 4.1 montre l'évolution du nombre de canaux VHF de 1944 à nos jours.

Année	Bande de fréquence	Espacement des canaux	Nombre de canaux
1947	118 - 132 MHz	200 kHz	70
1958	118 - 132 MHz	100 kHz	140
1959	118 - 136 MHz	100 kHz	180
1964	118 - 136 MHz	50 kHz	360
1972	118 - 136 MHz	25 kHz	720
1979	118 - 137 MHz	25 kHz	760
1994	118 - 137 MHz	8,33 kHz	2280

Tableau 4.1. Evolution du nombre de canaux VHF pour les communications aéronautiques

Aujourd'hui, les fréquences de radiocommunication sont très convoitées. Il est donc difficile d'étendre la bande aéronautique VHF. De plus, la séparation des canaux de 8,33 kHz correspond à l'espacement minimal qui permet de transmettre de la voix avec une qualité suffisante. Il est donc à présent très difficile d'augmenter la capacité des systèmes de communications vocales. Cette augmentation est pourtant nécessaire pour répondre à la croissance du trafic aérien [35].

Le transport aérien est aujourd'hui le moyen de transport qui se développe le plus rapidement. La figure 4.1 illustre les prévisions d'augmentation du trafic aérien en Europe d'ici 2020 par Eurocontrol.

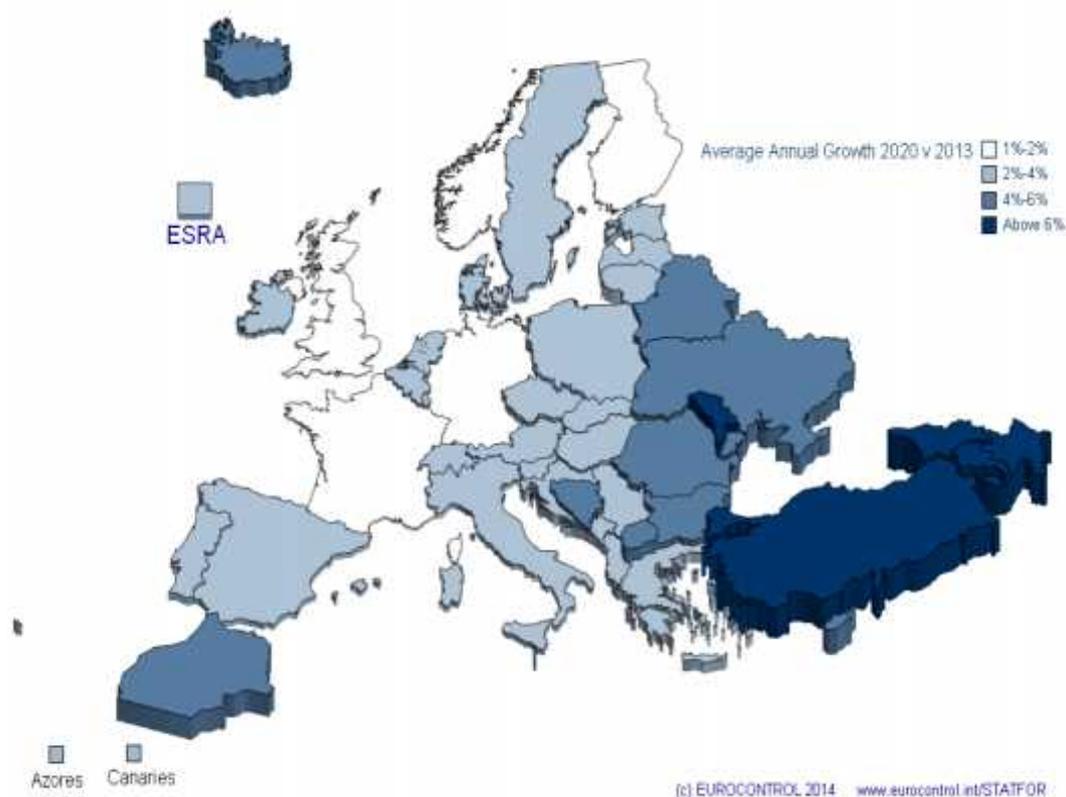


Figure 4.1. Prévisions de l'augmentation du Trafic aérien en Europe

4.2. Le Datalink et le concept CNS/ATM :

A la fin des années 70, les compagnies aériennes ont pris conscience du potentiel et de l'intérêt de proposer des communications basées sur les liaisons de données numériques sol bord en introduisant l'ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System). Ce système utilise les canaux VHF de 25 kHz réservés aux communications vocales. Il offre

un débit de 2,4 kbps et a pour but d'échanger des messages textes entre l'avion et la compagnie aérienne [36].

En 1983, un comité dédié aux futurs systèmes de navigation aérienne a été créé. Il s'agit du comité FANS (Future Air Navigation System). Il était chargé d'étudier, d'identifier et de développer de nouveaux concepts opérationnels et de nouvelles technologies dans le domaine des communications, de la navigation et de la surveillance aérienne, pour faire face aux nouveaux besoins et à la croissance du transport aérien mondial. C'est ainsi qu'a été introduit en 1991, le concept CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance/ Air Traffic Management). Son but étant d'améliorer la capacité et l'efficacité du transport aérien, tout en garantissant la meilleure sûreté possible.

Le comité FANS, dans un premier temps propose de changer la manière même dont les pilotes et les contrôleurs au sol communiquent entre eux. Le moyen de communication primaire doit ainsi passer progressivement des communications vocales aux communications de données numériques, communément appelé Datalink. C'est ainsi qu'on a vu naître l'application CPDLC (Controller Pilot Data Link Communications) prévues pour une utilisation dans les espaces aériens océaniques ou polaires.

Dans un contexte d'un réseau plus global, le réseau ATN (Aeronautical Telecommunication Network) qui permet l'interconnexion des différents réseaux de l'aviation civile, y compris les liens sol bord est en train d'être développé. Certains sous-réseaux sont déjà en cours de déploiement comme la VDL (VHF Datalink) mode 2. Depuis 2004 des applications CPDLC ont ainsi été mises en œuvre pour les avions en route grâce à la VDL mode 2. Actuellement, le réseau ATN est toujours en cours de déploiement.

4.3. Les classes de communications sol bord :

Les communications aéronautiques font l'objet de recommandations émises par l'OACI. Elles sont regroupées dans un document de référence de l'OACI nommé l'annexe 10 [37]. Cette annexe a été régulièrement amendée et comporte aujourd'hui cinq volumes. Le volume III est consacré aux systèmes de communication et divisé en deux parties dédiées respectivement aux communications de données numériques, et aux communications vocales.

