



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO**  
-----  
**ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE**  
-----  
**DEPARTEMENT TELECOMMUNICATION**



**MEMOIRE de fin d'études**

en vue de l'obtention

du **DIPLOME de MASTER**

**Titre : Ingénieur**

*Mention : Télécommunication*

*Parcours : Ingénierie des Réseaux et Systèmes (IRS)*

*par :* **RAFALINIRINA Haingomalala Sandra**

***ETUDE DE LA PERFORMANCE DU FUTUR SYSTEME  
L-DACSI A LA PLACE DE LA COMMUNICATION ENTRE  
PILOTE ET CONTROLEUR PAR LIAISON DE DONNEES***

Soutenu le Mercredi 11 Mai 2016 devant la Commission d'Examen composée de :

Président :

M. RAKOTOMALALA Mamy Alain

Examineurs :

M. RATSIMBAZAFY Andriamanga

M. RANDRIAMITANTSOA Andry Auguste

M. RAJAONARISON Roméo

Encadreur Pédagogique : M. RAKOTONDRAINAHina Tahina Ezéchiél

Encadreur Professionnel : M. RAKOTOARIMANANA Nirison

## REMERCIEMENTS

Je rends grâce à Dieu pour m'avoir donné le courage, la volonté et la santé durant la réalisation de ce mémoire.

Ma profonde gratitude s'adresse particulièrement aux personnes suivantes sans qui ce travail n'aurait abouti à terme :

- Monsieur ANDRIANAHARISON Yvon, Professeur Titulaire, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, le premier responsable de ma formation au sein de l'école.
- Monsieur RAKOTOMALALA Mamy Alain, Maître de Conférences, Chef de Département Télécommunication, qui me fait l'honneur de présider le Jury de ce mémoire.
- Monsieur RAKOTONDRAINA Tahina Ezéchiel, Maître de Conférences, Enseignant Chercheur au sein du Département Télécommunication, Directeur de ce mémoire de fin d'études, pour les conseils et directives qu'il m'a apporté.
- Monsieur RAKOTOARIMANANA Nirison, Inspecteur de la navigation aérienne de Madagascar, Chef de département de la navigation aérienne, Docteur-Ingénieur Electronique, qui m'a aidée et qui a bien voulu m'acceptée sous son encadrement malgré la responsabilité et les diverses occupations qu'il occupe au sein de son travail à l'ACM.
- Messieurs les membres de Jury :
- Monsieur RATSIMBAZAFY Andriamanga, Maître de Conférences et Enseignant Chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.
- Monsieur RANDRIAMITANTSOA Andry Auguste, Maître de Conférences et Enseignant Chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.
- Monsieur RAJAONARISON Roméo, Docteur en Télécommunication et Enseignant Chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.

Aux Corps Enseignants et Personnels Administratifs et Techniques de l'ESPA.

Je n'oublierai pas mes parents qui m'ont soutenue tant moralement que financièrement. Ils m'ont enseignée la valeur des études et ce mémoire est dédié en guise de remerciement.

Je ne saurais clore cette liste sans mentionner mes collègues de classe, mes frères et mes sœurs, tous mes amis, ainsi que toutes les personnes, qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
TABLE DES MATIERES .....	ii
NOTATIONS.....	v
ABREVIATIONS .....	viii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 TELECOMMUNICATION AERONAUTIQUE .....	3
1.1 Introduction : .....	3
1.2 Télécommunication sol-sol :.....	3
1.2.1 Système mondial des télécommunications ou SMT : .....	3
1.2.2 Le Réseau des Services Fixes des Télécommunications Aéronautiques ou RSFTA: .....	4
1.2.3 Le Réseau Air Trafic Services Direct Speech (ATS/DS) :.....	8
1.2.4 Le réseau Satellite Distribution Information Système (SADIS) : .....	8
1.3 Télécommunication air-sol:.....	8
1.3.1 Le service d'information de vol (FIS):.....	9
1.3.2 Le service d'alerte:.....	9
1.3.3 Le service de contrôle (ATC) :.....	11
1.4 Conclusion .....	23
CHAPITRE 2 LIMITES DES SYSTEMES DE COMMUNICATIONS AERONAUTIQUES .....	24
2.1 Introduction: .....	24
2.2 Le partage de l'information dans le contrôle aérien il y a quelques années:.....	25
2.3 Le partage de l'information dans le contrôle aérien de nos jours:.....	26
2.4 Les limites de la capacité de la communication vocale: .....	26
2.5 L'augmentation du trafic aérien: .....	28
2.6 Vers les communications de données numériques : le datalink:.....	29
2.7 La communication entre contrôleurs et pilotes par liaison de données : .....	30
2.7.1 Généralité :.....	30
2.7.2 Performances du système CPDLC:.....	31
2.7.3 Conclusion aux systèmes CPDLC :.....	37

2.8 Nécessité d'un nouveau système de communication :	37
2.9 Le système L-DACS :	39
2.10 Système L-DACS1 :	40
2.10.1 Présentation du système L-DACS1 :	40
2.10.2 Caractéristiques des canaux radios (support L-DACS1) :	41
2.11 Conclusion	47
<b>CHAPITRE 3 PERFORMANCES DU FUTUR SYSTEME L-DACS1</b>	<b>49</b>
3.1 Introduction:	49
3.2 Déroulement communication en système L-DACS1:	49
3.3 Base de chaîne de transmission numérique:	51
3.4 Spécifications de la couche physique de L-DACS1:	51
3.4.1 Partie codage dans le système L-DACS1:	52
3.4.2 Modulation multi-porteuses OFDM:	54
3.4.3 Paramètres OFDM pour L-DACS1 :	69
3.4.4 Transmission RL - OFDMA-TDMA:	70
3.4.5 Caractéristiques des trames OFDM dans la liaison RL:	71
3.5 Conclusion :	74
<b>CHAPITRE 4 SIMULATION PERFORMANCE DU FUTUR SYSTÈME : L-DACS1</b>	<b>75</b>
4.1 Introduction :	75
4.2 Logiciel MATLAB :	75
4.3 Canal de propagation aéronautique utilisé dans le travail :	75
4.3.1 Le canal AWGN :	76
4.3.2 Le canal de Rayleigh :	76
4.4 Critères de performances d'un système :	78
4.4.1 Rapport signal sur bruit :	78
4.4.2 Taux d'erreur binaire :	78
4.5 Simulation pour comprendre la modulation OFDM :	79
4.6 Simulation de comparaison de performance entre systèmes utilisant la modulation OFDM 4-QAM ET 16-QAM :	84

4.6.1 Bloc Data Source :.....	85
4.6.2 Bloc IQ mapper : .....	85
4.6.3 Bloc OFDM modulation :.....	86
4.6.4 Canal AWGN :.....	86
4.6.5 Bloc OFDM Demodulator :.....	87
4.6.6 Bloc IQ demapper :.....	87
4.6.7 Le bloc Sytem Performance Test : .....	88
4.6.8 Le bloc display : .....	88
4.6.9 Comparaison de performance des deux systèmes en termes de taux d'erreur binaire et justification du choix de modulation pour le simulateur L-DACS1 :.....	88
<b>4.7 Simulation de la performance du système L-DACS1 dans le sens RL dans le canal AWGN et Rayleigh : .....</b>	<b>90</b>
4.7.1 Au niveau de l'émission : .....	91
4.7.2 Au niveau de la réception :.....	91
4.7.3 Visualisation des signaux à la sortie.....	91
4.7.4 Simulation du système L-DACS1 dans le canal AWGN et Rayleigh :.....	92
<b>4.8 Conclusion : .....</b>	<b>95</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>97</b>
<b>ANNEXE 1 FORMULAIRE DU PLAN DE VOL.....</b>	<b>99</b>
<b>ANNEXE 2 MESSAGES CPDLC.....</b>	<b>100</b>
<b>ANNEXE 3 MODELE OSI .....</b>	<b>102</b>
<b>ANNEXE 4 MODULATIONS .....</b>	<b>103</b>
<b>ANNEXE 5 PORTION DU CODE SOURCE MATLAB .....</b>	<b>105</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>107</b>
<b>FICHE DE RENSEIGNEMENT .....</b>	<b>111</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>1</b>

## NOTATIONS

### 1. Minuscules latines :

$t$	: temps
$f$	: fréquence
$c$	: vitesse d'onde électromagnétique
dB	: décibel
$h(t)$	: réponse impulsionnelle
dBc	: decibels relative to carrier
dBm	: décibel-par-rapport-au-milliwatt
$d_{min}$	: nombre de bits minimaux de différence entre deux mots de codes
$k$	: longueur de message à coder
$n$	: longueur du mot de code
$m$	: longueur de symbole en bits
$g(x)$	: polynôme générateur
$q$	: nombre d'octets pouvant être corrigés
$r_{cc}$	: taux de codage
$c_k$	: Signal complexe en bande de base
$f_k$	: fréquence d'un signal modulé par $c_k$
$s(t)$	: Signal module total
$d$	: distance entre émetteur et récepteur
$f_c$	: fréquence porteuse
$f_D$	: fréquence Doppler
$c$	: vitesse de la forme d'onde électromagnétique voyageant dans le vide
$n_{be}$	: représente le nombre de bits erronés
$n_{bt}$	: représente le nombre de bits transmis
$h(t, \tau)$	: réponse impulsionnelle d'un canal radioélectrique
$x(t)$	: entrée du canal, le signal transmis

### 2. Majuscules latines :

NM	: Nautical Mile
----	-----------------

P	: symbole de parité
R	: symbole réservé
TL	: symbole de la longueur de transmission
T	: fonction de transposition de matrice
H	: matrice de parité
PN	: pseudo-bruit
GF	: Corps de Galois
$F_e$	: fréquence d'échantillonnage
$F_{max}$	: fréquence maximale du signal à échantillonner
L	: capacité de correction du codeur
S(t)	: signal modulé en bande de base
P(x)	: polynôme primitive
$R_c$	: taux de code
$T_m$	: temps de retard maximum du canal de propagation
D	: débit binaire
$T_b$	: durée de symbole
N	: Nombre de sous-canaux, nombre de sous-porteuses
$T_s$	: durée des symboles répartis en N trains plus lents
T	: période d'un train de symboles
$T_u$	: durée utile pour émettre l'information dans une modulation OFDM
$T_g$	: temps de garde
B	: bande de fréquence
$B_k$	: sous-bande dans N
$B_c$	: bande de cohérence
Q	: nombre de bits dans chaque symbole
V	: vitesse de l'avion
$E_b$	: énergie instantanée émise par bit
$N_o$	: densité spectrale du bruit affectant le bit transmis
$T_c$	: temps de cohérence du canal
BER	: Bit Error Rate
TEB	: Taux d'Erreur Binaire

3. Minuscules grecques :

- $\mu\text{s}$  : microsecondes  
 $\lambda$  : longueur d'onde  
 $\gamma$  : rapport signal sur bruit

4. Majuscules grecques :

- $\Delta_f$  : largeur de canal  
 $\Psi_k(t)$  : le kième sous-porteuse

## ABREVIATIONS

AAC	Airline Administrative Control
AC	Aircraft
ACARS	Aircraft Communications Addressing and Reporting System
ACM	Aviation Civile de Madagascar
ADS	Automatic Dependent Surveillance
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
AeroMACS	Aeronautical Mobile Airport Communications System
AGC	Automatic Gain Control
AGL	Above Ground Level
AIP	Aeronautical Information Publication
AMHS	Aeronautical Message Handling System
AMSS	Aeronautical Mobile Satellite Service
AOC	Airline operational control
APP	APProach Control Service
APT	Airport
ARINC	Aeronautical Radio INCorporated
AS	Air Station
ASECNA	Agence pour la Sécurité de la navigation aérienne en Afrique et à Madagascar
ASM	Aviation Services Manangement
AT&T	American Telephon & Telegraph
ATC	Air Traffic Control
ATFM	Air Traffic Flow Management
ATN	Aeronautical Telecommunication Network
ATS	Air Traffic Service
ATS/DS	Air Trafic Services Direct Speech
AVLC	Aviation VHF Data Link Communications
AWGN	Additive White Gaussian Noise
AWY	Airway
CA	Circulation Aérienne
CAG	Contrôle Automatique de Gain

CCR	Centre de Contrôle Régional
CDU	Control Display Unit
CMR	Conférence Mondiale des Radiocommunications
CMU	Communications Management Unit
CPDLC	Controller Pilot Data Link Communication
CPFSK	Continuous Phase Frequency Shift Keying
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CTR	ConTRol zone
CVC	Circuit Virtuel Commuté
D8PSK	Differential Eight Phase Shift Keying
DC	Dedicated Control
DCDU	Dedicated Control Display Unit
DFT	Discret Fourier Transform
DL	DownLink
DLS	Direct Link Service
DME	Distance Measuring Equipment
DSB-AM	Double Side Band – Amplitude Modulation
ENR	En-Route
ETTD	Equipement Terminal de Traitement de Données
FAA	Federal Aviation Administration
FCI	Future Communication Infrastructure
FCS	Future Communication System
FDD	Frequency Division Duplex
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FIR	Flight Information Region
FIS	Flight Information Service
FL	Flight Level
FL	Forward Link
FMS	Flight Management System
FPL	Flight Plan Filling
F-PLN	Flight Plan

FRS	Future Radio System
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GS	Ground Station
GS	Ground Station
HDLC	High Level Data Link Control
HF	High Frequency
HFDL	High Frequency Data Link
HMI	Human Machine Interface
IDFT	Inverse Discret Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IFR	Instrument Flight Rules
IRIS	Integrated Risk Information System
ISI	Intersymbol Interference
ISO	International Standard Office
KTAS	Knots True Airspeed
L-DACS	L-band Digital Aeronautical Communication System
LME	Layer Manegement Entity
LTA	Lower Traffic Areadu
MAC	Medium Access Control
MATLAB	MATrix LABoratory
MCDU	Multipurpose Control Display Unit
MIN	Message Identification Numbers
MRN	Message Reference Numbers
MSK	Minimum Shift Keying
MSL	Mean Sea Level
NEXTGEN	Next Generation Air Transportation System
NIM	Numéro d'Identification du Message
NOTAM	Notice To Airmen
NRM	Numéro de Référence du Message
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OMM	Organisation Mondiale de la Météorologie
ONU	Organisation des Nations Unis
OSI	Open Systems Interconnected
OTAN	Organisation du Traité de l'Atlantique Nord
PA	Pilote Automatique
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
POA	Plain Old Acars
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RA	Random Access
RF	Radio Fréquence
RGS	Remote Ground System
RL	Reverse Link
RPL	Repetitive Flight Planning
RS	Reed Solomon
RSFTA	Réseau des Services Fixes des Télécommunications Aéronautiques
SADIS	Satellite Distribution Information System
SATCOM	Satellite Communications
SESAR	Single European Sky ATM Research
SFC	Specific Fuel Consumption
SIGMET	SIGNificant METeorological Information
SMA(R)	Service Mobile Aéronautique(Route)
SMO	Système Mondial d'Observation
SMT	Système Mondial des Télécommunications
SMT	Système Mondial de Télécommunication
SMTD	Système Mondial de Traitement de Données
SNACP	Sub Network Access Protocol
SNDCF	Sub Network Dependant Convergence Function
STDMA	Space-time Division Multiple Access
TDD	Time Division Duplex

TDMA	Time Division Multiple Access
TDMA	Time division multiple access
TMA	TerMinal control Area
TMA	Terminal Maneuvering Area
UHF	Ultra-Haute Fréquence
UIR	Upper Information Region
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UL	UpLink
UTA	Upper Traffic Areadu
VDL	Very High Frequency Data Link
VDR	VHF Data Radio
VFR	Visual Flight Rules
VHF	Very High Frequency
VMC	Visual Meteorological Conditions
VMM	Veille Météorologique Mondiale

## INTRODUCTION GENERALE

Tout en étant un moyen de locomotion rapide et efficace, le transport aérien reste actuellement l'un des secteurs promoteurs de développement d'un pays. Dans la navigation aérienne, la sécurité du trafic aérien est une tâche très importante et vraiment primordiale pour les contrôleurs au sol ainsi que les pilotes à bords des aéronefs. Les communications aéronautiques continentales entre un pilote et un contrôleur aérien sont essentiellement assurées par des systèmes fonctionnant dans la bande aéronautique VHF de 118MHz à 138 MHz. La plupart de ces communications sont vocales et utilisent un système à modulation analogique. Au fil du temps, l'environnement aéronautique a évolué. En effet, les autorités aéronautiques mondiales prévoient une augmentation du trafic aérien dans toutes les régions du globe.

Le contrôle de la navigation aérienne est ainsi menacé par une saturation prochaine des fréquences radio et par le surplus de charges de travail pour les contrôleurs. Afin de pallier à ces problèmes, la liaison de données fait son essor dans le secteur aéronautique pour faciliter le transfert d'information entre aéronefs et contrôle aérien. La communication entre contrôleurs et pilotes par liaison de données fonctionnant dans la bande VHF fait son apparition. Cependant, un projet euro-américain plus prometteur a été lancé depuis 2004 pour le développement d'un futur système de communication aéronautique avec de plus larges ressources spectrales et des débits de communication numérique plus élevés. Parmi d'autres avantages, ce système permettrait d'avoir une bonne qualité de communication air-sol mais aussi air-air. Les systèmes L-DACS en font partie et seraient en charge des communications continentales prévues en 2020. Il s'agit du système de radiocommunication numérique qui permettrait de répondre aux problèmes de congestion du spectre que rencontre actuellement la bande VHF avec des fonctionnalités supplémentaires. En vue de l'implantation de ces futurs systèmes, des études de performance doivent être effectuées. En effet, une curiosité mène sur le comportement de ces futurs systèmes en transmission de données dans les canaux radio.

Ce présent mémoire est axé principalement sur l'un des systèmes L-DACS. Il s'intitule : « ETUDE DE LA PERFORMANCE DU FUTUR SYSTEME L-DACS1 A LA PLACE DE LA COMMUNICATION ENTRE PILOTE ET CONTROLEUR PAR LIAISON DE DONNEES ». Le travail consistera à évaluer la performance de la radiotéléphonie et CPDLC dans la communication aéronautique jusqu'à voir leurs limites. L'étude du futur système L-DACS1 solution proposée aux problèmes actuels formera la plus grande partie du travail.

Pour ce faire, ce travail est subdivisé en quatre chapitres. Le premier chapitre parle généralement de la télécommunication aéronautique. Le deuxième chapitre est consacré à la description des limites des systèmes de communication aéronautiques actuels, le troisième chapitre se focalisera sur le futur système L-DACS1 et enfin, le dernier chapitre s'agit des simulations sous logiciel MATLAB qui permettront de comprendre la base de la technique de modulation utilisée par L-DACS1 et d'évaluer la performance du système à travers les canaux radio de propagation par des paramètres caractéristiques.

# CHAPITRE 1

## TELECOMMUNICATION AERONAUTIQUE

### 1.1 Introduction :

La télécommunication aéronautique est un grand réseau mondial englobant plusieurs sous-réseaux avec des services spécifiques. On distingue actuellement deux principaux types de télécommunication à savoir la télécommunication sol-sol et celle air-sol.

### 1.2 Télécommunication sol-sol :

Elle est connue comme étant la télécommunication entre les aérodrômes.

Elle englobe les quatre (04) réseaux suivants :

- Le système mondial des télécommunications (SMT) ;
- Le réseau des services fixes des télécommunications aéronautiques (RSFTA) ;
- Le réseau Air Traffic Services Direct Speech (ATS/DS) ;
- Le réseau Satellite Distribution Information Système (SADIS).

#### *1.2.1 Système mondial des télécommunications ou SMT :*

##### 1.2.1.1 Généralités:

L'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie), une organisation spécialisée de l'ONU (Organisation des Nations Unis) dans le domaine de la météorologie, a initié un programme baptisé Veille Météorologique Mondiale(VMM) [1]. Ce programme est le plus important des programmes de l'OMM. La VMM fournit en temps réel à tous les Etats membres les renseignements météorologiques dont ils ont besoin tant pour l'exploitation que pour la recherche.

Les éléments essentiels de la VMM sont [2] :

- le système mondial d'observation ou SMO ;
- le système mondial de traitement de données désigné par SMTD ;
- le système mondial de télécommunication ou SMT.

*a. Le Système Mondial d'Observation (SMO) :*

Le SMO regroupe des points d'observation de surface (sur terre, sur mer), des points de mesure en altitude (radiosondages, pilotes), des stations radar et des satellites.

Les éléments du SMO élaborent à chaque heure les messages qui doivent être mis à la disposition des autres éléments du réseau.

*b. Le Système Mondial de Traitement des Données (SMTD) :*

Il s'agit d'un ensemble de centres dotés de calculateurs capables d'analyser et de traiter les données de base issues du SMO. Ainsi seront élaborées des prévisions à diffuser au niveau mondial ou régional (le plus souvent sous forme de cartes) pour le compte des services nationaux afin de les aider dans leurs diverses assistances aux usagers tant dans le secteur public que privé. Rappelons qu'il n'y a pas d'avion qui décolle et de navire qui ne lève l'ancre sans l'indispensable prévision du temps.

*c. Le Système Mondial de Télécommunications (SMT) :*

Ce système assure la jonction entre le SMO et le SMTD pour la circulation des données météorologiques. Les liaisons sont assurées par ligne terrestre, par satellite ou par radio.

Les données véhiculées sur ces liaisons sont, entre autres :

- les observations de 9000 stations terrestres produisant chacune plusieurs messages par jour ;
- des mesures et des messages radar ;
- des mesures effectuées par des avions, des bateaux, des bouées ;
- des images radar, satellites ;
- des cartes issues de modèles numériques ;
- des messages et des cartes des services de prévision, etc.

***1.2.2 Le Réseau des Services Fixes des Télécommunications Aéronautiques ou RSFTA:***

C'est le réseau mondial de circuits fixes aéronautiques destiné, dans le cadre du service fixe aéronautique, à l'échange de messages et/ou de données numériques entre stations fixes aéronautiques ayant des caractéristiques de communication identiques ou compatibles [3]. Parmi ces données, on distingue :

- les plans de vol ;
- les messages de départ ;
- les messages d'arrivée ;
- les messages de changement de vol ;
- les messages d'annulation des plans de vol ;
- les messages de services AMHS (Aeronautical Message Handling System).

A noter que ce réseau RSFTA constitue l'élément important des télécommunications sol-sol, il est conçu en fonction des besoins spécifiques de l'aviation civile internationale. À l'intérieur du RSFTA, tous les points au sol importants (aéroports, centres de contrôle de la circulation aérienne, centres météorologiques et autres) sont reliés par des liaisons appropriées conçues de façon à desservir les aéronefs durant toutes les phases du vol. Les messages déposés en un point quelconque du réseau sont transmis de façon systématique à tous les points où ils sont nécessaires au déroulement des vols en toute sécurité [3].

#### 1.2.2.1 Plan de vol :

La première procédure à faire avant d'entamer un vol est la mise en connaissance des autorités responsable du trafic d'itinéraire et les caractéristiques du vol ou « le dépôt de plan de vol ». Un plan de vol est l'ensemble des renseignements intéressant un vol et permettant de décrire précisément sa trajectoire, l'aéronef utilisé, et les règles qui seront appliquées à ce vol. Tout vol contrôlé doit faire l'objet d'un dépôt de plan de vol. Les plans de vol commerciaux sont déposés longtemps à l'avance (sur une période de 6 mois), ce qui permettra de faire des prévisions du trafic.

Par contre de nombreux vols non réguliers ne sont connus que tardivement. Le plan de vol contient les informations décrivant le vol prévu : type d'avion, immatriculation, heure de décollage prévue, aérodromes de départ et d'arrivée, route prévue, niveau de croisière souhaité.

A partir de ces données, et en utilisant un modèle de performance avion, on détermine quels secteurs de contrôle seront traversés par le vol, et on communique en temps voulu les informations nécessaires aux contrôleurs concernés. Ces informations sont l'indicatif et le type de l'avion, son niveau de vol courant, le niveau demandé, et les heures de passage estimées sur les balises de la route [4] [5] [6].

*a. La préparation du vol:*

Une préparation minutieuse et détaillée doit obligatoirement précéder tout voyage aérien. Cela pour éviter toutes sortes de problèmes qui pourraient engendrer une défaillance, une panne ou d'autres problèmes graves. La préparation du voyage dépend des conditions météorologiques et de la visibilité du moment, de la nature des régions à traverser, des zones à restrictions à contourner ou à pénétrer, de l'autonomie de l'avion.

Son objectif est :

- de construire une trajectoire en conformité avec la réglementation et les espaces aériens nominaux ou éventuels en cas de déroutement.
- d'intégrer la météo en route et à l'arrivée. A noter que la météo au départ a aussi son importance, mais le pilote part rarement par mauvais temps. En outre trajectoire et météo conduisent au calcul du temps de vol.
- de déterminer, en fonction de ce temps de vol, la quantité de carburant nécessaire (délestage + sécurité + déroutement + réserve) et de choisir, parmi les procédures de suivi de consommation indiquées dans le manuel de vol ou recommandées par l'exploitant, celle qui est la plus adéquate.

*b. Dépôt de plan de vol :*

Un plan de vol peut être déposé de trois façons :

- plan de vol répétitif (RPL) utilisé par les compagnies aériennes pour décrire des vols réguliers ;
- plan de vol déposé (FPL), formulaire déposé avant le vol décrivant la totalité du vol. C'est le plus souvent à ce type de plan de vol auquel on fait référence ;
- le plan de vol réduit, déposé en vol par radiotéléphonie à un organisme de la circulation aérienne, sous la forme d'éléments intéressant une partie du vol.

Un plan doit être obligatoire dans les cas suivants:

- tout vol IFR ;
- tout vol qui devra franchir des frontières ;
- pour le vol VFR de nuit (voyage-navigation hors vol local) ;

- pour les survols maritimes au-delà de la distance la plus faible des 2 distances suivantes : distance permettant en cas de panne d'un moteur, d'atteindre une terre se prêtant à un atterrissage d'urgence; distance égale à 15 fois l'altitude de l'aéronef. Tout vol devant évoluer dans des régions, sur des routes ou pendant des périodes désignées par arrêté du ministre chargé de l'aviation civile pour faciliter la fourniture du service d'alerte ou les opérations de recherche et de sauvetage (zones inhospitalières) ;
- tout vol devant évoluer dans des régions ou sur des routes désignées par arrêté du ministre chargé de l'aviation civile pour faciliter la coordination avec les organismes militaires ou les organismes de la circulation aérienne d'Etats voisins et éviter la nécessité éventuelle d'une interception aux fins d'identification.

Le dépôt d'un plan de vol est obligatoire quel que soit le régime de vol choisi (VFR ou IFR). Le modèle de plan de vol utilisé est conforme au plan de vol OACI et le plan de vol doit être déposé 30 minutes au moins avant l'heure de départ prévue au bureau de piste de l'aérodrome de départ, dans le cas seulement où le FPL peut être transmis aux organismes destinataires. Lorsqu'il se produit un retard de plus d'une heure par rapport à l'heure de départ prévue, un nouveau FPL doit être déposé et l'ancien FPL annulé.

*c. Formulaire du plan de vol :*

Il s'agit d'un formulaire remis aux organismes de la circulation aérienne [annexe 1]. Il comporte les éléments :

- identification de l'aéronef ;
- règles et type de vol ;
- nombre et type d'aéronef, catégorie de turbulence de sillage ;
- équipement ;
- aérodrome et heure de départ ;
- vitesse et niveau de croisière ;
- route ;
- aérodrome d'arrivée et durée totale estimée ;
- première et deuxième aérodromes de dégagement ;
- autonomie ;
- nombre de personnes à bord ;

- moyens de secours, couleurs et marques de l'aéronef ;
- les remarques ;
- nom du commandant de bord.

### ***1.2.3 Le Réseau Air Traffic Services Direct Speech (ATS/DS) :***

Le réseau ATS/DS est le réseau des télécommunications sol-sol en charge des messages de coordination entre les différents centres aéronautiques.

### ***1.2.4 Le réseau Satellite Distribution Information Système (SADIS) :***

Le SADIS est un système d'exploitation principalement spécialisé dans les renseignements météorologiques aéronautiques, conformément aux dispositions mondiales de l'OACI. Ce réseau assure un service prioritaire point multipoint vingt-quatre heures sur vingt-quatre par satellite. En plus des renseignements météorologiques, il est également en charge des documentations des vols, des photos satellite et des messages des différents services.

## **1.3 Télécommunication air-sol:**

Il s'agit de la télécommunication entre aéronefs et points au sol, en d'autres termes on parle du système de communication entre pilotes et contrôleurs. C'est au moyen des télécommunications air-sol que les aéronefs reçoivent, en mode verbal ou données, tous les renseignements nécessaires à la sécurité des vols [3] [9] [10] [11] [12]. Les services de la circulation aérienne, autrement appelés services de la CA ou services ATS désignent l'ensemble des services assurés par un organisme de la circulation aérienne afin de participer à la sécurité des vols. Ils sont au nombre de trois :

- le service d'information de vol (FIS) ;
- le service d'alerte ;
- le service de contrôle (ATC).

### **1.3.1 Le service d'information de vol (FIS):**

#### 1.3.1.1 Buts :

Le but du service d'information de vol est de fournir aux aéronefs tous les avis et renseignements utiles à l'exécution sûre et efficace des vols [9].

#### 1.3.1.2 Bénéficiaires :

Le service d'information de vol doit être assuré au bénéfice de tous les aéronefs auxquels les renseignements correspondants pourraient être utiles et :

- Auxquels est assuré le service du contrôle de la circulation aérienne
- Dont la présence est connue par ailleurs.

### **1.3.2 Le service d'alerte:**

#### 1.3.2.1 But :

Le but du service d'alerte est d'alerter les organismes appropriés lorsque des aéronefs ont besoin de l'aide des organismes de recherche et de sauvetage, et de prêter à ces organismes le concours nécessaire.

#### 1.3.2.2 Bénéficiaires :

Le service d'alerte est assuré :

- à tout aéronef en vol contrôlé ;
- à tout autre aéronef ayant communiqué un plan de vol ;
- à tout aéronef n'ayant pas communiqué de plan de vol, lorsqu'un organisme de la circulation aérienne estime qu'il possède suffisamment d'éléments lui permettant de douter de la sécurité de l'aéronef ou de ses occupants ;
- à tout aéronef que l'on sait ou croit être l'objet d'une intervention illicite.

### 1.3.2.3 Phases d'urgence :

Pour simplifier la coordination entre les organismes en cas d'alerte, des phases ont été définies, ainsi que les cas où elles doivent être déclenchées. Chaque phase correspond à un déclenchement de moyens.

### 1.3.2.4 Phase d'incertitude (INCERFA) :

L'INCERFA est une phase de recherche. Les organismes de recherche téléphonent aux organismes de la circulation aérienne ayant pu être en contact avec l'aéronef, afin de limiter la zone où l'aéronef aurait pu avoir un problème. Ils téléphonent ensuite aux gendarmeries locales pour vérifier que personne n'a vu un avion s'écraser. À ce stade, la recherche est uniquement téléphonique, aucun moyen n'est déployé. Une INCERFA est déclenchée lorsque :

- aucune communication n'a été reçue d'un aéronef, après un certain délai qui suit l'heure à laquelle une communication aurait dû être reçue ou l'heure à laquelle a été effectuée la première tentative infructueuse de communication avec cet aéronef, si cette dernière heure est antérieure à la première;
- un aéronef n'arrive pas, après un certain délai qui suit la dernière heure d'arrivée prévue notifiée aux organismes de la circulation aérienne ou la dernière heure d'arrivée calculée par ces organismes si cette dernière heure est postérieure à la première à moins qu'il n'existe aucun doute quant à la sécurité de l'aéronef et de ses occupants.

### 1.3.2.5 Phase d'alerte (ALERFA) :

Une ALERFA est déclenchée lorsque :

- après la phase d'incertitude, les tentatives pour entrer en communication avec l'aéronef ou les demandes de renseignements à d'autres sources appropriées n'ont apporté aucune information sur l'aéronef
- un aéronef qui a reçu l'autorisation d'atterrir n'atterrit pas dans les cinq minutes qui suivent l'heure prévue d'atterrissage et qu'il n'a pas été établi de nouvelle communication avec l'aéronef
- les renseignements reçus indiquent que le fonctionnement de l'aéronef est compromis, sans que, toutefois, l'éventualité d'un atterrissage forcé soit probable, à moins que des

indices concluants apaisent toute appréhension quant à la sécurité de l'aéronef et de ses occupants l'on sait ou que l'on croit qu'un aéronef est l'objet d'une intervention illicite.

#### 1.3.2.6 Phase de détresse (DETRESFA) :

Une DETRESFA est lancée lorsque :

- après la phase d'alerte, l'échec de nouvelles tentatives pour entrer en communication avec l'aéronef et de nouvelles demandes de renseignements plus largement diffusées indiquent que l'aéronef est probablement en détresse ; ou
- l'on estime que l'aéronef doit avoir épuisé son combustible ou que la quantité qui lui reste est insuffisante pour lui permettre de se poser en lieu sûr
- les renseignements reçus indiquent que le fonctionnement de l'aéronef est compromis au point qu'un atterrissage forcé est probable
- l'on a été informé ou qu'il est à peu près certain que l'aéronef a effectué un atterrissage forcé ou est sur le point de le faire, à moins qu'il ne soit à peu près certain que l'aéronef et ses occupants ne sont pas menacés d'un danger grave et imminent et n'ont pas besoin d'une aide immédiate.

