

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1



INSTITUT D'AERONAUTIQUE ET DES ETUDES SPATIALES

Département : Navigation Aérienne

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention d'un diplôme de MASTER en aéronautique

Option : CNS/ATM

THEME

**Etude du nouveau système de surveillance aérienne
et élaboration d'un programme d'extraction et
exploitation des données du message ADS-B (DF17).**

Réalisé par :

- ❖ Mr. MELIANI Ali
- ❖ Mr. DRAI Alla Eddine

Dirigé par :

- ❖ Mr. BOUDANI Abdelkader



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH tout puissant de nous avoir donné la force, la santé, le courage et la patience pour la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur, Mr BOUDANI Abdelkader pour son aide, encouragements et leurs précieux conseils tout au long de notre travail.

Nos sincères remerciements vont aussi à monsieur le président et messieurs les membres du jury pour avoir expertisé notre travail et nous avoir honorés par leurs présences.

Nous exprimons nos profondes gratitudeux aux enseignants de l'institut de l'Aéronautique de l'Université de Saad Dahleb Blida 1.

Un grand merci à nos familles et nos parents en particulier pour leur soutien, leurs encouragements et leurs sacrifices tout au long de notre parcours scolaire.

Enfin, Que tous ceux et celles qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, trouvent ici nos profonds remerciements.

Dédicace

Je dédie ce travail à celle qui m'a donné la vie qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma très chère mère...

A mon père, qui a été mon ombre durant toutes mes années d'étude, qui a veillé à me donner de l'aide, à m'encourager et à me protéger, que Dieu le garde et le protège.

A mes adorables sœurs qui m'ont donné le sens de la vie, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu vous protège et vous garde.

A mes chère grands-mères et grands-pères et toute ma famille Qui m'ont accompagnées par leurs prières, leur douceur, puisse Dieu leur prêter longue vie et beaucoup de santé et de bonheur.

A mon binôme Alla et toute la famille DRAI.

A mes meilleures camarades: Ahmed, Chakib, Foudhil, Arslan, Billel, Kada, Zaki, Walid, Hamza, Hocine, Farid.

Une spéciale dédicace aux ceux qui je partage avec eux tous les moments de ma vie : Tout l'équipe de Venezia et toute l'équipe CNS.

Et à tous ceux que j'ai omis de citer, qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, et qui se reconnaîtrons dans ces lignes.

Ali.

Dédicace

Je dédie ce travail à celle qui m'a donné la vie qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma très chère mère...

A mon père, qui a été mon ombre durant toutes mes années d'étude, qui a veillé à me donner de l'aide, à m'encourager et à me protéger, que Dieu le garde et le protège.

A mon frère et mes adorables sœurs qui m'ont donné le sens de la vie, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu vous protège et vous garde.

A mes chère grands-mères, grands-pères et toute ma famille Qui m'ont accompagnées par leurs prières, leur douceur, puisse Dieu leur prêter longue vie et beaucoup de santé et de bonheur.

A mon binôme Ali et toute la famille MELIANI.

A mes meilleures camarades: Ahmed, Chakib, Foudhil, Billel, Kada, Zaki, Walid, Sami, Amine, Hocine, Farid, Amar.

Une spéciale dédicace aux ceux qui je partage avec eux tous les moments de ma vie : Billel, Hamza, Youcef, Nouredine, Hacem, toute l'équipe CNS.

Et à tous ceux que j'ai omis de citer, qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, et qui se reconnaîtrons dans ces lignes.

Alla.

Résumé

Ce travail traite de la définition d'un nouveau système de surveillance des aéronefs, la surveillance dépendante automatique en diffusion (ADS-B), que la Federal Aviation Administration (FAA) introduit actuellement avec une mise en œuvre obligatoire aux États-Unis d'ici à 2020.

L'ADS-B est un système utilisé pour déterminer la position d'un aéronef, puis diffuser cette information, ainsi que son altitude, son indicatif d'appel, son cap et son type d'aéronef (c'est-à-dire sans signal d'interrogation SSR) à destination des autres aéronefs et du trafic aérien. Contrôler les installations au sol. Il a été construit en utilisant des aspects similaires du mode de transmission de surveillance de l'avion actuel appelé Mode S ou mode select. Deux fréquences optionnelles sont disponibles pour l'ADS-B: la première en mode S 1090ES et la seconde en UAT 978 MHZ, avec une longueur de liaison de données de 112 bits.

Ce mémoire a principalement porté sur le décodage des messages ADS-B. MATLAB a été utilisé pour décoder ces messages. Un message ADS-B a été utilisé dans cette recherche, qui est un format de liaison descendante (DF 17).

Mots clés : surveillance, ADS-B, radar, décodage, donnée.

Abstract

This research addresses the definition of a new aircraft surveillance system, Automatic Dependent Surveillance (ADS-B), as the Federal Aviation Administration (FAA) currently introduced with mandatory implementation in the United States by 2020.

ADS-B is a system used to determine the position of an aircraft and then broadcast this information, as well as its altitude, call sign, heading and type of aircraft (i.e., without an SSR query signal) to other aircraft and air traffic. controlling ground facilities. It was constructed using similar aspects of the current aircraft's monitoring mode called Mode S or select mode. Two optional frequencies are available for ADS-B: the first in S 1090ES mode and the second in UAT 978 MHZ, with a data link length of 112 bits.

This thesis focused on the decoding of ADS-B messages. MATLAB was used to decode these messages. An ADS-B message was used in this search, which is a downlink format (DF 17).

Key words: Surveillance, ADS-B, radar, decoding, Data.

الملخص

سيتناول هذا البحث التعريف عن نظام ملاحه جديد أطلق بواسطة إدارة الطيران الفيدرالية الأمريكية (FAA) ويطلق عليه نظام البث الاستطلاعي المستقل التلقائي (ADS-B) يقترح أن يكون من التوصيات ضرورية التطبيق في كل أنحاء العالم بحلول عام 2020.

و هو نظام يستخدم لتحديد موقع الطائرة ومن ثم بث هذه البيانات - متضمنة الإرتفاع ,وجهة الطائرة ونوعها – تلقائيا (أي بدون إشارة إستجواب من رادار ثانوي) إلى الطائرات الأخرى وإلى مرافق التحكم في حركة الأجواء. هذا النظام تم بناؤه على معايير مشابهة لنظام الإرسال(الوضع اس) أو وضع الاختيار.

هنالك ترددان يتم استخدامهما بواسطة نظام البث الإستطلاعي المستقل التلقائي, الأول 1090 ميغا هيرتز التردد الممتد والثاني 978ميغا هيرتز الخاص بترانسيفر الوصول العالمي ,كلا الترددين يرسلان بيانات طولها 112 بيت.

التركيز الأساسي لهذا البحث كان على فك تشفير رسائل هذا النظام باستخدام برنامج الماتلاب. للتذكير هذا البحث يختص بالرسائل ذات (صيغة الربط 17).

الكلمات المفتاحية: مراقبة، ADS-B ، رادار، فك التشفير،البيانات .