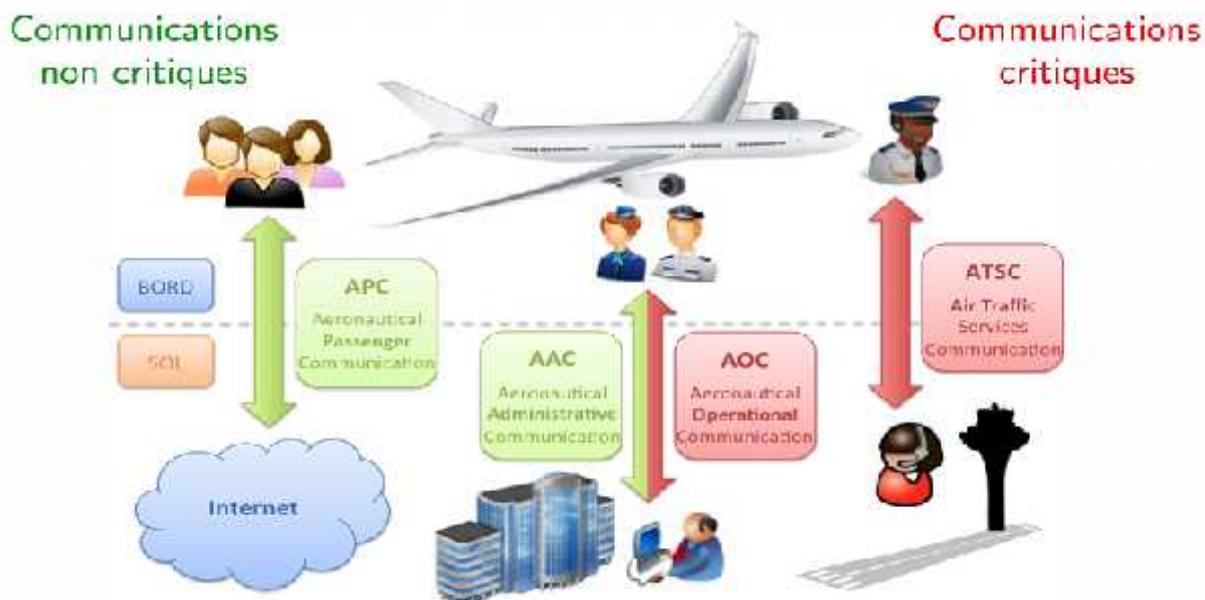


Figure 4.2. Les classes de communications sol bord

Dans la première partie, et comme le montre la figure 4.2 l'annexe 10 de l'OACI définit quatre catégories de communications aéronautiques sol bord :

- **ATSC (Air Traffic Services Communication)** : Les communications pour les services du contrôle aérien ;
- **AOC (Aeronautical Operational Control)** : Les communications opérationnelles pour les compagnies
- **AAC (Aeronautical Administrative Communication)** : Les communications administratives pour les compagnies
- **APC (Aeronautical Passenger Communication)** : Les communications pour les passagers

Les communications ATSC et AOC sont classifiées comme critiques. L'ATSC désigne les communications entre pilotes et personnels du contrôle aérien au sol. Les services ATSC ont pour but d'éviter les collisions entre les aéronefs, ou encore de fournir les informations utiles à l'exécution sûre et efficace du vol. Ils doivent aussi fournir un service d'alerte pour prévenir les organismes appropriés lorsque la situation d'un avion le nécessite.

Les compagnies aériennes ont aussi des besoins en communication pendant le vol. Les communications opérationnelles (AOC) regroupent l'ensemble des "communications nécessaires à l'exercice de l'autorité sur le commencement, la continuation, le déroutement ou l'achèvement du vol pour des raisons de sécurité, de régularité ou d'efficacité" [37]. Ces

communications permettent aux pilotes de bénéficier d'une liaison directe avec le personnel de la compagnie au sol.

Les communications administratives AAC désignent les communications entre les pilotes et les compagnies mais qui ne sont pas liées à la sécurité ou la sûreté des vols. Enfin, les communications Passagers (APC) regroupent l'ensemble des services proposés aux passagers basés sur des communications sol bord. Cette dernière catégorie fait l'objet de beaucoup de travaux de recherches car trop peu de services APC sont proposés à ce jour pendant les vols.

4.4. Les systèmes de communications de données :

4.4.1. Les systèmes de communications de données pour le contrôle aérien :

On distingue deux catégories de systèmes de communication de données numériques pour le contrôle aérien. Les liaisons directes avec le sol et les liaisons par satellite, comme le montre la figure 4.3.



Figure 4.3. Les systèmes de communications pour le contrôle aérien

Les performances requises pour les communications aéronautiques sont exprimées sous la forme de RCP (Required Communication Performance) [38] définies par l'OACI. Les performances attendues sont exprimées par un ensemble de paramètres et leur valeur requise. On peut citer :

- **La disponibilité (Availability)** : la probabilité qu'une transaction opérationnelle puisse être initiée ;
- **Le temps de transaction (TT95)** : le temps maximum pour qu'une transaction opérationnelle soit terminée pour 95% des cas ;

- **L'intégrité (Integrity)** : le taux maximum acceptable d'erreurs non détectées pendant une transaction opérationnelle.

Mais ce qui caractérise surtout ces paramètres, c'est le niveau d'exigence qu'ils fixent par leur valeur. Effectivement, compte-tenu des enjeux et du niveau de sûreté légitimement attendu pendant les vols, il est normal d'exiger des systèmes de communications de très hautes performances.

4.4.2. Les systèmes de communication de données pour les passagers :

Les communications aéronautiques pour les passagers ne sont pas soumises aux mêmes exigences de disponibilité, d'intégrité et de continuité que pour les communications du contrôle aérien, du fait qu'elles n'impactent pas la sûreté des vols.

Les recommandations concernant la qualité des services multimédia pour les passagers prévoient trois principaux paramètres :

- **Le délai** : la durée entre l'émission et la réception des données ;
- **La gigue** : la variation du délai ;
- **Le taux de perte** : le ratio de paquets perdus.

L'UIT (Union Internationale des Télécommunications) donne des recommandations pour de nombreuses applications vocales ou de données telles que la téléphonie, la visioconférence, la navigation sur le Web ou encore l'émission et la réception de courriers électronique [39]. Le tableau 4.2 en donne quelques exemples.

Application	Délai	Gigue	Taux de pertes
Téléphonie	<150 ms (préférable) <400ms (limite)	<1ms	<3%
Navigation web	<2s/page (préférable) <4s/page (préférable)	-	-
Courrier électronique	plusieurs mn	-	-

Tableau 4.2. Performances des services multimédias

4.5. Les limites des systèmes existants et les perspectives :

A ce jour, les systèmes permettant les communications sol bord aéronautique sont nombreux et différenciés suivant qu'ils s'adressent aux communications critiques ou non critiques. Les solutions par satellites présentent des limitations principalement en termes de capacité disponible.

On comprend donc que dans un contexte de croissance du trafic aérien et de l'apparition de nouveaux besoins notamment pour les passagers mais aussi pour le contrôle aérien et les compagnies, il est nécessaire d'envisager de nouvelles solutions qui pourront répondre aux différentes contraintes spécifiques du domaine aéronautique. Plusieurs industriels et opérateurs étudient de nouvelles solutions et plusieurs projets de recherches couvrent aussi les problématiques inhérentes à ces systèmes.

Inmarsat travaille avec Boeing sur la conception d'une nouvelle génération de satellite, Inmarsat 5. La principale nouveauté de ce système est qu'il utilisera la bande de fréquence Ka (26,5 à 40 GHz) qui devrait permettre de fournir des débits supérieurs à ceux proposés actuellement.

Iridium travaille aussi sur la deuxième génération de sa constellation de satellites. En 2010, elle a signé un contrat avec Thales Alenia Space pour la construction de 81 satellites. Le développement et le lancement de ces satellites se poursuivent actuellement avec un objectif de système opérationnel pour 2017.

En Europe, beaucoup de travaux sur les futures communications aéronautiques sont actuellement menés dans le cadre du projet SESAR (Single European Sky ATM Research) [40]. Ce projet se déroule en trois phases :

- Une phase de définition de 2004 à 2008 financée en partie par la Commission Européenne et dirigée par Eurocontrol ;
- Une phase de développement de 2008 à 2014 ;
- Une phase de déploiement de 2014 à 2020.

Le projet SESAR est un projet européen très ambitieux. Son objectif global est de définir et d'implémenter de nouvelles solutions techniques et opérationnelles pour satisfaire les besoins du contrôle aérien à l'horizon 2020. Il devrait permettre de multiplier par trois la capacité de l'espace aérien, et de multiplier par dix la sûreté des vols tout en réduisant de 10% les émissions de CO₂ et de 50% les coûts du contrôle aérien. Un projet similaire existe aux Etats-

Unis sous la direction de la FAA. Il s'agit de NEXTGEN (Next Generation Air Transportation System) [41].