#### 1.3.3 *Le service de contrôle (ATC) :*

Ce service est rendu par les contrôleurs aériens aux aéronefs afin d'aider à l'exécution sûre, rapide et efficace des vols. Il consiste également à accélérer et ordonner la circulation aérienne afin de prévenir les collisions entre aéronefs ou entre un aéronef et un obstacle.

##### 1.3.3.1 Fonctionnement du service de contrôle :

En vue d'assurer le service du contrôle de la circulation aérienne, l'organisme responsable doit entre autre :

- recevoir des renseignements au sujet des mouvements prévus de chaque aéronef et des modifications qui leur sont apportées et connaître en permanence la progression effective de chaque aéronef ;
- déterminer, d'après les renseignements reçus, les positions relatives des aéronefs signalés ;

- délivrer des clairances ou autorisations et des renseignements afin de prévenir les abordages entre les aéronefs placés sous son contrôle et d'accélérer et ordonner la circulation aérienne ;
- se mettre d'accord avec les autres organismes de la circulation aérienne : chaque fois qu'un aéronef risquerait sans cela d'entraver la circulation aérienne placée sous le contrôle de ces autres organismes et également avant de transférer à ces derniers le contrôle d'un aéronef.

### 1.3.3.2 Le contrôleur aérien :

Un contrôleur aérien parfois appelé Aiguilleur du ciel est une personne chargée d'assurer le contrôle, la sécurité et la gestion de la circulation aérienne. Sa mission est de séparer les avions, et les autres appareils volants (l'ensemble étant appelé aéronefs).

Des normes d'espacement sont établies et le contrôleur doit s'assurer que ces normes soient respectées à chaque instant. Il aide également à fluidifier et organiser la circulation des aéronefs dans le ciel, mais également au sol sur les aéroports. Pour cela, il peut regarder directement dehors (en tour de contrôle, appelée aussi vigie) ou utiliser son écran radar.

Pour compenser la charge de stress élevée, ainsi que le travail de nuit, les contrôleurs ne peuvent travailler plus de 32 heures par semaine glissante.

Par ailleurs, ce temps de travail doit être composé à 25% de pauses. Bien que cela ne soit pas le cas de tous, et pour respecter cette réglementation, un contrôleur aérien ne travaille donc généralement pas plus de trois jours par semaine.

### 1.3.3.3 Moyens :

Pour assurer le service du contrôle de la circulation aérienne, un contrôleur aérien dispose de deux moyens principaux :

- l'information de trafic ;
- la séparation ou espacement, assurée grâce à des clairances.

Le moyen utilisé pour prévenir les abordages pour un aéronef donné dépend du régime de vol de l'aéronef et de la classe de l'espace aérien dans lequel il évolue.

*a. L'information de trafic :*

L'information de trafic est un moyen d'aider les pilotes à voir. Le contrôle fournit au pilote une information précise sur la position relative d'un aéronef proche de lui, afin de diriger les yeux du pilote sur cet aéronef. Les actions nécessaires pour l'éviter sont ensuite à son initiative.

*b. La séparation :*

Elle désigne la distance entre deux aéronefs, deux niveaux et deux trajectoires. C'est un moyen utilisé par le contrôle aérien pour réduire le risque de collisions et les accidents dûs aux turbulences aérodynamiques formées derrière un aéronef appelées turbulences de sillage. En cas de perte de séparation on parle de conflit.

Dans le stade de vol, il existe trois (03) séparations minimales entre aéronefs à respecter :

- la séparation verticale, deux aéronefs doivent être séparés en altitude d'au moins 300 mètres ;
- la séparation horizontale, deux aéronefs doivent être distants d'au moins 10 minutes ;
- La séparation latérale, 60 NM pour deux aéronefs à disposition parallèle sinon 15 ° pour ceux à disposition non parallèle.

1.3.3.4 Organismes du contrôle de la circulation aérienne :

Suivant le type de trafic et sa position, on distingue les différents organismes suivants :

- les centres de contrôle régional (CCR) chargés d'assurer les services de la circulation aérienne au bénéfice des aéronefs en croisière,
- les centres de contrôle d'approche (APP) assurant les services de la circulation aérienne aux abords d'un aéroport, dans une zone de contrôle dont la taille est variable,
- les tours de contrôle d'aéroport chargées d'assurer les services de la circulation aérienne dans la circulation d'aéroport, c'est-à-dire dans une zone restreinte de l'ordre d'une dizaine de kilomètres autour d'un aéroport.

Ces organismes ont été différenciés car les compétences requises, les règles applicables et les moyens techniques nécessaires ne sont pas les mêmes. Un centre de contrôle en route nécessite un radar, tandis que l'outil principal en contrôle d'aéroport est la vue.

### 1.3.3.5 Gestion des flux de trafic aérien :

#### *a. Définition :*

Lorsque des secteurs de contrôle en route ou des aéroports sont saturés en trafic aérien, cela peut engendrer des risques liés à l'augmentation de la charge de travail du contrôleur aérien, ou des circuits d'attente imposés à des aéronefs en vol. Ainsi, la sécurité du trafic peut s'en trouver compromise. C'est là qu'intervient le concept de la gestion des flux de trafic aérien (ATFM).

#### *b. Raison d'être de la gestion des flux :*

La capacité d'un aéroport ou d'un secteur de contrôle est finie puisqu'un seul aéronef ne peut atterrir ou décoller sur une piste à la fois et que le contrôle aérien impose des séparations entre les aéronefs. La capacité d'un aéroport dépend de nombreux facteurs: le nombre de pistes disponibles, les ressources en termes de contrôle aérien mais aussi les conditions météo. En effet, le vent peut influencer sur le nombre de pistes utilisables ou une faible visibilité peut nécessiter l'augmentation des distances de séparation entre les aéronefs. La problématique de l'ATFM est à la fois simple à appréhender et difficile à résoudre : le trafic aérien connaît une croissance soutenue alors que l'espace aérien disponible reste grossièrement le même, même si les progrès techniques tels que l'adoption du Minimum de séparation verticale réduit dans certaines parties du monde, et la gestion de l'espace aérien en améliorent progressivement l'utilisation.

Il s'agit donc d'optimiser les flux de trafic pour garantir la ponctualité des vols. De plus, le système de régulation doit s'adapter le plus rapidement possible à des aléas opérationnels (météo, grèves, incident dans un aéroport, etc..). L'espace aérien malgache se trouve être circulé par environ 80 avions, cela démontre que le flux du trafic aérien à Madagascar n'est pas encore dangereux contrairement en Europe qui atteint jusqu'à environ 4000 avions circulant dans son espace.

#### *c. Objectifs de l'ATFM :*

- Adapter le flux de trafic à la capacité en prévenant les surcharges et en lissant l'écoulement du trafic
- Garantir la sécurité des vols
- Limiter les contraintes sur le trafic
- Limiter les retards

### 1.3.3.6 Gestion de l'espace aérien (ASM):

Le nombre d'avions ne cesse de croître pour satisfaire la demande croissante de transport. L'espace aérien devient donc de plus en plus encombré. Un avion volant dans l'espace peut atteindre une vitesse allant de 120 à 800 km/h. Devant l'encombrement de l'espace aérien, il est en effet nécessaire de le gérer.

#### *a. Découpage de l'espace aérien :*

Les territoires nationaux sont découpés en régions d'information de vol appelé FIR ou Flight Information Region. Les FIR vont de la surface (SFC) au niveau de vol 195 (inclus) ou FL 195, Flight Level 195, c'est-à-dire 19.500 pieds à la pression de 1013 hPa, soit environ 5 800 m. Les FIR sont gérées par le centre de contrôle en route. Au-dessus de la FIR, il y a une seule région, la région d'information supérieure UIR ou Upper Information Region. Elle va du niveau FL 195 (exclu) au FL660. Horizontalement, l'espace est divisé en tranches :

- l'espace aérien inférieur LTA ou Lower Traffic Area du niveau 115 (exclu) au 195 (inclus),
- 3 400 m à 5 800 m, espace contrôlé principalement de classe D, c'est à dire contact radio obligatoire.
- l'espace aérien supérieur UTA ou Upper Traffic Area du niveau 195 (exclu) au 660, 5 800 m à 20 000 m, espace contrôlé de classe C depuis novembre 2004, c'est à dire réservé aux aéronefs en régime de vol aux instruments IFR et à certains VFR sur réservation de zone [13] [14].

#### *b. Zone contrôlés ou non contrôlés :*

Il existe des espaces contrôlés de taille plus petite, pour permettre de gérer le trafic aérien aux abords des aéroports :

- la zone de contrôle terminale CTR ou ConTRol zone, souvent de forme cylindrique, centrée sur un aéroport important, qui permet de gérer les décollages et atterrissages ainsi que les circuits de piste. Elle a une hauteur faible (généralement 500 mètres) et démarre au sol.
- la région de contrôle terminale TMA ou TerMinal control Area, de plus grande taille qui chapeaute bien souvent une ou plusieurs CTR, qui permet de protéger les trajectoires de départ et d'arrivée d'un aéroport, ou de plusieurs aéroports

- la voie aérienne AWY ou Airway, qui relie les TMA entre-elles.

*c. Classe de l'espace aérien :*

Les classes d'espace aérien associent à des zones tridimensionnelles dans l'espace aérien un code, en l'occurrence une lettre, qui détermine le niveau de contrôle de la zone en question. Par « niveau de contrôle » on entend un ensemble de procédures auxquelles doit se conformer le pilote, ainsi qu'un ensemble de règles qu'il doit respecter, lorsqu'il circule dans la zone. Lorsqu'une zone est contrôlée, le pilote est en contact radio avec un organisme de contrôle, qui peut être par exemple la tour d'un aérodrome, ou bien un centre de contrôle plus conséquent.

Le centre de contrôle peut exiger certaines actions du pilote, par exemple qu'il mette en marche un appareil dans l'avion (transpondeur) permettant au centre de contrôle de l'identifier au radar. Le centre de contrôle offre, en échange, une aide au pilote, et le décharge d'un ensemble de tâches dont le centre assure le contrôle. Dans la définition des classes d'espace aérien on trouve des règles s'appliquant distinctement aux conditions VFR (« Visual Flight Rules ») et IFR (« Instrument Flight Rules »).

Les conditions VFR s'appliquent au « vol à vue » c'est à dire que le pilote utilise la vue de son cockpit comme source d'information principale. Dans le cas des IFR, le pilote utilise ses instruments comme source de connaissance de l'environnement.

*d. Classe d'espace contrôlé :*

- classe A : Le vol VFR est interdit en classe A sauf dérogation express accordée par l'autorité compétente. Le contact radio et la délivrance d'une clairance pour entrer dans l'espace sont obligatoires. Elle est utilisée dans les espaces avec un très fort trafic IFR.
- classe B : Le contact radio et la délivrance d'une clairance pour entrer dans l'espace sont obligatoires. Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont hors des nuages et 5 km de visibilité horizontale (8 km au-dessus du niveau de vol 100).
- classe C : Le contact radio et la délivrance d'une clairance pour entrer dans l'espace sont obligatoires. Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont 1000 pieds verticalement et 1500 m horizontalement par rapport aux nuages et 5 km de visibilité horizontale (8 km au-dessus du niveau de vol 100). La vitesse est limitée à 250 nœuds sous le niveau de vol 100 [13] [14].

- classe D : Le contact radio et la délivrance d'une clairance pour entrer dans l'espace sont obligatoires. Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont 1000 pieds verticalement et 1500 m horizontalement par rapport aux nuages et 5 km de visibilité horizontale (8 km au-dessus du niveau de vol 100). Ce sont les mêmes conditions que la classe C. La vitesse est limitée à 250 nœuds sous le niveau de vol 100.
- classe E : le vol VFR n'est pas un vol contrôlé. Par conséquent, un vol VFR est dispensé de clairance et de contact radio dans cette classe d'espace, sauf dans le cas du VFR spécial, où il redevient un vol contrôlé. Un vol IFR est lui un vol contrôlé, et a obligation de contact radio et de clairance pour pénétrer un espace de classe E. Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont 1000 pieds verticalement et 1500 m horizontalement par rapport aux nuages et 5 km de visibilité horizontale (8 km au-dessus du niveau de vol 100). Ce sont les mêmes conditions que les classes C et D. La vitesse est limitée à 250 nœuds sous le niveau de vol 100.

*e. Classe d'espace non contrôlé :*

- classe F : Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont 1000 pieds verticalement et 1500 m horizontalement par rapport aux nuages et 5 km de visibilité horizontale (8 km au-dessus du niveau de vol 100). Ce sont les mêmes conditions que les classes C et D. La vitesse est limitée à 250 nœuds sous le niveau de vol 100.
- classe G : Il s'agit de la classe d'espace la plus répandue. Quand aucun espace aérien n'est défini, l'espace est de classe G. Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont 1000 pieds verticalement et 1500 m horizontalement par rapport aux nuages et 5 km de visibilité horizontale (8 km au-dessus du niveau de vol 100). Ce sont les mêmes conditions que les classes C et D. La vitesse est limitée à 250 nœuds sous le niveau de vol 100.

*f. Classe d'espace non contrôlé :*

Ces zones sont beaucoup utilisées par les militaires pour protéger leurs évolutions, mais il en existe quelques-unes pour des besoins civils. Il existe trois types de zones :

- zone dangereuse (D): Les zones D, dangereuses, définies pour annoncer un danger permanent ou à certaines heures pour les aéronefs. La pénétration dans la zone n'est pas interdite même en cas d'activité. Il s'agit par exemple, de champs de tir militaires ou de

zones de barrage en montagne avec de nombreux câbles. A ne pas confondre avec l'espace de Classe D.

- zone réglementée (R) : Les zones R, réglementées, définies pour protéger une zone, principalement d'évolution d'avions militaires.
- zone interdites (P) : Les zones P, interdites de l'anglais prohibited, sont complètement interdites à tout aéronef civil. (Palais présidentiel).

#### 1.3.3.7 Outils et méthodes de travail :

##### *a. La radiotéléphonie ou fréquence ou micro :*

C'est le principal outil du contrôleur. Le contrôle aérien utilise principalement des radiocommunications VHF, mais aussi notamment pour le contrôle océanique, des fréquences HF et UHF. La bande de fréquence VHF réservée à la communication vocale en aéronautique s'étend de 118 Mhz à 138 Mhz.

- La communication HF :

Utilisé pour les besoins des zones océaniques et désertiques, la bande de fréquence HF utilise la gamme de 3 MHz à 30 MHz. Son utilisation est d'augure pour les espaces où les séparations sont larges (entre 50 et 100 NM entre avions). Les ondes ne se propagent pas seulement en ligne droite, et c'est bien ce phénomène qui est utilisé pour porter à des distances qui vont très largement au-delà de l'horizon.

Les ondes HF voyagent en se réfléchissant sur plusieurs couches invisibles de l'atmosphère. Ces couches sont formées par la réaction de l'air atmosphérique aux particules solaires, elles dépendent donc de l'ensoleillement, et pour simplifier, elles sont tour à tour réfléchissantes ce qui est bon pour la propagation et absorbantes, ce qui l'est nettement moins, bien sûr. Pour porter loin, il faut descendre le plus possible la fréquence des ondes. Alors pour porter le plus loin possible, on en arrive à la limite de ce qui est nécessaire pour transporter une voix humaine intelligible. C'est ainsi que la seule solution possible est l'emploi des ondes dites «Hautes Fréquences» [13] [14].

- La communication UHF :

La bande aéronautique internationale est nommée bande UHF afin d'être différenciée de la bande VHF proprement dite. Cette bande est utilisée en aéronautique militaire. La bande de fréquence utilisée couvre 240 - 410 MHz.

La radiotéléphonie permet aux contrôleurs :

- de recevoir des informations de la part des pilotes ;
- de délivrer des clairances aux aéronefs.

Les échanges en radiotéléphonie sont codifiés. Tous les messages courants ont une forme canonique qui doit être utilisée. On appelle cela la phraséologie. Elle est étudiée pour que les messages soient concis, clairs, sans ambiguïté.

Du point de vue du pilote, la situation des aéronefs évoluant dans son espace aérien est identifiée, pour l'essentiel, par une activité appelée party line. Le party line est ici l'écoute par le pilote des communications radiotéléphoniques qui ne lui sont pas directement adressées.

Par exemple, le pilote est assuré que la piste est libre avant d'être autorisé à atterrir s'il entend l'aéronef qui vient de se poser indiquer au contrôleur "IT640 piste dégagée". Le contrôleur peut indiquer à un pilote de manière explicite la position des autres aéronefs pour justifier un changement de ses paramètres de vol, mais ce n'est pas la source d'information prédominante.

Tout comme le contrôleur aérien, le pilote d'aéronef se fait une image mentale du trafic actuel et futur à partir des informations issues du party line.

Le collationnement (readback) est obligatoire pour la plupart des instructions : il s'agit de répéter l'instruction (ou du moins les éléments principaux) pour confirmer la bonne compréhension.

Par exemple, pour autoriser un avion au décollage, le contrôleur lui communiquera l'instruction cleared for take off ou « autorisé au décollage », il donnera la direction et la vitesse du vent et le numéro de la piste. Le pilote doit confirmer en répétant l'instruction donnée.

Lettre	Alphabet Radio International	Alphabet Morse
A	Alpha	·—
B	Bravo	····
C	Charlie	···—
D	Delta	··—
E	Echo	·
F	Fox Trot	···—
G	Golf	··—
H	Hotel	····
I	India	··
J	Juliett	·—··
K	Kilo	··—
L	Lima	··—
M	Mike	··
N	November	··—
O	Oscar	··
P	Papa	··—
Q	Québec	··—
R	Roméo	··—
S	Sierra	··
T	Tango	—
U	Uniform	··—
V	Victor	··—
W	Whiskey	··—
X	X-Ray	··—
Y	Yankee	··—
Z	Zulu	··—

**Tableau 1.01:** *Phraséologie utilisé en aéronautique*

La structure du message entre le contrôleur et le pilote se constitue comme ceci :

- le message initial (prise de contact) doit comporter l'appelé et l'appelant : "Ivato de Fox Alpha Bravo, bonjour".

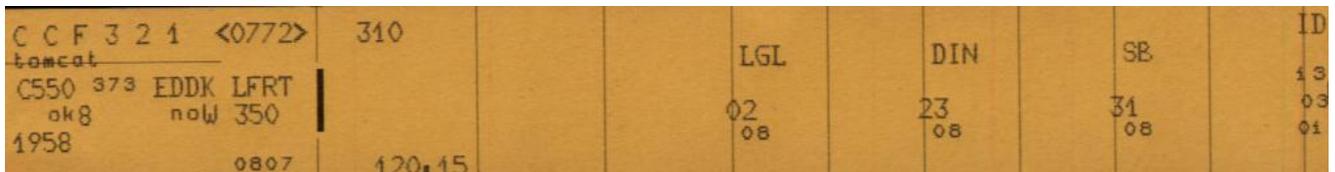
- un message de demande commence par l'appelant : "Fox Alpha Bravo, au seuil 22, prêt pour alignement et décollage"
- un message d'instruction ou d'information (clairance ou indication du sol) commence par l'appelé: "Fox Alpha Bravo, autorisé alignement et décollage piste 22"
- un message de collationnement fini par l'appelant : "Je m'aligne et décolle, piste 22, Fox Alpha Bravo".

Voici un autre exemple de discussion entre pilote et contrôleur pour montrer le collationnement :

- contrôleur : "Mike Delta Golf, autorisé à pénétrer, le QNH 1013, piste en service 22, transpondez 5123, rappelez verticale"
- pilote : "Autorisé à pénétrer, QNH 1013, piste 22, transpondeur 5123, je rappellerais verticale, Mike Delta Golf".

*b. Les strips:*

Les strips sont de petites bandes de progression en papier sur lesquelles sont inscrites les informations relatives aux vols pris en charge par le contrôle aérien [15].



**Figure 1.01** : Présentation d'un strip

A chaque phase de vol correspond donc des strips, où sont imprimés les détails connus de vol : indicatif d'appel en radio téléphonie, route, provenance, destination, type d'aéronef, niveau de vol ou altitude, waypoints de passage.

Le contrôleur utilise ensuite ce strip pour y inscrire les instructions qu'il donne à l'aéronef : changements de cap, d'altitude ou encore de vitesse, autorisations d'atterrissage ou de décollage, horaires de passage de certains points.

Par la suite, le strip est archivé et utilisé comme preuve pour facturer le service de contrôle aérien à la compagnie aérienne.

Dans certains systèmes modernes les strips en papier sont remplacés par des «strips électroniques» qui s'affichent à l'écran. Le contrôleur recevra automatiquement un détail du vol en cours sans prendre contact avec le pilote. Les informations qui étaient disponibles sur les strips papiers sont facilement introduites dans le système. Ainsi le système peut mettre à jour la situation et donner des alarmes dans le cas échéant. Le partage d'informations entre secteur est possible contrairement au strip papier qui n'est lisible que par les contrôleurs à proximité.

*c. Le contrôle radar :*

Deux types de radar sont utilisés dans l'aviation civile :

- le radar primaire, encore très utilisé pour le contrôle aérien militaire, car il détecte les avions possédant ou non un transpondeur .Dans le civil, il est tombé en désuétude au profit du secondaire. Il est encore utilisé sur les grandes approches, où il est en doublure avec le radar secondaire par sécurité, et pour les radars sols sur les grands aéroports comme l'aéroport Paris-Charles-de-Gaulle, où il sert à suivre le déplacement des aéronefs et véhicules au sol.
- le radar secondaire est le plus utilisé dans l'aviation civile, qui profite de l'identification des pistes et de la visualisation uniquement des vols pertinents. Ce type de radars ne localise que les avions possédant un transpondeur.

Le contrôleur utilise le radar pour rendre trois services, appelés "services radar" :

- Assistance radar : fournit aux aéronefs des informations relatives à leur position et aux écarts par rapport à leur route.
- Surveillance radar : utilise le radar pour mieux connaître la position des aéronefs.
- Guidage radar : donne des caps aux aéronefs afin de leur faire suivre une trajectoire spécifiée.

#### 1.3.3.8 Rôles du service ATC:

Ce service a donc pour mission :

- le contrôle ;
- la gestion de flux de trafic aérien ;

- et la gestion de l'espace aérien.

#### **1.4 Conclusion**

Tous les sous-réseaux aéronautiques possèdent des services dépendant pour la plupart les uns des autres afin d'assurer la sécurité de la navigation aérienne. La télécommunication entre aéronefs et point au sol sera le plus développé dans ce mémoire.

## CHAPITRE 2

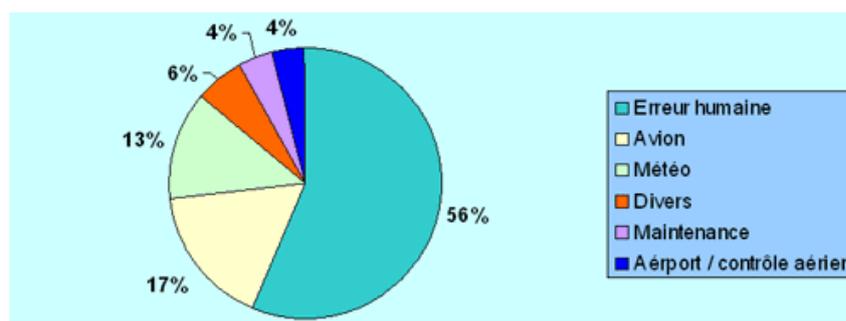
### LIMITES DES SYSTEMES DE COMMUNICATIONS AERONAUTIQUES

#### 2.1 Introduction:

Depuis le premier vol des frères Wright en 1903, la question des communications entre le pilote et le sol s'est toujours posée. Elles sont indispensables pour améliorer la sûreté et l'efficacité des vols.

Dans un premier temps, le personnel au sol utilisait des gestes ou des signaux visuels. Les pilotes inclinaient par exemple les ailes de l'avion pour signaler à la tour de contrôle qu'ils allaient atterrir à leur prochain passage. En 1917, AT&T a inventé le premier émetteur-récepteur radio pour avion. La première communication radio entre un avion et le sol a ainsi eu lieu en juin 1917. Mais c'est seulement au début des années 1930 qu'il est devenu techniquement et commercialement possible d'installer une radio à bord des avions. La société ARINC (Aeronautical Radio Incorporated) a d'ailleurs été fondée en 1929. Dans les années 1940, la radio est devenue disponible sur la plupart des avions, permettant les communications vocales.

D'après des calculs statistiques, la plupart des accidents aériens sont la conséquence d'un enchaînement d'évènements variés. Les rapports d'analyse font d'ailleurs distinction entre la cause principale de l'accident et les différents facteurs ayant contribué à la catastrophe. Le camembert ci-dessous présente la répartition des causes principales dans les accidents aériens [16].



*Figure 2.01 : Causes des accidents d'avions*

L'erreur humaine est la cause principale des accidents d'avions. Les équipages doivent s'entraîner régulièrement et intensément pour éviter ces erreurs. Au fil du temps, des améliorations et des

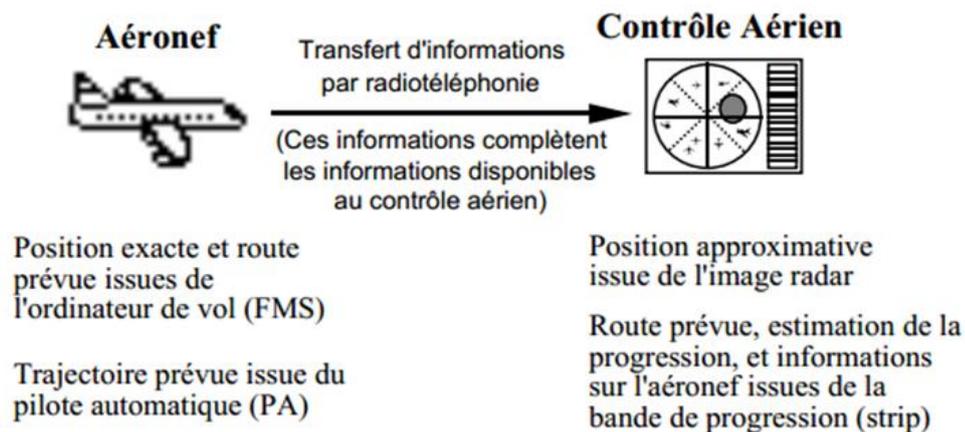
évolutions apparaissent dans le secteur aéronautique surtout les systèmes de communication afin d'atteindre l'objectif de zéro accident.

## 2.2 Le partage de l'information dans le contrôle aérien il y a quelques années:

Il y a quelques années les principaux moyens de communication utilisés pour le contrôle de la navigation aérienne sont la radiotéléphonie et le radar secondaire. Les informations sont transmises par la voix c'est-à-dire utilisation d'une communication vocale et la localisation se fait par l'utilisation du radar.

Du point de vue du contrôleur aérien, la situation du trafic à un instant donné est indiquée essentiellement par une image radar, et par des bandes de progression appelées strips qui sont des bandes de papiers indiquant les détails connus du vol indicatif d'appel en radiotéléphonie, route, provenance, destination, type d'aéronef, niveau de vol ou altitude.

Ces informations sont complétées et remises à jour via communication vocale par la radiotéléphonie par les pilotes d'aéronef. Les informations transmises aux contrôleurs incluent la position exacte et la route prévue de l'aéronef issue de l'ordinateur de vol (FMS), la trajectoire prévue de l'aéronef issue du pilote automatique (PA), et l'état général de l'aéronef. Ces informations complémentaires sont notées sur les bandes de progression ou stockées dans la mémoire du contrôleur aérien qui élabore une image mentale du trafic actuel et futur[50].



*Figure 2.02 : Partage d'informations entre contrôleur et aéronef*

### **2.3 Le partage de l'information dans le contrôle aérien de nos jours:**

De nos jours, le partage des informations dans le contrôle de trafic aérien se fait automatiquement par l'intermédiaire des différents capteurs de surveillance qui sont le premier maillon de la chaîne car ces systèmes ont pour mission de "voir" les avions et de transmettre toutes les informations disponibles aux systèmes de poursuite.

Le système de contrôle automatisé du trafic aérien peut être utilisé pour les missions suivantes :

- contrôle opérationnel : le contrôle du trafic en temps réels avec toutes les données nécessaires pour établir un vol.
- test et évaluation : tous les sous-systèmes sont soumis à plusieurs phases de test et de validation.
- formation : le système doit fournir un mode simulation pour la formation des contrôleurs aériens et cela doit pouvoir se faire dans de bonnes conditions et sur du trafic simulé.
- archivage, rejeu et visualisation, pour des raisons légales (incidents, accidents) mais aussi pour évaluer le montant de la redevance au service de contrôle auprès des compagnies aériennes. Le système doit comporter l'enregistrement de tous les messages émis et reçus par le système et toutes les actions contrôleur et d'autre part, le rejeu de ces messages sur une position dédiée afin d'obtenir une sorte de boîte noire ou de preuves si il y a un accident ou une défaillance technique quelconques [30][31][32].

### **2.4 Les limites de la capacité de la communication vocale:**

Après la seconde guerre mondiale, l'aéronautique a connu une évolution majeure avec le transport de passagers. Les premières compagnies aériennes ont fait leur apparition [17].

Années	Bandes 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
À nos jours	118-138 Mhz	8,33 kHz	2400

**Tableau 2.01:** *Evolution du nombre de canaux VHF pour les communications aéronautiques*

Il est alors devenu nécessaire d'avoir une approche plus structurée des communications aéronautiques. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) a été créée en 1947 dans le but d'élaborer des normes pour standardiser le transport aéronautique international. 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 était alors divisée en 70 canaux de 200 kHz.

En 1958, la compagnie PanAm met en service le Boeing 707. C'est le début du transport aérien commercial de masse. Dès lors, le trafic aérien n'a cessé d'augmenter et les 70 canaux ont rapidement été saturés. L'amélioration de la précision de la fréquence des porteuses a ensuite permis de réduire l'espacement entre les canaux. On est ainsi passé de 200 kHz à 100 kHz en 1958, puis à 50 kHz en 1964 et à 25 kHz depuis 1972. Parallèlement à cela, la bande allouée aux communications aéronautiques par l'UIT a augmentée. En 1959, elle a été étendue jusqu'à 136 MHz, puis jusqu'à 137 MHz en 1979. De plus, une sectorisation de l'espace aérien a été mise en place pour permettre une réutilisation des fréquences. En 1994, il a été décidé de réduire encore l'espacement des canaux de 25 kHz à 8,33 kHz. Cette séparation a été appliquée en Europe au-dessus du niveau de vol FL 245 (24 500 pieds, soit 7,5 km environ) à partir d'octobre 1999, puis au-dessus du niveau de vol FL195 à partir de mars 2007.

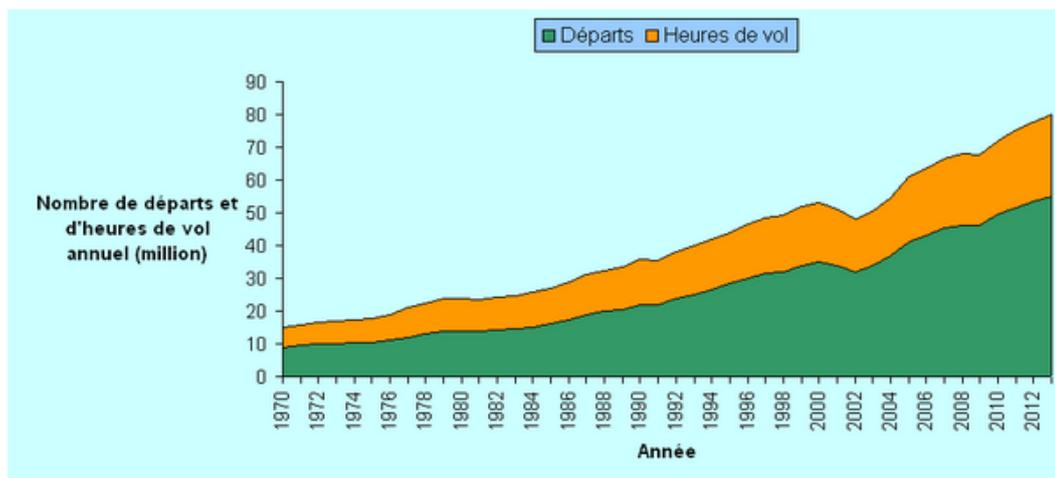
Le tableau 2.01 montre l'évolution du nombre de canaux VHF de 1947 à nos jours.

Aujourd'hui, les fréquences de radiocommunication sont très convoitées. 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, avec la modulation actuelle DSB-AM (Double Side Band – Amplitude Modulation). Il est donc aujourd'hui très difficile d'augmenter la capacité des systèmes de communications vocales.