Table des matières

Remerciement	I
Dédicace	II
Résumé	IV
Table de matière	VI
Liste de figure	IX
Liste de tableaux	XII
Listes des acronymes et abréviations	XIII
Liste des symboles et notations	XV
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la surveillance aérienne	3
I.1 La surveillance :	3
I.1.1 Catégories de capteurs de surveillance :	3
I.2 Le système radar	4
I.2.1 Principe du fonctionnement	5
I.2.2 Différentes classification de radar :	5
I.2.3 Le radar primaire :	7
I.2.4 Radars Secondaires :	12
I.2.5 Radars primaire et secondaire combinés :	17
I.3 Multilatération (MLAT) :	19
I.4 Surveillance dépendante automatique (ADS) :	20
I.4.1 ADS-C :	20
I.4.2 ADS-B :	21
Chapitre II Surveillance Dépendant Automatique –Diffusion(ADS-B).....	25
II.1 Historique	24
II.2 description général	24

II.2.1	Définition.....	24
II.2.2	Objectif.....	24
II.2.3	L'abréviation :.....	26
II.3	Principe.....	26
II.4	Catégories d'application d'ADS-B	27
II.5	L'équipement avionique de l'ADS-B :	27
II.6	. Les technologies de l'ADS-B	29
II.6.1	Le 1090 ES (1090 MHz Extended Squitter).....	29
II.6.2	VDL mode 4	30
II.6.3	L'UAT.....	30
II.7	Services ADS-B :	31
II.7.1	Service d'information sur la circulation – diffusion générale (TIS-B).....	31
II.7.2	Service d'information de vol – diffusion générale (FIS-B).....	32
II.8	Surveillance dépendante automatique - retransmission (ADS-R) :	33
II.9	Paramètres de performance ADS-B :	35
II.9.1	La précision ADS-B	35
II.9.2	L'intégrité ADS-B	36
II.9.3	La continuité ADS-B.....	36
II.9.4	La disponibilité de l'ADS-B	37
II.9.5	La latence ADS-B	37
II.10	Différence entre RADAR et systèmes ADS :	38
II.11	Amélioration d'ADS-B de la limite de système surveillance actuel.....	39
II.12	Mise en application	42
II.13	Sécurisation de l'ADS-B:	44
Chapitre III :Décodage de donnée de message ADS-B		45
III.1	Principes de base de l'ADS-B	45
III.1.1	Structure des messages :.....	45

III.1.2	Adresse de l'OACI :.....	46
III.1.3	Types de messages ADS-B :.....	47
III.1.4	Somme de contrôle ADS-B :.....	47
III.2	Identification de l'aéronef.....	48
III.3	Rapport de position compact.....	50
III.3.1	Le CPR et les fonctions.....	50
III.3.2	Nombre de zones de latitude géographiques.....	50
III.3.3	La fonction floor(x).....	50
III.3.4	La fonction de module.....	51
III.3.5	Nombre de zones de longitude.....	51
III.4	Positions aéroportées.....	51
III.4.1	Position globale non ambiguë (décodage avec deux messages).....	52
III.4.2	Position localement non ambiguë (décodage avec un message).....	56
III.5	Vitesse aéroportée.....	58
III.5.1	Sous-type 1 (vitesse au sol).....	59
III.5.2	Sous-type 3 (vitesse).....	61
Chapitre IV : résultats et simulation.....		64
IV.1	Aperçu de chapitre.....	64
IV.2	Validation du script ADS-B.....	64
IV.3	Résultats du décodage et de la simulation.....	64
IV.3.1	Test d'erreur :.....	65
IV.3.2	Détection de l'indicatif d'appel de l'avion « callsign ».....	67
IV.3.3	Calcul de la Position globale non ambiguë.....	69
IV.3.4	Calcul de la position locale no ambiguïté :.....	74
IV.3.5	Calcul de Vitesse aéroportée :.....	77
Conclusion générale et perspectives.....		83
Bibliographie.....		84

Annexes 86

Figure I.1 : Principe du radar	5
Figure I.2 : Les radars mono statiques	5
Figure I.3 : Les radars bi-statiques	6
Figure I.4 : Les radars multistatiques	6
Figure I.5 : Le SRE-M7	8
Figure I.6 : Radar ASR 12	8
Figure I.7 : Radar militaire d'approche de précision PAR-80.....	9
Figure I.8 : Radar de surface	9
Figure I.9 : le fonctionnement du radar météorologique	10
Figure I.10 : Principe de fonctionnement du PSR	11
Figure I.11 : Principe fondamental du radar secondaire	12
Figure I.12 : Radar secondaire	14
Figure I.13 : Compatibilité entre SSR Mode A / C et Mode S	16
Figure I.14 : Radars primaire et secondaire.....	18
Figure I.15 : Architecture multilateration de base.....	19
Figure II.1 : ADS-B transpondeur	26
Figure II.2 : Principe de l'ADS-B.....	27
Figure II.3 : fonctionnement de l'ADS-B "Out"	28
Figure II.4 : fonctionnement de l'ADS-B IN	29
Figure II.5 : Aviation transpondeur VDL mode 4.....	30
Figure II.6 : données de liaison montante d'aéronefs non équipés ADS-B	32
Figure II.7 : liaison montante d'informations météorologiques et autres informations	32
Figure II.8 : Affichage de la météo avec ADS-B.....	33
Figure II.9 : réticulation des données ADS-B	34
Figure II.10 : L'écran TAS-A d'Avidyne	35
Figure II.11 : Antenne d'ADS-B	39

Figure II. 12 : couverture ADS-B et ADS-C dans le monde.....	42
Figure II. 13 : couverture ADS-B et radar dans L'Australie.....	43
Figure IV.1: Organigramme générale du programme.....	64
Figure IV.2: Organigramme de test d'erreur.....	65
Figure IV.3: résultats de simulation de l'exemple n01 de test l'erreur	65
Figure IV.4: résultats de simulation de l'exemple n02 de test l'erreur.	66
Figure IV.5: Organigramme de l'indentification de l'aéronef.....	67
Figure IV.6 : résultats de simulation de l'exemple n01 de l'identification d'un aéronef...68	
Figure IV.7: résultats de simulation de l'exemple n02 de l'identification d'un aéronef...68	
Figure IV.8: Organigramme pour calculer latitude	69
Figure IV.9 : Organigramme de calculer longitude	70
Figure IV.10: Organigramme de calcule l'altitude	71
Figure IV.11: affichage de donnée de 1er message 'exemple n01'.....	72
Figure IV.12: affichage de donnée de 2em message 'exemple n01'	72
Figure IV.13 résultats de simulation de calculer de la position 'ex01'.....	72
Figure IV.14 Affichage de donnée de 1er message exemple n02	73
Figure IV.15 Affichage de donnée de 1er message exemple n02	73
Figure IV.16 Résultats de simulation de calculer de la position "ex02"	73
Figure IV.17: Organigramme de position locale no ambiguïté	74
Figure IV.18: Affichage de donnée de message exemple 01	75
Figure IV.19: Résultats de simulation de calculer de la position « ex01 »	75
Figure IV.20: Affichage de donnée de message exemple 02	76

Figure IV.21: Résultats de simulation de calculer de la position « ex02 »	76
Figure IV.22: organigramme de calcul de la vitesse.....	77
Figure IV.23: Organigramme de taux horizontale de sous-type 01.....	78
Figure IV.24: Affichage de donnée de message en décimal ‘ex01’	79
Figure IV.25: Résultats de simulation de l'exemple n01	79
Figure IV.26: Affichage de donnée de message en décimal ‘ex02’	79
Figure IV.27: Résultats de simulation de l'exemple n02	80
Figure IV.28: Organigramme de taux horizontale du vitesse de sous type 03	80
Figure IV.29: Organigramme de taux verticale sous type 01 ou 03	81
Figure IV.30: Affichage de donnée de message en décimal	82
Figure IV.31: Résultats de simulation de l'exemple	82