Le projet ANASTASIA (Airborne New and Advanced Satellite techniques and Technologies in A System Integrated Approach) a démontré la convenance des normes DVB-S2 et DVB-RCS pour la provision de services ATM [42]. La suite du document illustre l'architecture du lien DVB-S2/RCS dans ce contexte.

4.6. Accès satellite DVB-S2/RCS :

La figure 4.4 montre un modèle de référence de cette liaison, où la norme DVB-S2 est retenue comme spécification d'accès pour la voie aller (de la station terrestre aux avions) et la norme DVB-RCS pour la voie retour (des avions à la station terrestre).

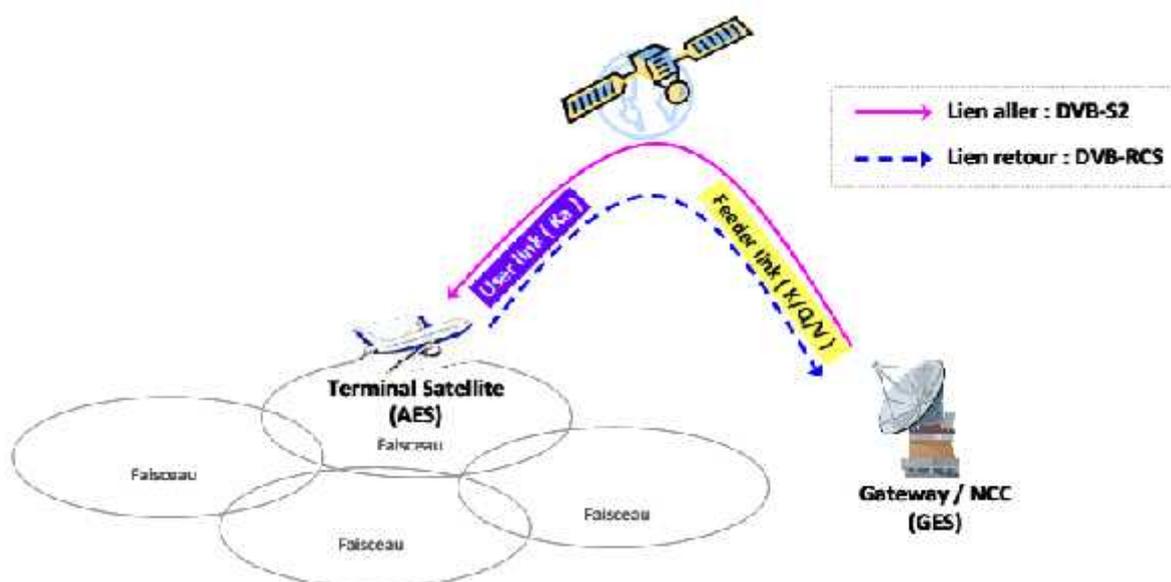


Figure 4.4. Réseau d'accès DVB-S2/DVB-RCS

4.6.1. Lien aller DVB-S2 :

Le partage de la ressource du lien aller DVB-S2 entre les terminaux satellitaires est basé sur la méthode TDMA (Time Division Multiple Access) : la GW découpe la bande passante pour plusieurs terminaux par une division temporelle. Avec l'utilisation de l'ACM, une séquence de trames TDM est émise par la GW dont le type de modulation et de codage (28 combinaisons sont disponibles dans la DVB-S2 avec un gain maximum de 18.4 dB) peut être modifié trame par trame afin de s'adapter dynamiquement au canal. La décision du mode ACM s'appuie sur un contrôle en boucle fermée par la voie retour DVB-RCS. Les

informations de retour comprennent notamment des mesures de rapport signal sur bruit et interférence (CNI : Carrier to Noise and Interference ratio) et le ModCod le plus approprié pour le terminal.

4.6.2. Lien retour DVB-RCS :

Le lien retour DVB-RCS est plus contraint que le lien aller DVB-S2 en termes de performances. Le bilan de liaison depuis le mobile vers la station terrienne est impacté par la limitation de la taille d'antenne et de la puissance d'émission. La bande passante d'un répéteur doit être partagée en plusieurs porteuses sur lesquelles plusieurs terminaux doivent pouvoir émettre. La technique d'accès est donc du type MF-TDMA (Multi Frequency – Time Division Multiple Access), qui suppose une répartition en plusieurs fréquences distinctes, ces canaux fréquentiels sont subdivisés en trames ; chaque trame est partagée en intervalles temporels (burst) durant lesquels les terminaux peuvent transmettre des données ou de la signalisation [43].

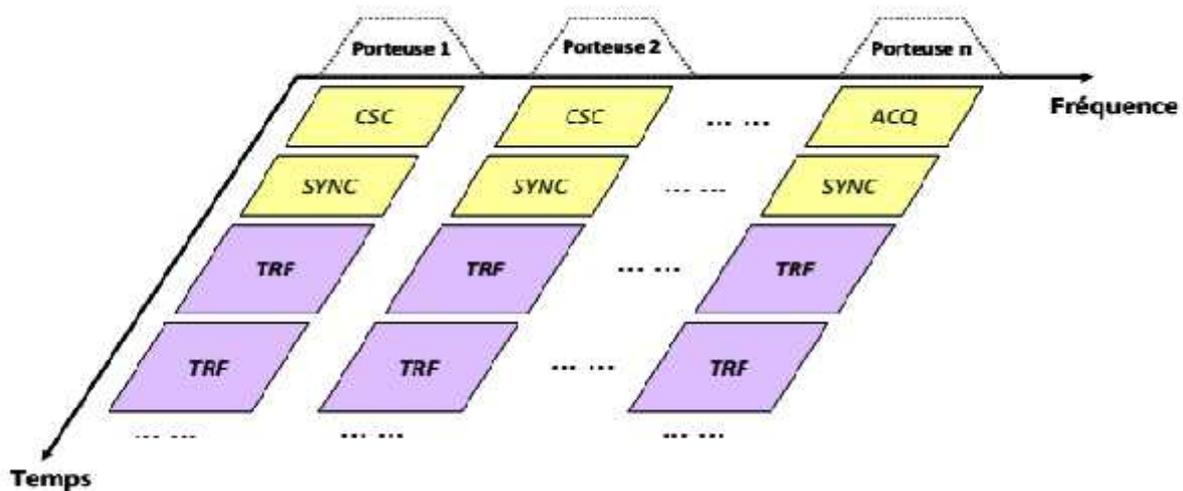


Figure 4.5. Méthode d'accès pour le lien retour DVB-RCS (MF-TDMA)

En plus de la MF-TDMA et de l'ACM (Adaptive coding Modulation), des techniques appelées FMT (Fading Mitigation Technique) ou techniques de contre mesure d'atténuation sont utilisées.

Ces techniques reposent sur une évaluation dynamique du bilan de liaison et permettent une modification de la forme d'onde. Le système utilise ainsi la forme d'onde la plus efficace spectralement pour chaque terminal et maximise la capacité globale du système.

La marge fournie par cette technique est apparentée à la disponibilité du lien. Le modèle de l'UIT exige une disponibilité de 99,9% du temps quelle que soit la condition atmosphérique.

Mode	Modulation and coding	Req. Es/No	Symbol Rate	Data rate
0	BPSK 1/3	-1.5 dB	170 ks/s	56 kbit/s
1	BPSK 1/3	-1.5 dB	683 ks/s	228 kbit/s
2	QPSK 1/2	4.5 dB	683 ks/s	683 kbit/s
3	QPSK 2/3	6.9 dB	683 ks/s	910 kbit/s
4	8PSK 1/2	8.7 dB	683 ks/s	1024 kbit/s

Tableau 4.3. Les modes FMT

Les modes illustrés dans le tableau 4.3 ont été choisis de telle façon à obtenir un Symbol Rate constant à l'exception du Mode 0 qui est considéré comme un mode de secours garantissant une disponibilité optimale pour les services ATC. Cela veut dire que les porteuses occupent une même largeur de bande.