## 2.5 L'augmentation du trafic aérien:

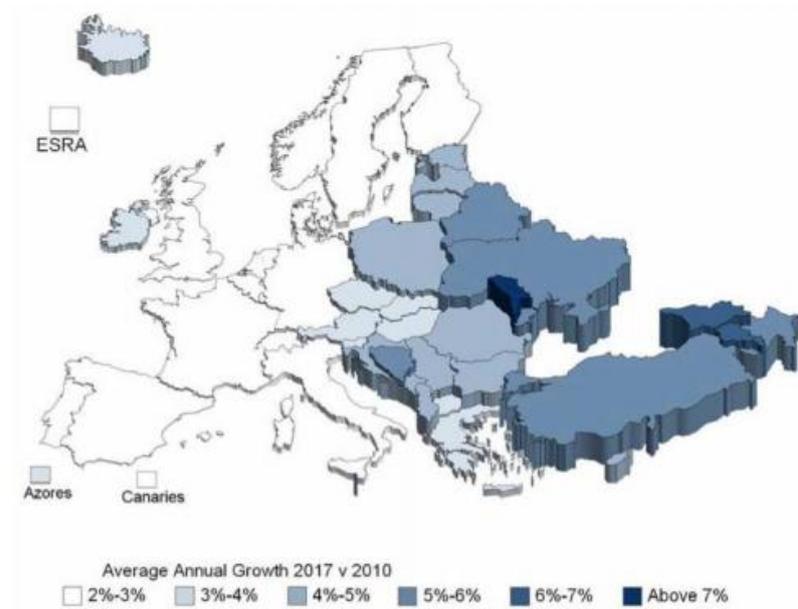
Le trafic aérien n'a cessé de croître jusqu'en 2001, année des attentats du World Trade Center. Ces événements dramatiques ont entraîné la faillite de nombreuses compagnies aériennes et une diminution du trafic aérien.

Mais l'aéronautique s'en est vite relevée, et deux ans après, la croissance repart. En 2013, le nombre d'heures de vol effectuées atteint un record (54.9 millions) [16].



*Figure 2.03 : Croissance du trafic aérien*

Le transport aérien est en effet aujourd'hui le moyen de transport qui se développe le plus rapidement. La figure ci-après, illustre la prévision d'augmentation du trafic aérien en Europe d'ici 2017 par Eurocontrol. On peut y voir des prévisions de croissance annuelle de plus de 7% d'ici à 2017 dans certaines parties de l'Europe. La congestion des systèmes de communications vocales va donc s'accroître dans les prochaines années.

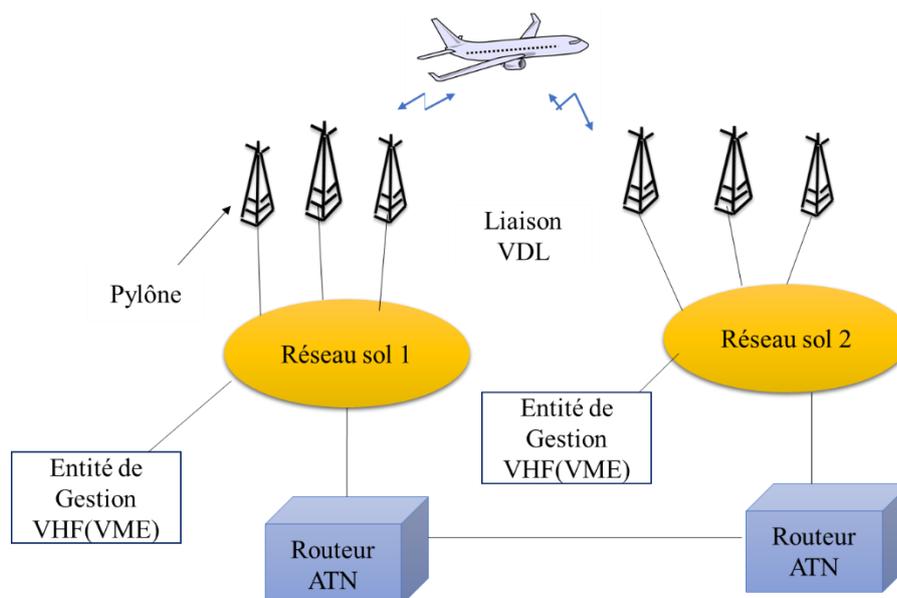


*Figure 2.04 : Prévission d'augmentation du trafic aérien en Europe par Eurocontrol*

## 2.6 Vers les communications de données numériques : le datalink:

Créé initialement pour aider au contrôle du trafic au-dessus des espaces océaniques, le datalink, faisant son essor, est en passe de devenir un nouvel outil capable de remplacer ou de seconder le radar et de compléter les communications vocales. Grâce à un équipement spécial à bord de l'avion, les données des calculateurs de bord (position, altitude, vitesse, météo) sont collectées, puis transmises à intervalles réguliers par satellite au-dessus des océans vers les équipements au sol. Une interface graphique permet de visualiser ces éléments et leur mise à jour sur un écran. Les images obtenues peuvent même être intégrées sur les écrans radar de dernière génération (moniteur graphique). Il s'agit également d'utiliser une messagerie électronique pour les dialogues entre pilotes et contrôleurs : c'est ce qu'on appelle CPDLC [17].

On distingue quatre modes de liaison de données en VHF : VDL mode 1, VDL mode 2, VDL mode 3 et VDL mode 4. VDL mode 2 est le support du CPDLC.



**Figure 2.05 :** Vue d'ensemble du système VDL

Comme la radio VHF fonctionne principalement en visibilité directe, son utilisation dans la communication air-sol se limite aux espaces aériens qui peuvent être desservis par des stations au sol. Le sous-système à bord fonctionne comme un terminal de communication mobile, qui établit et rétablit des connexions de liaison avec les stations sol capables d'assurer une connectivité fiable avec les ETTD (Equipements Terminaux de Traitement de Données ou routeurs air-sol). En fait, un aéronef en route vers sa destination finale doit établir des connexions avec un grand nombre de stations sol à mesure qu'il passe de la zone de couverture d'une RGS à celle d'une autre RGS. Le principe de la VDL mode 2 est que l'on a un ensemble de stations sol qui émettent dans un rayon de 200 NM et qui peuvent prendre en charge jusqu'à 200 avions. Ces stations servent de relai entre le sol et le bord.

## **2.7 La communication entre contrôleurs et pilotes par liaison de données :**

### **2.7.1 Généralité :**

Pour l'application CPDLC, il a été établi un ensemble d'éléments de message d'autorisation, d'information, de demande qui correspond aux expressions conventionnelles utilisées en radiotéléphonie. Le contrôleur sera doté des moyens lui permettant de répondre aux messages, y compris les urgences, de délivrer des autorisations, des instructions et des avis consultatifs, ainsi que de demander et de fournir des renseignements, selon les besoins.

Le pilote sera doté des moyens lui permettant de répondre aux messages, de demander des autorisations et des renseignements, de fournir des renseignements et de signaler ou d'annuler une urgence. Le pilote et le contrôleur seront dotés des moyens leur permettant d'échanger des messages qui ne suivent aucun format défini (c'est-à-dire messages en texte libre).

Les systèmes sol et bord permettront d'afficher les messages de façon appropriée, de les imprimer au besoin et de les stocker d'une manière qui permet de les retrouver facilement et en temps utile en cas de besoin. Chaque fois qu'une présentation sous forme de texte est nécessaire, ce texte sera affiché au moins en langue anglaise. Il est toutefois reconnu que l'ensemble de messages CPDLC et les procédures connexes diffèrent quelque peu de ceux de l'équivalent vocal, les deux systèmes n'utilisant pas le même support : l'un est un système de conversation directe et l'autre, un système d'échange de données, celles-ci pouvant être affichées et/ou imprimées.

### **2.7.2 Performances du système CPDLC:**

#### 2.7.2.1 VDL mode 2 :

Au niveau de la couche physique, la VDL Mode 2 utilise une modulation de phase D8PSK et offre un débit binaire de 31,5 kbps. Au niveau de la couche liaison, la sous-couche MAC de la VDL Mode 2 implémente le CSMA p-persistent. Comme dans le CSMA, un avion écoute le canal avant d'émettre pour déterminer s'il est occupé ou non. Si le canal est libre, l'avion émet alors avec une probabilité p. S'il n'émet pas, il attend un temps aléatoire avant de recommencer l'opération.

#### 2.7.2.2 Structure des messages CPDLC:

Les messages CPDLC sont constitués d'éléments de message pré-formatés seuls, de textes libres seuls ou d'une combinaison des deux. Les messages pré-formatés sont soit du texte ou une combinaison de texte et de variables.

Exemple: CLIMB TO AND MAINTAIN 330

L'appui sur une touche de l'interface affiche le message pré-formaté CLIMB TO qui présente le champ "level" vide. Ce champ est rempli par le pilote.

Le principe des messages pré-formaté est que l'on n'envoie pas le texte (ici CLIMB TO ...) mais une trame définie par le numéro unique de l'élément du message, la variable (si elle existe) plus un

attribut du message (d'urgence ou de réponse développé plus loin) ainsi que des numéros servant à la gestion des messages.

Un message CPDLC peut rassembler plusieurs éléments (5 au maximum).

Les trames sont soit des trames UL n° xx (pour UpLink) soit des trames DL n° xx (pour DownLink) selon que la trame est Air-Sol ou Sol-Air. Il existe pour l'instant plus de quatre-vingt (80) trames DL et presque cent quatre-vingt (180) trames UL constituant tous les messages standards définis par l'ADS Panel de l'OACI.

Ainsi le pilote choisit sur l'interface homme machine (MCDU par exemple) le type de message à envoyer (exemple REQUEST) puis dans la rubrique REQUEST le type de demande (exemple REQUEST CLIMB TO) puis remplit le champ de la variable (ex : 330) et enfin envoie sa demande (SEND). L'avionique génère alors une trame DL contenant le numéro unique de l'élément du message (DL n°9) accompagné de la variable plus attribut et numéro du message.

Arrivée au contrôle, la trame est détectée et le numéro (ici 9) affiche en clair sur la console ATC le texte de l'élément du message "REQUEST CLIMB TO" et la variable.

Le texte n'a donc jamais voyagé sur les ondes (gain d'efficacité, pas de perte de caractères etc..). Les messages CPDLC ne nécessitent pas de read back comme en phonie.

*a. Attribut du message :*

Chaque élément du message comporte un attribut caractérisant le caractère d'urgence ou d'alerte et le type de réponse nécessaire à la clôture du dialogue. L'attribut d'urgence (L'attribut d'urgence détermine les exigences relatives à la mise en file d'attente des messages reçus qui sont affichés à l'utilisateur d'extrémité.) est soit normal, soit de détresse qui fera que ce message sera délivré avant les autres.

L'attribut d'alerte (L'attribut d'alerte détermine le type d'alerte nécessaire au moment de la réception du message.) est assigné à quelques messages (ex : DL n°56 = MAYDAY). L'attribut est transparent pour pilotes et contrôleurs qui ne le voient donc pas. Les attributs de réponse (L'attribut de réponse détermine les réponses valides à envoyer pour un élément de message donné) sont par exemple pour les messages Uplink du type W (Wilco), U (Unable), Y (Yes si une réponse est exigée), N (No si ne nécessite pas de réponse), R (Roger) ou NE si aucune réponse

n'est exigée (dans ce cas le message est considéré comme clôturé dès l'envoi). Pour les messages Downlink l'attribut est Y ou N.

*b. Suivis des messages :*

Les messages contiennent le numéro d'identification du message (NIM). Ce numéro est attribué par le système et permet de vérifier que les messages UL et DL appartenant au même dialogue sont appariés correctement et clos. Tout message ayant un attribut de réponse possède un numéro de référence du message (NRM) permettant de relier le message initial et la réponse. Le MRM est le NIM du message précédent demandant une réponse.

Exemple d'un dialogue :

Pilote vers Contrôle (Downlink) :

« REQUEST CLIMB TO 330 » (message pré-formaté + variable)

Le système de bord génère la trame DL 9 qui demande une réponse (attribut Y).

Le message se voit attribuer le MIN 8 (par exemple).

Contrôle vers Pilote (Uplink) :

« CLIMB TO AND MAINTAIN 330 »

Le système sol génère la trame UL 20 qui demande une réponse (attribut W/U)

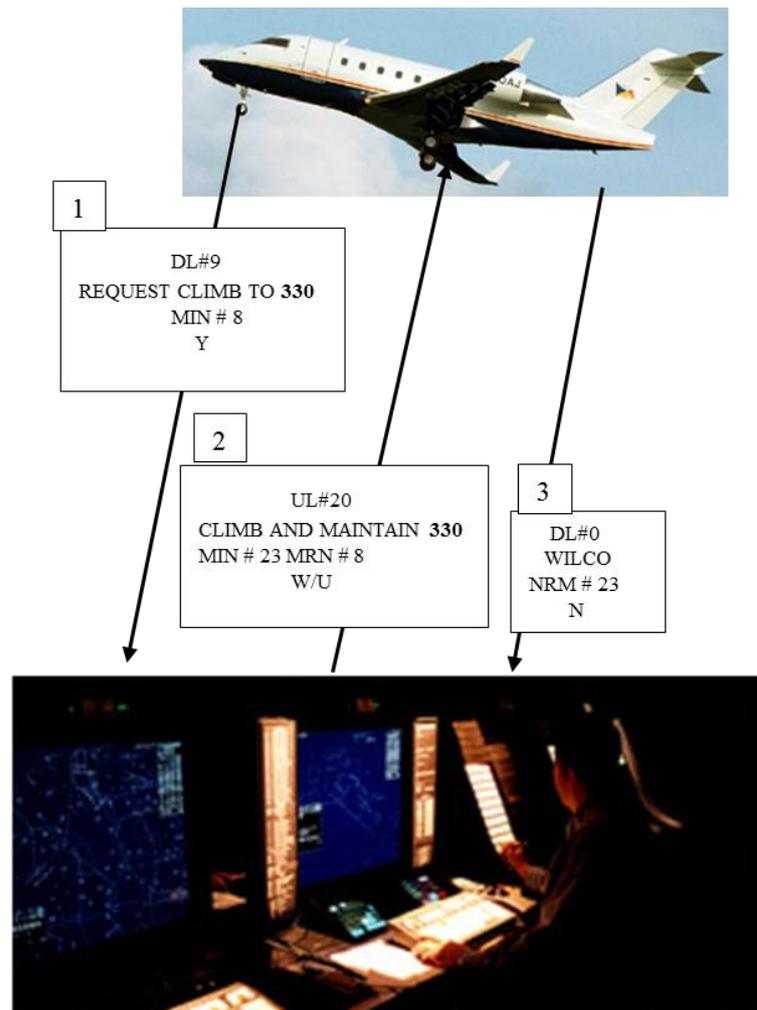
La trame se voit attribuer un MIN 23 et le MRN est celui du MIN downlink (ici 8).

Pilote vers Contrôle (Downlink) :

Le système décode le message et présente la clairance au pilote via l'interface Homme Machine (HMI).

Un prompt Wilco ou Unable est automatiquement activé, le pilote choisit et appuie sur Wilco. Une trame DL 0 est générée. Cette trame ne demande pas de réponse (Attribut N)

Le dialogue est clos.



*Figure 2.06 : Exemple de dialogue entre contrôleur et pilote*

Afin d'éviter les incompréhensions il est recommandé de n'utiliser les messages en free text que s'il n'existe pas de message pré-formaté correspondant à la situation [39].

Généralement, quand un avion équipé CPDLC volera dans une région de contrôle équipée de CPDLC, hors de portée VHF, les moyens CPDLC seront les moyens primaires de communication et la phonie sera utilisée comme moyen de secours (cas de l'Atlantique Nord) [37].

*c. Messages automatiques :*

Il est possible pour le pilote, après réception d'une clairance contenant un report obligatoire de position, d'altitude afin d'armer le système pour qu'il expédie automatiquement un message downlink dès que la condition est réalisée.

Exemple de clairance :

CLIMB TO AND MAINTAIN FL340  
REPORT LEVEL FL340

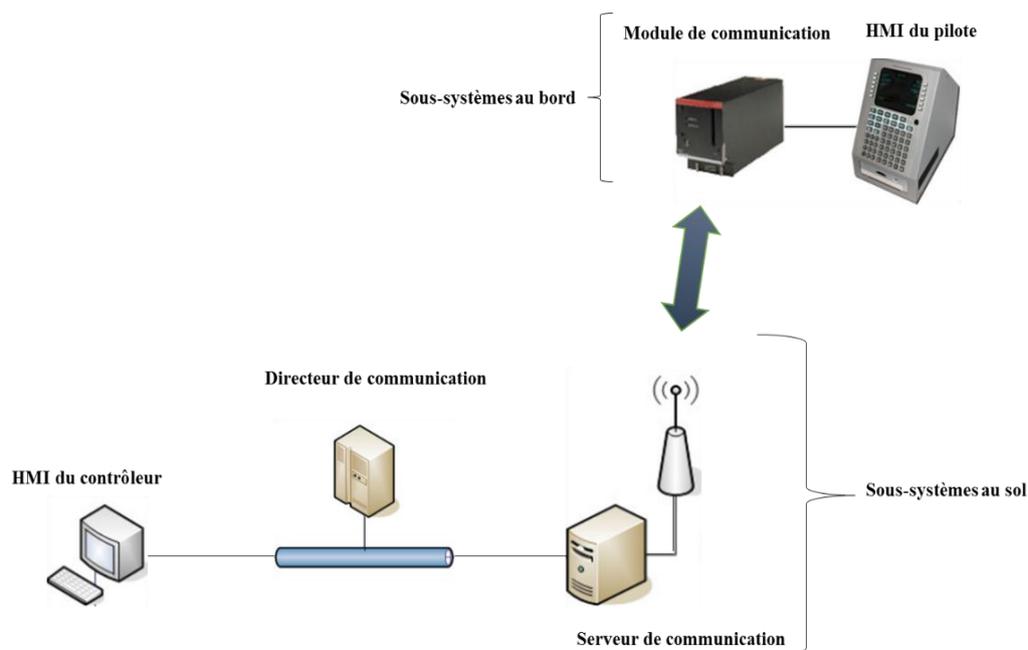
Après acceptation de la clairance et avoir armé le système, le message sera envoyé automatiquement sans action de l'équipage dès que le niveau 340 sera atteint [39].

Les messages entraînant (après armement) un envoi automatique sont :

REPORT PASSING « position »  
REPORT REACHING « altitude »  
REPORT LEAVING « altitude »  
REPORT LEVEL « altitude »

Les messages les plus utilisés en CPDLC sont présentés dans l'annexe 2.

### 2.7.2.3 Architecture et topologie du système:



*Figure 2.07 : Architecture générale*

Un système CPDLC se compose des équipements au bord et au sol. Au sol on a une interface homme machine permettant au contrôleur d'expédier et de recevoir des messages. Dans le service de trafic aérien, il y a un réseau interne au sol qui conduit les messages à un manager de communication. Celui-ci envoie le message à un serveur de communication qui par la suite envoie le message au bord de l'avion par liaison de données.

Pendant que le message est reçu par le système embarqué, il sera décodé puis ira à un panneau de cockpit habituellement les mêmes que celui du FMS.

L'interface homme machine du contrôleur fournit au contrôleur la possibilité d'écrire, d'envoyer, de recevoir et de répondre aux messages.

Lorsque les messages sont prédéfinis, le HMI montre seulement les messages possibles pour chaque occasion. Le contrôleur choisit le message, indique les arguments et l'envoie au pilote.

A l'intérieur du service de trafic aérien, il y a un réseau au sol, habituellement un réseau de câble relie les différents ordinateurs du système de contrôle de trafic aérien. Ce réseau possède plusieurs fonctions tel le transport des messages CPDLC sur terre jusqu'au dispositif qui transmet le message par lien sans fil.

Le manager de communication est un serveur relié au réseau sol responsable de la commande de la circulation des messages entre contrôleurs et pilotes. Ce serveur contrôle l'écoulement et exécute le protocole de CPDLC. Quand un message est reçu, le directeur de communication vérifie la validité du message dans le contexte puis l'envoie au serveur de communication.

Le serveur de communication est un dispositif capable d'envoyer et de recevoir les messages par liaison de données. Ce serveur ne connaît pas le contenu du message mais il a seulement besoin de savoir dans quel canal le message doit être transmis.

Le manager de communication et le serveur de communication pourraient être une machine physique simple.

La liaison de données est la couche physique qui a un raccordement sans fil avec l'avion.

Le module de communication manipule la réception et la transmission des messages.

Le HMI du pilote montre les messages reçus par le pilote et fournit l'interface pour les réponses [40].

#### 2.7.2.4 Avantages et inconvénients du système CPDLC :

##### *a. Avantages :*

Le CPDLC est un remède à des lacunes des systèmes existants comme la réduction significative du temps de transmission et la suppression d'actions par erreur sur les messages ATC destiné à un autre vol. Il est la solution aux erreurs ou malentendus relatifs à la mauvaise qualité de la voix. Il

permet la possibilité d'accès immédiat aux messages précédemment enregistrés. Il permet également de réduire la congestion de la voix, de transmettre les données simultanément et l'utilisation plus opportune et plus efficace des dégagements.

*b. Inconvénients :*

La prise en charge des messages CPDLC nécessite du temps c'est-à-dire que la lecture et l'interprétation d'un dégagement écrit se trouvent moins immédiates que l'écoute lui-même, de plus la préparation et l'envoi d'une requête à l'aide de la combinaison du MCDU et DCDU sont plus longue que directement à l'aide du microphone. C'est pourquoi en risque de conflit, les messages urgents ne doivent pas se faire via CPDLC, cela nécessite donc des tris. Par ailleurs, lorsqu'on utilise le CPDLC le party line est perdu, c'est-à-dire que le pilote ne peut pas écouter les communications radiotéléphoniques environnantes.

**2.7.3 Conclusion aux systèmes CPDLC :**

Comme un avion survole à une vitesse allant de 120 km/h à 800km/h, ses coordonnées changent totalement d'une seconde à l'autre. En risque de conflit, CPDLC n'est pas un moyen envisageable pour la communication entre pilote et contrôleur. La radiotéléphonie reste le moyen principal de communication. On conclut que le système CPDLC se trouve être une solution non à long terme devant cette évolution incessante du trafic aérien et de la saturation de fréquence. De plus, le party line est perdu pour ce système.

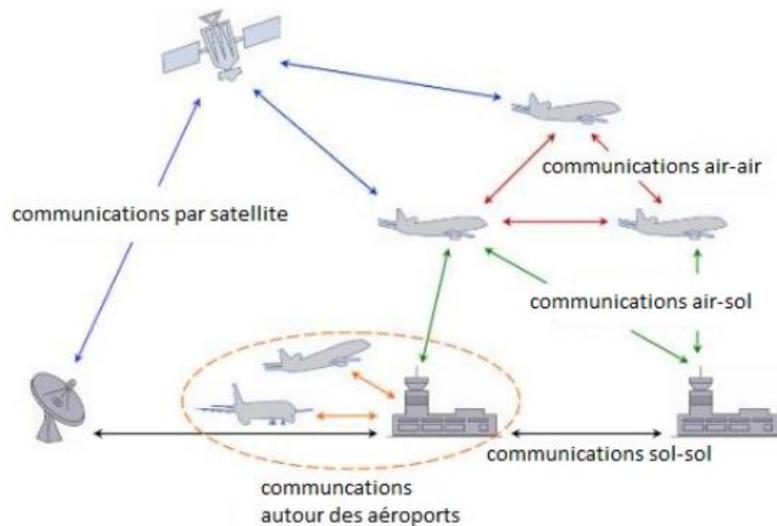
**2.8 Nécessité d'un nouveau système de communication :**

Selon des prévisions, en 2025 le nombre d'aéronefs opérationnels dépasserait le double de leur nombre en 2005. En conséquence, les autorités aéronautiques ont formulé de nouveaux besoins, par exemple de plus larges ressources spectrales et des débits de communication numérique plus élevés.

En revanche, les systèmes actuels ne permettraient pas à suivre cette évolution. Quelques solutions ont été proposées pour améliorer les technologies existantes mais elles seraient insuffisantes à long terme.

Un projet euro-américain a été lancé depuis 2004 pour le développement d'un futur système de communication aéronautique FCS ("Future Communication System"). Le principe de ce projet est de créer une solution générique assurant la communication avec un aéronef pendant toutes ses

phases de vol, comme l'indique la figure suivante. Parmi d'autres avantages, cette structure permettrait ainsi d'avoir une bonne qualité de communication air-sol mais aussi air-air.



**Figure 2.08 :** *Communications avec un aéronef à différentes phases de vol*

Le projet SESAR est donc un projet européen très ambitieux qui a pour but de définir et d'implémenter de nouvelles solutions techniques et opérationnelles pour satisfaire les besoins du contrôle aérien à l'horizon 2020. Il doit ainsi permettre de multiplier par trois la capacité de l'espace aérien, de multiplier par dix la sûreté des vols, de réduire de 10% les émissions de CO2 et de réduire d'au moins 50% les coûts du contrôle aérien pour l'utilisateur. Un projet similaire est en cours aux Etats-Unis sous la direction de la FAA (Federal Aviation Administration) : NEXTGEN (Next Generation Air Transportation System). Dans le domaine des communications, l'infrastructure choisie est basée sur trois nouveaux systèmes de communications de données numériques : l'AeroMACS pour les communications à proximité des aéroports, une nouvelle solution par satellite pour les zones océaniques avec le programme IRIS et le L-DACS pour les communications en zone continentale.

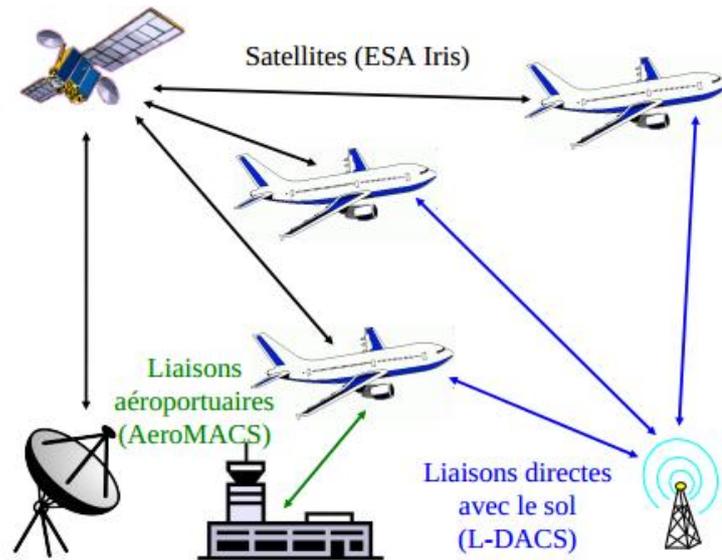


Figure 2.09 : Architecture de communication du projet SESAR

## 2.9 Le système L-DACS :

L-DACS est une solution de communication par liaison directe avec le sol. Il nécessite le déploiement de stations au sol et sera donc uniquement disponible en espace continental. Deux systèmes sont actuellement candidats pour une implémentation future : le L-DACS1 et le L-DACS2. Les deux systèmes opèrent en bande L et offrent une capacité d'environ 200 kbps.

	LDACS-1	LDACS-2
Bandes de fréquences	FL:985,5-1008,5 MHz; RL:1048,5-1071,5Mhz	960-975 Mhz
Bande passante	498,05 kHz	200 kHz
Fréquence binaire	FL(303-1373 kbps)+ RL(220-1038 kbps)	270,833 kbps(FL+RL)
Modulations	QPSK, 16QAM	GMSK
Technique d'accès	FL: OFDMA RL: OFDMA/TDMA	TDMA

Tableau 2.02: Spécifications des deux versions L-DACS

Des prototypes de chacune des deux versions sont actuellement en cours de développement pour des tests en situation réelle. Un choix devra ensuite être fait pour standardiser l'une des deux solutions.

## 2.10 Système L-DACSI :

### 2.10.1 Présentation du système L-DACSI :

L-DACS 1 propose deux modes de fonctionnement. Une communication air-sol et celle air-air. Ces deux modes utilisent différents canaux radio avec couche physique et couche liaison de données différentes.

Le sous-système de la couche physique et de la couche liaison de données L-DACS 1 air-sol sont optimisés pour des communications de données mais également en charge des communications vocales party-line qui sont réalisées par retransmission via la station au sol.

Le sous-système L-DACS1 air-sol est un système point-multipoint. Il est conçu pour une plage de fonctionnement de 200 NM. Afin de limiter l'interférence produite par l'émetteur L-DACS1, la puissance d'émission maximale est de +41dBm.

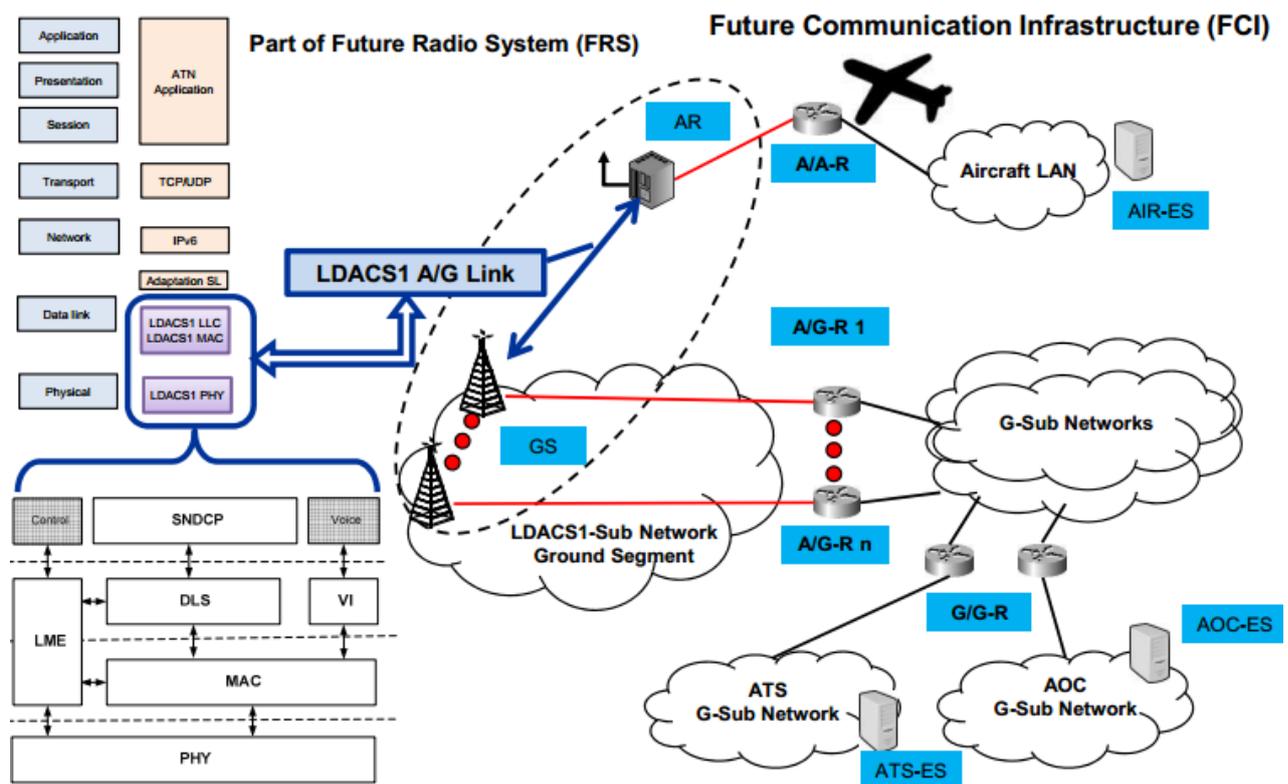


Figure 2.10 : Environnement L-DACSI

Le mode air-sol prend une topologie en étoile avec L-DACS1 sol qui peut prendre en charge simultanément les aéronefs sous son contrôle. Le système L-DACS1 air-sol concerne les deux couches basses du modèle OSI [annexe 3] et une partie de la couche réseau.

### 2.10.2 Caractéristiques des canaux radios (support L-DACS1) :

Un canal radio est caractérisé par plusieurs phénomènes physiques :

- La réflexion qui est un phénomène où l'onde électromagnétique rencontre un obstacle dont les dimensions sont grandes, comparées à la longueur d'onde. Une partie de l'énergie de l'onde est réfléchiée par l'obstacle avec un angle égal à celui d'arrivée. L'autre partie de l'énergie est absorbée par l'obstacle suivant le phénomène de réfraction.
- La diffraction qui est un phénomène où l'onde électromagnétique rencontre un obstacle imperméable à celle-ci, mais présentant des dimensions de l'ordre de la longueur d'onde ou présentant des arêtes vives. Chaque point de l'arête se comporte alors comme une source secondaire qui rayonne à nouveau l'onde dans toutes les directions.
- La diffusion ou "scattering", un phénomène qui se produit lorsque l'onde électromagnétique rencontre sur son trajet un grand nombre d'objets dont la taille est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde ou plus petite.