Tableau I.1 : Catégories de technologies de surveillance existantes	4
Tableau I.2 : Caractéristiques de performance du capteur de surveillance	23
Tableau II.1 : Comparaison entre VDL, MOD 4 et 1090ES	31
Tableau II.2 : Résumé des exigences de performance de la surveillance ADS-B	37
Tableau II.3 : comparaison entre le système ADS-B et le système de surveillance	39
Tableau III.1 : composition de message ADS-B	45
Tableau.III.2 : Structure de message ADS-B	45
Tableau.III.3 : présentation de donnée de message avec 3 bases	46
Tableau.III.4 : Code de type ADS-B et contenu	47
Tableau III.5 : présentation de champ de donnée de message d'identification	48
Tableau.III.6 : présentation de caractères de message d'identification	49
Tableau.III.7 : Bits de message de position aéroportés expliqués	51
Tableau.III.8 : Présentation de données de 2 messages en binaire.....	52
Tableau.III.9 : La représentation des coordonnées par CPR en binaire	53
Tableau.III.10 : La représentation des coordonnées par CPR en décimal	53
Tableau.III.11 : représentation de données de message de position en binaire	58
Tableau.III.12 : Représentation CPR de coordonnées	58
Tableau.III.13 : Structure de message de vitesse en hexadécimal	59
Tableau.III.14 : structure de donnée de message de vitesse en binaire	59
Tableau.III.15 : Explication des bits du message de vitesse dans l'air - Sous-type 1.....	59
Tableau.III.16 : Explication des bits du message de vitesse en vol - Sous-type 3.....	62

Listes des acronymes et abréviations

1090 ES	: 1090 MHz Extended Squitter
ADS-B	: Automatic Dependent Surveillance -Broadcast
ADS-C	: Automatic Dependent Surveillance-Contract
ADS-R	: automatique Surveillance dépendante - retransmission
ASTERIX	: All Purpose STructured Eurocontrol surveillance Information eXchange
CCR	: Centre de Contrôle Régional
CNS/ATM	: Communication, Navigation and Surveillance/Air Traffic Management
FTC	: Format Type Code
PSR	: Primary Surveillance Radar
RADAR	: Radio Detection And Ranging
RHP	: Radar Head Processor
RMM	: Radar Maintenance Monitor
RSA	: Radars de surveillance aérienne
RAP	: Radar d'approche de précision
SMR	: radar de mouvement de surface
SAACTA	: Système Algérien Automatisé de Contrôle du Trafic Aérien
GPS	: système de positionnement global
INS	: système de navigation inertielle
ATC	: Air Traffic Control
MLAT	: Multilatération
IFF	: Identification Friend or Foe
SPI	: identification de position spéciale
GNSS	: Global Navigation Satellite System
ATCRBS	: Air Traffic Control Radar Beacon System
CDTI	: Cockpit Display of Traffic Information
TDOA	: Time Difference Of Arrival
VFR	: Visual Flight Rules
IFR	: Instrument Flight Rules
SSR	: Secondary Surveillance Radar
TCAS	: Traffic Collision Avoiding System
TIS-B	: Traffic Information Service – Broadcast
FIS-B	: Flight Information Service – Broadcast

Listes des acronymes et abréviations

UAT	: Universal Access Transceiver
UTC	: Coordinated Universal Time
VDL mode 4	: VHF Data Link Mode 4
VHF	: Very High Frequency
DF	: Format de liaison descendante
CA	: Capacité
PI	: Parité
CRC	: redondance cyclique
FEC	: correction des erreurs d'acheminement
ARQ	: répétition automatique
TC	: code de Type
EC	: catégorie d'émetteur
C*	: un caractère
SS	: Statut de surveillance
NICsb	: NIC supplément-B
ALT	: Altitude
T	: Tempe
F	: Indicateur de trame pair / impair CPR
LAT-CPR	: Latitude au format CPR
LON-CPR	: Longitude au format CPR
CPR	: rapport de position compact
METAR	: Rapports météorologiques de l'aviation
SPECI	: Rapports météorologiques à l'aviation non routiniers
TAF	: Prévisions de zone terminale
NOTAM	: Avis aux aviateurs
SIGMET	: Conditions météorologiques des aviateurs
SUA	: Statut de l'espace aérien à usage spécial
TFR	: Restrictions de vol temporaires
PIREPS	: Rapports de pilote

Liste des symboles et notations

- $G(X)$: polynôme de générateur
- NZ : Nombre de zones de latitude géographiques entre l'équateur et un pôle
- $\text{Floor}(x)$: fonction qui définit comme la plus grande valeur entière k
- $\text{mod}(x, y)$: La fonction de module
- $NL(\text{lat})$: nombre de zones de longitude
- J : l'indice de latitude
- m : l'indice de longitude
- $Dlat$: la taille de la zone de latitude
- $Dlon$: la taille de la zone de longitude
- Lat : latitude
- T : temps
- Lon : longitude
- ALT : altitude
- S_{ns} : Vitesse Est-Ouest
- S_{ns} : Vitesse Nord-Sud
- V : Vitesse
- h : cap
- S_{vr} : le champ Vitesse vertical
- Vr : Le taux vertical réel

Introduction Générale

Introduction :

À mesure que le trafic aérien augmente chaque année, il est essentiel de disposer de meilleurs systèmes de surveillance, en particulier lorsqu'on navigue dans de mauvaises conditions (comme des conditions météorologiques défavorables). Le contrôle de la circulation aérienne (ATC) utilise des systèmes radar comme aide à la navigation de choix, mais en raison de l'augmentation exponentielle du trafic aérien, des systèmes plus sophistiqués et plus avancés ont été mis au point. Un système radar typique comprend un radar de surveillance primaire (PSR) et un radar de surveillance secondaire (SSR). Ces technologies de surveillance sont couplées à des communications radio pour construire un système ATC complet depuis les années 1950 [1].

Avec le développement des communications spatiales et d'Internet, les systèmes traditionnels de l'aviation civile vieillissants évoluent pour devenir des systèmes électroniques dotés de technologies sans fil évoluées pour fonctionner en tant que nœud mobile intelligent dans un réseau mondial d'informations comprenant des systèmes spatiaux, aériens et terrestres [2]. Le RADAR de surveillance primaire (PSR) et le RADAR de surveillance secondaire (SSR) sont omniprésents dans les systèmes ATC. Néanmoins, leurs limites entravent une adoption plus large dans les zones maritimes et éloignées en raison des coûts élevés.

La Federal Aviation Administration (FAA) a proposé une réforme complète de la surveillance radar (Next Gen). Pour ce faire, la FAA déploie une technologie relativement nouvelle appelée diffusion automatique de surveillance dépendante (ADS-B). Cette technologie permet aux aéronefs dotés d'un système de positionnement global (GPS) d'envoyer périodiquement leur position et d'autres informations aux stations au sol et aux autres aéronefs équipés de l'ADS-B présents dans la région. [3]

Par conséquent, les avions équipés de l'ADS-B peuvent avoir une image commune de la connaissance de la situation, ce qui est très important car les décisions peuvent être prises avec une conscience totale de l'impact sur les autres utilisateurs. En conséquence, des systèmes ADS-B ont été mis en place dans de nombreux pays et sont en voie de remplacer les radars et de devenir le pivot des systèmes ATM de nouvelle génération. Par exemple, la Federal Aviation Administration (FAA) exige que les aéronefs soient prêts pour l'ADS-B d'ici 2020 aux États-Unis [2].

Problématiques :

- Quelle est la surveillance aérienne actuelle ?
- Quelle est la surveillance aérienne moderne? Est qu'est ce qu'elle ajoute pour le domaine de surveillance aérienne ?
- Comment récupérer et décoder les données de navigation depuis le message ADS-B ?