Il est intéressant de souligner que le Data Rate obtenu en utilisant la FMT mode 0 est similaire à celui d'un lien VDL mode 2 [44].

4.7. Le lien DVB-RCS comme support de données Radar :

La croissance rapide du trafic dans notre espace aérien et l'ancienneté des systèmes utilisés pour le transfert de l'information aéronautique imposent l'introduction de nouveaux supports de transmission, avec une bande passante globale fortement accrue, qui assurent des liaisons de données plus directes et plus efficaces pour réduire le maximum d'erreurs et augmenter le taux de sécurité. [42]

Dans ce contexte, l'établissement national de la navigation aérienne est en cours de chercher un moyen plus fiable, à faible coût et disponible sur le marché.

4.7.1. Présentation de l'Etablissement Nationale de la Navigation Aérienne :

L'Etablissement National de la Navigation Aérienne (**ENNA**) est un établissement qui assure le service public de la sécurité de la navigation aérienne, le contrôle et le suivi des appareils en vol, pour le compte et au nom de l'Etat. Il est placé sous la tutelle du Ministère des Transports, en coordination avec les autorités concernées et les institutions intéressées.

4.7.2. Le Service Radar de l'ENNA :

La couverture radar de l'espace aérien offre la possibilité d'échange de données air-sol c.-à-d. elle permet un contrôle du trafic aérien sûr et efficace. À cet effet, l'ENNA a mis en avant l'utilisation de ses systèmes de détection afin de garantir la souveraineté de l'état dans son espace aérien.

Le Service Radar : C'est le service qui gère la station radar d'Alger (primaire/secondaire) ainsi que les liaisons et la coordination avec 4 autre stations Radar secondaire à : Annaba, Oran, El oued, El Bayadh et les liaisons militaire (voir Figure 4.6)

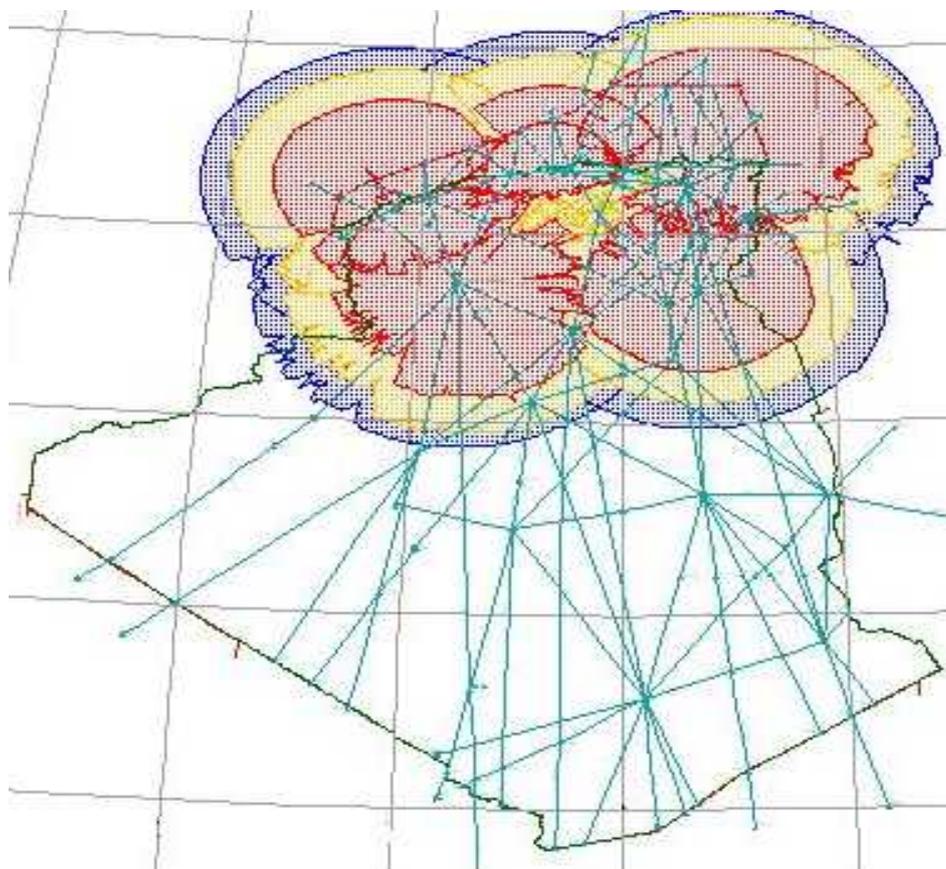


Figure 4.6. La couverture radar en Algérie

4.7.3. Le système RADAR :

Dans le but de gérer le trafic aérien dans l'espace aérien Algérien (partie du Nord), l'ENNA utilise les quatre stations SSR, ainsi que la cinquième station d'Alger Co-implanté (PSR, MSSR). Chaque station fournit trois formats de données :

- ✓ Données SAACTA (Système Algérien Automatisé de Contrôle du Trafic Aérien) pour corrélation avec les informations plan de vol ;
- ✓ Données TIC/TIS (Télé contrôle/ Télé signalisation) ;
- ✓ Données EXTERNAL (données radar pour une utilisation militaire) ;
- ✓ Données ALENIA (image radar brute) ;

Ces données radar issues d'un serveur nommé «RHP» *Radar Head Processor*, en disposant de huit sorties configurables. Comme on peut le voir sur la figure (4.7) tous les RHP envoient les TIC/TIS, SAACTA, EXT et radar data (données Alenia pour image brute sans corrélation avec les informations plan de vol) au centre de contrôle régional « CCR ».

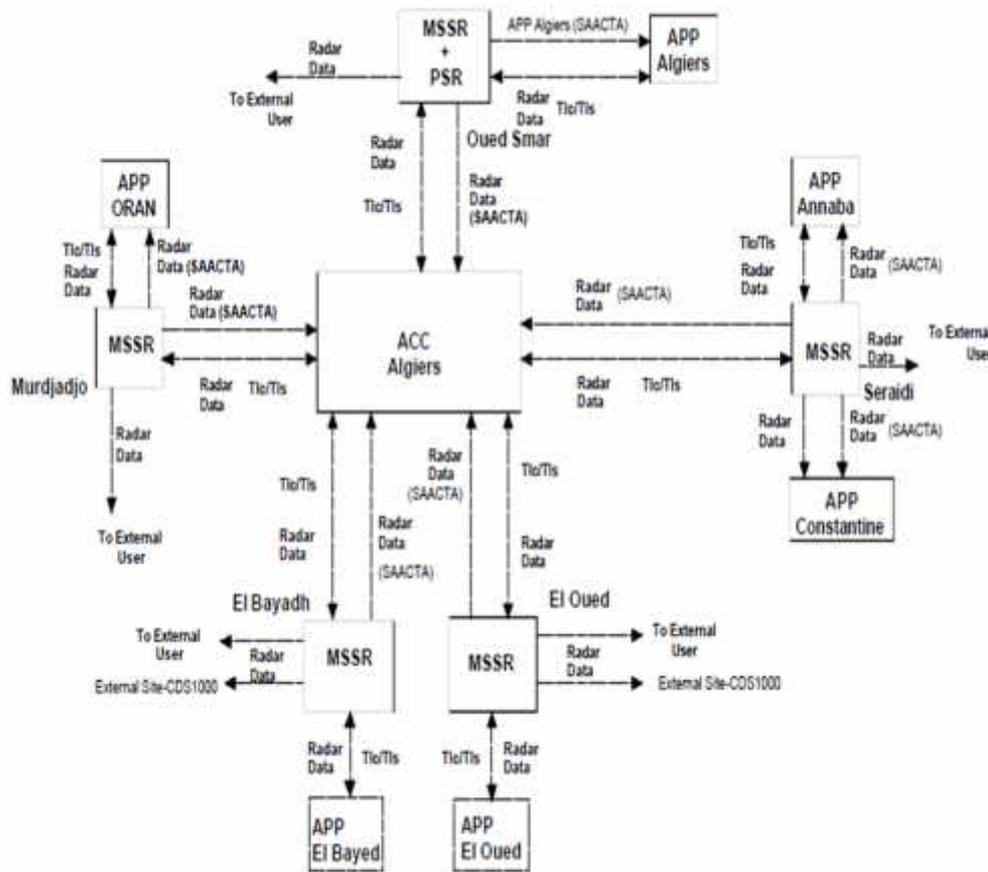


Figure 4.7. Diagramme des stations Radar (PSR, MSSR)