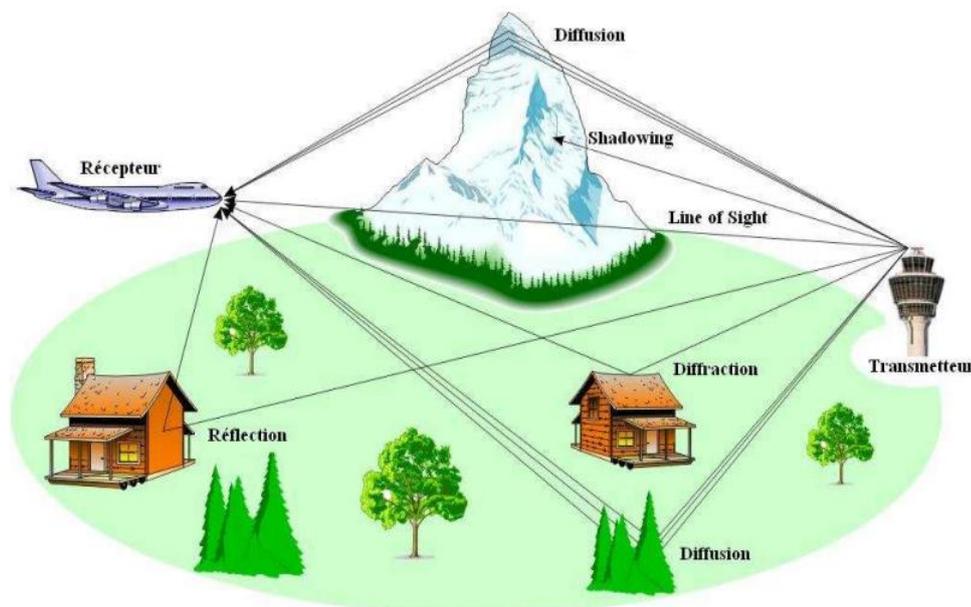


Figure 2.11 : Scénario typique de propagation radio-mobile

Tous ces phénomènes physiques entraînent des échos (propagation par trajets multiples due à la présence d'obstacles) pouvant engendrer des évanouissements (fadings) qui sont des « trous de transmission » résultant de l'annulation du signal à un instant et une fréquence donnée. Par conséquent, lorsqu'on est en réception fixe, portable ou mobile, la probabilité de recevoir uniquement une onde directe provenant d'un émetteur est très faible. On va donc recevoir le signal émis par l'émetteur ainsi qu'une multitude de signaux atténués et retardés provenant des différents échos [55] [48].

#### 2.10.2.1 Canal sélectif en fréquence :

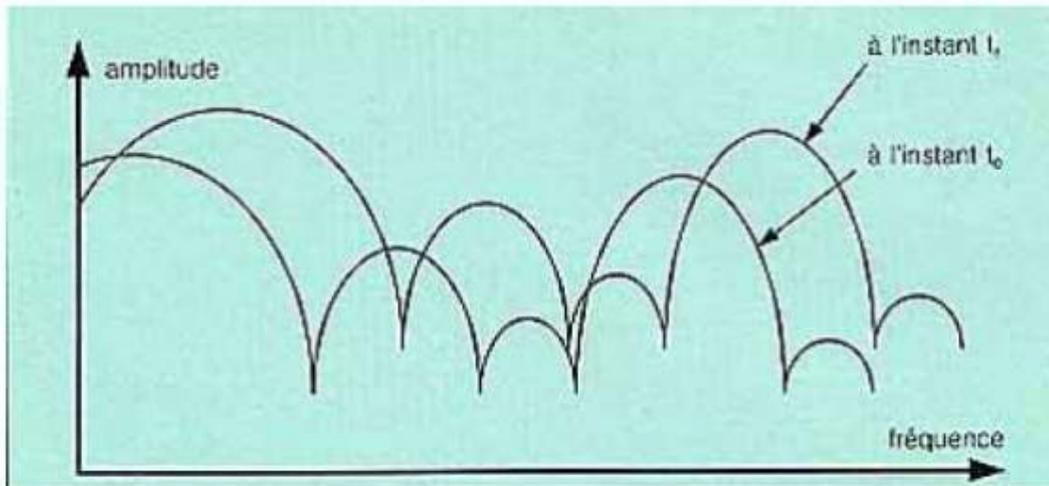
Un signal radiofréquence est émis sur un canal radio, qui constitue son support physique.

Un canal est dit sélectif en fréquence lorsqu'il ne se comporte pas identiquement suivant la fréquence du signal. Il exprime le fait que le signal à transmettre a des composantes fréquentielles qui sont atténuées différemment par le canal de propagation. Certaines fréquences seront transmises plus rapidement que d'autres, ou encore seront atténuées plus que d'autres. Le signal sera alors déformé lors de la transmission : les données seront donc dispersées dans le temps et pouvant mener à des interférences entre symboles.

#### 2.10.2.2 Canal multi-trajet :

Une fonction de transfert est un modèle mathématique de la relation entre l'entrée et la sortie d'un système linéaire, le plus souvent invariant. Elle est utilisée, notamment, en traitement du signal, en théorie des communications, en automatique, et dans toutes les sciences de l'ingénieur qui font appel à cette discipline.

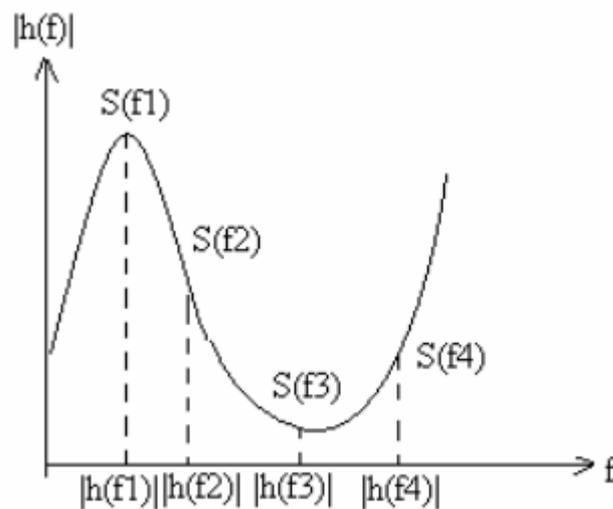
La fonction de transfert d'un canal radio résultant d'une propagation à trajets multiples présente une réponse fréquentielle qui n'est pas plate, mais comporte des creux et des bosses dus aux échos et réflexions entre l'émetteur et le récepteur.



**Figure 2.12 :** Fonction de transfert du canal multi-trajets

Or, un très grand débit impose une grande bande passante, et si cette bande couvre une partie du spectre comportant des creux, il y a donc perte totale de l'information pour la fréquence correspondante.

Voici la représentation de cette fonction de transfert (atténuation par le canal en fonction de la fréquence du signal):



**Figure 2.13 :** Atténuation en fonction de fréquence de canal

On voit que le canal comporte des atténuations qui dépendent de la fréquence : le signal d'information est transmis sur chaque porteuse sinusoïdale de fréquence  $f_i (i=1, \dots, 4)$  et est atténué de  $|h(f_i)|$ .

De façon générale, on suppose que le signal émis pour le canal multi-trajet s'écrit :

$$s(t) = \text{Re}\{S_u(t)e^{2j\pi f_c t}\} \quad (2.01)$$

Où  $S_u$  est le signal utile et  $f_c$  est la fréquence porteuse.

Le signal reçu est la somme des signaux issus des différents chemins :

$$x(t) = \sum \alpha_n(t)s(t - \tau_n(t)) \quad (2.02)$$

tel que chaque chemin provoque une atténuation  $\alpha_n$  et un retard  $\tau_n$  qui varient en fonction du temps. Le signal  $x(t)$  peut encore s'écrire :

$$x(t) = \text{Re}\{\sum[\alpha_n(t)e^{-2j\pi f_c \tau_n(t)}s_u(t - \tau_n(t))]\}e^{-2j\pi f_c t} \quad (2.03)$$

L'expression entre crochets montre que le signal en bande de base subit des atténuations  $\alpha_n$ , des retards  $\tau_n$  et des déphasages  $-2j\pi f_c \tau_n$  qui dépendent tous du temps.

A partir de cette formule on peut définir la fonction de transfert en bande de base du canal:

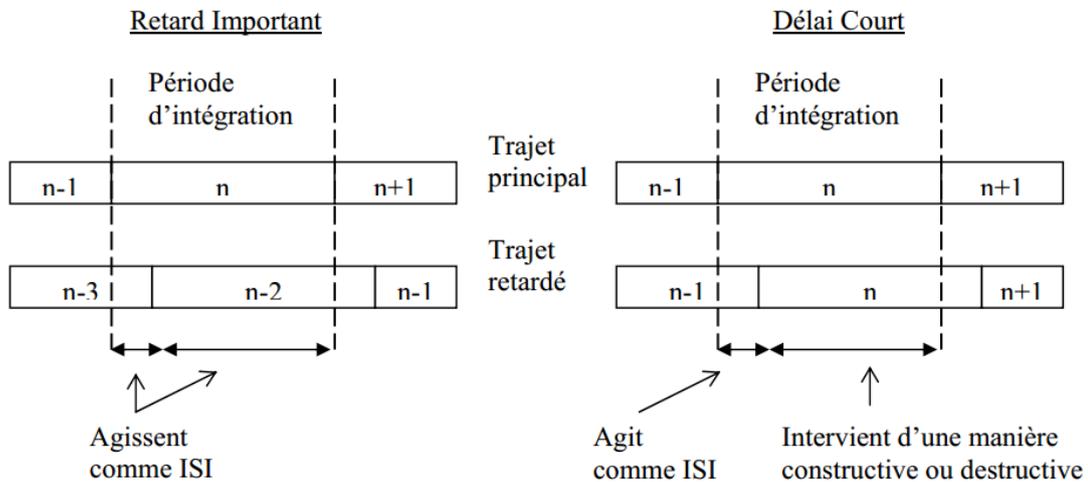
$$c(t, \tau) = \sum \alpha_n(t)e^{-2j\pi f_c \tau_n(t)}\delta(t - \tau_n(t)) \quad (2.04)$$

Le canal de transmission à trajets multiples est caractérisé par :

- $c(t, \tau)$  qui est sa fonction de transfert ;
- $\alpha_n(t)$  et  $\tau_n(t)$  représentant l'atténuation et le retard en fonction du temps du  $n$ ème écho, et  $f_c$  la fréquence porteuse.
- $T_m$  son retard maximum (ou étalement des retards). Si la durée des symboles est grande devant  $T_m$ , les symboles sont reçus sans interférences. Si la durée des symboles est petite devant  $T_m$ , les symboles interfèrent entre eux.
- $T_c$  : le temps de cohérence correspondant à une bande de cohérence  $B_c$  est défini comme la bande de fréquence sur laquelle on peut considérer la fonction de transfert du canal comme constante. Si la largeur de bande du signal  $B$  est inférieure à  $B_c$  (la bande de cohérence), l'amplitude du signal est peu affectée, considérant que la fonction de transfert est quasiment constante. Si la largeur de bande du signal  $B$  est supérieure à  $B_c$ , certaines composantes spectrales du signal seront affaiblies et le signal subira des distorsions. Le canal est sélectif en fréquence.

### 2.10.2.3 Affaiblissements à trajets multiples :

La réflexion des signaux émis par différents obstacles provoquent ce phénomène. Le passage du signal à sa destination prend plusieurs trajets avec un délai entre eux, donc au récepteur, on aura le symbole affecté par d'autres symboles en retard.



**Figure 2.14 :** Effet du retard

Supposons maintenant que le signal reçu arrive de deux trajets différents, avec un retard relatif entre eux. Si on prend le symbole transmis  $n$  comme exemple, le récepteur s'efforcera de démoduler les données contenues dans ce symbole en examinant toutes les informations reçues (directement ou avec un retard) par rapport à ce symbole  $n$ .

Lorsque le retard relatif est supérieur à une période de symbole (Figure à gauche), le signal provenant du second trajet agit uniquement comme un brouillage, puisqu'il n'achemine que des informations appartenant à un ou plusieurs symbole(s) précédent(s).

Lorsque le retard relatif est inférieur à une période de symbole (Figure à droite), seule une partie du signal transmis sur ce trajet agit comme un brouillage, puisqu'elle n'achemine que des informations appartenant au symbole précédent. Le reste achemine des informations du symbole utile, mais peut s'ajouter de manière constructive ou destructive aux informations du trajet principal.

#### 2.10.2.4 Fading :

C'est le phénomène d'évanouissement, qui est dû par des variations aléatoires des phases du signal dans le temps (après réflexion). Ces variations peuvent engendrer des signaux s'ajoutant de façon destructive en réception. Le signal résultant sera alors très faible ou nul.

C'est aussi un affaiblissement progressif, sporadique ou prolongé d'un signal émis et qui ne varie pas en fonction de la fréquence. Le fading peut être causé par l'affaiblissement des signaux d'émission ou certaines perturbations atmosphériques ou électromagnétiques.

#### 2.10.2.5 Interférence entre symboles ISI (InterSymbol Interference):

Un canal de transmission a toujours une bande passante limitée et chaque symbole transmis est déformé et surtout étalé. A la réception les symboles successifs se trouvent en partie mélangés et leur identification peut devenir difficile. Le phénomène de sélectivité en fréquence est aggravé par la présence de trajets multiples pour un même signal transmis. Du fait des nombreuses réflexions que le signal peut subir en environnement urbain, le récepteur recevra une série d'échos d'amplitudes et de retards variables.

Cette problématique du canal à trajets multiples est critique dans le cas d'un canal radio-mobile, c'est-à-dire lorsque le récepteur et l'émetteur ne sont pas fixes relativement. Les différents échos et amplitudes variant dans l'espace, ils varieront dans le temps dans le cas d'un récepteur mobile.

#### 2.10.2.6 Effet Doppler :

Le mouvement relatif entre l'émetteur et le récepteur provoque des changements de fréquence dans le signal reçu qui est décrit par le décalage Doppler  $f_D$ . Lorsque l'aéronef se déplace vers les GS,  $f_D$  est positif et la fréquence reçue est exprimée par  $f_c + f_D$ . D'autre part,  $f_D$  est négatif lorsque l'AC se déplace loin de GS, d'où la fréquence reçue est  $f_c - f_D$ .

$f_D$  est relié à  $f_c$  et à la vitesse  $V$  de l'AC par la relation suivante :

$$f_D = \frac{V}{c} f_c \quad (2.05)$$

où  $c = 3.10^8$  m/s est la vitesse de la forme d'onde électromagnétique voyageant dans le vide.  $f_D$  provoque l'élargissement spectral du spectre du signal reçu, qui est la puissance spectrale Doppler défini par :

$$S(V) = \frac{1}{\pi f_D \sqrt{1 - \left(\frac{V}{f_D}\right)^2}} \quad (2.06)$$

La largeur du spectre de puissance Doppler est appelée étalement Doppler. Le temps de cohérence  $T_c$  du canal est décrit comme étant la durée pendant laquelle la réponse impulsionnelle du canal est approximativement constante. Si le temps de symbole  $T_s$  est très faible par rapport à  $T_c$ , on a un canal d'évanouissement lent. D'autre part, lorsque  $T_s$  est comparable à celle de la  $T_c$  du canal (jusqu'à  $10T_c$ ), on a un canal à évanouissement rapide. La propagation Doppler du canal et  $\tau_c$  sont liés par :

$$T_c \cong \frac{9}{16\pi f_D} \quad (2.07)$$

Le modèle de canal peut être qualifié par le profil de puissance de retard et le spectre de puissance Doppler.

#### 2.10.2.7 Bruit :

Le bruit consiste en signaux parasites qui se superposent au signal transporté lors de sa transmission et qui donnent, en définitive, un signal déformé.

On distingue 3 types de bruit :

- bruit déterministe (dépend des caractéristiques du support) ;
- bruit aléatoire (perturbations accidentelles) ;
- bruit blanc (agitation thermique des électrons).

Le bruit le plus gênant est évidemment le bruit aléatoire. Il peut modifier notablement le signal à certains moments et produire des confusions entre "0" et "1".

Le « bruit blanc » est un bruit dont la densité spectrale est constante suivant la fréquence. En télécommunications on considère souvent les bruits comme étant blancs, au moins dans les bandes passantes des systèmes étudiés.

## 2.11 Conclusion

Les systèmes de communications aéronautiques actuels ne supporteraient plus l'évolution du trafic aérien. En effet, de nouveaux systèmes plus prometteurs sont en cours d'implémentation et seront opérationnels à partir de 2020. Dans un canal radio, la transmission d'un train de symboles s'accompagne presque inévitablement d'une dispersion des données dans le temps. Ainsi, un signal

est déformé lorsqu'il parcourt plusieurs trajets différents entre l'émetteur et le récepteur : les bits de données qui arrivent au récepteur sont retardés par des réflexions sur des immeubles, sur des voitures ou sur le sol, parce que leur trajet est un peu plus long que celui des bits qui arrivent directement. Le signal déformé, qui résulte de l'addition de tous les symboles, peut-être mal interprété par le récepteur. Les signaux émis se superposent avec des bruits qui pourraient perturber totalement le signal. Ces problématiques liées au canal radio seront pris en compte pour l'étude de performance de L-DACS1 que l'on va voir plus tard.

## CHAPITRE 3

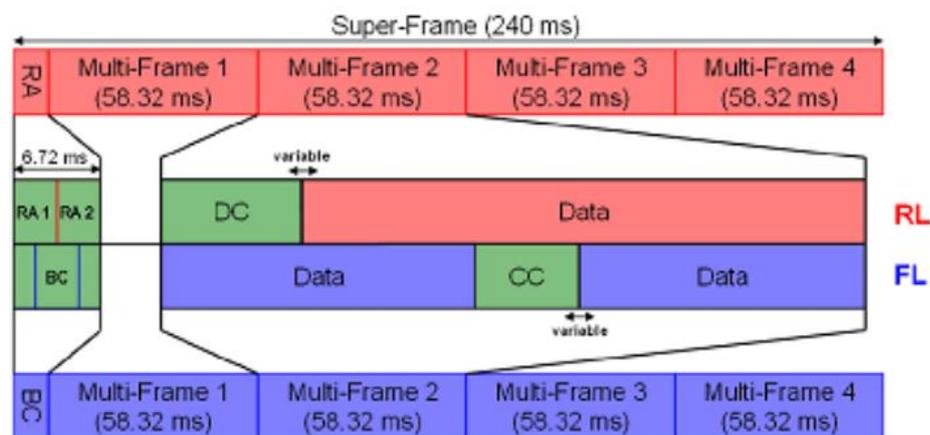
### PERFORMANCES DU FUTUR SYSTEME L-DACS1

#### 3.1 Introduction:

Lors de la Conférence Mondiale des Radiocommunications (CMR) de Novembre 2007, l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) ont attribué une partie de la bande aéronautique L (960 MHz à 1164 MHz) du service de radionavigation aéronautique ou SRNA au Service Mobile Aéronautique (Route) ou SMA(R), pour permettre le développement de L-DACS. Ces nouveaux systèmes devraient permettre, à terme, de répondre aux problèmes de congestion du spectre que rencontre actuellement la bande VHF et autoriser de nouveaux échanges air-air et le transfert de données. L-DACS1 sera le sujet de cette étude [41].

#### 3.2 Déroulement communication en système L-DACS1:

La communication entre une station de base GS et un aéronef AS s'organise en super-trames de durée 240 ms et structurées comme à la figure ci-après. Le début et fin de chaque super-trame dans le sens FL et RL sont alignés [43] [44].

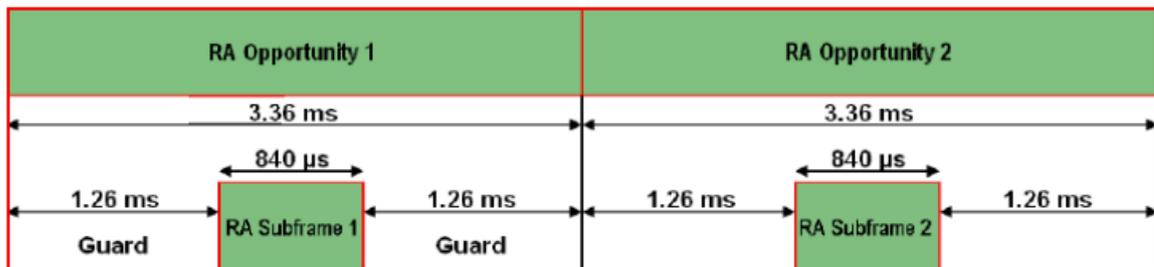


*Figure 3.01 : Structure d'une super-trame, système L-DACS1*

Une super-trame FL est formée d'une trame de diffusion (BC : "Broadcast") d'une durée fixe = 6,72 ms, puis quatre multi-trames (MF : "Multiframe") d'une durée fixe = 58,32 ms chacune. La trame BC est formée par trois sous trames successives BC1 (602 symboles), BC2 (1120 symboles) et BC3 (602 symboles). Par ailleurs, chaque MF est divisée en neuf trames d'une durée de 6,48 ms chacune. Les quatre premières et les dernières trames contiennent des données utiles ("Payload

Data") émises par la GS. A partir de la cinquième trame est émis le message de contrôle commun (CC : "Common Control").

D'autre part, une super-trame RL est formée d'une trame d'accès aléatoire (RA : "Random Access") d'une durée fixe = 6,72 ms, puis quatre multi-trames MF d'une durée fixe = 58,32ms chacune. La trame RA est divisée en deux sous trames de durée identiques et sa structure est donnée par la figure suivante :



*Figure 3.02 : Structure d'une trame d'accès aléatoire, système L-DACS1*

Les multi-trames MF sont organisées en fragments appelés tuiles ("tiles"). Une tuile est formée par un segment de contrôle (DC : "Dedicated Control") et par un segment de données ("Data"). D'après les spécifications du système L-DACS1, une AS peut utiliser une seule sous trame RA et une seule tuile par super-trame.

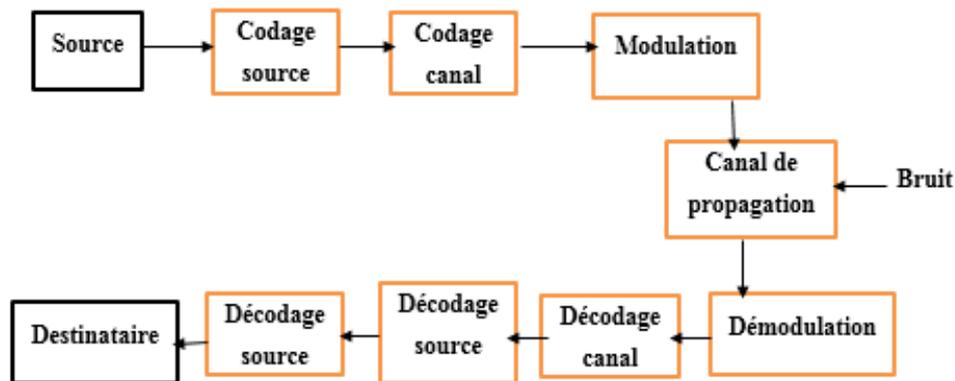
La communication pour le système L-DACS1 se déroule en six phases successives :

- Une AS écoute les informations de configuration diffusées par la GS vers toutes les AS dans sa zone de couverture dans BC2 (informations sur la cellule actuelle), BC1 et BC3 (informations sur les cellules adjacentes).
- La AS demande une connexion à la GS, dans une sous trame RA.
- La GS acquitte cette demande et indique à la AS la tuile qui lui sera allouée dans le message CC de la première SF.
- La AS acquitte cette allocation et formule sa demande de ressources à la GS dans le segment DC (sinon la MS y envoie un message "Keep Alive").
- La GS acquitte cette demande et annonce à la AS l'allocation des ressources si disponibles dans la partie CC de la même MF (sinon dans les MF suivantes).
- La AS émet ses données dans le segment "Data" de sa tuile [43] [44] .

### 3.3 Base de chaîne de transmission numérique:

Les systèmes numériques sont basés sur l'architecture présentée ci-dessous. Lorsque le message produit par la source est de type analogique, il est numérisé en le convertissant en une séquence d'éléments binaires par des étapes successives d'échantillonnage, de quantification et de codage binaire. Selon le théorème de Shannon la fréquence d'échantillonnage  $F_e$  doit être au moins le double de la fréquence maximale  $F_{max}$  du signal à échantillonner.

Pour augmenter l'efficacité de la transmission un codeur de source compresse les données en éliminant les redondances qui sont des éléments non significatifs. Ensuite le signal est soumis à un codage canal qui, contrairement au codage source, ajoute des redondances au signal pour le rendre plus robuste face aux bruits présents dans le canal de propagation. Puisque le milieu de transmission physique autorise uniquement la transmission des signaux analogiques il faut alors convertir l'information numérique en un signal analogique avant sa transmission effective à travers le milieu. Ce n'est qu'après ces différentes étapes que les données peuvent être transmises à travers le canal de propagation.



*Figure 3.03 : Chaîne de transmission numérique*

Des procédures inverses à l'émission s'effectuent à travers la réception pour la reconstitution du signal [42] [45].

### 3.4 Spécifications de la couche physique de L-DACS1:

Il emploie une modulation de type OFDM ("Orthogonal Frequency Division Multiplexing") sur des symboles QPSK ("Quadrature Phase Shift Keying") ou 16-QAM et utilise un duplexage en fréquence (FDD : "Frequency Division Duplex", c'est-à dire une séparation fréquentielle des voies

montante et descendante). L'équipement au sol et l'équipement embarqué émettent alors simultanément en utilisant des canaux de fréquence distincts, dont les porteuses sont séparées de 63 MHz. Pour le sens FL on a une bande de fréquence de 985,5 à 1008,5 MHz, pour celle du sens RL de 1048,5 à 1071,5 Mhz. Chaque liaison possède une efficacité de bande passante 498,05 kHz. L-DACS1 a été conçu pour faire face aux conditions d'interférence prévues dans l'incrustation environnementale [19].

### 3.4.1 *Partie codage dans le système L-DACS1:*

#### 3.4.1.1 Code convolutif:

Les codes convolutifs sont capables de corriger des erreurs de transmission, sachant que le modèle d'erreur ne dépasse pas la capacité de correction du codeur,  $l$ .

Avec :

$$l = \frac{d_{min}-1}{2} \quad (3.01)$$

Où  $d_{min}$  est défini comme le plus petit nombre d'endroits (en bits) que deux quelconques mots codes se diffèrent dans le livre de codes. De toute évidence, les codes avec grande  $d_{min}$  sont un bon choix.

Malheureusement, l'augmentation de la distance minimale diminue également le taux de code  $R_c$  et est défini comme suit :

$$R_c = \frac{k}{n} \quad (3.02)$$

Où  $k$  est la longueur du message et  $n$  est la longueur du mot de code [45].

#### 3.4.1.2 Code Reed Solomon :

Le codeur Reed Solomon (RS) qui est un codeur cyclique non binaire sur la base GF. Grâce à un ajout de redondance, ces codes permettent de corriger deux types d'erreurs : les erreurs induisant une modification des données, ou certains bits passent de la valeur 0 à la valeur 1 et vice versa et les erreurs provoquant des pertes d'informations aussi appelées effacements, lorsque des paquets d'informations sont perdus ou effacés. La notation RS ( $n, k, t$ ) est souvent utilisée.

On a les relations suivantes :

$$n = k + 2t \quad (3.03)$$

$$n = 2^m - 1 \quad (3.04)$$

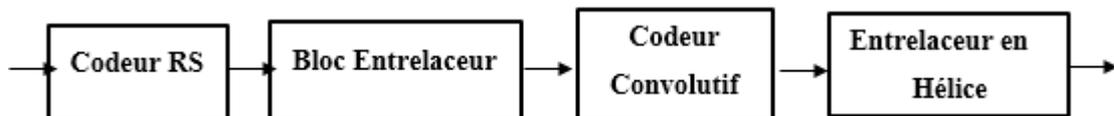
où  $n$  est le nombre total de symboles dans le bloc codé,  $k$  est le nombre des symboles de données à la sortie du code,  $m$  est la longueur de symbole en bits et  $2t$  le nombre de symboles de contrôle. Le codage Reed-Solomon sait corriger  $(n - k)/2$  erreurs. Par exemple RS (15, 11, 4), ce code peut corriger jusqu'à 2 symboles erreurs, chaque symbole de 4 bits [45].

Cela signifie qu'une erreur de rafale de 8 bits peut être corrigée, compte tenu de l'erreur est exactement limitée à 2 symboles. Il est toujours souhaitable de réduire les bits redondants, autant que possible, à savoir, en augmentant le débit du système. Par conséquent, il est un compromis entre l'augmentation du taux et de code et le nombre d'erreurs que le codeur peut corriger [43] [44].

### 3.4.1.3 Spécification de codage pour le système L-DACS1 :

Pour rendre le signal à l'émetteur Tx robuste aux interférences, un schéma de codage concaténé constitué d'un code convolutif et Reed-Solomon (RS) est utilisé pour le système L-DACS1. Avec le choix approprié des paramètres de codage, les codes concaténés peuvent réaliser des gains de codage très élevées avec un codage efficace. L'idée est simple: le codeur externe est responsable de la correction des erreurs en rafale tandis que le codeur interne corrige les erreurs aléatoires. Du côté Tx, les bits d'information entre dans le codeur RS, suivi d'un bloc entrelaceur. Dans une dernière étape, les bits codés sont entrelacés en utilisant un entrelaceur en hélice [43] [44].

L'opération complémentaire est appliquée dans l'ordre inverse du côté récepteur Rx.



**Figure 3.04 : Codage et entrelacement L-DACS1**

Six bits zéros sont ajoutés à la fin des données justes avant le codage de convolution. Ces bits sont jetés sur le côté Rx après décodage du code de convolution.

#### a. Codage externe :

Un code RS obtenu en raccourcissant un RS systématique ( $n = 2^8 - 1$ ,  $k$ ,  $t$ ) code à l'aide de champ Galois  $GF(2^8)$ , le polynôme primitif est :

$$P(x) = x^8 + x^7 + x^2 + x + 1 \quad (3.05)$$

et le polynôme générateur :

$$g(x) = \prod_{i=1}^{2t} (x - \alpha^i), \alpha = 02_{HEX} \quad (3.06)$$

Où  $k$  : nombre d'octets non codés,

$n$  : nombre d'octets codés

$t$  : est le nombre d'octets qui peuvent être corrigés

*b. Codage interne :*

Chaque bloc de données de sortie du bloc entrelaceur est codé par un codeur convolutif. Les polynômes générateurs du codeur sont donnés par:

$G_1 = 171_{OCT}$ , pour la première sortie

$G_2 = 133_{OCT}$ , pour le second sortie

Le taux de codage natif est  $r_{cc} = 1/2$  et la longueur de contrainte est égale à 7.

*c. Entrelacement :*

Une autre technique utile est d'utiliser l'entrelacement au niveau du codage canal. La fonction d'entrelacement est simplement de répandre les bits (groupes ou individus) au sein de la trame transmise, après le bloc de codage. Il en résulte que des erreurs corrélées sont réparties entre plusieurs mots de code, ce qui conduit à moins d'erreurs par mot de code.

Cela permet au codeur de corriger avec succès les erreurs.

- Bloc entrelaceur

Les octets de sortie du codeur RS sont entrelacés par un entrelaceur de blocs. Celui-ci est défini par une matrice. Le nombre de lignes est donné par le nombre de mots de code RS qui sont entrecroisés. Le nombre de colonnes est défini par le nombre d'octets codés par RS. Pour l'entrelacement, les octets sont écrits par lignes dans la matrice et lus en colonne.

- Entrelaceur en hélice :

L'entrelacement de la sortie du codeur convolutif est effectué par un entrelaceur en hélice. Cela garantit que les bits codés sont uniformément répartis dans le plan temps-fréquence.

### **3.4.2 Modulation multi-porteuses OFDM:**

L'évolution des systèmes de communications numériques s'articule autour de plusieurs aspects : des besoins du haut débit, le caractère du terminal mobile, un contexte d'encombrement de la

ressource spectrale. Les modulations à simple porteuse ne permettent pas de répondre d'une manière optimale à ces besoins pour le cas de transmission sur canal radio, en raison de la sélectivité en fréquence du canal et des multiples trajets que peut emprunter un même signal durant son émission.

Pour le cas de la modulation multi-porteuse OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), l'information est répartie sur un grand nombre de porteuses modulées à un faible débit symbole. C'est pour cela que ces sous-porteuses sont moins sensibles aux défauts du canal. Le système L-DACS1 solution finale proposée dans ce présent mémoire utilise cette modulation intéressante. C'est une technique de modulations multi-porteuses à base de transformée de Fourier rapide. C'est un moyen qui est bénéfique pour les transmissions dans des canaux radio sélectifs en fréquence qui comportent des trajets multiples [46] [55].

#### 3.4.2.1 Présentation de l'OFDM :

L'OFDM est la nouvelle technologie clé pour les réseaux et les applications de transmission sans fil à large bande. C'est un procédé de modulation numérique des signaux et il autorise la transmission de signaux numériques simultanément sur plusieurs porteuses RF.

Pour émettre un signal, le procédé OFDM divise une plage de fréquence en plusieurs sous-canaux espacés par des zones libres de taille fixe. Par la suite, un algorithme, le FFT (Fast Fourier Transform), véhicule le signal par le biais des différents sous-canaux. C'est également cet algorithme qui se charge de la recombinaison du message chez le récepteur. L'objectif est ainsi d'exploiter au maximum la plage de fréquence allouée tout en minimisant l'impact du bruit grâce aux espaces libres séparant chaque canal.

#### 3.4.2.2 Principe de l'OFDM :

D'abord, le nombre d'utilisateurs devant se partager les mêmes ressources et le développement de nouvelles formes de télécommunications accroît grandement le volume d'information à transmettre.

Puis, comme le signal à transmettre est généralement répété sur différentes fréquences porteuses, ainsi dans un canal de transmission avec des chemins multiples où certaines fréquences seront détruites à cause de la combinaison destructive de chemins, le système sera tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été détruites.

Ensuite, pour remédier à la perte d'informations due à la sélectivité du canal, l'idée est de répartir l'information sur un grand nombre de porteuses, créant ainsi des sous-canaux très étroits pour lesquels la réponse fréquentielle du canal peut être considérée comme constante ; ces sous canaux sont ainsi non sélectifs en fréquence.