Objectif :

Le but de cette recherche est d'examiner les messages de position ADS-B. L'ADS-B contient plusieurs formats de sous-types pour la diffusion des données d'aéronefs. Cette recherche portera sur le format de liaison descendante (DF) 17. Ces messages contiennent des informations telles que l'identifiant de l'aéronef, l'altitude, la latitude et la longitude, qui fournissent la position de la cible à insérer.

A cet effet, notre travail s'articulera autour de quatre axes. Le premier s'attachera aux: systèmes de surveillance aérienne. Le second introduira le concept ADS-B pour tenter de faire connaître cette technique relativement nouvelle, le troisième s'articulera sur le décodage de message ADS-B et extraire les données de l'avion. Le dernier axe représentera les résultats de simulation de programme.

Chapitre I

Généralités sur la surveillance aérienne

I.1 La surveillance :

La surveillance, qui fait référence aux méthodes utilisées pour garder la trace des aéronefs. La fonction de surveillance, dont la mise en œuvre comprend des capteurs, un système d’affichage et des procédures opérationnelles, fournit aux contrôleurs aériens la position des aéronefs afin de gérer l’espace et de gérer efficacement un espace aérien donné. Selon le type de capteur de surveillance, des informations supplémentaires sont également présentées, telles que l’identification et la vitesse de l’aéronef. En outre, la fonction de surveillance prend en charge un certain nombre d’autres applications telles que la prévision de trajectoire, la détection de conflit et la connaissance de la situation.

I.1.1 Catégories de capteurs de surveillance :

Les technologies de capteurs de surveillance peuvent être classées en trois catégories; Non coopératif indépendant, coopératif indépendant et coopératif dépendant. Le terme «non coopératif» désigne la capacité de détecter la position d’une cible sans compter sur la réponse de la cible au signal transmis par le capteur. Par ailleurs, le terme «coopérative» fait référence à la confiance du capteur dans la réponse de la cible au signal transmis (interrogation) afin d’en déduire la position de la cible. Un équipement (c'est-à-dire un transpondeur) relié à la cible répond à l’interrogation du capteur. Le transpondeur est un récepteur et émetteur de signal radio qui reçoit à une fréquence de 1030 MHz et émet sur une fréquence de 1090 MHz.

Le terme «indépendant» fait référence à la capacité du système de surveillance à déterminer la position d’une cible par lui-même, tandis que le terme «personne à charge» fait référence à la dépendance du système de surveillance à un système externe pour obtenir la position de la cible, par exemple. Dépendance à un système de navigation tel que le système de positionnement global (GPS).

Le tableau I-1 présente les catégories de technologies de surveillance existantes. La signalisation manuelle de la position par le pilote à l’ATC par radio est classée dans la catégorie Coopérative dépendante, car l’ATC au sol est tenu de répondre à l’appel pour signaler la position de l’aéronef. Le pilote dépend du système de navigation embarqué tel que le GPS ou le système de navigation inertielle (INS) pour obtenir la position de l’aéronef. Dans ce cas, le pilote / l’aéronef joue le rôle de système de surveillance pour transmettre la position de l’aéronef à l’ATC [4].

Tableau I.1 : Catégories de technologies de surveillance existantes [4]

Catégorie de surveillance	Technologie de surveillance
Indépendant non coopératif	<ul style="list-style-type: none"> • Radar de surveillance primaire (PSR)
Coopérative Indépendante	<ul style="list-style-type: none"> • Radar de surveillance secondaire (SSR) Mode A/C • Radar de surveillance secondaire (SSR) Mode S • Multilatération (MLAT)
Coopérative dépendante	<ul style="list-style-type: none"> • Rapport de position manuel (voix) • Surveillance dépendante automatique - Contrat (ADS-C) • Surveillance dépendante automatique - Diffusion (ADS-B) IN/OUT

I.2 Le système radar

Radar est l'acronyme anglais de *RA*dio *DE*tectio*N* *AN*d *R*ang*ING* traduit par « détection et télémétrie radio ». Le système des radars a été créé à la fin des années 1930, et son rôle a été déterminant dans la bataille d'Angleterre pendant la seconde guerre mondiale. C'est un instrument émettant et recevant des ondes électromagnétiques, il est utilisé pour localiser des objets dans l'espace et déterminer leur distance [5]. Les radars n'indiquent pas seulement la présence et la distance d'un objet éloigné, mais aussi déterminent sa position dans l'espace, sa taille, sa forme ainsi que sa vitesse et sa direction.

Le contrôleur utilise le radar pour rendre trois services qui sont :

- Assistance radar : pour fournir aux aéronefs intéressés des renseignements (météo, information trafic, etc.).
- Surveillance radar : pour mieux connaître la position des aéronefs.
- Guidage radar : pour donner des caps aux aéronefs afin de leur faire suivre une trajectoire spécifiée

I.2.1 Principe du fonctionnement

Un radar est un émetteur et un récepteur d'ondes électromagnétiques. Une onde électromagnétique correspond à une variation temporelle de champs magnétiques et de champs électriques :

- Émission et propagation d'une onde électromagnétique par le radar.
- Réception et analyse du signal émis par la cible et reçu par le radar.

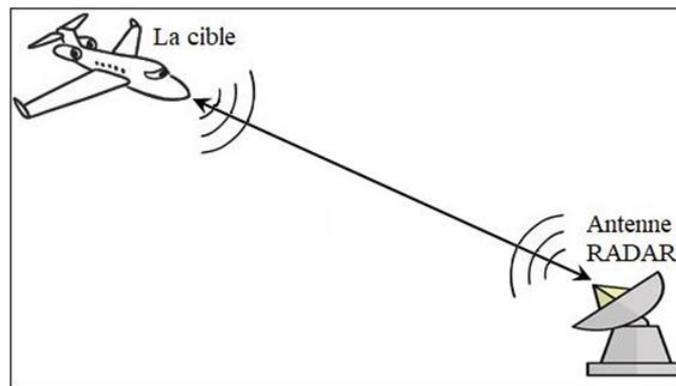


Figure I.1: Principe du radar

I.2.2 Différentes classification de radar :

Il existe plusieurs types de radars :

a) Les radars mono statiques

Le radar est dit mono-statique lorsqu'une seule antenne est utilisée pour l'émission et la réception des signaux. C'est la configuration classique pour un radar [6].

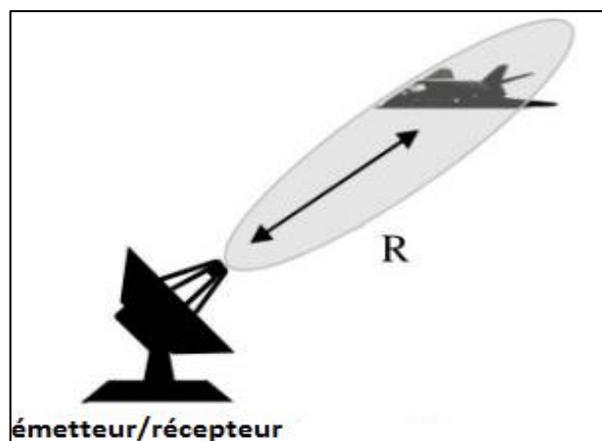


Figure I.2: Les radars mono statiques.

b) Les radars bi-statiques

Un radar bi-statique est un radar dont l'émetteur et le récepteur sont séparés. Ce système est avantageux car le type d'onde, la fréquence utilisée et la position du récepteur sont inconnus. Cependant il est plus difficile à mettre en œuvre avec son système plus complexe [6].