Sachant que :

ACC Algiers : Centre de contrôle régional d'Alger ;

MSSR : Monopulse Secondary Surveillance Radar, avec une portée de 250NM ;

PSR : Primary Surveillance Radar, avec une portée de 80NM ;

APP : les approches (aérodrômes).

D'après le diagramme des stations Radar montré dans la figure (4.7), le système Radar adopté par l'ENNA dispose de 5 stations Radar (Alger, Annaba, El bayadh, El oued et Oran) fournissant l'information de chaque secteur qui le couvre au CCR d'Alger via les supports de transmission notamment la fibre optique, les câbles coaxiaux, et les faisceaux Hertzien. Dans le but de protéger l'information de tout type d'atténuation et de perte, plusieurs centres d'amplification d'Algérie Télécom existent entre les stations Radar et le CCR d'Alger.

Les données Radar des 5 stations convergent vers la salle technique (CCR d'Alger), qui comprend les informations suivantes :

- La position et la vitesse ;
- Mode Alpha (Mode A) c'est le code SSR ;
- Mode Charles (Mode C) c'est l'altitude ;

En plus des données ci-dessus et dans le but d'enrichir ces data l'ENNA dispose d'un système qui assure la corrélation entre les donnée radar brute (issues des capteurs radar) et les informations aéronautiques (plan de vol, info météo) fournies au contrôleur pour remplir sa mission dans la gestion du trafic aérien.

Le service radar comprend encore un système de contrôle et de supervision déporté RCMS (Remote Control & Monitoring System) pour assurer le contrôle technique des cinq stations radar.

4.7.4. Solution VSAT :

Pour optimiser notre espace aérien (la flexibilité de l'espace), il faut assurer la continuité de service en fournissant l'information nécessaire au contrôleur aérien. Pour cela l'ENNA a choisi de redonder leur support de transmission.

Vu les avancés connus dans le domaine des transmissions des données via le satellite, un système basé sur des satellites géostationnaires et permettant l'émission/réception de données

à partir d'un terminal de petite dimension et accessible sur le marché, nommé VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) peut être une solution fiable. Le VSAT est un système qui repose sur le principe d'un site principal (le hub) et d'une multitude de points distants (les terminaux) reliés via un lien satellitaire comme c'est montré dans la figure 4.8.

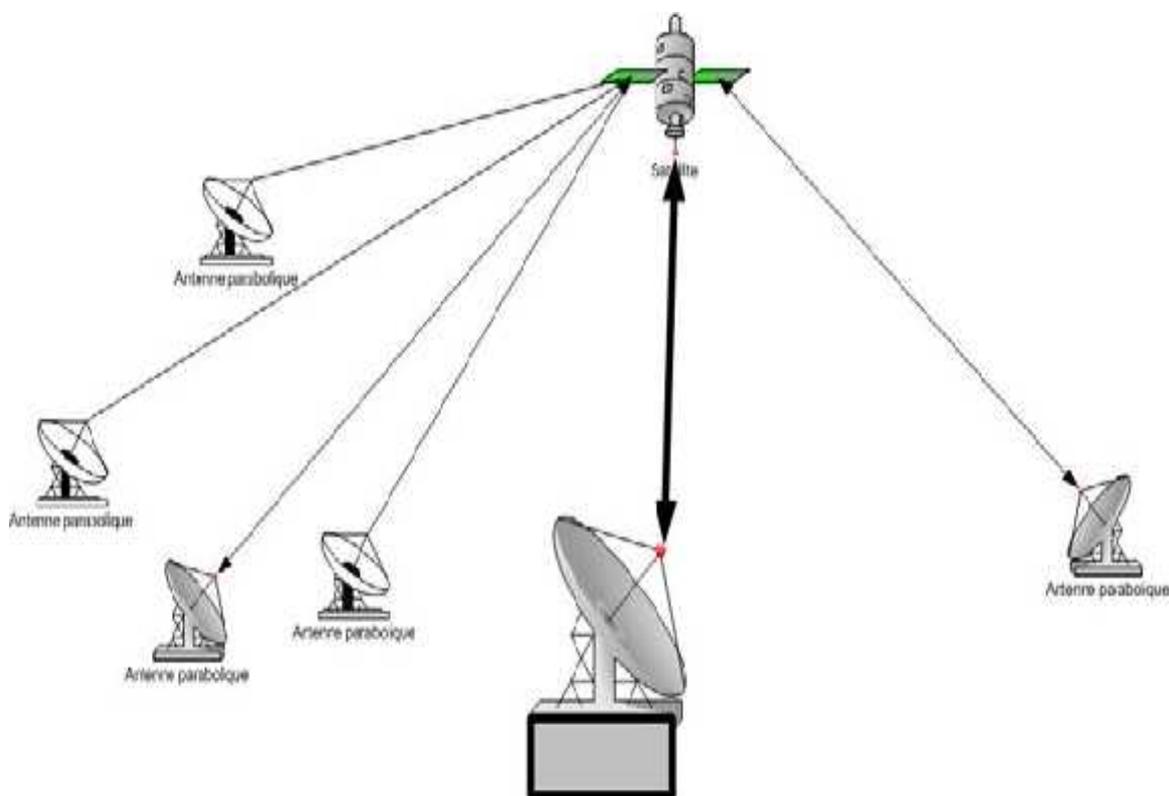


Figure 4.8. Principe du concept VSAT

4.7.5. Réseau VSAT de l'ENNA :

Le réseau VSAT, en bande Ku est constitué de 15 stations, dont une principale configurée en un Mini HUB, et 14 stations secondaires. Est actuellement utilisé principalement pour la coordination CCR/AERODROME, sauf pour certains terrains, où on trouve aussi de la VHF (Antennes avancées) et pour les communications AIR/SOL.