Pour le cas d'un canal à trajets multiples, les techniques de modulation classiques sont très sensibles à l'interférence inter-symboles ISI. Cette interférence est d'autant plus importante que la durée d'un symbole est petite par rapport au retard maximum du canal. En d'autres termes, une démodulation simple est favorisée si la durée des symboles utiles est grande par rapport au temps de retard maximum du canal de propagation  $T_m$ .

*a. Différence entre débit binaire et débit symbolique :*

Un symbole OFDM comprend l'ensemble des informations contenues dans l'ensemble des porteuses à un instant  $t$ .

Le débit binaire  $D$  est la fréquence de flux binaire dans le système examiné. C'est l'inverse de la durée d'un bit :

$$D = \frac{1}{T_b} \quad (3.07)$$

Le débit symbolique est la fréquence des états discrets réellement transportés sur le canal de transmission. La durée symbole est notée par  $T_s$ .

La bande passante requise par un format de modulation donné dépend du débit symbolique, et non du débit binaire.

$$\text{Débit binaire symbolique} = \frac{D}{\text{Nombre de bits avec chaque symbole}} \quad (3.08)$$

De plus, on peut transmettre de bits avec chaque symbole, plus le spectre de transmission d'une quantité de données précises ne peut être étroit.

Les formats de modulation les plus complexes peuvent envoyer la même quantité d'informations sur une portion réduite du spectre RF (Radio Fréquence). L'inconvénient c'est que les formats les plus complexes nécessitent des récepteurs et des émetteurs plus complexes.

L'efficacité spectrale caractérise la capacité d'une modulation à "passer" un débit maximum dans une largeur de canal minimum. C'est le rapport entre le débit binaire et la bande occupée autour de la porteuse. Elle est comprise entre 2 et 8 pour des modulations dites performantes.

### 3.4.2.3 Principe :

La modulation d'un bloc de symboles est réalisée par une IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform). Soit la séquence  $I$  de symboles à émettre à la cadence  $T_s$ . Ces symboles appartiennent, généralement, à un alphabet fini issu d'une constellation de modulation donnée. Le flot initial de données est réparti sur  $N$  flots parallèles, chaque flot étant émis sur une des  $N$  fréquences porteuses orthogonales entre elles et modulées à bas débit.

Le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence est une technique de modulations multi-porteuses à base de transformée de Fourier rapide.

L'OFDM a été conçu sur ce principe: en émission, le signal fréquentiel  $S(f)$  est transmis sur un certain nombre de sinusoides à des fréquences différentes (appelé également porteuses). Cette opération s'effectue à l'aide d'une IDFT. En réception, le signal est démodulé à l'aide d'une DFT (Discrete Fourier Transform) : le signal obtenu est alors tout simplement filtré par la fonction de transfert du canal ; en d'autres termes, chaque composante du signal est multipliée par un coefficient correspondant au gain fréquentiel du canal. Il s'avère alors facile pour le récepteur d'égaliser le canal puisqu'il suffit de diviser chaque signal reçu par le gain correspondant (on parle dans ce cas d'égalisation scalaire). De ce fait, à la réception, ISI est supprimée et les symboles émis ne subissent qu'une atténuation. Chaque sous-canal peut être alors considéré comme une transmission mono-trajet dotée de son propre rapport signal à bruit (fonction de l'atténuation) et de largeur  $\Delta_f$ . Cette stratégie rend les modulations multi-porteuses moins sensibles au bruit impulsif que les transmissions mono-porteuses (puisque chaque sous-canal est traité indépendamment) et simplifie l'égalisation. Il faut bien noter que malgré la présence du terme 'multi', il s'agit bien de la transmission d'une seule source d'information.

Les modulations multi-porteuses consistent donc à répartir les symboles sur un grand nombre de porteuses à bas débit, comme si l'on combinait le signal à transmettre sur un grand nombre de systèmes de transmission (exemple: des émetteurs) indépendants et à des fréquences différentes, en même temps, à l'opposé des systèmes conventionnels qui transmettent les symboles en série, chaque symbole occupant alors toute la bande passante disponible.

Par conséquent, il s'agit bien d'un multiplexage fréquentiel puisque les données sont transmises sur  $N$  canaux différents, et dans ce cas, pour un train de symboles initial de période  $T$ , les symboles seront répartis en  $N$  trains plus lents et auront alors une durée :

$$T_s = NT \quad (3.09)$$

Dans la pratique, dans chaque symbole, les porteuses sont modulées par les nombres complexes  $c_k$  qui changent d'un symbole à l'autre et qui sont pris dans un ensemble de la constellation.

Plus la constellation comporte d'états, plus chaque porteuse peut acheminer de bits pendant un symbole. Les  $N$  sous-porteuses sont modulées en x-QAM, basée sur une modulation en amplitude d'une porteuse en phase (I) et en quadrature (Q). Le spectre d'une sous-porteuse a une allure de :  $\frac{\sin(x)}{x}$ .

Il s'en suit que pour répondre à un niveau non négligeable des signaux retardés, il faut réduire le débit de symboles pour que la gamme des retards (entre le premier trajet reçu et le dernier) ne représente qu'une partie minime de la période de symbole. Les informations susceptibles d'être acheminées par une porteuse unique sont dès lors limitées en cas de trajets multiples. Si une porteuse ne peut transporter le débit de symboles nécessaire, on arrive tout naturellement à diviser ce débit de données élevé en plusieurs flux parallèles de débit moins élevé, acheminés chacun par sa propre porteuse.

Ainsi, le signal binaire initial à haut débit  $D = \frac{1}{T}$  sera reparti sur  $N$  porteuses modulées par des signaux de débit  $N$  fois plus faible, soit par des bits de durées  $T_s$ ,  $N$  fois plus longue :  $T_s = NT$ .

Tant que le retard introduit par les trajets multiples reste inférieur à la durée d'un symbole  $T_s$ , la réception n'est pas perturbée. Et comme la durée  $T_s = NT$  est relativement grande du fait du grand nombre de porteuses utilisées, cette modulation est insensible à des différences de trajets importantes ou à des échos très longs.

Par conséquent, les systèmes à mono-porteuses ne remplissaient pas les conditions de résistance aux trajets multiples et de débit élevé pour un taux d'erreur binaire faible.

En supposant que la bande de fréquence du canal entier est largement supérieure à celle des différentes sous-porteuses (pour  $N$  élevé), les fonctions de transfert du canal peuvent être considérées constantes à l'intérieur de chaque sous-porteuse.

#### 3.4.2.4 Notion d'orthogonalité :

L'utilisation d'un très grand nombre de porteuses est une perspective presque effrayante : il faut sûrement beaucoup de modulateurs / démodulateurs et de filtres? Il faut aussi davantage de largeur

de bande. Il est heureusement simple de résoudre ces deux problèmes en spécifiant un espacement rigoureusement régulier entre les porteuses. Les porteuses forment alors ce que les mathématiciens appellent un ensemble orthogonal.

Pour que le signal modulé ait une grande efficacité spectrale, il faut que les fréquences des porteuses soient les plus proches possibles, tout en garantissant que le récepteur soit capable de les séparer et retrouver le symbole numérique émis sur chacune d'entre elles. Ceci est vérifié si le spectre d'une porteuse est nul aux fréquences des autres porteuses.

Il faut donc que l'espace entre chaque sous-porteuse soit égale à  $\frac{1}{T_u}$  où  $T_u$  est la durée utile pour émettre l'information, et que lorsque le spectre d'une sous-porteuse est maximal, il faut que le spectre de toutes les autres soit nul: c'est la condition d'orthogonalité.

Cette condition d'orthogonalité permet d'avoir un recouvrement entre les spectres des différentes sous-porteuses, et malgré ceci d'éviter les interférences entre sous-porteuses si l'échantillonnage est fait précisément à la fréquence d'une sous-porteuse.

La k-ième porteuse peut s'écrire sous la forme :

$$\Psi_k(t) = e^{jk\omega_u t} \quad (3.10)$$

Où

$$\omega_u = \frac{2\pi}{T_u} \quad (3.11)$$

et les porteuses doivent satisfaire la condition d'orthogonalité :

$$\int_{\tau}^{\tau+T} \Psi_k(t) \Psi_1^*(t) dt = 0, k \neq 1 \quad (3.12)$$

$$\int_{\tau}^{\tau+T} \Psi_k(t) \Psi_1^*(t) dt = T_u, k = 1 \quad (3.13)$$

### 3.4.2.5 Préservation de l'orthogonalité :

#### a. Intervalle de garde :

Une même suite de symbole arrivant à un récepteur par deux chemins différents se présente comme une même information arrivant à deux instants différents. Il peut donc subsister une légère

interférence entre deux symboles OFDM transmis successivement, et ils vont donc s'additionner, et provoquant ainsi les deux types de défauts suivants :

- l'interférence inter-symboles
- l'interférence inter-porteuses

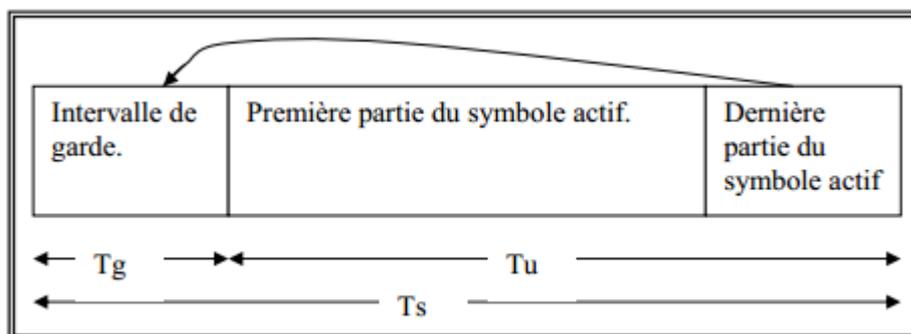
Pour éviter ces phénomènes, on insère une zone "morte" appelée intervalle de garde entre chaque symbole transmis, pendant laquelle on n'émet rien, pour garantir que toutes les informations intégrées viennent du même symbole et apparaissent constantes pendant sa durée. En effet, les derniers échos du symbole OFDM auront lieu durant cet intervalle dit "de garde", et le symbole OFDM suivant ne sera plus perturbé par le précédent.

La durée  $T_u$  pendant laquelle est émise l'information diffère de la période symbole  $T_s$  car il faut prendre en compte, entre deux périodes utiles, un "temps de garde"  $T_g$  qui a pour but d'éliminer l'ISI qui subsiste malgré l'orthogonalité des porteuses.

En pratique on choisit pour la taille de cet intervalle de garde une durée de l'ordre du quart de celle d'un symbole OFDM, ce qui représente un bon compromis entre diminution des erreurs et perte de débit utile.

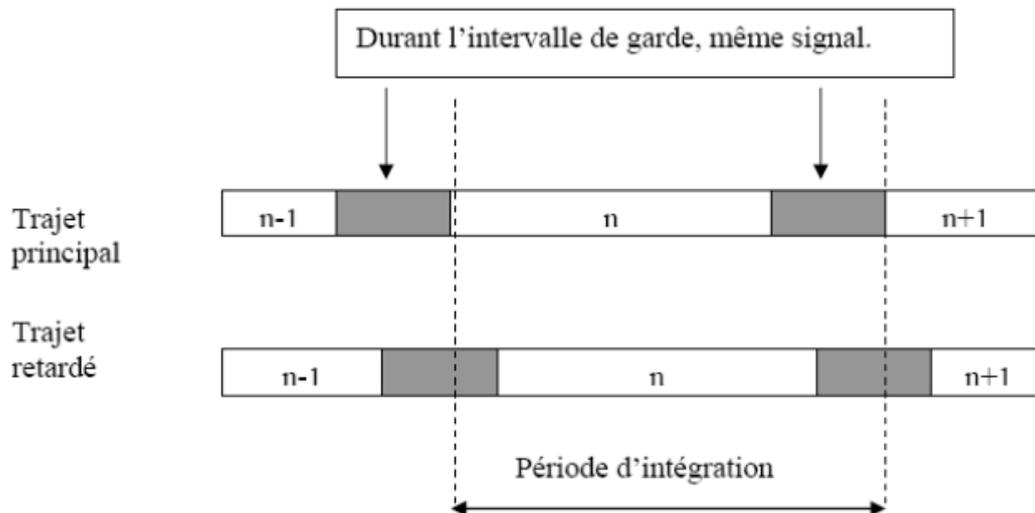
Entre la période symbole, la période utile et l'intervalle de garde s'instaurent donc la relation :

$$T_s = T_u + T_g \quad (3.14)$$



**Figure 3.05 :** Adjonction d'un intervalle de garde

La longueur de l'intervalle ne devrait pas représenter une trop grande partie de  $T_u$  pour ne pas sacrifier trop de capacité en données (et de rendement spectral).



**Figure 3.06 : Intervalle de garde**

### 3.4.2.6 Principe de modulation :

Le principe du multiplexage par répartition en fréquence est de grouper des données numériques par paquet de  $N$ , qu'on appellera symbole OFDM et de moduler par chaque donnée une porteuse différente en même temps.

Considérons une séquence de  $N$  données  $c_0 c_1 c_2 \dots c_{N-1}$ .

Appelons  $T_s$  la durée symbole c'est-à-dire le temps qui sépare 2 séquences de  $N$  données.

Chaque donnée  $c_k$  module un signal à la fréquence  $f_k$ .

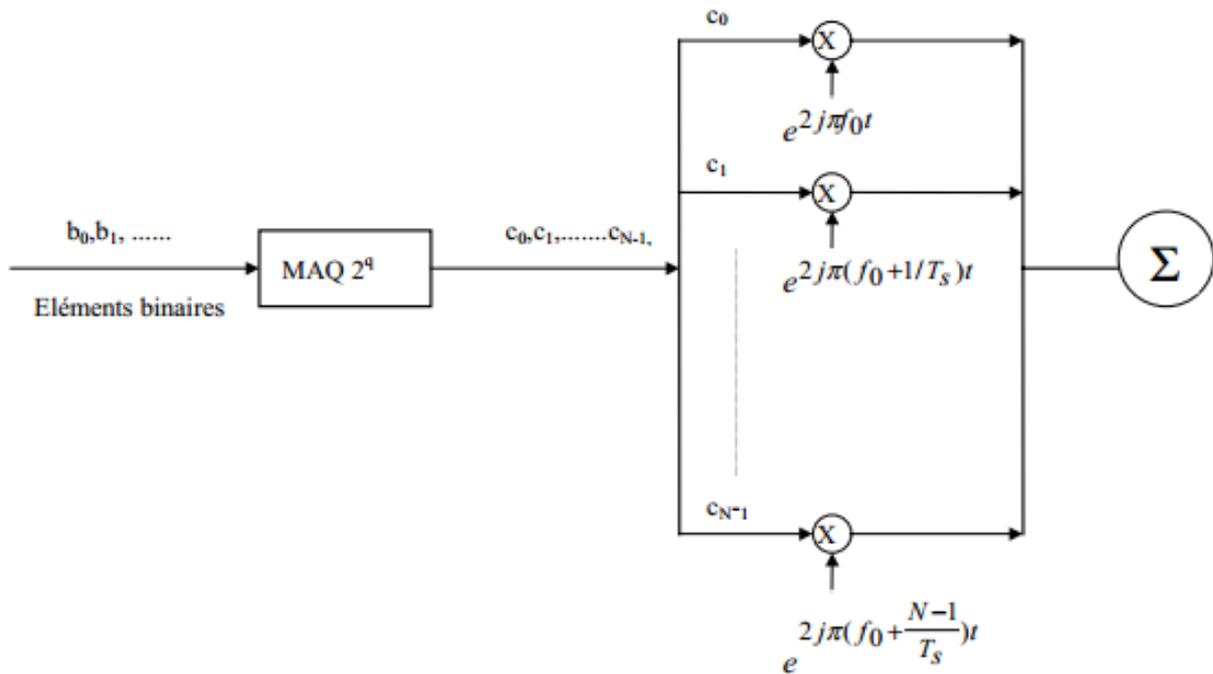
Le signal individuel s'écrit sous forme complexe :

$$S_k(t) = c_k e^{2j\pi f_k t} \quad (3.15)$$

Le signal  $s(t)$  total correspondant à toutes les données d'un symbole OFDM est la somme des signaux individuels :

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi f_k t} \quad (3.16)$$

D'après cette formule, on a le schéma de principe d'un modulateur de la figure 3.06.



**Figure 3.07** : Principe du modulateur multi-porteuse

Le multiplexage est orthogonal si l'espace entre les fréquences est  $\frac{1}{T_s}$ .

Alors : 
$$f_k = f_c + \frac{k}{T_s} \text{ et } s(t) = e^{2j\pi f_c t} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{k}{T_s} t} \quad (3.17)$$

Plus précisément les données numériques  $c_k$  sont des nombres complexes définis à partir d'éléments binaires par une constellation (mapping) de modulation d'amplitude en quadrature QAM à plusieurs états (4, 16, 64, de façon générale à  $2^q$  états). Ces données sont des symboles complexes formés par groupement de  $q$  bits. On les appelle symboles numériques.

De l'équation précédente on peut déduire l'expression réelle du signal :

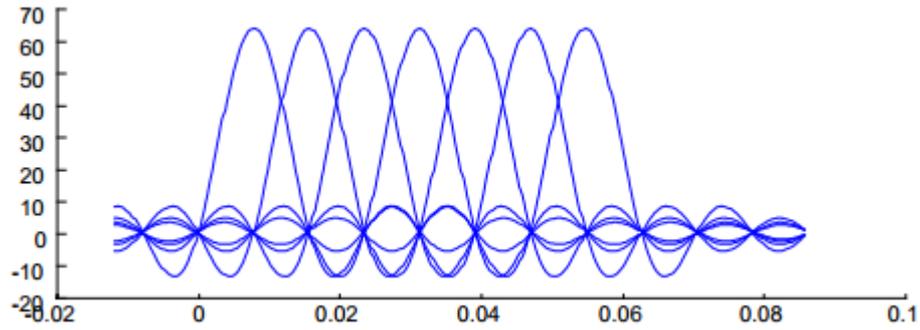
$$S(t) = \text{Re}\{s(t)\} = \text{Re}\left\{\sum_{k=0}^{N-1} (a_k + b_k) e^{2j\pi\left(f_c + \frac{k}{T_s}\right)t}\right\} \quad (3.18)$$

Donc,

$$S(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cos\left(2\pi\left(f_c + \frac{k}{T_s}\right)t\right) - b_k \sin\left(2\pi\left(f_c + \frac{k}{T_s}\right)t\right) \quad (3.19)$$

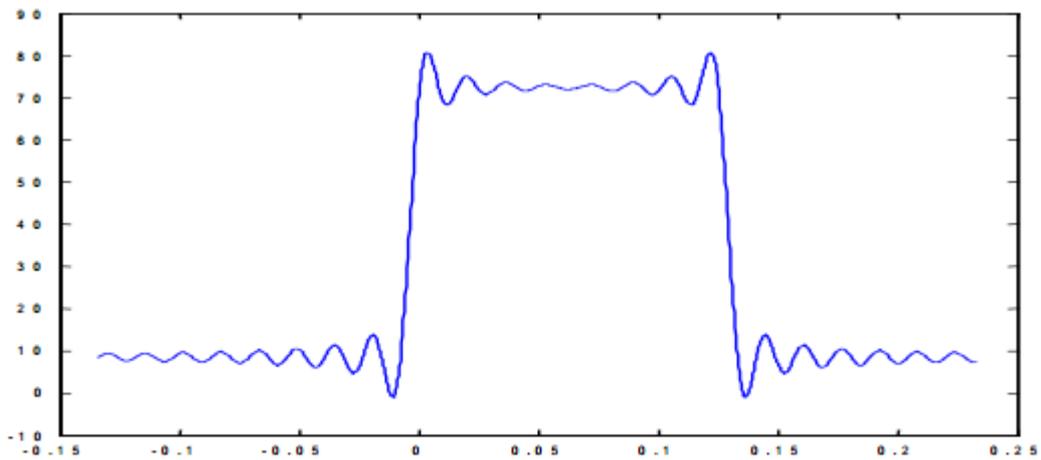
D'après cette expression du signal et la figure, le modulateur ainsi que le démodulateur devrait comporter  $N$  modulateurs individuels.

**Spectre des différentes sous-porteuses :**



*Figure 3.08 : Spectre des sous-porteuses*

Et le spectre total est la somme des spectres individuels.



*Figure 3.09 : Spectre d'un signal OFDM*

La figure 3.08 montre que l'espace entre chaque sous-porteuse  $\frac{1}{T_s}$  permet, lorsque le spectre d'une sous-porteuse est maximal, d'annuler le spectre de toutes les autres : c'est la condition d'orthogonalité.

Cette condition d'orthogonalité permet d'avoir un recouvrement entre les spectres des différentes sous-porteuses, et malgré ceci d'éviter les interférences entre sous-porteuses si l'échantillonnage est fait précisément à la fréquence d'une sous-porteuse.

La figure 3.09 montre que la bande en fréquence est occupée de façon optimum, puisque le spectre est presque plat dans cette bande. La bande occupée est à peu près  $B = \frac{N}{T_s}$  (en excluant les lobes secondaires de part et d'autre de la bande), chaque sous-porteuse occupant à peu près  $\frac{1}{T_s}$ .

Les modulations multi-porteuses sont particulièrement utiles pour des canaux comportant des échos multiples. En effet, pour l'OFDM, la bande de fréquence totale  $B$  est divisée en  $N$  sous-bandes  $B_k \ll B_c$ , mais la bande totale utilisée  $B = NB_k$  peut être très supérieure à  $B_c$  (bande de cohérence), donc chaque sous-porteuse voit un canal constant mais parmi toutes les sous-porteuses, certaines sont affaiblies d'autres amplifiées.

La réalisation suivant le schéma de principe nécessiterait  $N$  modulateurs. Mais l'expression mathématique du signal montre qu'on peut le considérer comme la transformée de Fourier inverse des symboles numériques  $c_k$ .

Si le symbole  $c_k$  transporte  $q$  bits, le débit total c'est-à-dire le nombre de bits par seconde est :

$$\frac{qN}{T_s} = qB \quad (3.20)$$

où  $q$  est le nombre de bits dans chaque symbole,  $N$  est le nombre de sous porteuses,  $T_s$  est la durée symbole,  $B$  est la bande utilisée par le signal.

La réalisation suivant le schéma de principe nécessiterait  $N$  modulateurs. Mais l'expression mathématique du signal montre qu'on peut le considérer comme la transformée de Fourier inverse des symboles numériques  $c_k$ .

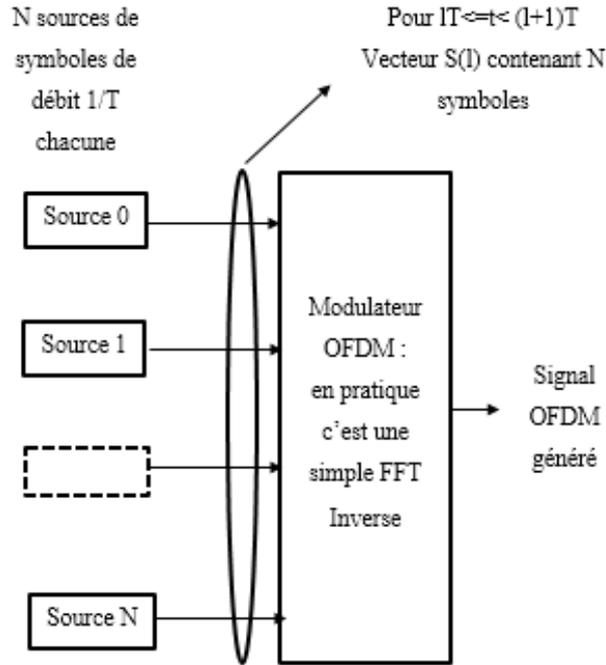
Après avoir échappé à des milliers de filtres grâce à l'orthogonalité, on passe maintenant à la mise en œuvre des porteuses de démodulation et de tous les multiplicateurs et intégrateurs.

Dans la pratique, on travaille sur le signal reçu sous forme échantillonnée. Le processus d'intégration devient alors une simple sommation, et l'ensemble de la démodulation prend une forme identique à une DTF.

En discrétisant le signal  $s(t)$  et en le ramenant en bande de base pour l'étude numérique on obtient une sortie  $s(n)$  sous la forme :

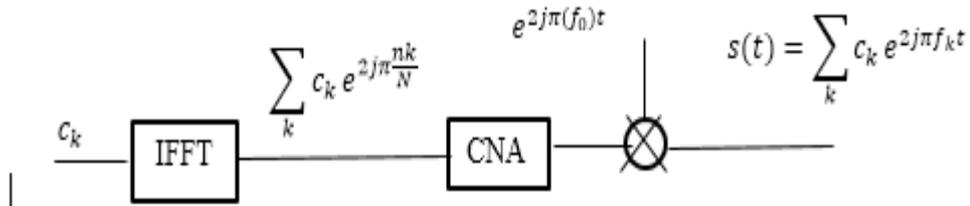
$$S_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (3.21)$$

Les  $s(n)$  sont donc obtenus par une transformée de Fourier inverse discrète des  $c(k)$ . En choisissant le nombre de porteuses  $N$  tel que  $N=2^n$ , le calcul de la transformée de Fourier inverse se simplifie et peut se calculer par une simple IFFT qui conduit au schéma numérique suivant :



**Figure 3.10 :** Schéma numérique du modulateur OFDM

Ainsi, le schéma de principe du modulateur est le suivant :



**Figure 3.11 :** Modulateur OFDM

Physiquement, les symboles numériques  $c_k$  sont les données dans l'espace fréquentiel, les échantillons du signal  $s_n$  sont les données dans l'espace temporel puisqu'on passe des premières aux secondes par une transformée de Fourier inverse.

Le spectre du signal OFDM est formé des  $c_k$  placés aux fréquences  $f_k$ , autour de ces données le spectre s'élargit suivant un sinus cardinal à cause du spectre de la fenêtre temporelle  $T_s$ .

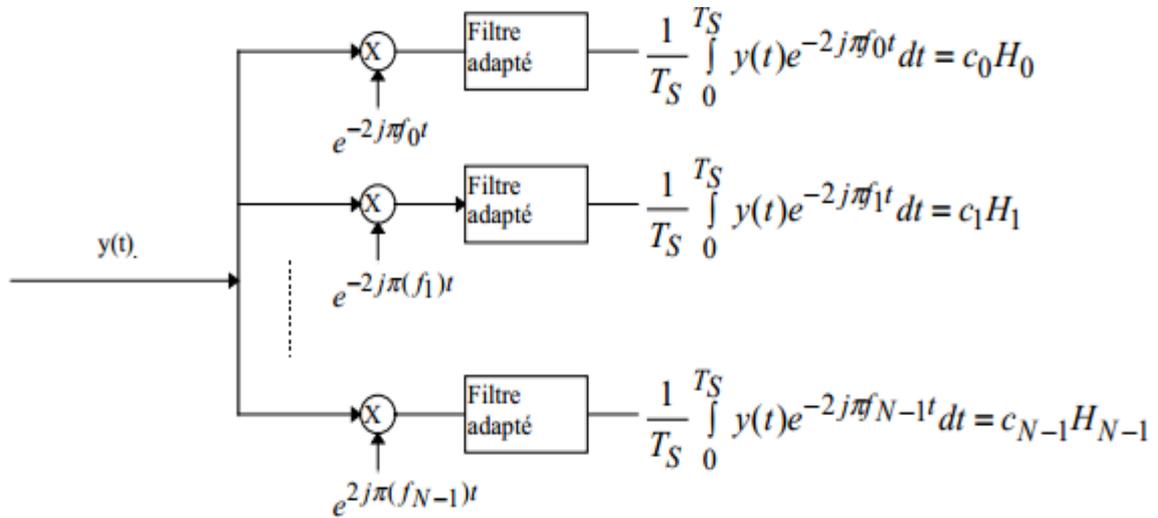
### 3.4.2.7 Principe de démodulation :

Le signal parvenant au récepteur s'écrit, sur une durée symbole  $T_s$  :

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k(t) e^{2j\pi(f_c + \frac{k}{T_s})t} \quad (3.22)$$

$H_k(t)$  est la fonction de transfert du canal autour de la fréquence  $f_k$  et au temps  $t$ . Cette fonction varie lentement et on peut la supposer constante sur la période  $T_s$ .

La démodulation classique consisterait à démoduler le signal suivant les  $N$  sous-porteuses suivant le schéma classique :



**Figure 3.12 :** Principe du démodulateur OFDM

La condition de l'orthogonalité montre que :

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} y(t) e^{-2j\pi f_i t} dt = \frac{1}{T_s} \sum_{k=0}^{N-1} \int_0^{T_s} c_k H_k e^{-2j\pi(k-i)\frac{t}{T_s}} dt = c_i H_i \quad (3.23)$$

Parce-que

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} c_k H_k e^{-2j\pi(k-i)\frac{t}{T_s}} dt = 0 \text{ si } k \neq i \quad (3.24)$$

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} c_k H_k e^{-2j\pi(k-i)\frac{t}{T_s}} dt = 1 \text{ si } k = i \quad (3.25)$$

En pratique, comme pour la modulation, on remarque que la démodulation peut être réalisée par une transformée de Fourier.

- Implémentation numérique du démodulateur :

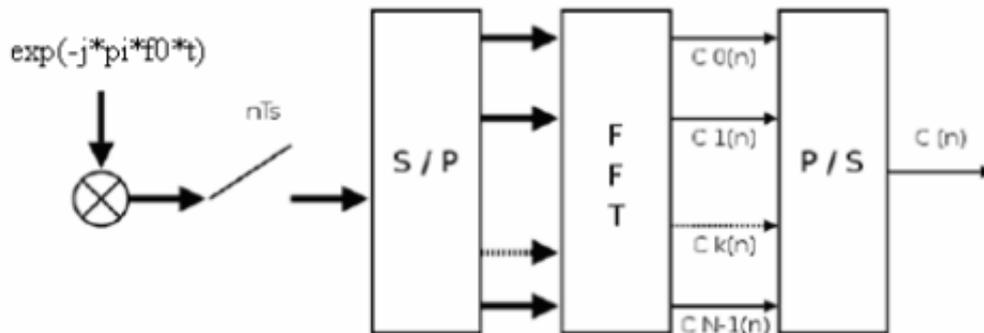
L'analyse théorique définit le signal discrétisé reçu au niveau du démodulateur sous la forme :

$$z(t_n) = z\left(\frac{nT_s}{N}\right) = z_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (3.26)$$

$z_n$  est la transformée de Fourier discrète inverse de  $c_k H_k$ , la démodulation consiste donc à effectuer une transformée de Fourier directe discrète.

Le nombre de porteuses ayant été choisi tel que  $N = 2^n$ , on peut réaliser ce calcul à l'aide d'une FFT.

On obtient alors le schéma de principe suivant :

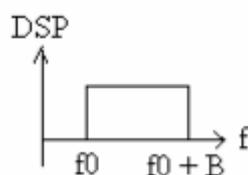


**Figure 3.13** : Principe du démodulateur numérique OFDM

Pour discrétiser, il faut choisir une fréquence d'échantillonnage.

Voyons comment la démodulation impose cette fréquence :

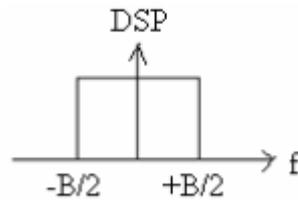
Le signal reçu occupe la bande passante  $B$  autour de la fréquence d'échantillonnage  $f_0$  comme le montre le schéma suivant :



**Figure 3.14** : Bande passante du signal reçu

Pour démoduler, on va d'abord transposer le signal en bande de base, donc effectuer une translation de  $f_0 + \frac{B}{2}$ , fréquence médiane de la bande.

Le spectre occupera la bande  $[-\frac{B}{2}, \frac{B}{2}]$  comme on le voit sur le schéma suivant :



**Figure 3.15 :** Spectre du signal reçu en bande de base

La bande passante du signal étant

$$\frac{B}{2} = \frac{N}{2T_s} \quad (3.27)$$

La fréquence d'échantillonnage doit être supérieure ou égale à

$$\frac{2B}{2} = \frac{N}{T_s} \quad (3.28)$$

L'échantillonnage se fera aux temps

$$t_n = \frac{nN}{T_s} \quad (3.29)$$

Le signal reçu en bande de base après le décalage en fréquence de  $f_0 + \frac{B}{2}$  s'écrit alors :

$$z(t) = y(t)e^{-2j\pi(f_0 + \frac{N}{2T_s})t} = \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k e^{2j\pi(\frac{k-N}{T_s})t} \quad (3.30)$$

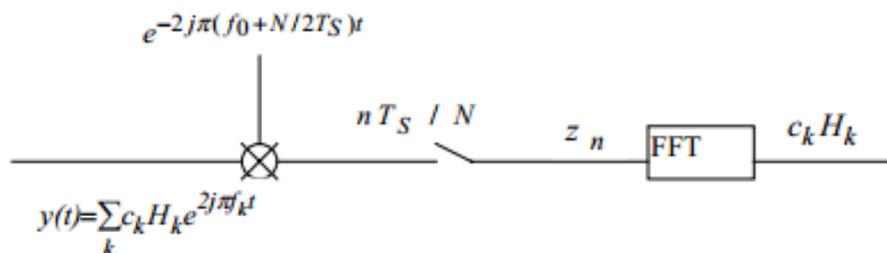
Puis après échantillonnage, on a :

$$z(t_n) = z\left(\frac{nT_s}{N}\right) = z_n = (-1)^n \sum_{k=0}^{N-1} c_k H_k e^{2j\pi\frac{kn}{N}} \quad (3.31)$$

On voit que  $z_n$  est la Transformée de Fourier discrète inverse de  $c_k H_k$ , la démodulation consiste donc à effectuer une Transformée de Fourier directe discrète.