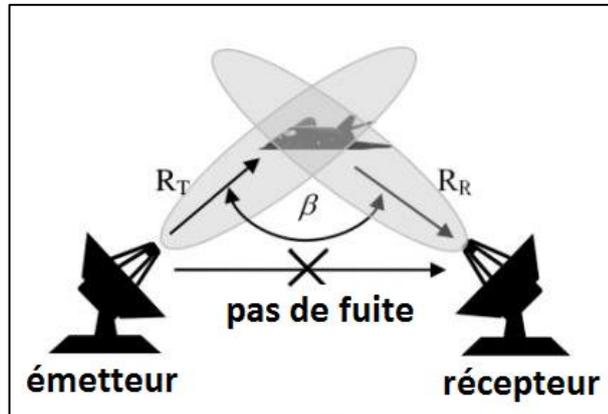


Figure I.3: Les radars bi-statiques

c) Les radars multistatiques

Le principe est le même qu'un radar bi-statique sauf qu'il ne contient pas seulement deux radars mais plusieurs. La diversité spatiale offerte par ce système permet de visualiser différents aspects d'une cible simultanément. Le potentiel de gain d'information peut donner lieu à un certain nombre d'avantages par rapport au système mono-statique [6].

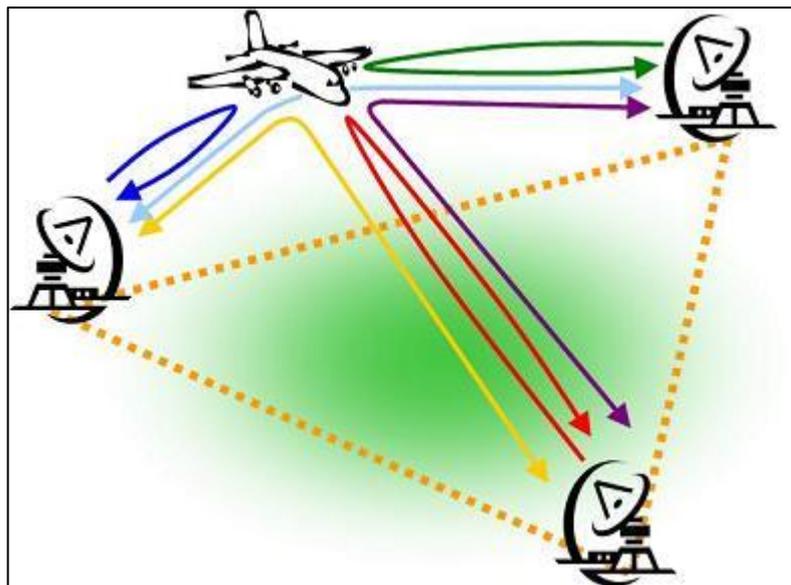


Figure I.4: Les radars multistatiques

d) Le radar à effet Doppler :

L'effet Doppler est le décalage de fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps [6].

I.2.3 Le radar primaire :

Un radar primaire (**PSR**) est un capteur classique qui illumine une large portion d'espace avec une onde électromagnétique et qui reçoit en retour les ondes réfléchies par les cibles se trouvant dans cet espace.

Le **PSR** est un radar non coopératif, il est utilisé pour détecter et localiser des cibles. Il utilise une antenne à faible résolution verticale mais à bonne résolution horizontale. Il balaye rapidement sur 360° autour du site sur un seul angle d'élévation. Il peut donc donner la distance et la vitesse radiale de la cible avec une bonne précision [7].

I.2.3.1 Radars de contrôle aérien :

Le contrôle aérien se divise en surveillance du trafic, approche des aéroports et direction à l'atterrissage. Ces différentes phases de la navigation aérienne sont prises en charge par divers types de radars [6] :

- Radars en route;
- Radars de surveillance aérienne;
- Radar d'approche de précision;
- Radars de surface;
- Radars météorologiques spécialisés

- Radars « en route » :

Utilisant la bande L, ces radars suivent la position, la vitesse et la trajectoire des avions sur une large zone. Habituellement, leur portée va jusqu'à 250 milles nautiques pour leur permettre de coordonner les vols. Ils effectuent une rotation sur 360 degrés.



Figure I.5: Le SRE-M7, un radar « en route » fabriqué par la compagnie allemande DASA.

- **Radars de surveillance aérienne (RSA):**

Les radars de surveillance aérienne ont une courte portée et servent à coordonner les décollages, atterrissages et déplacement autour d'un aéroport. Utilisant généralement bande E, ils doivent surveiller une zone de 40 à 60 milles nautiques de rayon allant du sol à 7 620 mètres (25 000 pieds).



Figure I.6: Radar ASR 12

- **Radar d'approche de précision (RAP) :**

Ces radars sont une aide à l'atterrissage en cas de mauvais temps. Le pilote suit les instructions du contrôleur aérien qui obtient la position, l'angle de descente et la vitesse de l'appareil à partir de ces radars dont la direction de sondage est celle des pistes.

L'information est envoyée par onde radio en mode audio si elle va au pilote ou en information numérique au pilote automatique.

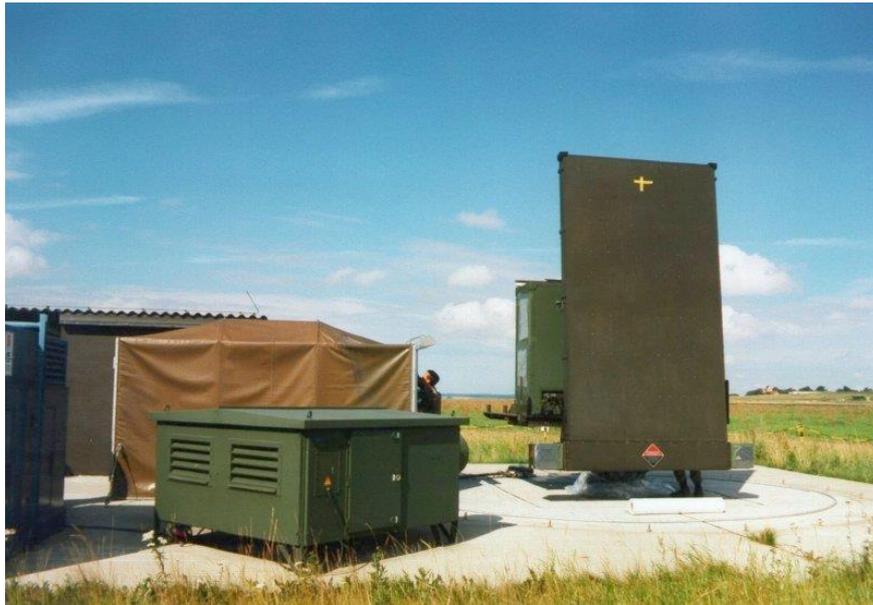


Figure I.7: Radar militaire d'approche de précision PAR-80

- **Radar de surface (SMR) :**

Le radar de surface permet de localiser les véhicules et aéronefs sur le tarmac et les pistes. Ces radars primaires utilisent les bandes J à X et des impulsions extrêmement courtes pour obtenir une résolution en distance acceptable.

Ils permettent de coordonner les mouvements au sol pour éviter les accidents. Le terme et l'abréviation ont été uniformisés par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI).



Figure I.8 : Radar de surface

- **Radars météorologiques spécialisés :**

Le radar météorologique est un instrument très important dans la panoplie des outils du contrôle aérien. Ces radars permettent non seulement de repérer les précipitations mais également les zones de turbulences, la grêle et bien d'autres conditions météorologiques dangereuses.