La configuration actuelle du réseau VSAT bande Ku est montré comme suit :

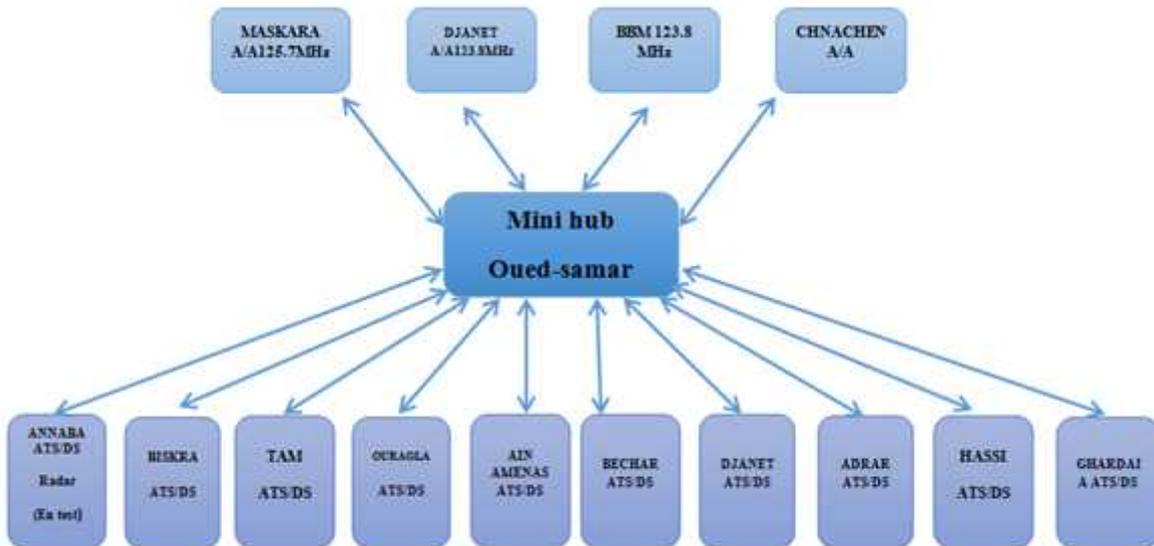


Figure 4.9. Configuration du réseau VSAT de l'ENNA

Remarque :

Afin de nous permettre une meilleure gestion de notre réseau VSAT bande Ku, une station de supervision en temps réel et de control (UMC), auprès d'Algérie Télécom par Satellite (ATS) à LAKHDARIYAH, a été installée.

4.7.6. Le transfert des données Radar via le VSAT :

Comme les supports de transmissions terrestre (fibre optique, câbles coaxiaux, etc.), l'ENNA prévoit l'utilisation du support VSAT pour transmettre les données Radar des 5 stations au CCR d'Alger.

Les tests réalisés par les spécialistes radar ENNA en coordination avec les services télécom pour la transmission des données radar via le support VSAT/KU nous ont conduits à conclure que l'un des problèmes souvent reconnu dans la transmission différents type de données est la synchronisation.

Vu l'importance de l'information Radar (continuité de service) dans la sécurité aéronautique et la gestion du trafic aérien, il est donc nécessaire d'investiguer et localiser la source de ce problème et le prendre en charge par la suite.

En effet, après études des anomalies dans la transmission des données radar liées aux problèmes de synchronisation via le VSAT, il a été procédé à la présentation des phénomènes de synchronisation comme montré par la suite.

4.7.6.1. Le retard dû au temps aller-retour de l'onde électromagnétique :

Comme toute transmission, utilisant un lien satellitaire, le temps aller-retour de l'onde électromagnétique provoque un écart considérable entre l'émission et la réception. Le retard est dû à plusieurs facteurs, essentiellement la longueur du trajet entre l'émetteur et le satellite (qui est égale à 35 838 Km pour un satellite géostationnaire).

Pour mieux comprendre l'impact du retard sur le transfert des données Radar via le VSAT, il suffit de réaliser une plateforme de supervision des données radar déportés via deux supports de transmission différents (terrestre et satellitaire) (tests effectués à l'ENNA avec les données du site Annaba) comme présenté ci-dessous :

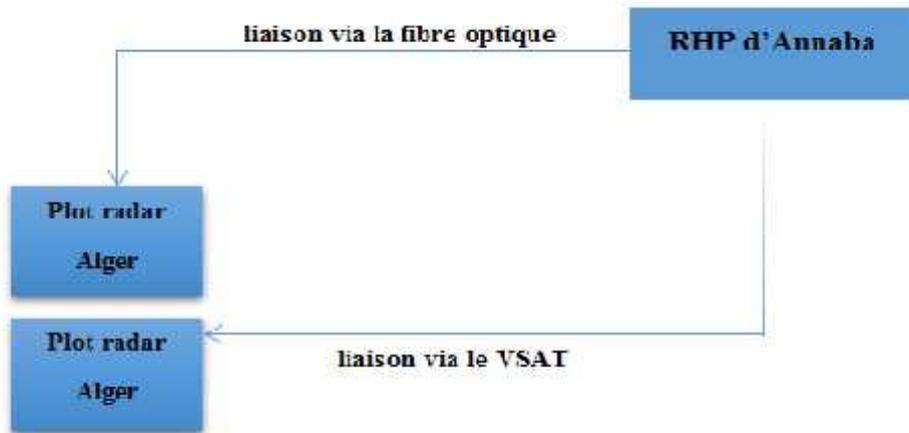


Figure 4.10. Schéma synoptique du transfert des données radar via deux supports différents

Remarque :

On remarque que les plots radar reçus d'une liaison terrestre apparaissent avant ceux reçus d'une liaison satellitaire, et ce dû au retard de 600 ms, sachant que :

$$L_{\text{ter}} = T_{\text{A/R}} + T_{\text{TS}} \quad (4.1)$$

Conclusion :

Le VSAT est un moyen de transmission secours très efficace. Malheureusement, ce type de support est lié au retard engendré par le trajet aller/retour vers le satellite qui perturbe la stabilité de l'image radar reçue.

4.7.6.2. Apparition et disparition des plots radar :

Les plots radar (l'image radar) est la représentation graphique du trafic aérien dans un espace aérien bien déterminé, sur une position de travail appelée « écran radar », qui désigne les différentes cibles détectées par un balayage horizontal d'une antenne radar.

L'importance de l'information fournie par ce dernier nécessite un codage et un système de sécurité d'un niveau élevé. Et ce, dans le but de préserver et protéger ces données durant la transmission et la diffusion pour garantir une meilleure sécurité des données dans ce domaine sensible.

Suite aux perturbations rencontrées sur les liaisons de transmission terrestre durant le transfert des données aéronautiques (radar, VHF...) entre deux sites déportés, il est nécessaire de réaliser un support secours via un satellite pour assurer la continuité de service.

La perte d'image du trafic des zones de couverture radar conduit à un contrôle aux procédures qui nécessite d'augmenter les séparations entre aéronefs pour pouvoir gérer le trafic aérien.

Les tests techniques effectués pour une transmission de données radar entre un site déporté et le site central d'ALGER (CCR) en collaboration entre l'ENNA et l'ATS ont été présentés comme suit :

1. **Réglage, paramétrage et adaptation des modems au niveau du site d'Alger :**
Apparition instable des plots et disparition d'autres avec une fréquence très élevée.
2. **Plusieurs tentatives de réglage des modems (entrées-sorties) au niveau du hub ATS (Algérie Télécom Satellite) :** Amélioration de la situation dans le temps de perte des plots.
3. **intervention des techniciens ATS sur la bande passante allouée pour la transmission via le VSAT :** Cela a mené à une stabilité considérable des plots mais avec saturation du canal.

Les résultats cités ci-dessus nous ont conduits à introduire l'architecture DVB-RCS adopté par la norme DVB, en se servant des chapitres précédents ainsi que des applications dans le domaine de l'aéronautique afin de proposer une solution pour le problème de saturation de la bande passante.

4.8. Solution DVB-RCS :

Dans n'importe qu'elle système de transmission par satellite, le retard de trajet est inévitable, par ailleurs une réduction du temps de traitement de l'information est possible et pour cela des algorithmes, des processeurs de haute vitesse et des modes d'accès au satellite sont employés pour des services qui nécessitent des délais de traitement et de transmission resserrés.

Dans le système VSAT utilisé par l'ENAA, l'accès au satellite est en SCPC, qui implique une capacité satellitaire permanente pour chaque site. De plus, le MODCOD utilisé est le Viterbi qui rajoute un débit supplémentaire à la donnée utile, ce qui induit une réduction de vitesse de téléchargement et désynchronisation du système. Pour éviter ces effets, une augmentation de la bande passante (bitrate) de chaque site peut résoudre le problème, mais en contrepartie il faudrait une grande capacité satellitaire. Le coût devient donc plus important, la figure suivante illustre la répartition des porteuses sites sur le spectre de fréquence.