L'intérêt de cette discrétisation est qu'on peut réaliser ces transformées de Fourier à l'aide d'algorithmes de FFT (direct) et IFFT (inverse).

Le schéma de principe du démodulateur se simplifie :

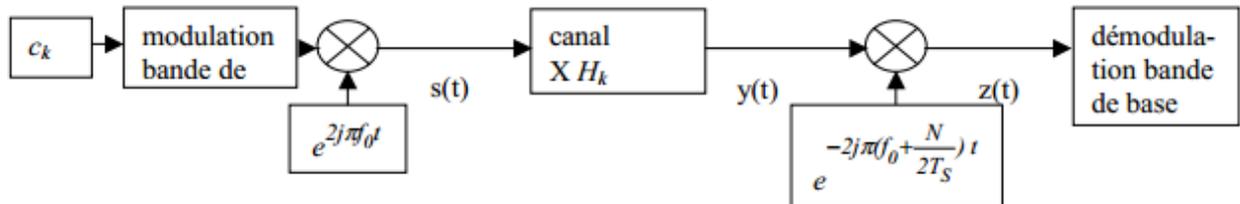


**Figure 3.16 :** Démodulateur OFDM

Si on pose que le signal modulé en bande de base  $s(t)$  est lui aussi discrétisé, les échantillons  $s_n$  s'écrivent :

$$s_n = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{kn}{N}} \quad (3.32)$$

Ainsi, la chaîne de transmission est schématiquement la suivante :



**Figure 3.17 :** Chaîne de transmission OFDM

Un des majeurs problèmes que rencontre la transmission à débit élevé est le problème de trajet multiple. L'OFDM apparaît comme une bonne solution pour les trajets multiples, et ceci en divisant la bande de transmission en  $N$  sous-canaux orthogonaux. Un Intervalle de Garde est ensuite ajouté au début du symbole et cet intervalle est identique au segment de même longueur à la fin du symbole. Sa longueur est choisie de façon à être supérieure à la valeur maximale de délai dû à l'effet de trajet multiple.

L'OFDM présente une grande simplicité dans la modulation et la démodulation ayant besoin d'un seul modulateur et d'un seul démodulateur. Ceci a lieu dans le cas où les différents éléments fondamentaux sont correctement sélectionnés : Nombreuses porteuses orthogonales, intervalle de garde, entrelacement et des bonnes informations sur l'état du canal.

L-DACS1 utilise cette modulation intéressante.

### 3.4.3 Paramètres OFDM pour L-DACS1 :

Cependant, le paramètre le plus important est l'espacement de sous-porteuse. La durée de symbole OFDM est inversement proportionnelle à cet espacement. Les symboles larges consistent à une interférence entre symboles inférieurs.

Toutefois, l'espacement de sous-porteuse plus étroite peut entraîner l'augmentation de l'interférence entre porteuses.

Les paramètres principales OFDM de L-DACS1 sont indiqués dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeur (Unité)
Nombre total de sous porteuses (taille de la FFT)	64 (sous porteuses)
Nombre de sous porteuses utiles	50 (sous porteuses)
Durée préfixe cyclique	17,6 $\mu$ s
Durée d'un symbole OFDM (préfixe cyclique inclus)	120 $\mu$ s
Espacement entre deux sous porteuses	9,765625 (kHz)
Largeur de bande effective	498,05 (kHz)

**Tableau 3.01:** *Résumé des paramètres de la modulation L-DACS1*

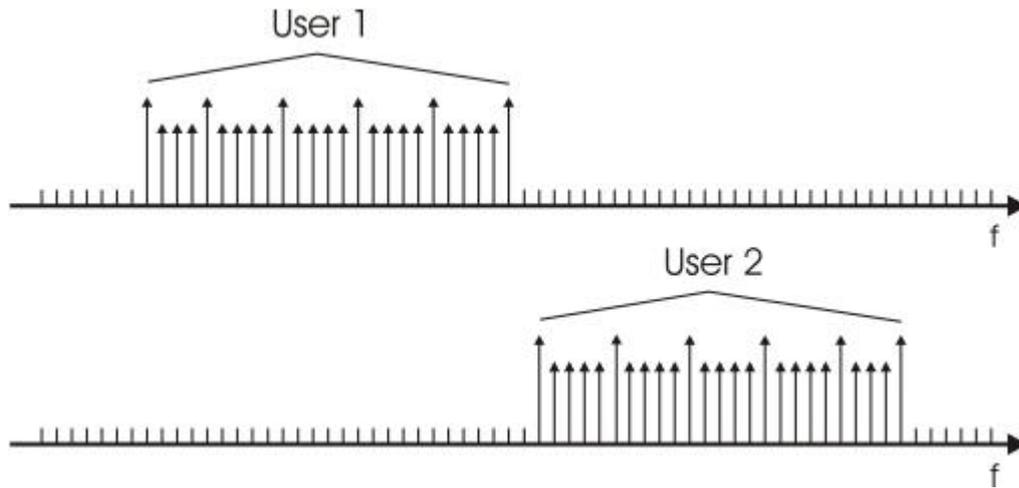
Le deuxième paramètre important est le préfixe cyclique OFDM qui est conçu pour surmonter l'étalement des retards causés par la propagation par trajets multiples. Étant donné que les ondes radio se déplacent à la vitesse de la lumière, un préfixe cyclique de 17,6  $\mu$ s permet un chemin différentiel de 5,28 km. Ceci est la différence maximale autorisée entre le chemin le plus long et le chemin de court -circuit entre l'émetteur et le récepteur. Un étalement de retard supérieur que cela va provoquer l'interférence entre symboles. La longueur du chemin peut être beaucoup plus grande que cela, mais l'écart augmente généralement avec de plus grandes distances de couverture.

#### **3.4.4 Transmission RL - OFDMA-TDMA:**

3.4.4.1 Dans le domaine des fréquences :

Un symbole OFDM est composé de soixante-quatre (64) sous-porteuses (FFT), qui peuvent être occupées par:

- symboles Null c'est-à-dire les sous-porteuses non modulées dans les bandes de garde, la sous-porteuse DC et les sous-porteuses inactives ;
- des symboles de données, utilisée pour la transmission de données d'utilisateur ;
- les symboles pilotes utilisés à des fins d'estimation de canal ;
- symboles de synchronisation, occupés par des séquences de synchronisation ;
- les symboles de réduction du PAPR;
- symboles Préambule, utilisés pour soutenir le récepteur AGC.



**Figure 3.18 : Structure OFDMA dans RL**

#### 3.4.4.2 Dans le domaine de temps :

La transformée de Fourier inverse IFFT d'un symbole OFDM crée le domaine de temps de forme d'onde OFDM.

Dans le sens RL, chaque AS impliqué crée séparément son domaine de temps de symbole OFDM. Dans une transmission OFDMA, la GS reçoit une superposition de deux signaux de temps de domaine séparés, nécessitant une transmission synchrone de ces deux ASs dans le temps et la fréquence, ainsi que la puissance l'alignement entre ces deux ASs.

Une tuile est affectée à un seul AS, mais la tuile suivante dans le sens du temps peut être utilisée par un autre AS. Ainsi, les symboles OFDM reçus subséquents appartenant à des tuiles différentes peuvent transporter des données provenant d'ASs différentes.

#### **3.4.5 Caractéristiques des trames OFDM dans la liaison RL:**

Les symboles OFDM sont organisés en trames. En fonction des données à transmettre différents types de trames OFDM sont définis. Tous types de trame peuvent être représentés par des symboles figurativement dans un plan temps-fréquence. Les symboles de données sont traités différemment selon les types de trames.

##### 3.4.5.1 Trame de segments de données Data :

Dans le RL, les segments de données sont constitués de tuiles. Une tuile couvre 25 symboles en fréquence et 6 symboles dans la direction du temps et il est illustré à la figure suivante :

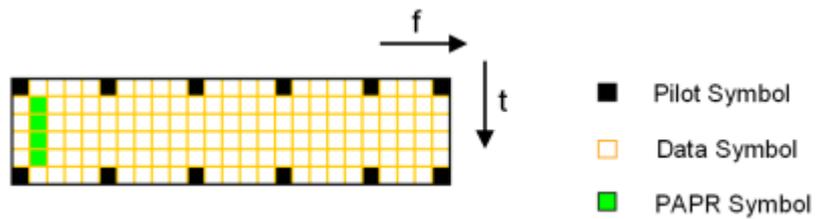


Figure 3.19 : Tuile

Chaque tuile comprend 4 symboles de réduction PAPR et 12 symboles pilotes. Cela conduit à une capacité de 134 symboles ( $25 \times 6 - 12 - 4$ ) de données par tuile, ce qui représente le plus petit bloc d'allocation dans le RL



Figure 3.20 : Segment de données à huit (08) tuiles

### 3.4.5.2 Segment de contrôle dédié DC :

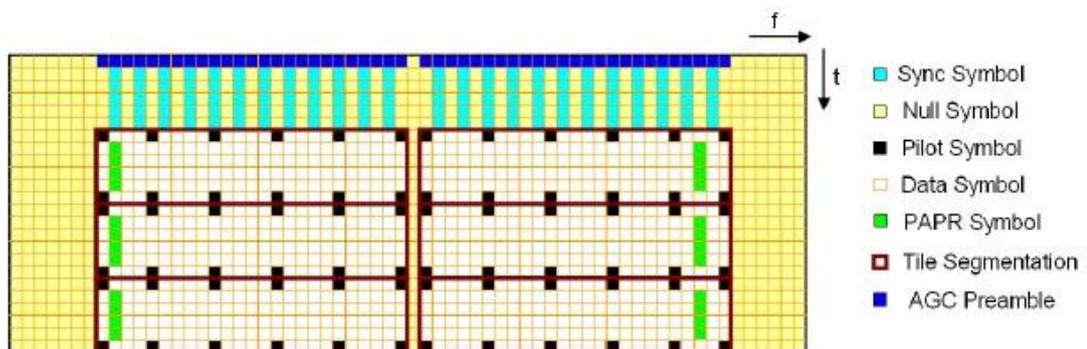


Figure 3.21 : DC SEGMENT RL

Les symboles de synchronisation OFDM fournissent une possibilité pour la GS de mettre à jour la synchronisation de plusieurs ASs.

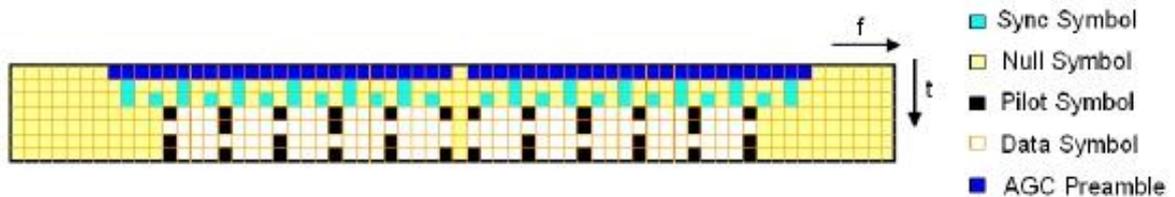
### 3.4.5.3 Trame RA :

Deux sous-trames RL RA offrent deux possibilités pour ASs d'envoyer leur demande d'entrée de cellule au GS.



*Figure 3.22 : RA Opportunité*

Les temps de garde de propagation de longueur  $T_{g,RA} = 1,26 \text{ ms}$  précèdent ou suivent chaque sous-trame RA respectivement. Ce temps de garde de propagation de 1,26 ms correspond à une distance maximale AS-GS de 200 NM. Lors de la transmission d'une sous-trame RA, un AS n'est pas encore synchronisé avec les GS. En dessous de telles conditions, un AS envoie la première sous-trame RA directement après le début d'un SF RL à son tour, a été déterminé à partir du signal GS FL qui a besoin de 1,26 ms pour atteindre un AS à la distance maximale de la GS. La seconde RA sous-trame se décale de 3,36 ms par rapport à la première.



*Figure 3.23 : Structure d'une sous-trame RA*

Le premier symbole OFDM représente le préambule AGC, les deux symboles OFDM suivants contiennent des séquences de synchronisation, tandis que les quatre autres symboles OFDM acheminent des données et les symboles pilotes. Ces quatre symboles OFDM utilisent seulement 43 sous-porteuses (y compris le sous- porteuses DC support), ce qui conduit à des bandes de garde avec  $N_{g,gauche} = 11$  et  $N_{g,droite} = 10$  porteuses.

### **3.5 Conclusion :**

Devant les problèmes des systèmes de communications aéronautiques actuels opérant dans la bande VHF, L-DACS1 est l'un des futurs systèmes aéronautiques solutions de ces problèmes. On a vu les différentes techniques que ce système utilise au niveau de sa couche physique afin de pallier aux effets néfastes des canaux de propagation. La modulation OFDM, qui est celle de L-DACS1, permet la transmission des données à haut débit, à faible distorsion et à faible atténuation du signal malgré les défauts du canal radio. L-DACS1 a été conçu pour être en mesure de transmettre les données en grande quantité avec un taux d'erreur minimum possible dans l'environnement. A noter que la modulation multi-porteuse est robuste au bruit impulsif puisque chaque porteuse est affectée d'un bruit indépendant des autres porteuses. Contrairement aux modulations mono porteuses où le bruit peut affecter un certain nombre de symboles transmis, la perte d'un symbole dû à un bruit important n'affectant pas les autres symboles. La partie codage utilisant la concaténation du code Reed Solomon et code convolutif rend le système plus performant en terme de transmission de données.

## **CHAPITRE 4**

### **SIMULATION PERFORMANCE DU FUTUR SYSTÈME : L-DACS1**

#### **4.1 Introduction :**

Le but de cette partie est de simuler les transformations lors de la génération et de réception d'un signal OFDM dans le canal physique (canal radio) de transmission, ensuite la comparaison de performance de systèmes utilisant OFDM avec 4-QAM (QPSK) et OFDM 16-QAM afin de choisir celle performante pour L-DACS1. La dernière partie de ce travail consiste à simuler la performance du système L-DACS1 en transmission de données entre aéronefs et station de base dans les canaux de propagations. Pour le cas de ce présent mémoire, on a choisi de faire l'étude sur le sens RL de l'aéronef à la station de base. On va prendre le cas des signaux traversant les canaux dits AWGN et Rayleigh. La performance du système L-DACS1 sera évaluée en termes de taux d'erreur binaire (BER) des données transmises et ce, en fonction du rapport signal sur bruit (SNR).

#### **4.2 Logiciel MATLAB :**

Matlab (MATrix LABoratory) est un logiciel pour le calcul scientifique, numérique et symbolique. La majorité de ses instructions (fonctions) sont basées sur un calcul matriciel simplifié. Grâce à ses fonctions spécialisées, Matlab est considéré comme un langage de programmation adapté pour les divers problèmes d'ingénierie. C'est un langage interprété, chaque ligne d'un programme est lue, interprétée et exécutée.

Simulink est un ensemble de logiciels pour la modélisation, la simulation et l'analyse des systèmes dynamiques. Il supporte les systèmes linéaires ou non linéaires modélisés en temps continu ou en temps discret.

On a utilisé la version Matlab 2013 car elle offre une facilité d'utilisation [54].

#### **4.3 Canal de propagation aéronautique utilisé dans le travail :**

Lors de l'étude des systèmes de communication, l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération est le canal de transmission. Le terme "canal" désigne le milieu entre l'émetteur et le récepteur. Dans sa forme la plus simple, le canal est considéré comme idéal lorsque la transmission a lieu dans l'espace libre. En réalité, les effets de canal expérimenté sont loin d'être idéaux. Ces effets sont provoqués par le mouvement relatif entre l'émetteur et le récepteur ainsi

que par l'existence d'obstacles entre les deux. Ces obstacles peuvent être les effets de fading. En outre, le niveau de signal reçu est atténué par la perte de trajet et dégradé par l'effet du multi-trajet.

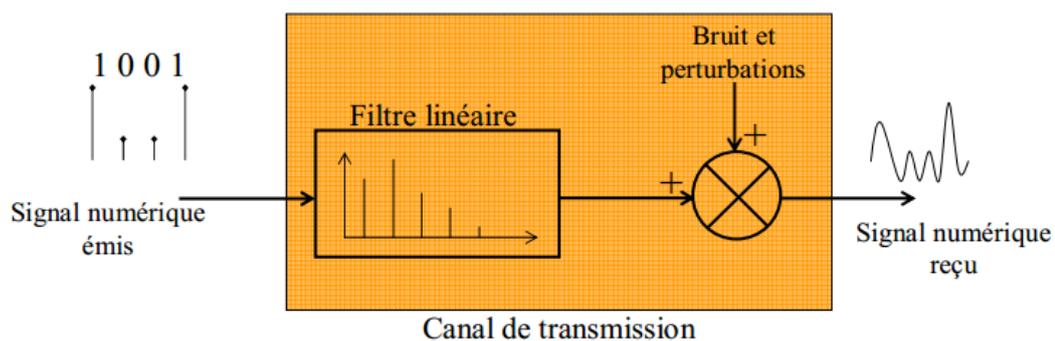
#### 4.3.1 Le canal AWGN :

Le bruit blanc gaussien est un modèle de bruit largement utilisé dans de nombreux domaines. En effet, lorsqu'un phénomène correspond à la somme d'un grand nombre de variables aléatoires [59], il est possible de démontrer par le théorème de la limite centrale que la distribution statistique de ce phénomène suit une distribution gaussienne.

Dans le domaine fréquentiel, un bruit blanc présente une densité spectrale constante en fonction de la fréquence c'est-à-dire que le bruit est ajouté à parts égales à toutes fréquences composantes du signal d'origine. Un bruit gaussien suit une distribution gaussienne, caractérisée par une moyenne  $\mu$  et une variance  $\sigma^2$ .

Un canal AWGN est non discret et sans mémoire représentant parfaitement une liaison radio en vue directe dont le bruit est principalement d'origine thermique. Le bruit additif est dans ce cas un bruit gaussien de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$ .

La figure qui suit présente le modèle général d'un canal AWGN. Le canal est caractérisé par une fonction de transfert ou une réponse impulsionnelle, qui décrit le comportement soit fréquentiel soit temporel du canal. Les perturbations externes et le bruit se couplent au canal et sont ajoutés au signal transmis [58].



**Figure 4.01 :** Modèle général d'un canal de transmission à bruit additif

#### 4.3.2 Le canal de Rayleigh :

En réalité, la plupart des canaux sans fil ne peut être modélisée par le modèle espace libre simple. La raison c'est que le récepteur reçoit des copies multiples du signal d'origine par l'intermédiaire

de trajets différents, ce qui est connu sous le nom de propagation à trajets multiples. Ces types de modèles de canaux sont largement utilisés dans la modélisation des canaux de communication car ils peuvent décrire les caractéristiques du canal efficace.

Dans les liaisons radiomobiles, les canaux de transmission évoluent en fonction du temps à cause des déplacements aléatoires des entités communicantes et l'existence d'obstacles entre l'émetteur et le récepteur. Il peut en résulter que le signal émis suit plusieurs trajets avant d'arriver au récepteur, conduisant à une variabilité importante du signal reçu due à l'addition de plusieurs signaux déphasés.

Lorsque le débit de transmission est suffisamment faible, chaque symbole ne se superpose qu'avec lui-même, au moins sur une portion significative de sa durée. Un canal de Rayleigh permet de prendre en compte ces effets : réflexions multiples, évanouissements, fluctuations à grande et petite échelle et effet Doppler. L'amplitude et la phase du signal reçu apparaissent comme des variables aléatoires qui suivent une loi de Rayleigh comme suit :

$$p(x) = \frac{x^2}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.01)$$

De ce fait, le canal de Rayleigh peut être mis en considération pour la simulation de la performance du système L-DACS1.

Une alternative à la modélisation avec un bruit gaussien complexe filtré est de rapprocher le processus fading de Rayleigh par une somme d'un ensemble de sinusoides complexes. Une technique de ce genre a été proposée par William Jakes des laboratoires de Bell pour la simulation des canaux à évanouissement radio mobiles. Ceci est connu comme étant le modèle de Jakes. Les diffuseurs soient répartis uniformément autour d'un cercle à angle  $\alpha_n$  avec k rayons émergeant de chaque diffuseur. Le décalage Doppler sur ray n est :

$$f_n = f_D \cos \alpha_n \quad (4.02)$$

Jakes a proposé la somme de modèles de sinusoides suivants :

$$h_I(t) = \sqrt{2} \cos(2\pi f_D t) * 2 \sum_{n=1}^M \cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right) \cos\left(2\pi f_D \cos\left[\frac{2\pi n}{4M+2}\right] t\right) \quad (4.03)$$

$$h_Q(t) = 2 \sum_{n=1}^M \sin\left(\frac{2\pi n}{M}\right) \cos\left(2\pi f_D \cos\left[\frac{2\pi n}{4M+2}\right] t\right) \quad (4.04)$$

Où  $h_I(t)$  et  $h_Q(t)$  désigne les composantes en phase et en quadrature de phase des composantes du gain de canal complexe et M désigne le nombre de sinusoides.

#### 4.4 Critères de performances d'un système :

Comme critères de performance on a choisi le rapport signal sur bruit et la probabilité d'erreur binaire.

##### 4.4.1 Rapport signal sur bruit :

Connaître la puissance du bruit n'a un intérêt que si on peut la comparer à celle du signal et en déduire son impact sur la dégradation du signal. C'est pourquoi on utilise généralement un rapport de puissance appelé rapport signal sur bruit.

En effet, la moyenne du rapport Signal sur Bruit est un estimateur de la dégradation que le signal a subie et un indicateur de la sensibilité d'un dispositif pour une densité spectrale du bruit donné. Si  $\gamma$  correspond au SNR instantané d'un signal numérique, il est défini par :

$$\gamma = \frac{E_b}{N_o} \quad (4.05)$$

$E_b$  : représente l'énergie instantanée émise par bit et  $N_o$  la densité spectrale du bruit affectant le bit transmis. Le SNR est généralement exprimé en décibel (dB). Plus le rapport signal sur bruit est faible, plus le signal est dégradé et plus il sera difficile de supprimer l'influence du bruit sur le signal. Il est nécessaire de garantir un rapport signal à bruit important pour s'assurer que le signal reçu reste une « copie fidèle » du signal transmis.

##### 4.4.2 Taux d'erreur binaire :

Au cours d'une transmission numérique, le nombre de bits erronés reçu à la réception sur un nombre fini de bits transmis se reflète à travers le taux d'erreur binaire. La qualité d'un signal numérique ne sera réduite que si les effets négatifs du canal conduisent le récepteur à confondre plusieurs symboles ou bits dans le cas d'un signal binaire. Le Taux d'Erreur Binaire exprime le rapport entre le nombre de bits erronés et le nombre total de bits transmis.

Le taux d'erreur binaire BER est défini par :

$$BER = \frac{n_{be}}{n_{bt}} \quad (4.06)$$

$n_{be}$  : représente le nombre de bits erronés

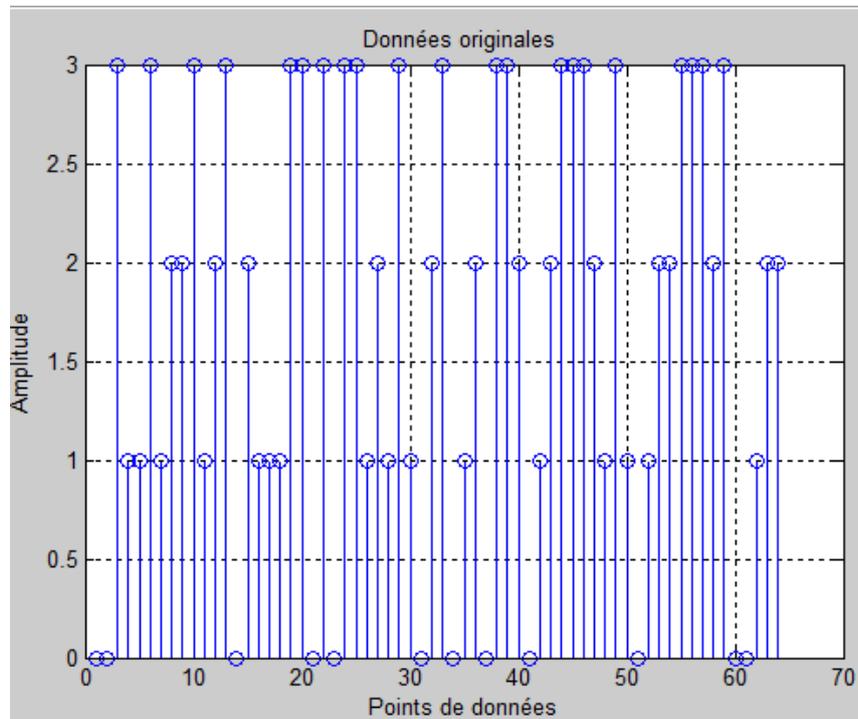
$n_{bt}$  : représente le nombre de bits transmis

Plus la contrainte sur la qualité de service d'une transmission est élevée, plus le BER est faible.

#### 4.5 Simulation pour comprendre la modulation OFDM :

Dans cette partie de simulation, on va visualiser les différentes transformations pour la transmission d'un signal OFDM.

- Les données à transmettre, composé de 64 bits d'information, est représenté par la figure suivante :

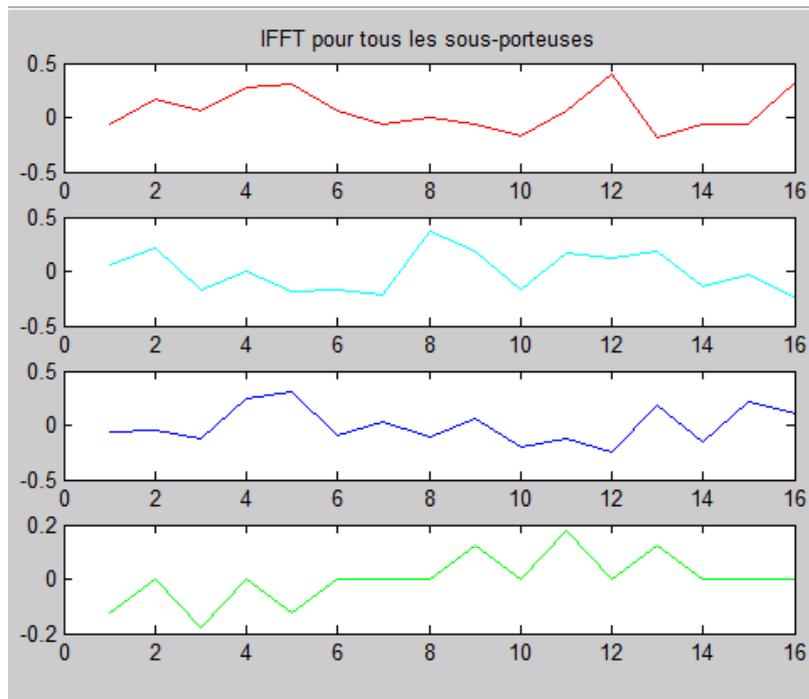


*Figure 4.02 : Données à transmettre*

- La Figure 4.03 ci-dessous montre les symboles complexes après constellation QPSK des bits d'informations.

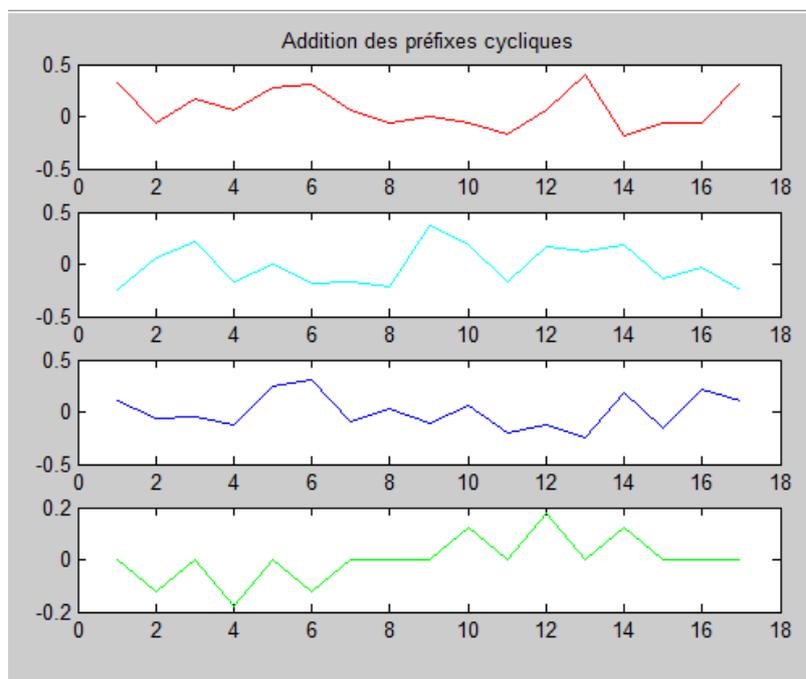


- La figure 4.05 ci-après montre la présentation des sous-porteuses par la méthode IFFT.



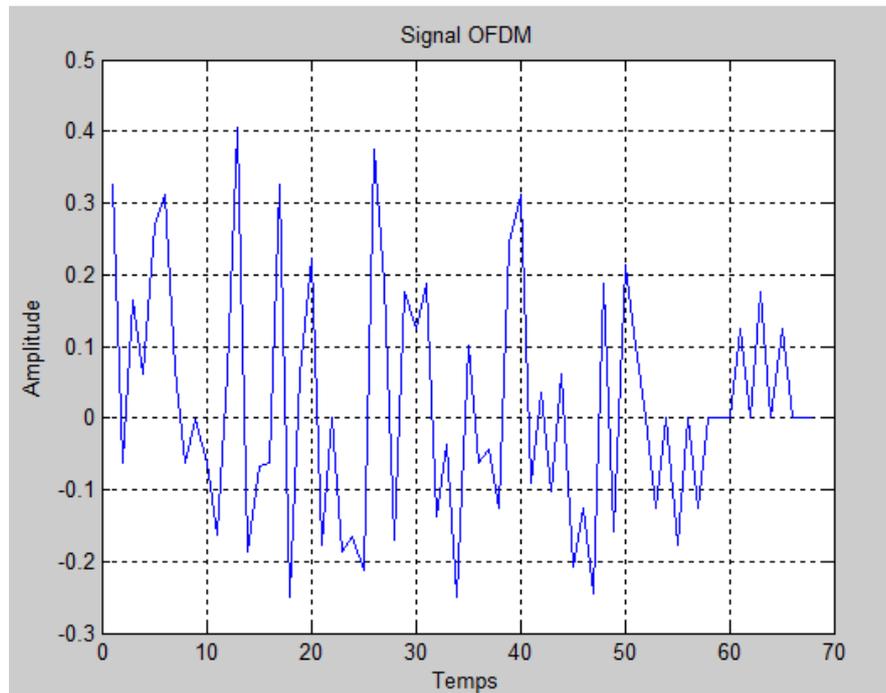
*Figure 4.05 : Application de l'algorithme IFFT*

- Pour éviter les interférences inter-symboles, l'ajout des préfixes cycliques étant nécessaire. On obtient une présentation comme suit :



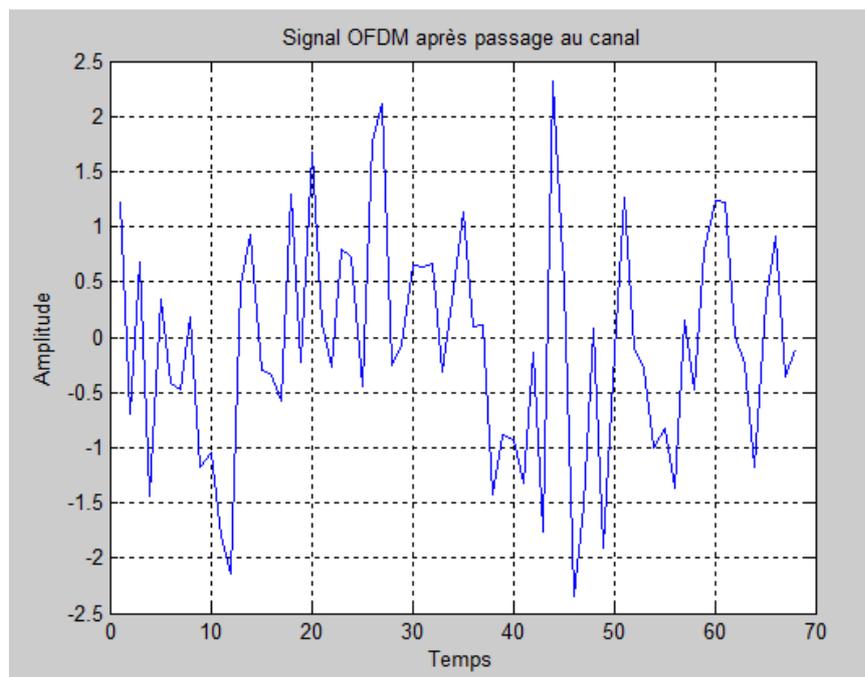
*Figure 4.06 : Après addition des préfixes cycliques*

- Après addition des préfixes cycliques, on obtient en effet le signal OFDM comme suit :



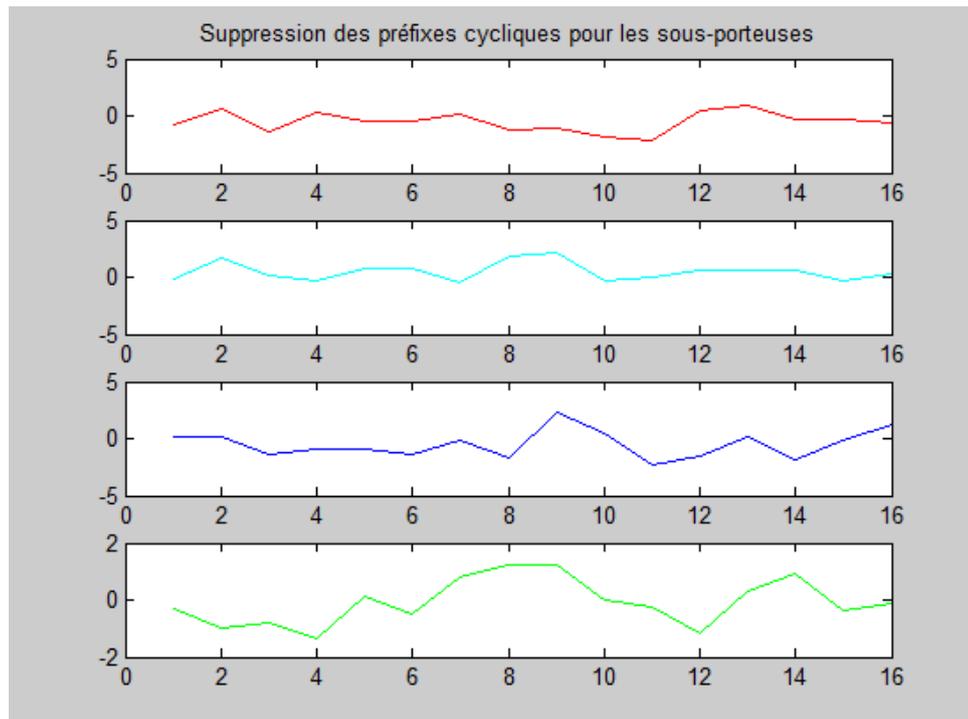
*Figure 4.07 : Signal OFDM à transmettre*

- Supposant que ce signal est transmis à travers un canal bruité, on a une déformation du signal. La figure 4.08 présente cette déformation.