Certains de ces radars ont été spécialement conçus pour la navigation aérienne: meilleure résolution spatiale, sondages plus fréquents, algorithmes informatiques spécialement adaptés. C'est le cas des radars météorologiques d'aéroports TDWR.

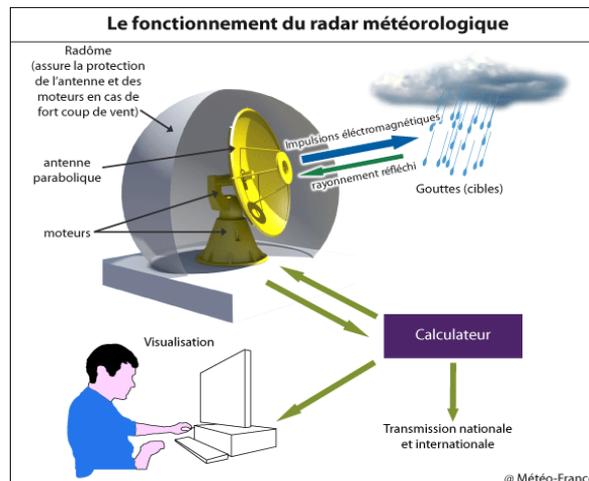


Figure I. 9: le fonctionnement du radar météorologique

I.2.3.2 Principe de fonctionnement :

Le signal transmis par le radar est généré par un émetteur puissant puis passe par un duplexeur qui le dirige vers l'antenne émettrice. Chaque cible réfléchit le signal en le dispersant dans un grand nombre de directions, ce qui se nomme la diffusion. La rétrodiffusion est le terme désignant la partie du signal réfléchi diffusée dans la direction opposée à celle des ondes incidentes (émises). L'écho ainsi réfléchi par la cible vers l'antenne sera aiguillé par le duplexeur vers un récepteur très sensible. Les échos détectés par le radar peuvent être finalement visualisés sur l'écran radar [8]. (**Figure I.10**).

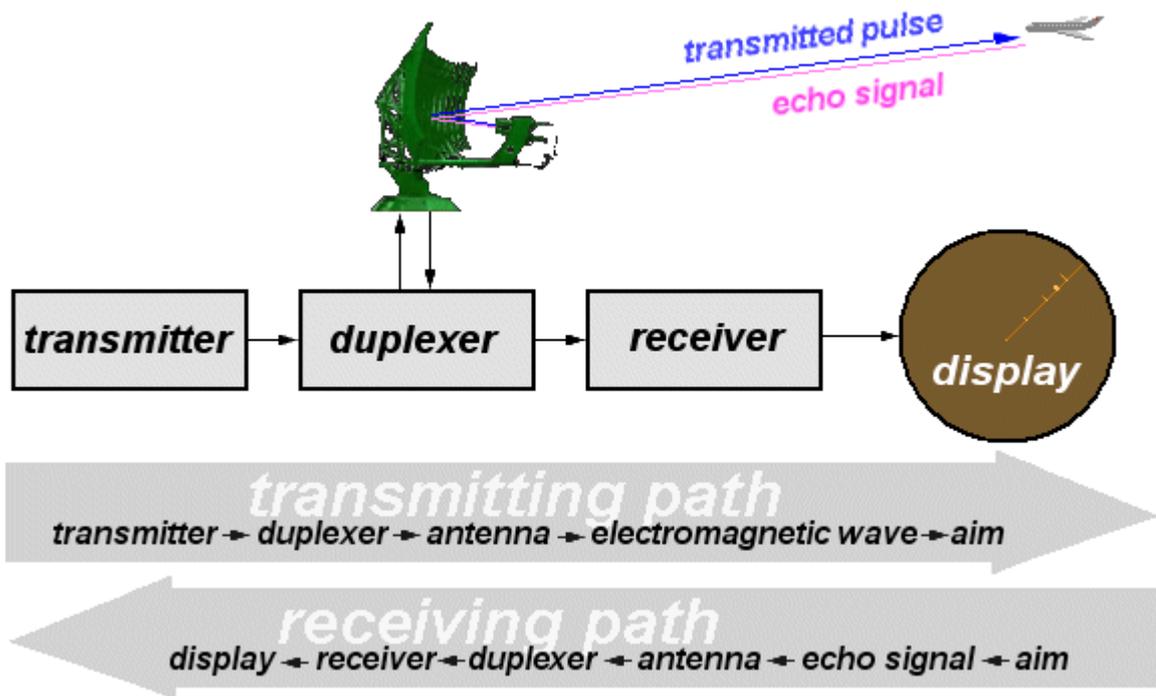


Figure I.10: Principe de fonctionnement du PSR

I.2.3.3 Avantages et Inconvénients :

Avantage :

- Hormis les avions furtifs, rien n'échappe au radar primaire. Il présente donc un intérêt stratégique pour le contrôle aérien militaire.
- Il ne nécessite aucun équipement à bord des avions.

Inconvénients :

- Hormis dans le cas particulier des radars militaires tridimensionnels, le radar primaire ne permet pas de connaître l'altitude d'un avion.
- Il ne permet pas d'identifier un avion, uniquement de repérer sa présence.
- Il affiche des échos parasites (relief, précipitations, etc.).

I.2.4 Radars Secondaires :

I.2.4.1 Description du système :

Il comprend deux éléments principaux: un interrogateur / récepteur au sol et un transpondeur d'avion. Le transpondeur de l'avion répond aux interrogations de la station au sol, ce qui permet de déterminer le champ de tir et le relèvement de l'avion depuis la station au sol. Le développement du SSR a évolué à partir de systèmes d'identification militaire ami ou ennemi (IFF) et permet l'utilisation du service Mode A / C pour l'aviation civile. Depuis lors, le service Mode S a été considérablement développé. Les fréquences SSR de 1030 et 1090 MHz restent partagées avec l'armée.

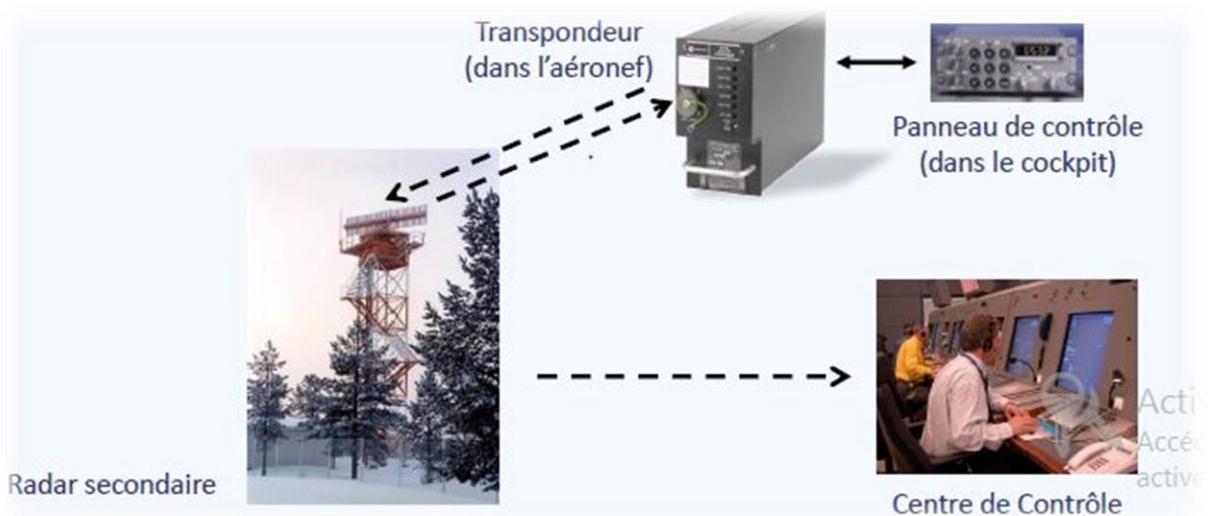


Figure I.11 : Principe fondamental du radar secondaire

Le système dispose de quatre modes d'interrogation / réponse: mode A, mode C, mode S et inter mode. Il existe deux classes de transpondeurs: les transpondeurs mode A / C pouvant uniquement répondre aux interrogations mode A, les interrogations mode C et inter mode, et les transpondeurs mode S pouvant répondre à tous les modes.