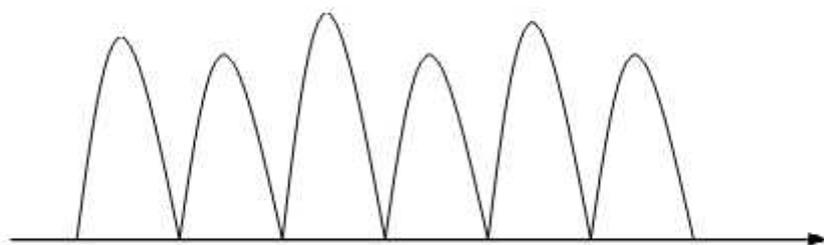


Figure 4.11. Répartition des porteuse VSAT sur le spectre de fréquence

Pour optimiser l'utilisation de la bande passante, le DVB-RCS apparait comme une bonne solution, car il a un mode d'accès MFTDMA. Les sites transmettent leurs données décalées en temps et en fréquence, ce qui permet un gain important en termes de capacité satellitaire. Mais pour réaliser cette configuration on doit synchroniser tous les sites et assurer leurs bilans de liaison.

4.8.1. Le système MENOS :

Le MENOS (Multimedia Exchange Network Over Satellite) est un réseau d'échange de données par satellite il assure la connexion entre le hub et les différents SIT (Small Interactif Terminal) via une topologie DVB-RCS (figure 4.12), le hub envoi les différents Stream dans une porteuse en mode MCPC (Multi Channel Per Carrier) avec une modulation DVB-S2 multi-Stream qui peut offrir un MODCOD spécifique pour chaque flux et une adaptation de la puissance de la porteuse qui est calculée afin d'assurer un bon signal de réception aux niveaux des SIT.



Figure 4.12. Schéma synoptique du réseau MENOS basée sur le DVB-RCS

Les différents SIT, sont nommés selon les services qu'ils peuvent offrir. Par exemple, un SIT qui ne peut transporter que la radio est appelé SIT-Radio, pour l'internet il sera nommé SIT-IP, et pour la télévision SIT-TV.

4.8.2. Le système MENOS de la TDA :

La TDA est un des membres fondateurs de l'ASBU (Arab States Broadcasting Union) qui est le propriétaire du système MENOS. Elle héberge le hub au centre de Bouchaoui et dispose d'un réseau TV qui assure les contributions entre les maisons TV de Bechar, Ouargla, Oran, Constantine et Alger. Elle dispose aussi d'un réseau radio qui permet d'assurer les échanges et les duplexes entre les différentes radios régionales, et enfin d'un réseau Intranet qui relie toutes les directions régionale de TDA avec la direction centrale.

4.8.3. Le MENOS pour le transfert des données radar :

Le système MENOS offre cette possibilité. D'où le HUB qui envoie une porteuse (Forward) contenant les données GPS pour la synchronisation des sites avec le système de réception (Brut démodulateur), les différentes configurations des Modulateurs MFTDMA installé au niveau des SIT avec une modulation ACM (adaptive code mode) qui permet une bonne réception au sol. Les Returns des SIT sont en MFTDMA sur une autre capacité, la synchronisation d'accès au satellite et entre les SIT et le récepteur, est assurée par un serveur appelé MRS (Management ressources satellite) installé au niveau du HUB, qui peut garantir un taux de chevauchement entre les porteuses à 0%, ainsi il offre la possibilité d'augmenter la bande passante des SIT lorsque le trafic sur la capacité MFTDMA est faible ; par exemple pour une capacité de 3 MHz partagée entre 3 SIT et si un site arrête les transmissions, cette capacité sera partagée entre les deux SIT restants, donc soit 1.5 MHz pour chaque site au lieu de 1 MHz.

Pour la démodulation des porteuses MFTDMA au niveau du HUB, il existe des bruts démodulateurs qui récupèrent les données après démodulation et dés-encapsulation pour qu'elles soient rassemblées et envoyées via le serveur NMS (network management Stream) vers le système d'affichage des images radar (écran radar).

En termes de capacité satellitaire, avec l'accès MFTDMA on peut faire fonctionner tous les SIT radar avec trois porteuses de 256 MHz sans perte de synchronisation car les SIT-IP de MENOS utilisent un turbo FEC comme MODCOD. Ce dernier permet une rapidité d'encapsulation et dés-encapsulation et sa consommation en bitrate est très réduite par rapport au Viterbi.

Pour la sécurisation des données, les trames sont envoyées avec une entête contient l'adresse MAC du récepteur donc un seul récepteur qui peut décoder cette information. Les entêtes sont générées au niveau des SIT via le **MDM 3300** (figure 4.14) qui intègre un modulateur MFTDMA, un démodulateur DVB-S2 (ACM) et un routeur qui assure le filtrage des flux RX et TX, au niveau du HUB le serveur NMS rajoute les entête sur les données suivant leurs destination (adresse MAC de MDM 3300 installé au niveau des SIT ciblés). La figure 4.13, représente la répartition des capacités d'un système DVB-RCS sur le spectre de fréquence.

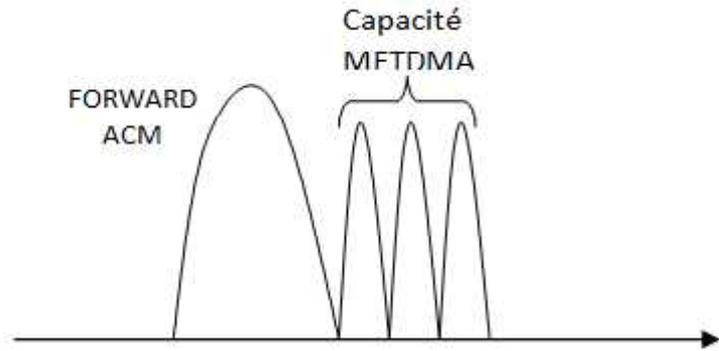


Figure 4.13. Optimisation de la bande passante dans un système DVB-RCS



Figure 4.14. MDM 3300 Satellite Modem

Conclusion:

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les différentes applications de la norme DVB-S dans le domaine aéronautique en général et dans le concept CNS/ATM en particulier. Nous avons dans un premier lieu, analysé les problèmes dû au transfert de données Radar via le réseau VSAT adopté par l'ENNA, puis proposé le lien DVB-RCS comme solution fiable et déjà existante en Algérie (exemple du réseau MENOS basé sur la technologie DVB-RCS de la TDA).

Conclusion générale et perspectives

La convergence des télécommunications vers des liaisons satellitaires est un fait indiscutable en vue des nombreux avantages que ça en procure. Les besoins croissants des utilisateurs d'être connectés partout, n'importe quand et à partir de n'importe quel terminal impliquent des architectures de plus en plus évoluées.

Le principal objectif de ce travail est de présenter les normes DVB-S et DVB-S2 dans le cas de la télévision numérique d'une part, et dans celui des télécommunications aéronautiques de l'autre.

Notre stage à la Télé Diffusion Algérienne nous a été bénéfique dans le sens où ça nous a offert l'opportunité d'approcher des équipements et des technologies de pointe dans un domaine en plein essor de la diffusion numérique.

Les tests effectués ont démontré les énormes performances que peuvent atteindre ces technologies en termes d'efficacité spectrale et de taux d'erreur binaire.

C'est pour nous une expérience professionnelle instructive et très riche, tant sur le plan technique que sur le plan relationnel.

Pour conclure, on souhaiterait que notre solution au problème de synchronisation des stations VSAT puisse être prise en considération par l'organisme concerné. On espérait aussi que ce modeste travail puisse répondre favorablement aux besoins de la communauté aéronautique, et servir comme outil d'aide et de documentation aux promotions à venir.