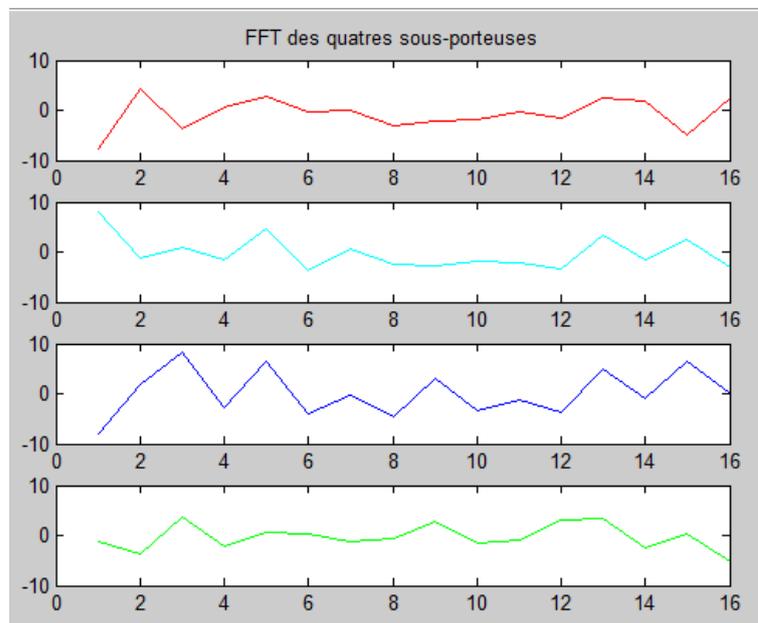
*Figure 4.08 : Signal OFDM après passage au canal*

- La suppression des préfixes cycliques s'effectue à la réception.



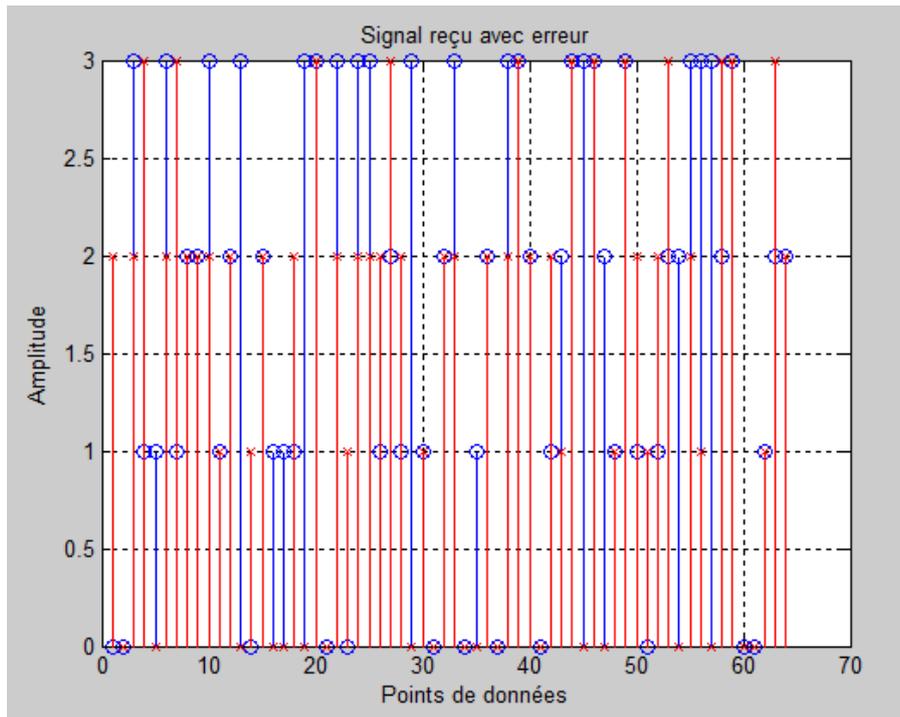
*Figure 4.09 : Suppression des préfixes cycliques*

- Application FFT des signaux reçus



*Figure 4.10 : Application FFT*

- Finalement, on retrouve les bits transmis mais avec erreur.

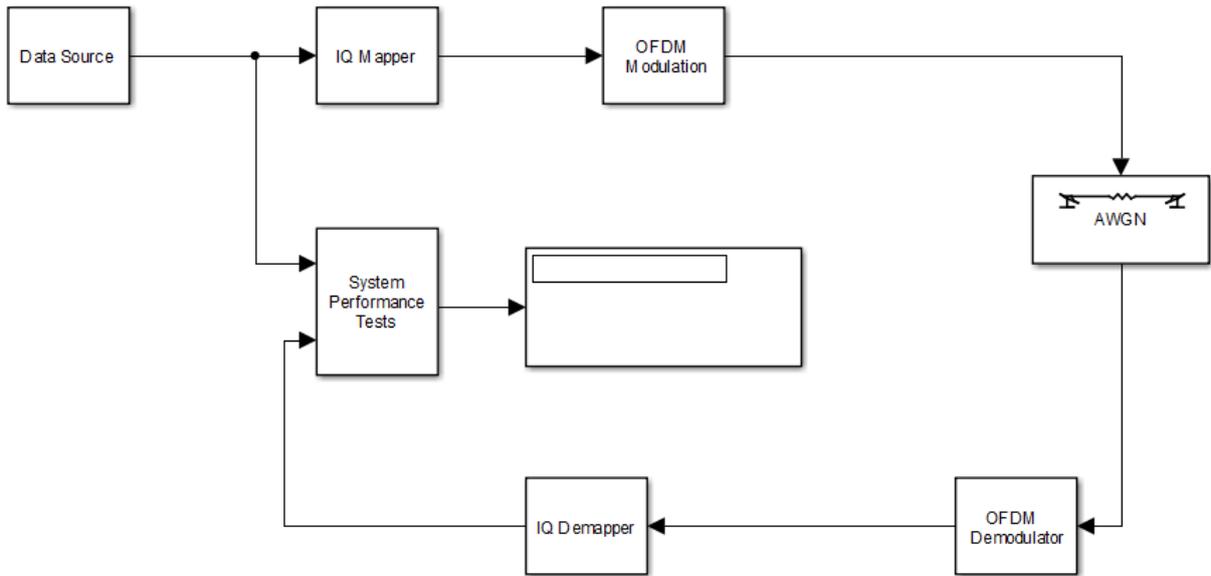


*Figure 4.11 : Signal reçu avec erreur*

On remarque dans le résultat final présenté dans la figure 4.11 que les imperfections dû au comportement du canal se répartissent pour un signal transmis. Ce qui met en évidence l'avantage de la modulation OFDM grâce à l'utilisation de plusieurs sous-porteuses.

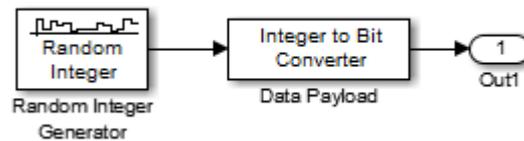
#### **4.6 Simulation de comparaison de performance entre systèmes utilisant la modulation OFDM 4-QAM ET 16-QAM :**

Les deux systèmes de communication utilisant la modulation OFDM se présente généralement sous ce modèle en simulink :



*Figure 4.12 : Présentation générale des deux modèles*

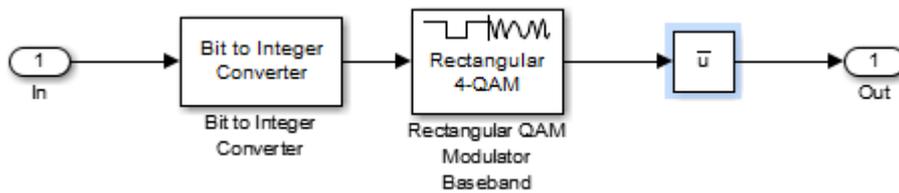
**4.6.1 Bloc Data Source :**



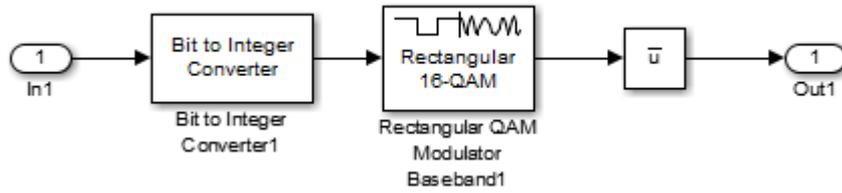
*Figure 4.13 : Blocs pour la génération de source*

On utilise le Random Integer Generator pour la génération de source aléatoire. Le bloc Integer to Bit pour générer des bits en sortie de la source.

**4.6.2 Bloc IQ mapper :**



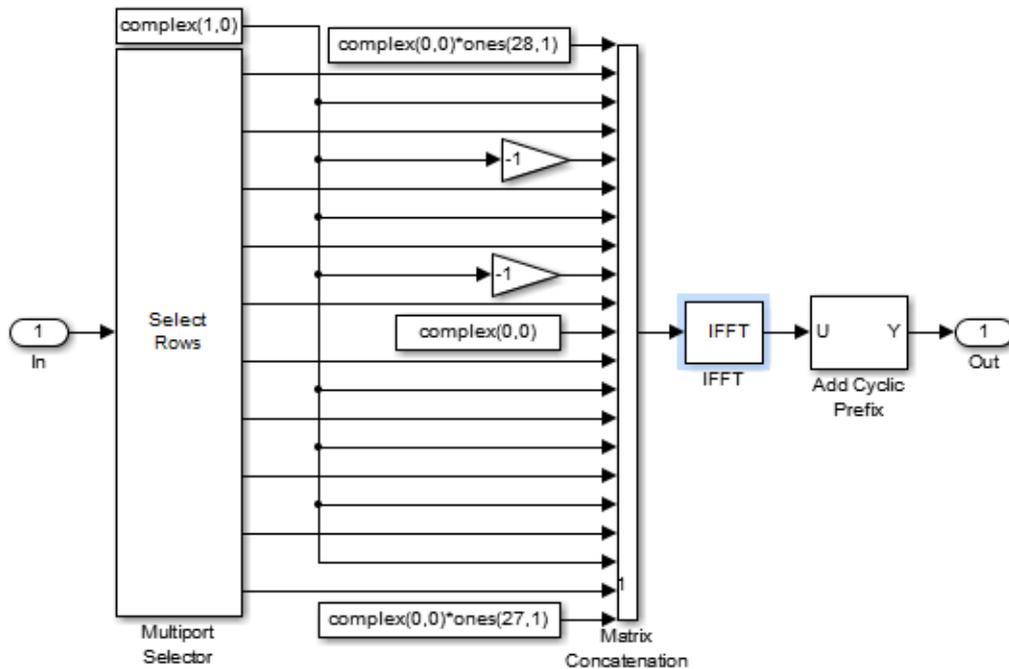
*Figure 4.14 : Mapping : modulation 4-QAM*



*Figure 4.15 : Mapping : modulation 16-QAM*

Les deux modèles sont utilisés pour la génération de symboles utilisés pour la modulation OFDM. L'un utilise la modulation 4-QAM et l'autre celle 16-QAM.

**4.6.3 Bloc OFDM modulation :**



*Figure 4.16 : Modulateur OFDM*

**4.6.4 Canal AWGN :**

Ce canal caractérise le canal radio (à bruit blanc).

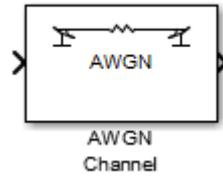


Figure 4.17 : Bloc AWGN

4.6.5 Bloc OFDM Demodulator :

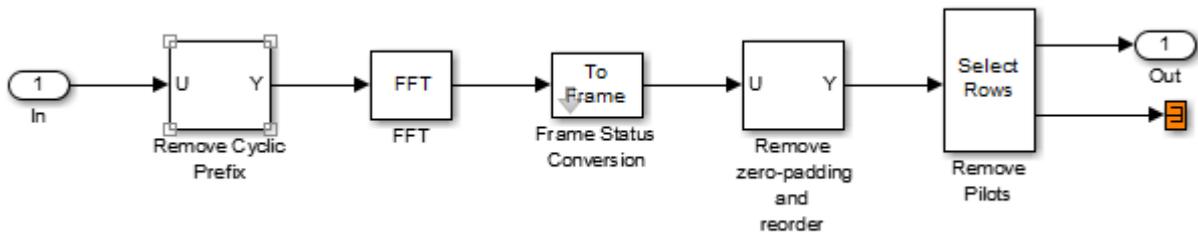


Figure 4.18 : Démodulateur OFDM

4.6.6 Bloc IQ demapper :

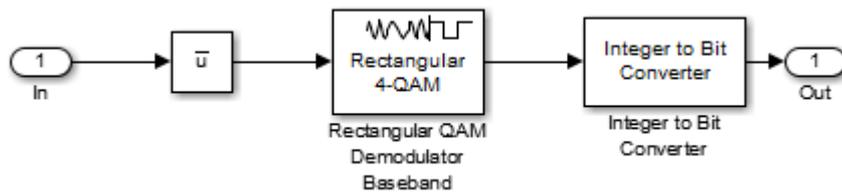


Figure 4.19 : Demapping : démodulation 4-QAM (QPSK)

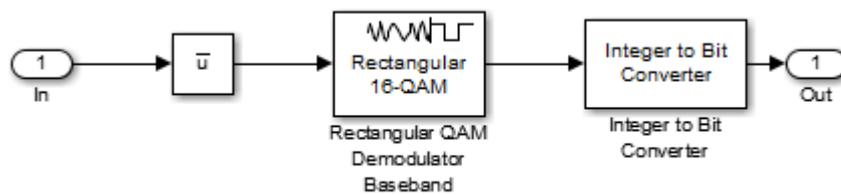
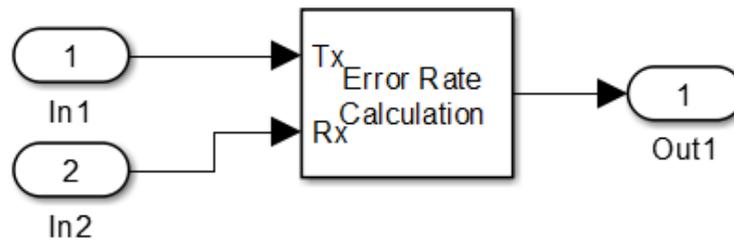


Figure 4.20 : Demapping : démodulation 16-QAM

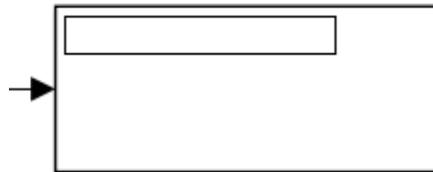
#### 4.6.7 Le bloc Sytem Performance Test :



*Figure 4.21 : Bloc error rate calculation*

Le bloc System Performance Test est formé par le bloc Error Rate Calculation en charge de calcula du BER entre les bits d'entrée et ceux de la sortie.

#### 4.6.8 Le bloc display :



*Figure 4.22 : Bloc display*

Ce bloc est en charge de l'affichage du BER.

#### 4.6.9 Comparaison de performance des deux systèmes en termes de taux d'erreur binaire et justification du choix de modulation pour le simulateur L-DACSI :

Pour un canal AWGN de paramètres suivants :

Parameters

Input processing:

Initial seed:

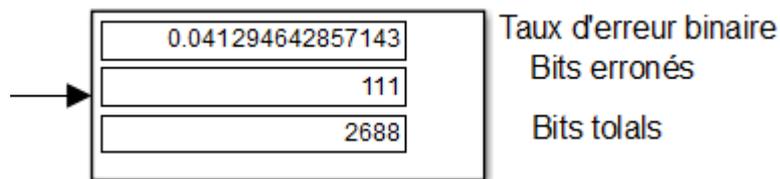
Mode:

SNR (dB):

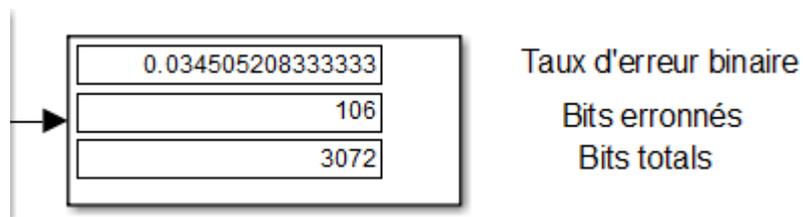
Input signal power, referenced to 1 ohm (watts):

**Figure 4.23** : Paramètres du canal AWGN

On a les résultats suivants :



**Figure 4.24** : Résultat du TEB pour OFDM avec 4-QAM (QPSK)



**Figure 4.25** : Résultat du TEB pour OFDM avec 16-QAM

D'après les résultats obtenus, on constate que l'erreur du signal reçu est réduite en utilisant la modulation OFDM avec 16-QAM par rapport à celle utilisant OFDM avec 4-QAM ou QPSK. Le vrai objectif pour la mise en place d'un système de transmission serait d'avoir le système le plus performant possible. En effet, il serait souhaitable de choisir la technique de modulation OFDM avec 16-QAM pour le système L-DACS1.

#### 4.7 Simulation de la performance du système L-DACS1 dans le sens RL dans le canal AWGN et Rayleigh :

La performance du système L-DACS1 au niveau de la couche physique est simulée à l'aide de programme MATLAB. Comme L-DACS1 est un grand système, l'étude a été choisie pour le sens RL qui est une liaison d'aéronefs à la station de base. L'émetteur se trouve à bord des aéronefs et le récepteur se trouvant à la station de base. On a pris dans la simulation le cas d'une transmission sans codage avec une modulation OFDM de symboles 16-QAM dans les environnements : AWGN et Rayleigh.

Dans la simulation on a pris en considération les spécifications de la couche physique du système L-DACS1. On a pris comme cas l'émission de données de deux (02) avions vers une station de base.

On a le schéma de transmission simplifié comme suit pour le simulateur L-DACS1 au sens de liaison RL en question :

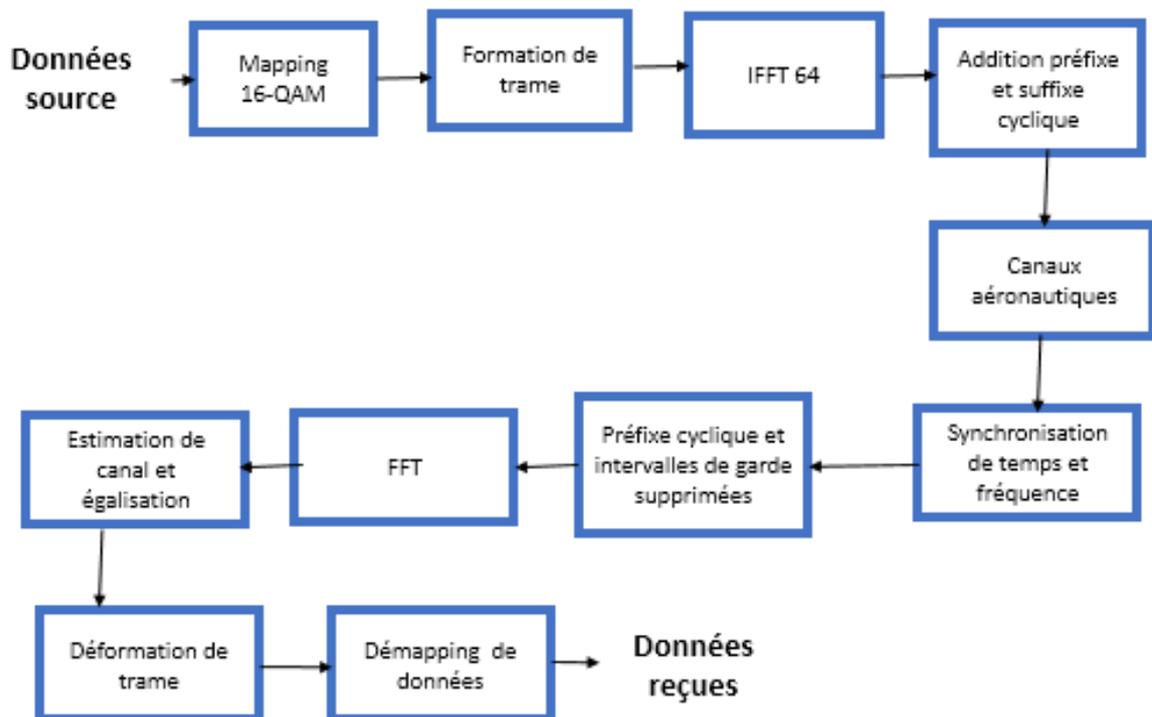


Figure 4.26 : Etape de la simulation L-DACS1

#### **4.7.1 *Au niveau de l'émission :***

- Les bits de données source sont modulés par modulation 16-QAM qui produira des symboles de données 16 QAM.
- Après l'étape de modulation par 16-QAM dans la chaîne de transmission de données pour L-DACS1, les symboles de données seront traités différemment selon les trames de sous-couche MAC présentées dans le chapitre précédent. Pour le segment de données par exemple un total de 12 pilotes est ajouté à chaque symbole. 4 symboles PAPR sont ajoutés pour la réduction de PAPR. Après avoir retiré DC, 12 pilotes et 4 PAPR on se retrouve avec 50 supports de données utiles par FFT de taille 64.
- 64 points IFFT sont ensuite appliqués sur ces trames de données.
- Un préfixe cyclique ou intervalle de garde est ajouté aux échantillons de symbole OFDM obtenus précédemment.

#### **4.7.2 *Au niveau de la réception :***

- A la réception, l'estimation de décalage de temps-fréquence et la correction se font en premier.
- Les intervalles de garde et les préfixes cycliques sont supprimés
- 64 points FFT est effectué
- L'estimation de canal et l'égalisation s'effectue
- La déformation des trames est réalisée. Les sous-porteuses pilotes, de garde et DC sont retirées des symboles OFDM reçus.
- Le « demapping » ou la démodulation 16-QAM est ensuite effectué, ce qui produit des bits de données.

#### **4.7.3 *Visualisation des signaux à la sortie***

A la sortie de la chaîne de transmission, les données reçues au niveau de la station de base seront comparées à la somme des données émises par les deux aéronefs. Les critères de performance d'un système de communication BER et SNR seront par la suite analysés et interprétés

#### 4.7.4 Simulation du système L-DACSI dans le canal AWGN et Rayleigh :

On va présenter dans la simulation les différents comportements du système L-DACSI dans quatre différents types de canaux radio. On va prendre en compte le canal AWGN puis trois canaux suivant le modèle de Rayleigh : le canal dit APT, TMA et ENR.

- Le canal APT :

La taille d'une cellule pour ce canal est de 10 NM soit 18 km. Les aéronefs survolent à une vitesse moyenne d'environ 115 m/s et établissent une communication à la station de base. On a un décalage Doppler de 413 Hz pour les fréquences d'émission maximale dans la liaison RL. L'étalement maximal de retard du canal est de 3  $\mu$ s.

- Le canal TMA :

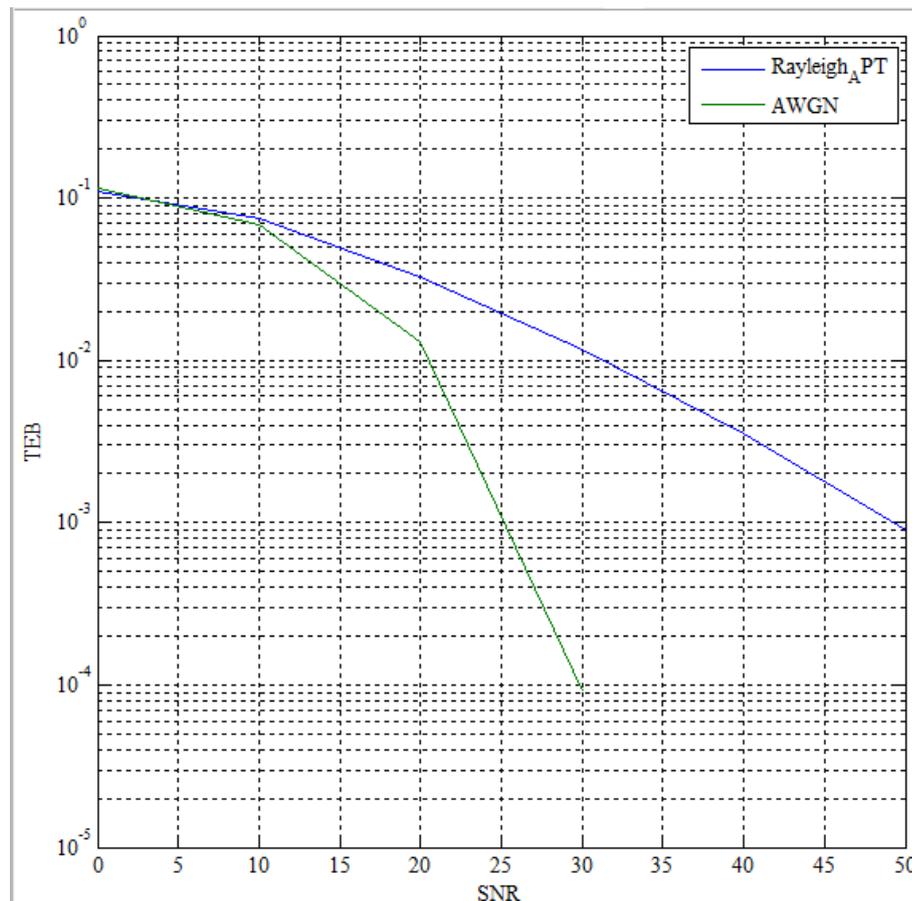
Le modèle de canal TMA, également connu sous le nom de Terminal Manœuvre Région, correspond à celui par laquelle la communication entre GS et AC s'effectue lorsque ce dernier se décolle ou s'atterrisse.

La taille de la cellule correspondante de la TMA est de 40 NM (équivalent à 75 km). Les avions survolant dans cette zone de couverture atteignent une vitesse jusqu'à 174 m/s. Avec une fréquence d'émission maximale d'environ 1071Mhz, le décalage Doppler maximal pour le canal en question est de 624 Hz. On a un étalement maximal d'environ 20  $\mu$ s.

- Le canal ENR :

Dans le scénario du canal en route, l'AC est supposé être de croisière à une vitesse moyenne d'environ 350 m/s. La taille des cellules est de 120 NM correspondant à 225 km. A la vitesse correspondante avec  $f_c = 1071$  MHz pour le sens RL,  $f_D$  est d'environ 1250 Hz. On a un delay maximal d'environ 15  $\mu$ s.

#### 4.7.4.1 Simulation de L-DACS1 dans le canal AWGN et APT :

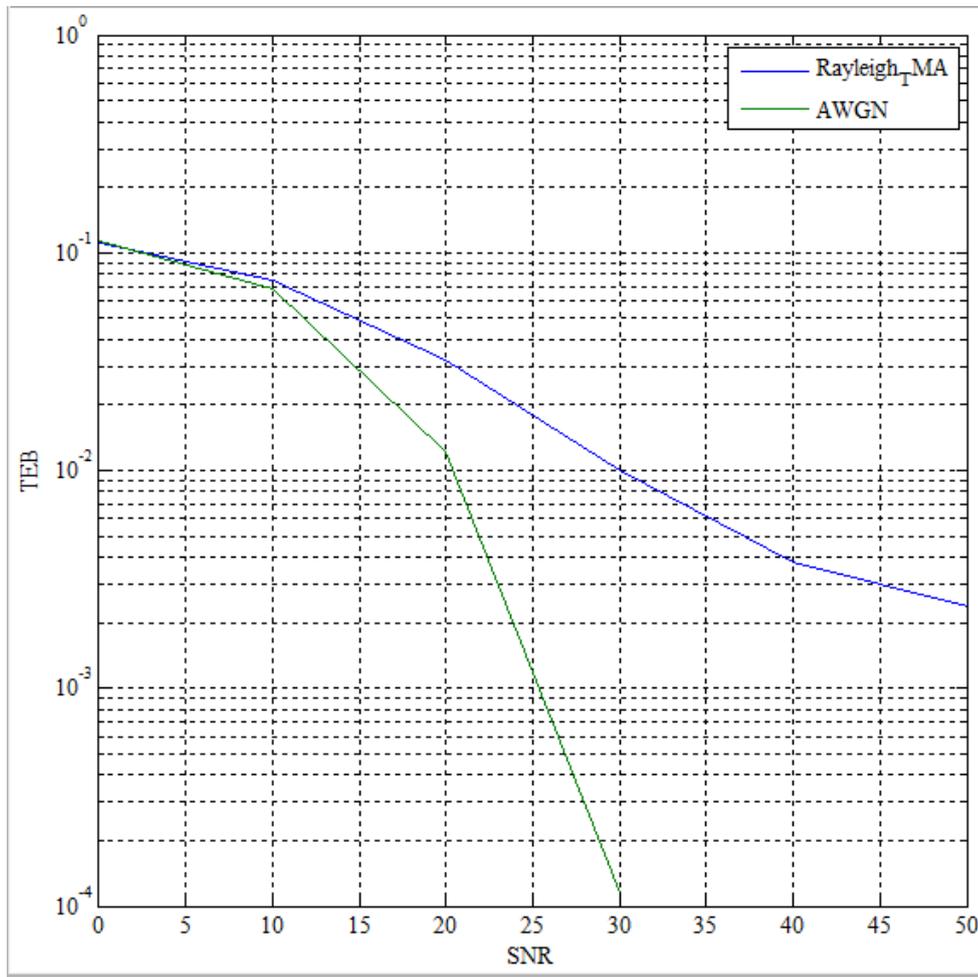


**Figure 4.27 :** Performance du système L-DACS1 à travers les canaux AWGN, Rayleigh (fréquence doppler =413 Hz)

On a le résultat comme suit :

Dans le cas d'un canal AWGN (canal idéal), l'effet du bruit pourrait être facilement atténué par seulement l'augmentation du rapport signal sur bruit. D'autre part, pour le canal APT ci-présent, les performances du système dégradent sévèrement. D'après les spécifications de L-DACS1, le taux d'erreur binaire (TEB) physique (c'est-à-dire sans codage de canal) est égal à  $10^{-3}$ . Ainsi, pour atteindre un TEB physique de  $10^{-3}$ , pour un canal AWGN, il faut un rapport signal sur bruit de 25 dB. Pour le canal APT, il faut un SNR d'environ 47 dB.