Les réponses à tous les modes d'interrogation peuvent être utilisées pour déterminer la position de l'aéronef en mesurant la distance et le relèvement de la réponse [9].

Il existe actuellement deux classes de SSR:

- SSR classique :

Ce système SSR repose sur la présence ou non des réponses du transpondeur SSR dans la largeur du faisceau. Les performances peuvent être très médiocres, en particulier pour la précision et la résolution de l'azimut. Ce type de système est également sujet à d'importantes anomalies de trajets multiples dues au mauvais diagramme d'antenne. La précision de la portée dépend de la variabilité du délai fixé dans le transpondeur de l'avion.

- SSR monopulse :

Le système mesure la position en azimut d'un aéronef dans le diagramme d'antenne horizontal à l'aide de techniques de diffraction. Ces techniques améliorent la précision et la résolution de l'azimut. De plus, ces radars ont généralement de grandes antennes à ouverture verticale et sont donc moins sujets aux effets de trajets multiples.

Dans de nombreux cas, le SSR est co-localisé avec un PSR, généralement avec le SSR monté sur le dessus de l'antenne du PSR.

I.2.4.2 Transpondeur :

EUROCONTROL définit un transpondeur comme étant le récepteur/émetteur radar aéroporté du système de radiobalises radar de contrôle de la circulation aérienne (ATCRBS) qui reçoit automatiquement les signaux radio des interrogateurs au sol. Il répond ensuite de façon sélective avec une impulsion de réponse spécifique ou un groupe d'impulsions uniquement aux interrogations reçues sur le mode auquel il est prévu de répondre. Le transpondeur est un équipement obligatoire pour le fonctionnement du SSR [4].



Figure I .12: Radar secondaire

I.2.4.3 Modes de SSR

➤ **Mode A :**

Une interrogation mode A génère une réponse mode A qui prend en charge les fonctionnalités suivantes:

- L'un des codes 4096 permettant l'identification d'un aéronef ou d'un groupe d'aéronefs en fonction des besoins opérationnels.
- Identification sur l'affichage, sur demande, d'un signal de chaque aéronef à l'aide du dispositif d'identification de position spéciale (SPI) du transpondeur.
- Identification immédiate des aéronefs confrontés à une défaillance de la communication radio ou à une autre intervention urgente ou illicite (prise haute).

➤ **Mode C :**

Une interrogation en mode C provoque une réponse en mode C. Tous les transpondeurs doivent répondre aux interrogations en mode C. La réponse contiendra des informations codées sur l'altitude-pression.

La source altitude-pression sera analogique ou numérique et les informations d'altitude sont fournies directement, sans correction, au transpondeur depuis la source. Les informations d'altitude numérisées sont automatiquement dérivées par un convertisseur analogique-numérique connecté à la source de pression d'altitude de l'aéronef référencée au

CHAPITRE I : généralités sur la surveillance aérienne

réglage de pression standard de 1013,25 hectopascals. Si, pour une raison quelconque, le transpondeur ne peut pas charger de données pour la transmission d'un rapport d'altitude, la réponse consistera uniquement en impulsions de trame. Si des installations de décodage et d'affichage appropriées sont disponibles, l'altitude de l'aéronef transmettant des informations d'altitude peut être affichée.

Remarque: l'altitude barométrique est la référence pour la séparation verticale dans l'espace aérien de l'OACI. Il n'existe aucun moyen de convertir les données de hauteur géométrique en altitude-pression.

➤ **Mode S**

Les interrogations en mode S (liaison montante) peuvent être adressées à chaque aéronef. Cela permet la transmission d'informations codées au transpondeur équipé d'une capacité de liaison de données. La réponse mode S (liaison descendante) peut contenir l'identité de l'aéronef, son altitude ou d'autres données, en fonction de la demande de la station sol et de l'aéronef. Les interrogations et les réponses en mode S sont protégées par un mécanisme de détection / correction d'erreur robuste qui confère une grande fiabilité aux informations transférées. Les transpondeurs mode S sont capables de rapporter l'altitude-pression par incréments de 100 ou 25 pieds. Les encodeurs de pression-altitude signaleront l'altitude au moins par incréments de 100 pieds. Cependant, les capacités des systèmes de surveillance au sol et en vol sont considérablement améliorées si le rapport pression-altitude est transmis par incréments de 25 pieds. La plupart des sources d'altitude-pression sont capables de signaler des incréments égaux ou supérieurs à 25.

Par conséquent, ces sources d'altitude devraient être utilisées, au moins dans les nouvelles installations. Cependant, l'utilisation d'une source d'altitude-pression avec une quantification plus grossière que 25 pieds connectée au transpondeur lorsque le transpondeur utilise les formats pour des incréments de 25 pieds aggravera la situation. Les rapports d'altitude ne doivent pas être transmis par incréments de 25 pieds si la source d'altitude-pression n'est pas en mesure de fournir une quantification de 25 pieds ou supérieure. Si les informations pression-altitude sont directement fournies par la source d'altitude au transpondeur, celui-ci choisira la quantification appropriée pour la transmission du rapport d'altitude.

Si des informations d'altitude numérisées sont fournies via un bus de données embarqué, le jeu de données doit également fournir des informations sur la quantification appropriée de la transmission du rapport d'altitude.

➤ **Inter mode**

L'interrogation intermodale tout appel Mode A ou Mode C permet à une station terrienne mode S d'interroger des transpondeurs mode A / C en mode A ou C, sans réponse des transpondeurs Mode S. L'interrogation tout appel en mode A / C / S fait que les transpondeurs en mode S répondent avec une réponse en mode S, indiquant leur adresse discrète en mode S. Les transpondeurs mode A / C répondent avec une réponse mode A ou mode C en fonction de l'interrogation. [9]