Les annexes

Matériels utilisés

ANNEXE A : codeur Vibe EM2000 de Thomson



➤ **Caractéristiques :**

- 8 entrées AES/EBU par châssis ;
- Codage audio MPEG-1 ;
- Sortie ASI et TSoIP du flux mpeg-2 TS incorporant les 8 services audio ;

ANNEXE B : Modulateur M6100 de Newtec



➤ **Caractéristiques :**

- Entrée ASI ;
- Sortie bande L ;
- Formes d'ondes DVB-S et DVB-S2 ;
- QPSK et 8PSK ;
- Débit maximal: 54 Mbaud ;

ANNEXE C : Convertisseur de fréquence FRC0740 de Newtec



➤ **Caractéristiques:**

- Fréquences d'entrée : 950 – 2000 MHz ;
- Fréquences de sortie : 13,75 – 14,80 GHz ;
- Gain : 0 à 30 dB pas de 0,1 dB.

ANNEXES D : IRD TV - RD4000 de Thomson



➤ Caractéristiques :

- Entrées DVB-S QPSK et DVB-S2 Q/8PSK ;
- Sorties SDI avec audio Embedded ;
- Décodage MPEG-2 et MPEG-4 ;

ANNEXE E : Analyseur de spectre MS2711D d'Anritsu



➤ Caractéristiques :

- Largeur de bande : 10kHz – 3GHz ;

ANNEXES F : Puissance-mètre Hewlett Packard-E4418A



Bibliographie

- [1] Hugo MERIC. Codage par suppression pour les communications par satellite. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse. 2012.
- [2] Clément FOLLET. Transmission satellite. Novembre, 2012.
- [3] <http://www.ptgmedia.pearsoncmg.com>.
- [4] <https://www.cnes.fr>.
- [5] <http://www.telesatellite.com>.
- [6] Octave RINGAR. Utilisation des techniques avancées d'Emission/Réception multi-antennes pour une transmission optique large bande. Thèse de doctorat de l'Université de LIMOGES. 2015.
- [7] Nouredine ABDELLAH. Services de télécommunication hauts débits : cas d'EUTELSAT W3A, thèse de licence de l'Université de DAKAR. 2008.
- [8] Julien FASSON, ÉTUDE D'UNE ARCHITECTURE IP INTÉGRANT UN LIEN SATELLITE GÉOSTATIONNAIRE, Thèse de doctorat, 2004, Institut National Polytechnique de Toulouse
- [9] Emmanuel DUBOIS, Convergence dans les réseaux satellite. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse. 2008.
- [10] Ferdinand TRA. Contrôle d'Admission des Connexions pour les Systèmes de Télécommunication par Satellite avec des Liaisons Physiques Adaptatives. Thèse de doctorat de l'Ecole doctorale de Toulouse. 2008.
- [11] Lorrin FANNY, et Jardin JEREMIE. Le standard DVB-S. ESIGELEC. Décembre, 2001.
- [12] Olivier ALPHAND. Architecture à qualité de service pour systèmes satellites DVB-S/RCS dans un contexte NGN. Thèse de doctorat de l'INP Toulouse. Décembre, 2005.
- [13] ETSI EN 301 790 V1.5.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems. Mai, 2009.

- [14] Nizar JEGHAM. Performances des applications IP dans les systèmes de communications par satellite : cas du DVB-RCS et du DVB-S2. Thèse de doctorat pour l'Université Paris-Est, Marne-La-Vallée. Novembre, 2008.
- [15] ETSI EN 300 421 V1.1.2. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services. Août, 1998.
- [16] Claude CARLET. Cours de Codes Correcteurs d'Erreurs (et fonctions booléennes). D.E.A de mathématiques et d'informatique de Bamako. 2007.
- [17] Marco CAGNAZZO. Principes de la TV numérique : DVB, codage canal, et techniques de modulation. TELECOM paris TECH. Octobre, 2010.
- [18] David ARNOULT. La TNT, Télévision Numérique Terrestre. Mémoire pour obtenir l'examen probatoire en Informatique du centre régional de Nantes. Mai, 2005.
- [19] <http://perso.libertysurf/IPhilGood>. La transmission en DVB.
- [20] Martial COULON. Systèmes de télécommunications. ENSEEIHT-Télécom-Réseaux Electronique SCR. 2007-2008.
- [21] Pléneuf. Signal. V1.1. Formation Télécom Réseaux. Septembre, 2011.
- [22] Etude comparative entre DVB-S et DVB-S2, Chapitre 1.
- [23] ComTechData. Migration from DVB-S to DVB-S2 and related efficiencies. Mai, 2009.
- [24] ETSI EN 302 307-1 V1.4.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1: DVB-S2. Novembre, 2014.
- [25] Alberto MORELLO, Vittoria MIGNONE. DVB-S2 dans les starting blocks. UER, revue technique. 2004.
- [26] Roman STASIEWICZ. La nouvelle norme internationale DVB-S2. REVUE DES TECHNOLOGIES DE RADIO, CANADA. Janvier, 2007
- [27] Fatima Ezzahra NAAMANE. DVB-S2 : Etude du Codage canal et mise en service de la technologie. Thèse pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état de la Faculté des Sciences et Techniques Fès. Juillet, 2011.

- [28] R. Gallager. Low-density parity-check codes. Information Theory, IRE Transactions on. janvier, 1962.
- [29] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima. Near shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. 1. In Communications, 1993. ICC 93. Geneva. Technical Program, Conference Record, IEEE International Conference. Mai, 1993.
- [30] David J.C. MacKay and I. Background. Low density parity check codes over $gf(q)$. IEEE Communications Letters. 1996.
- [31] D.J.C. MacKay. Good error-correcting codes based on very sparse matrices. Information Theory, IEEE Transactions. Mars, 1999.
- [32] Claude E. Shannon and Warren Weaver. The Mathematical Theory of Communication. Journal de l'Université de l'Illinois. 1949.
- [33] Clément DUDAL. Forme d'onde multi porteuse pour la diffusion par satellite haute capacité. Thèse de doctorat de l'INP Toulouse. Octobre, 2012.
- [34] Advantech Wireless. DVB-S2 Technical presentation.
- [35] Alain PIROVANO. Conception et Optimisation d'Architectures Réseaux pour les Systèmes de Communication Aéronautiques. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. ENAC. Avril, 2015.
- [36] Current Communication Radio Systems for Data Link. 2014.
- [37] ANNEXE 10 : Télécommunications aéronautiques. Technical report, OACI.
- [38] Doc 9869 AN/462. Manual on required communication performance (RCP). Draft, OACI. 2006. End-user multimedia QoS categories. Serie G: Transmission and media, digital systems and networks - quality of service and performance, recommendation g.1010. Technical report, ITU. 2001.
- [39] SESAR. <http://www.sesarju.eu/>.
- [40] NEXTGEN. <http://www.faa.gov/nextgen/>.
- [41] Christian KISSLING, Cristina PARRAGA Niebla, Nuria RIERA-DIAZ, Sandro SCALISE. DVB-S2/RCS Suitability for the Provision of Air Traffic Management Services. German Aerospace Center (DLR). Février, 2007.

[42] Na TAO. Etude des Performances et Optimisation d'un Réseau d'Accès par Satellite pour les Communications. Thèse de doctorat de l'INPT. Juillet, 2009.

[43] José RADZIK, Alain PIROVANO, Na TAO, Michel BOUSQUET. Satellite system performance assessment for in-flight entertainment and air traffic control. Septembre, 2014.

[44] http://www.enna.dz/vhf_radar.htm.

[45] Mm.Azine, cours ATC, 2016.