#### 4.7.4.2 Simulation du système L-DACS1 dans le canal TMA :

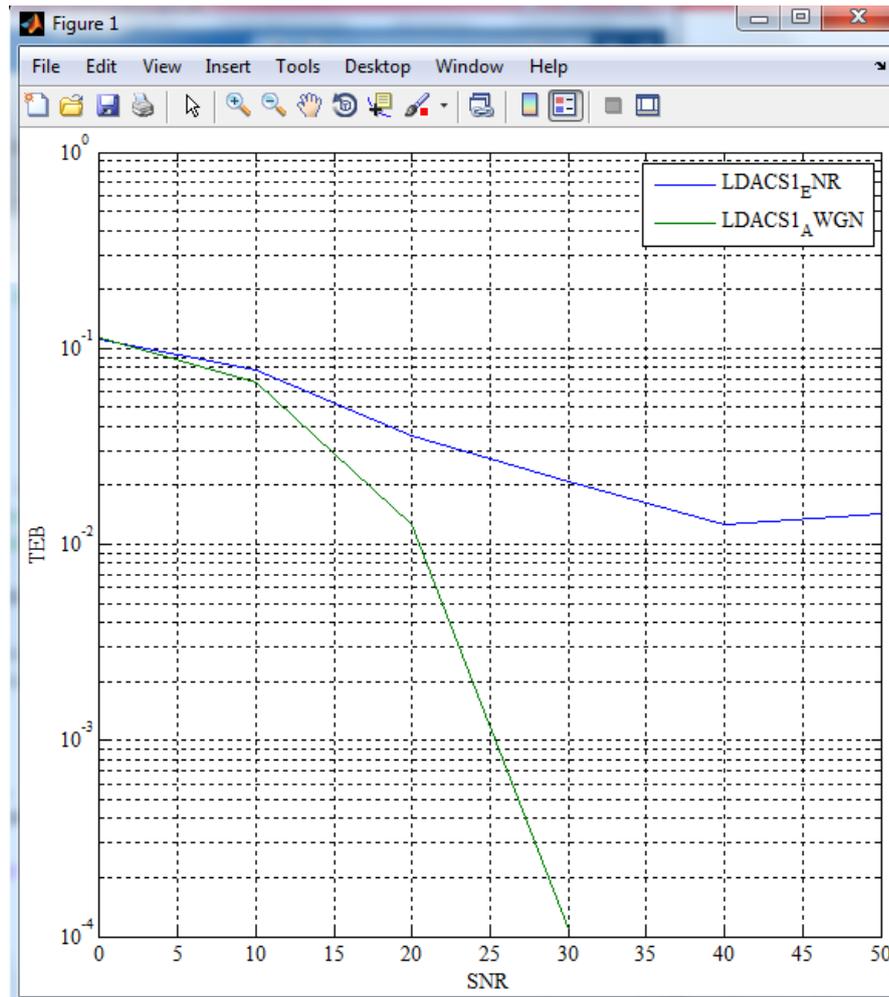


**Figure 4.28** : Performance du système L-DACS1 à travers les canaux AWGN, TMA, fréquence Doppler de 624 Hz

En prenant le cas d'aéronefs dans le canal TMA, le taux d'erreur binaire tend vers la valeur du taux d'erreur binaire physique de  $10^{-3}$  à partir de SNR=50dB.

#### 4.7.4.3 Simulation du système L-DACS1 dans le canal ENR :

On a le résultat suivant :



**Figure 4.29 :** Performance du système L-DACSI à travers les canaux AWGN, ENR fréquence Doppler de 1250 Hz

En prenant le cas d'aéronefs survolant dans le canal ENR, l'atténuation du bruit est difficile même si on augmente le niveau du SNR au-delà de 40 dB. La valeur du taux d'erreur binaire se trouvant être constante en prenant la valeur  $10^{-2}$  environ à partir du SNR 40 dB. Les signaux se dégradent évolutivement et loin d'atteindre le taux d'erreur binaire de  $10^{-3}$ .

#### 4.8 Conclusion :

Dans les simulations effectuées, on a pu visualiser les différentes étapes de transformation de signal par la modulation OFDM afin de comprendre la spécificité de cette modulation. Ensuite, une comparaison de performance de deux systèmes l'un utilisant OFDM avec QPSK et l'autre OFDM avec 16-QAM a été réalisée. Les résultats obtenus montrent que la modulation OFDM

avec 16-QAM serait la plus acceptable en termes de taux d'erreur binaire. La dernière partie de la simulation a permis de voir les différents comportements du système L-DACS1 dans l'environnement aéronautique. On remarque que plus les avions se déplacent rapidement, plus l'effet Doppler est important et plus on voit une dégradation évolutive du système en transmission de données.

## CONCLUSION GENERALE

L'enjeu opérationnel primordial pour le développement du trafic aérien est de maintenir un niveau de sécurité élevé, lequel passe par une bonne coordination et une bonne compréhension entre les organismes au sol et les personnels à bord des aéronefs. Or, à l'intérieur d'un même espace géographique géré par un binôme de contrôleurs, l'augmentation de trafic implique une augmentation des communications entre les contrôleurs et les pilotes.

Ce présent mémoire montre dans une partie que la CPDLC permet d'une part, de désencombrer des fréquences et d'autre part de seconder les communications vocales VHF vulnérables aux bruits. Cette application actuelle permet de réduire la charge des contrôleurs cependant elle doit être utilisée dans des situations sans pression temporelle et sans caractère d'urgence, ce qui montre qu'il ne peut remplacer totalement le moyen vocal. La CPDLC ne serait donc pas une solution à long terme devant la saturation de fréquence VHF et les problèmes rencontrés en communication vocale.

L-DACS1 serait une solution prometteuse. Ce dernier pouvant pallier à ces problèmes et fournirait des services supplémentaires comme les communications air-air. C'est un système plus performant que ses prédécesseurs, il fournirait plus de ressources spectrales et de débit d'informations importantes. On s'est focalisé sur une étude de performance de ce futur système de communication en transmission de données aéronautiques venant des émetteurs embarqués jusqu'à la station de base. L-DACS1 utilise la technique de codage concaténé et les techniques de modulation multi-porteuses permettant la transmission des données à haut débit, à faible distorsion et à faible atténuation du signal malgré les défauts du canal radio.

Dans la simulation l'étape d'une modulation OFDM a été visualisée et indique que cette modulation présente des avantages devant l'imperfection des canaux. La modulation OFDM 16-QAM a été choisi pour le simulateur L-DACS1 réalisé après une évaluation de sa performance. Les différentes performances de L-DACS1 en termes de taux d'erreur binaire des signaux transmis en fonction du rapport signal sur bruit ont été visualisées dans la dernière partie de la simulation. On remarque la dégradation évolutive des signaux pour le cas des avions se déplaçant plus rapidement dans les canaux multi-trajets. Pour les cas des canaux APT et TMA, le taux d'erreur binaire physique pour la spécification de L-DACS1 peut être atteint à la valeur de SNR aux environs de 50 dB. Les résultats obtenus en simulation dans ce présent mémoire aideront pour

le choix d'un des systèmes L-DACS à mettre en place dans le futur. Quelques améliorations de la spécification du système seraient encore souhaitables pour atteindre un meilleur objectif : transmission à haut débit avec un taux d'erreur minimal.

Un système de radionavigation aéronautique appelé DME occupe la plus grande partie de la bande L de 960 à 1164 MHz utilisé pour L-DACS1. Les antennes embarquées de L-DACS1 et DME très proches pourraient mener à des interférences qui nuiraient à la performance de ces deux systèmes. Ce point fort doit être mis en considération pour la mise en place du futur système de communication aéronautique.

# ANNEXE 1

## FORMULAIRE DU PLAN DE VOL

Ministère chargé de l'aviation civile		<b>Formulaire de plan de vol / Flight plan form</b>		
				N° 14806*01
PRIORITÉ / Priority << = FF →		DESTINATAIRES / Addressees <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> << =		
HEURE DE DÉPÔT / Filing time <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> →		EXPÉDITEUR / Originator <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> << =		
IDENTIFICATION PRÉCISE DES DESTINATAIRES ET/OU DE L'EXPÉDITEUR / Specific identification of addressees and/or originator				
3 TYPE DE MESSAGE / Message type << = (FPL		7 IDENTIFICATION DE L'AÉRONEF / Aircraft identification <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>		8 RÈGLES DE VOL / Flight rules <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>
				TYPE DE VOL / Type of flight <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> << =
9 NOMBRE / Number <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>	TYPE D'AÉRONEF / Type of aircraft <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>	CATÉGORIE DE TURBULENCE DE SILLAGE / Wake turbulence category <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> / <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>		10 EQUIPEMENT & POSSIBILITÉS / Equipment & capabilities 10-a <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>
13 EMPLACEMENT DE DÉPART / Departure location <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>		HEURE / Time <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> << =		
				10-b <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> << =
15 VITESSE CROISIÈRE / Cruising speed <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>		NIVEAU / Level <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>	ROUTE / Route <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>	
<< =				
16 AÉRODROME DE DESTINATION / Destination aerodrome <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>		DURÉE TOTALE ESTIMÉE / Total EET HR: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> MIN: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>		AÉRODROME DE DÉGAGEMENT À DESTINATION / Destination alternate aerodromes <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>
				<< =
18 RENSEIGNEMENTS DIVERS / Other information <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>				
<< =				
19 RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES (À NE PAS TRANSMETTRE DANS LES MESSAGES DE PLAN DE VOL DÉPOSÉ) / Supplementary information (NOT TO BE TRANSMITTED IN FPL MESSAGES)				
AUTONOME / Endurance HR: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> MIN: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> → E / <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>		PERSONNES À BORD / Persons on board → P / <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>		RADIO ET BALISE D'URGENCE / Emergency radio UHF: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> VHF: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> RCO: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> c/b: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> → R / U V E
EQUIPEMENT DE SURVIE / Survival equipment POLAIRE / Polar: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> / <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> DÉSERT / Desert: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> / <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> MARITIME / Maritime: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> / <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> JUNGLE / Jungle: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> / <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> → S / P D M J		GILETS DE SAUVETAGE / Jackets LAMPES / LIGHT: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> / <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> FLUORES / FLUORE: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> / <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> UHF: <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> / <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/> → J / L F U V		
CANOTS / Dinghies → D / <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>	NOMBRE / Number <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>	CAPACITÉ / Capacity <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>	COUVERTURE / Cover <input style="width: 20px; height: 20px;" type="text"/>	COULEUR / Colour <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> << =
COULEUR ET MARQUES DE L'AÉRONEF / Aircraft colour and markings				
A / <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>				
→ N <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> << =				
PILOTE COMMANDANT DE BORD / Pilot-in-command C / <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/> << =				
DÉPOSÉ PAR / Filed by <input style="width: 100%; height: 20px;" type="text"/>		ESPACE RÉSERVÉ À DES FINS SUPPLÉMENTAIRES / Space reserved for additional requirements		

Figure A.01 : Formulaire du plan de vol

## ANNEXE 2

### MESSAGES CPDLC

Les messages les plus utilisés pour la liaison montante (uplink) sont les suivants :

- UL n°20 CLIMB TO AND MAINTAIN [altitude] (monter et maintenir cette altitude)
- UL n°175 REPORT REACHING [altitude] (instruction rapportant quand l'avion a atteint le niveau indiqué)
- UL n°169/170 Free Text (attribut normal d'urgence / attribut de détresse d'urgence)
- UL n°147 REQUEST POSITION REPORT (instruction rédigeant un rapport de position utilisé si le contrôleur ne reçoit pas un rapport de position).
- UL n°118 AT [position] CONTACT [unit] [frequency] (à la position indiquée l'unité d'ATS avec le nom indiqué d'unité d'ATS doit être entrée en contact sur la fréquence indiquée).
- UL n°0 UNABLE par ce message d'uplink ou de downlink le pilote ou le contrôleur informe et est au courant que le request(s) contenu dans le message associé ne puisse pas être satisfait. Si on utilise pour répondre à un message de plusieurs éléments (uplink ou downlink), il signifie qu'au moins un des éléments ne peut pas être satisfait donc le message entier est rejeté, même si quelques éléments pourraient être admis.
- UL n°82 CLEARED TO DEVIATE UP TO [direction] [distance offset] OF ROUTE (L'autorisation de déroger à la distance spécifiée de la route autorisée dans la direction indiquée)
- UL n°127 REPORT BACK ON ROUTE (instruction rapportant quand l'avion sera de retour sur l'itinéraire dégagé).
- UL n°117 CONTACT [unit] [frequency] (le pilote est requis à appeler à l'ATS à une telle fréquence)
- UL n°123 SQUAWK [code] le code spécifique (SSR code) est sélectionné
- UL n° 2 REQUEST DEFERRED (indique que l'ATS a reçu la demande mais il a été déferred jusqu'à plus tard. Le pilote est au courant que la demande soit évaluée et un à long terme retarde peut être prévu. L'échange n'est pas fermé et la demande sera répondue à quand allowed conditions.

- UL n° 121 AT [position] MONITOR [unit] [frequency] (à la position indiquée l'unité d'ATS avec le nom indiqué d'unité d'ATS doit être surveillée sur la fréquence indiquée.
- UL n°1 STANDBY c'est un message d'uplink ou de downlink, le pilote ou le contrôleur est au courant que la demande soit évaluée et il y aura un court terme de retard (dans un délai de 10 minutes). L'échange n'est pas fermé et la demande sera répondue quand les conditions le permettront.

Les messages les plus utilisés pour la liaison descendante:

- DL n°48 POSITION REPORT [position report] (rapporte la position actuelle de l'avion quand le pilote appuie sur le bouton pour envoyer ce message. ATS s'attend à des rapports de position basés sur ce message de downlink)
- DL n°0 WILCO le message de downlink de WILCO indique au contrôleur que le pilote se conformera entièrement à l'instruction contenu dans le message associé d'uplink.
- DL n°9 REQUEST CLIMB TO [altitude] (demande de monter à une telle altitude)
- DL n°72 REACHING [altitude] (avis que l'avion a atteint le niveau indiqué)
- DL n°67/68 Free Text (attribut normal d'urgence/ attribut d'urgence de détresse)
- DL n°66 DUE TO AIRCRAFT PERFORMANCE ((utilisé pour expliquer les raisons du message de l'opérateur d'avion)
- DL n°3 ROGER également un message d'uplink ou de downlink, ROGER est la seule réponse correcte à n'importe quel message des textes libres d'uplink
- DL n°27 REQUEST WEATHER DEVIATION UP TO [distanceoffset] [direction] OF ROUTE (demande d'une déviation de temps jusqu'à la distance indiquée)
- DL n°2 ERROR [error information] (le système a produit un message que l'avionique a détecté une erreur)
- DL n°65 DUE TO WEATHER (utilise pour expliquer les raisons du message de l'opérateur d'avion)
- DL n°41 BACK ON ROUTE (l'avion a regagné la route autorisée)
- DL n°29 CLIMBING TO [altitude] (notification à s'élever au niveau indiqué)

### **ANNEXE 3**

#### **MODELE OSI**

L'ISO a spécifié un modèle d'architecture des logiciels pour les réseaux de télécommunication où les fonctionnalités réseaux sont réparties dans sept couches logicielles. Ce modèle s'appelle OSI (Open System Interconnect). Chaque couche possède son rôle et remplit des fonctions bien définies et limitées [52]:

- Couche 1: Physique : sa fonction principale est le transport des informations binaires. C'est à ce niveau que l'on choisit le type de transmission, le débit du canal de transmission des données sur le média et le type de dialogue point à point ou point multipoint avec les autres nœuds du réseau. Elle échange des trames d'informations avec la couche liaison de données.
- Couche 2 : Liaison : elle reçoit les trames de la couche physique qu'elle assemble en paquet pour la couche réseau. La fonction majeure de cette couche est le control et la détection des erreurs de transmission des trames reçues de la couche physique.
- Couche 3 : Réseau : elle recense en permanence les stations présentes dans le réseau et enregistre leur adresse, ce qui lui permet de tenir à jour un tableau des stations du réseau et leur état (en service ou hors service) : c'est sa table de routage. Le contrôle de flux est une autre des missions de cette couche.
- Couche 4 : Transport : elle assure le transfert de données entre deux entités de session.
- Couche 5 : Session : elle synchronise le dialogue entre deux applications et contrôle les services offerts par la couche transport. Elle identifie les applications mais elle ne gère pas la transmission de données.
- Couche 6 : Présentation : elle gère la description des données et la syntaxe utilisée pour structurer les données. Elle présente les données de façon identique aux deux extrémités d'une connexion logique, elle permet de définir des environnements.
- Couche 7 : Application : elle ne traite pas les problèmes de communication, elle offre un cadre d'accueil aux tâches qui doivent être en relation. C'est l'interface offerte à l'utilisateur pour communiquer. Elle définit les interactions entre l'utilisateur et le système de communication.

## ANNEXE 4

### MODULATIONS

Au cours d'une transmission numérique, l'information transmise est une donnée binaire.

L'information transmise est portée à travers une suite binaire dont le nombre dépend du type de modulation.

#### A4.1 Modulation binaire

Une modulation binaire est une modulation au cours de laquelle l'information est transmise à travers une suite de un bit 0 ou 1.

#### A4.2 Modulation M-aires :

Lorsque plusieurs bits  $M$  sont utilisés pour transmettre une information, on parle de modulation M-aire dont la suite binaire est appelée symbole. Le nombre de bits composant un symbole au cours d'une modulation M-aire est défini par :

$$n = \log_2(M) \quad (\text{A4.01})$$

#### A4.3 Constellation :

La constellation est une représentation de chaque symbole à transmettre à partir de son amplitude et sa phase.

Pour une constellation, plus les symboles sont espacés, plus la probabilité de confondre ces deux symboles est faible.

#### A4.4 Modulation par déplacement de phase (MDP)

Les Modulations par Déplacement de Phase (MDP) sont aussi appelées par leur abréviation anglaise : PSK pour "Phase Shift Keying".

Le signal modulé issu d'une Modulation par Déplacement de Phase est défini par :

$$m(t) = Aa(t)\cos(w_0t + \varphi_0) - Ab(t)\sin(w_0t + \varphi_0) \quad (\text{A4.02})$$

Les deux signaux  $a(t)$  et  $b(t)$  sont définis par :

$$a(t) = \sum_k a_k g(t - KT) = \sum_k \cos(\varphi_k) g(t - KT) \quad (\text{A4.03})$$

$$b(t) = \sum_k b_k g(t - KT) = \sum_k \sin(\varphi_k) g(t - KT) \quad (\text{A4.04})$$

- Les constellations MDP-M :

Pour une MDP-M représentant une modulation de Phase correspondant à des symboles M-aires, les symboles  $a_k$  et  $b_k$  prennent respectivement leurs valeurs dans l'alphabet  $\cos(\varphi_k)$  et  $\sin(\varphi_k)$  tel que  $\varphi_k$  est défini par :

$$\varphi_k = \frac{\pi}{M} + k \frac{2\pi}{M} \text{ pour } M > 2 \quad (\text{A4.05})$$

$$\varphi_k = 0 \text{ ou } \varphi_k = \pi \text{ pour } M=2 \quad (\text{A4.06})$$

#### A4.5 Modulation QAM :

Les modulations d'amplitude sur deux porteuses en quadrature (MAQ) sont dites modulation bidimensionnelle.

Le signal modulé issu de ce type de modulation est défini par :

$$m(t) = a(t) \cos(w_0 t + \varphi_0) - b(t) \sin(w_0 t + \varphi_0) \quad (\text{A4.07})$$

Le signal modulé est d'une part bidimensionnelle puisqu' il est composé de deux signaux et d'autre part en quadrature car ces deux signaux sont en quadrature en phase.

Les deux signaux  $a(t)$  et  $b(t)$  sont définis par :

$$a(t) = \sum_k a_k g(t - KT) \quad (\text{A4.08})$$

$$b(t) = \sum_k b_k g(t - KT) \quad (\text{A4.09})$$

Les symboles  $a_k$  et  $b_k$  prennent respectivement leurs valeurs dans deux alphabets à « M » éléments  $(A_1, A_2, \dots, A_M)$  et  $(B_1, B_2, \dots, B_M)$  donnant ainsi naissance à une modulation possédant un nombre  $E = M^2$  états.

Généralement lorsque les symboles  $a_k$  et  $b_k$  prennent leurs valeurs dans l'alphabet défini par :

$$A_i, B_i = \{\pm d, \pm 3d, \pm 5d, \dots, \pm(M-1)d\}$$

Où  $M = 2^n$

On obtient alors une modulation à  $2^{2n}$  états dont l'état est représenté par un couple  $(a_k, b_k)$  qui est représenté par un symbole complexe  $c_k = a_k + jb_k$  avec une constellation à contour carré.

## ANNEXE 5

### PORTION DU CODE SOURCE MATLAB

#### A5.1 Fichier main.m :

C'est le code qui permet d'afficher les courbes représentant la performance de L-DACS1 dans les canaux aéronautiques en termes de taux d'erreur binaire en fonction du SNR. Ce code est le suivant :

```
clc
clear
close all

% Paramètres
EbN0dB = [0:10:50];
EsN0dB = EbN0dB - 10*log10(4) + 10*log10(50/64);
N_0 = 10.^( -EsN0dB / 10); % Puissance du bruit
t_stamp = 0; % temps d'envoi pour le modèle Jakes

+libs.fig('width', 15, 'height', 15, 'fontsize', 10 );
semilogy(EbN0dB, [BER_FLAT; BER_AWGN]')
legend('Rayleigh', 'AWGN');
xlabel('SNR')
ylabel('TEB')
```

#### A5.2 Fichier ldacs1.m :

C'est le code source pour les étapes de la transmission de données dans le système L-DACS1 pour une liaison RL.

```
function [ BER ] = ldacs1( N_0, channel_type, t_stamp )

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Simulation
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Trame RA
[ra_opportunity_AS1, ra_opportunity_AS2, offsets] = tx.raFrame( false );

% Modulation des signaux transmis
% par AS 1 at AS2
tx_ra_AS1 = 64/sqrt(50)* ifft( ra_opportunity_AS1,[],2 );
tx_ra_AS2 = 64/sqrt(50)* ifft( ra_opportunity_AS2,[],2 );

% Préfixe cyclique
tx_ra_AS1 = [ tx_ra_AS1(:,54:64) tx_ra_AS1 ];
tx_ra_AS2 = [ tx_ra_AS2(:,54:64) tx_ra_AS2 ];
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Continuation de la transmission si la synchronisation est en succès
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

BER = 0;
Bits = 0;

for ii = 1:4 % 4 Multi-trames

% Génération de données binaires pour un mapper, suffisamment assez pour un
% multi-trame
[ dataBiIn, tileAssigns ] = generateData( 160 );

% Map de données binaires en symbole 16QAM
tx_symbols_AS1 = mapper( dataBiIn(:,1) );
tx_symbols_AS2 = mapper( dataBiIn(:,2) );

% Estimation de canal
[ chanEst, tile_data_pos ] = rx.channelEstimator( rx_data_symbols );

% Egalisation
[symbols_in_tiles, equalized_data] = rx.equalization( chanEst, rx_data_symbols,
tile_data_pos );

% Arrangement des symboles dans les tiles en vecteur
symStream = reshape(symbols_in_tiles.', [], 1);
[dataBiOut, symsQuantized] = mapper( symStream, 'DeMap');

% Computation BER
Bit_errors = sum( dataBiOut ~= sum(dataBiIn,2) );
Bits = Bits + size(dataBiOut,1);

end

BER = Bit_errors / Bits;

end

```

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] OACI : « *Manuel de réseau de télécommunication aéronautique (ATN)*», Document 9578-AN/935 Première Edition
- [2] ASECNA Service CNS/ATM, « *Communications, Navigation and Surveillance/Air Traffic Management (CNS/ATM)*», Document technique, 2011
- [3] Organisation de l'Aviation Civile Internationale, « *La Convention relative à l'aviation civile internationale* », 1944
- [4] P. Lépinard, « *Importation d'un plan de vol dans EURONAV III* », Juillet 2007
- [5] AIS ASECNA, « *Service de l'information aéronautique, Acheminement des messages de plan de vol, ENR /1-5-01/16* », Octobre 2002
- [6] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Plan\\_de\\_vol](http://fr.wikipedia.org/wiki/Plan_de_vol), 2015
- [7] Organisation de l'Aviation Civile Internationale, « *Communications air-sol et air-air aéronautiques, scénarios relatifs aux communications mobiles aéronautiques* », Onzième conférence de navigation aérienne, Montréal, Octobre 2003
- [8] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Bande\\_aéronautique\\_VHF](http://fr.wikipedia.org/wiki/Bande_aéronautique_VHF), 2015
- [9] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Contrôle\\_du\\_trafic\\_aérien](http://fr.wikipedia.org/wiki/Contrôle_du_trafic_aérien), 2015
- [10] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Alphabet\\_radio](http://fr.wikipedia.org/wiki/Alphabet_radio), 2015
- [11] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Contrôle\\_d'aérodrome](http://fr.wikipedia.org/wiki/Contrôle_d'aérodrome), 2015
- [12] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Phraséologie>, 2015
- [13] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Classe\\_de\\_l'espace\\_aérien](http://fr.wikipedia.org/wiki/Classe_de_l'espace_aérien), 2015
- [14] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Espace\\_Aérien](http://fr.wikipedia.org/wiki/Espace_Aérien), 2015
- [15] M. Benejean, « *Informatisation des productions d'information et des activités de communication dans les relations pilotes-contrôleurs : contradictions et reconfigurations entre technologies en projet et mises en pratiques* », édition 2013.
- [16] <http://www.1001crash.com>, 2015
- [17] F. Besse, « *Réseaux ad hoc aéronautiques* », édition 2014.

- [18] M. Benejean, « *La communication pilotes-contrôleurs médiatisée dans le cadre d'une évolution technologique des artefacts de transmission des messages* », édition 2008.
- [19] N. NEJI, « *Etude de la compatibilité radioélectrique du futur système de communication aeronautique en bande L* », édition 2011.
- [20] A. Badarou, « *Etude et développement d'une architecture radio numérique innovante dans le contexte des communications aéronautiques* », édition 2013.
- [21] Organisation de l'Aviation Civile Internationale, « *Mise en œuvre de l'ADS/CPDLC dans la FIR Antananarivo* », Juin 2001
- [22] [http://www.sasflightops.com/fans\\_cpdlc.html](http://www.sasflightops.com/fans_cpdlc.html), 2015
- [23] [http://www.skybar.aero/index.php/Controller\\_Pilot\\_Data\\_Link\\_Communications\(CPDLC\)](http://www.skybar.aero/index.php/Controller_Pilot_Data_Link_Communications(CPDLC)), 2015
- [24] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Circulation\\_aérienne](http://fr.wikipedia.org/wiki/Circulation_aérienne), 2015
- [25] F. Gil, « *analysis of the cpdlc real time characteristics and the mode S data link capacity* », édition 2008,
- [26] P. Souchu, « *Mise en œuvre de l'ADS, DSNA/DTI/SO/3* », Juillet 2006, Octobre 2002
- [27] Organisation de l'Aviation Civile Internationale, Réunion régionale spéciale de navigation aérienne (RAN) Afrique-Océan Indien (AFI), « *stratégie de mise en œuvre des systèmes cns dans la région AFI* », Novembre 2008
- [28] <http://www.tls.cena.fr/divisions/CEP/DL/cpdlc>, 2015
- [29] <http://www.w3.org/TR/html4/loose.dtd/ads.html>, 2015
- [30] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Radar\\_primaires](http://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_primaires), 2015
- [31] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Radar\\_secondaire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_secondaire), 2015
- [32] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Système\\_de\\_contrôle\\_automatisé\\_du\\_trafic\\_aérien](http://fr.wikipedia.org/wiki/Système_de_contrôle_automatisé_du_trafic_aérien), 2015
- [33] European Organization for the Safety of Air Navigation, « *L-DACSI System Definition Proposal: Deliverable D2* », 2009
- [34] J. Micallef, R. Womersley, « *FCI Technology Investigations: L-band Compatibility Criteria and Interference Scenarios Study - Deliverables C7: Assessment on the potential use of the onboard suppression bus for L-DACS operation*, » 2009

- [35] Wavecom, "*VDL Mode 2 - A New Aeronautical Data Link*", 2011
- [36] D. Sanjin, "*Increased Capacity for VDL Mode 2 Aeronautical Data Communication*", Decembre 2010
- [37] Doc 9776-AN/970 OACI, « *Manuel de la liaison numérique VHF (VDL) mode 2* », Première édition, 2001
- [38] N. Rakotoarimanana, « *Evaluation de la performance du réseau ATN cas de Madagascar* », décembre 2004
- [39] Avionics Engineering Center School of Electrical and Computer Science Ohio University Athens, "*Modifying and Testing ATC Controller Interface (CI) for Data Link Clearances*", September 2001
- [40] C. Sheehe, "*aviation communications emulation testbed*", NASA Glenn Research Center 22 Juin 1998
- [41] International Civil Aviation Organization, "*First meeting of ICAO ACP Working Group T (Technology) - Final Report*," ICAO, Tech. Rep., 2007.
- [42] A. N. Andriamanalina, "*Communication numérique*", Cours I4 – TCO, Dép. TCO.-E.S.P.A., A.U. : 2013-2014.
- [43] European Organization for the Safety of Air Navigation, "*L-DACSI System Definition Proposal: Deliverable D2*", EUROCONTROL, Tech. Rep. Edition 1.0, 2009.
- [44] European Organization for the Safety of Air Navigation, "*L-DACSI System Definition Proposal: Deliverable D3: Design Specifications for L-DACSI Prototype*," EUROCONTROL, Tech. Rep. Version 1.0, 2009.
- [45] T. E Rakotondraina., "*Codage canal et codage source*", Cours I5 – TCO, Dép. TCO.-E.S.P.A., A.U. : 2014-2015.
- [46] A. Glaunec, « *Modulation multiporteuses* », 1997
- [47] T.Graupl, "*L-DACSI Data Link Layer Design Performance*," SessionH\_AirGround\_Integration/04-Graeupl, 2009
- [48] H. Abdulkarim, "*Comparison of Proposals for the Future Aeronautical Communication System LDACS*", 2012
- [49] Future Air Navigation System, "*Flight Operations Support & Services*", Avril 2007
- [50] F. Jambon, J. Coutaz, Laboratoire de Génie Informatique, Institut IMAG, « *contrôle aérien*

*et liaisons de données : vers un plus grand partage de l'information », Décembre 1998*

- [51] A. N. Andriamanalina, « *modélisation des différents canaux des systèmes de communication numériques* », Juin 2012
- [52] M. A. Rakotomalala, « *Réseau des télécommunications* », Cours I4 – TCO, Dép. TCO.-E.S.P.A., A.U. : 2013-2014
- [53] N. D. Ravonimanantsoa, « *Théorie des simulations de réseau* », Cours I5 – TCO, Dép. TCO.-E.S.P.A., A.U. : 2014-2015.
- [54] <http://www.mathworks.com/>, 2015
- [55] J. Nakad, « *Allocations de ressources radio dans un réseau local sans fil (WLAN) de type OFDM* », 2003
- [58] A. Boyer, « *Canaux de Transmissions Bruités*», Octobre 2010.
- [59] F. Randimbindrainibe, « *Probabilités et statistiques* », Cours I2 – TCO, Dép. TCO.-E.S.P.A., A.U. : 2011-2012.

## FICHE DE RENSEIGNEMENT

**Nom :** RAFALINIRINA

**Prénoms :** Haingomalala Sandra

**Adresse de l'auteur :** Cité Ambatomaro Bloc 404 Porte E

**Téléphone :** +261 34 79 172 15

**E-mail :** sandrahaingomalala@gmail.com



**Titre du Mémoire :**

ETUDE DE LA PERFORMANCE DU FUTUR SYSTEME L-DACS1 A LA PLACE DE LA  
COMMUNICATION ENTRE PILOTE ET CONTROLEUR PAR LIAISON DE DONNEES

**Nombre de pages :** 98

**Nombre de tableaux :** 4

**Nombre de figures :** 68

**Directeurs de mémoire :** Monsieur RAKOTONDRAINANA Tahina Ezéchiel

Maître de Conférences

Tel : +261 34 19 082 00

e-mail : tahina.ezechiel@gmail.com

Monsieur RAKOTOARIMANANA Nirison

Inspecteur de la navigation aérienne de Madagascar, Chef de  
département de la navigation aérienne, Docteur-Ingénieur Electronique,

Tel : +261 32 07 240 07

e-mail : nirisonrakotoari@acm.mg

## **RESUME**

Ce travail présente l'évolution des différents systèmes aéronautiques au fil du temps liés aux différents problèmes rencontrés dans l'évacuation des données dans le secteur aéronautique.

Les systèmes actuels ne seraient plus en mesure de suivre l'évolution du trafic aérien. L'étude de performance d'un système en cours L-DACS1, opérationnel à partir de 2020 est l'objet de ce mémoire. Il a pour but de voir les dégradations que peuvent présenter les signaux dans l'environnement aéronautique pour ce futur système afin de prévoir des améliorations pour atteindre l'objectif de haut débit de transmission avec un taux d'erreur acceptable.

**Mots clés :** Aéronautique, CPDLC, L-DACS 1, Codage, OFDM.

## **ABSTRACT**

This work presents the evolution of different aeronautical systems over time related to the various problems encountered in the discharge data in the aviation sector.

The current systems are no longer able to follow the development of air traffic. The performance study of a current system L- DACS, operational from 2020 is the subject of this work. It aims to see the damage that may have the signals in the aviation environment for the future system to provide for improvements to achieve the goal of high transmission rate with an acceptable error rate.

**Key words:** Aeronautic, CPDLC, L-DACS 1, Coding, OFDM