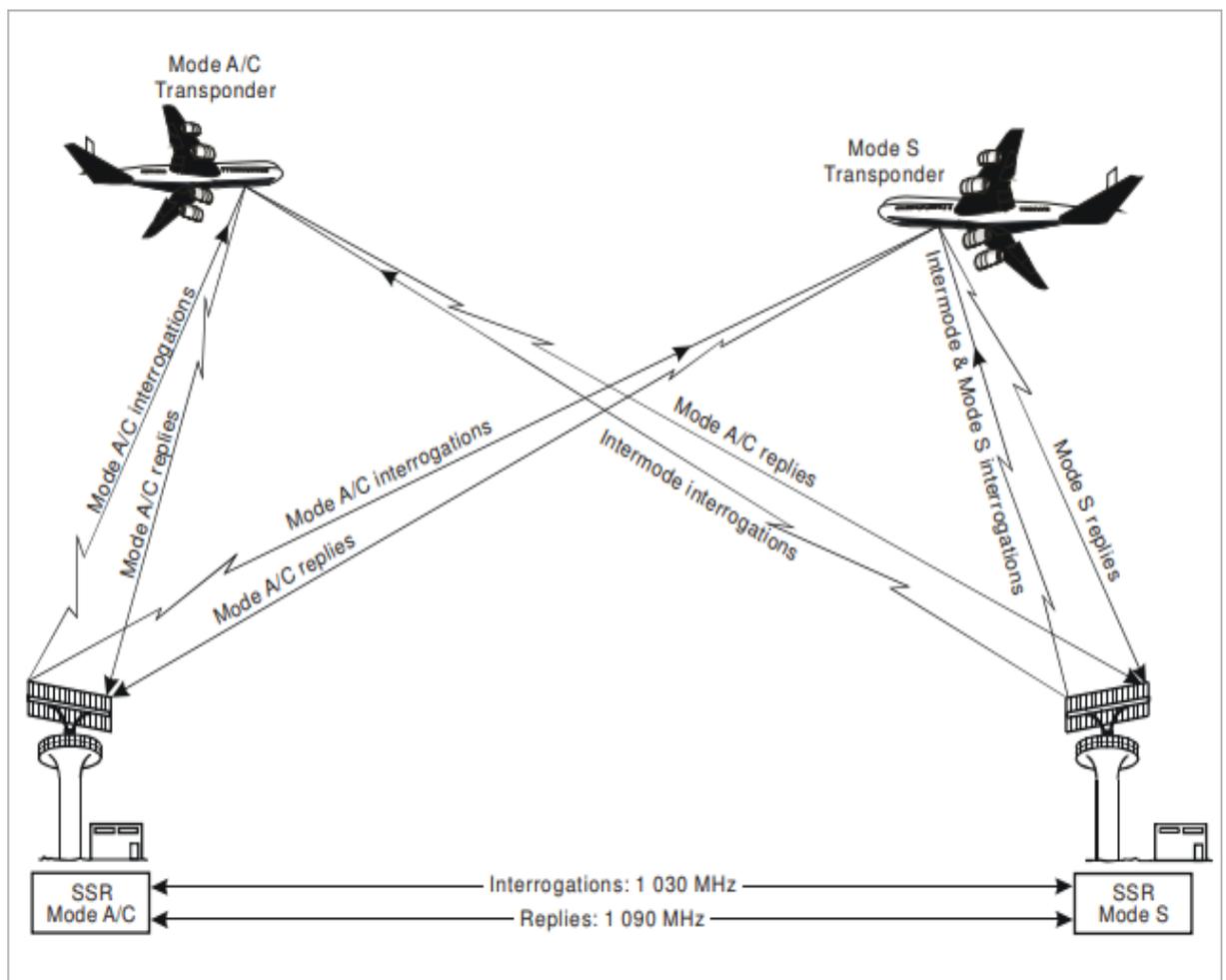


Figure I.13 : Compatibilité entre SSR Mode A / C et Mode S

I.2.4.4 L'utilisation de la SSR :

Le SSR seul est utilisé pour le contrôle radar en route dans de nombreux États où la détection d'intrus n'est pas requise. Une installation à SSR uniquement est moins chère qu'un radar combiné principal-secondaire, mais implique des dépenses considérables pour les bâtiments, les routes d'accès, l'alimentation électrique principale, les génératrices de secours, les tours et les tourniquets pour faire pivoter une grande antenne surélevée, etc. Document OACI 4444, Procédures pour Services de la circulation aérienne - Gestion de la circulation aérienne, définit les exigences relatives aux services radar.

I.2.4.5 Les Avantages et Les Inconvénients :

❖ Les Avantages :

- La mise en œuvre de ce principe élimine tout Garbling.
- Il est possible d'envisager un allongement des transactions entre le radar et le transpondeur, ceci permettra d'introduire de véritables fonctions de "**liaison de données**".
- L'identification sera directe et sans ambiguïté avec la possibilité d'affichage direct d'informations sur l'écran de contrôleur : indicatif d'avion ou numéro de vol.
- Les informations classiques (altitude et distance) pourront être faites sur un seul échange ce qui entraîne une forte réduction de l'encombrement électromagnétique.

❖ Les Inconvénients

- Il faut d'abord prévoir une phase d'acquisition entre le radar et le transpondeur.
- il faut assurer la compatibilité radar secondaire mode S de façon à faciliter l'évolution en ménageant les problèmes techniques et économiques des États (installation progressive des stations radar mode S), des compagnies (installations à bord des transpondeurs mode S).

I.2.5 Radars primaire et secondaire combinés :

Il exploite les avantages des deux types de radar dans une même installation. En règle générale, l'antenne PSR et l'antenne SSR sont montées sur le même vireur et le traitement associé effectue le filtrage, combine le SSR et les données primaires et suit les rapports

radar. Un message de piste est émis par avion pour chaque rotation d'antenne. Le radar principal assure la détection des aéronefs intrus et le SSR détecte les aéronefs coopératifs, ainsi que des informations d'altitude et d'identité. Les systèmes de poursuite numérique tirent des avantages considérables de l'installation du SSR et du PSR sur la même antenne tournante. Le SSR peut résoudre les ambiguïtés de suivi qui existeraient dans une solution PSR uniquement et inversement. Certains États choisissent de monter des systèmes PSR et SSR à des emplacements distincts, fournissant ainsi des plates-formes d'antenne distinctes. Cela présente l'avantage d'un niveau de redondance puisqu'une antenne s'arrête, un niveau de service peut donc être fourni par l'autre. Toutefois, dans ce cas, les avantages des performances de poursuite améliorées sont perdus - à moins que les antennes ne soient à proximité et que la rotation des antennes ne soit synchronisée.

Des systèmes combinés PSR / SSR sont généralement fournis pour prendre en charge l'ATC au départ d'approche dans l'espace aérien de la zone de manœuvre du terminal. C'est dans l'espace aérien occupé de la zone de terminal que la probabilité que des aéronefs de l'aviation générale s'égarer dans l'espace aérien contrôlé soit plus grande et par conséquent, certains États préfèrent avoir le PSR dans ces environnements. Souvent, ces systèmes sont sauvegardés par des systèmes SSR uniquement hors site. [9]



Figure I .14 : Radars primaire et secondaire

I.3 Multilatération (MLAT) :

La technologie de multilatération (MLAT) repose sur les signaux d'un avion détectés par au moins quatre stations au sol MLAT afin de localiser l'avion. Il utilise la technique TDOA (Time Difference of Arrival) pour établir des surfaces représentant des différences constantes entre la cible et les paires de stations de réception, et détermine la position de l'aéronef à l'intersection de ces surfaces (Owusu, 2003). Le système MLAT est utilisé comme outil de surveillance pour les surfaces aéroportuaires et les zones terminales.

Le système MLAT exige que l'aéronef soit équipé d'un transpondeur mode-S. Heureusement, cela est facilité par les exigences obligatoires de l'OACI pour que les aéronefs soient équipés d'un transpondeur prenant en charge la technologie SSR. Le capteur MLAT a une couverture de 200 NM avec une précision de 10 à 500 mètres. La précision du système dépend de la géométrie de la cible par rapport aux stations de réception, ainsi que du temps relatif de réception du signal. Le système fournit un taux de mise à jour de (1-5) secondes. Le seul inconvénient identifié avec cette technologie est la nécessité d'un minimum de quatre stations au sol pour détecter les signaux d'un aéronef afin de déterminer son emplacement [4].

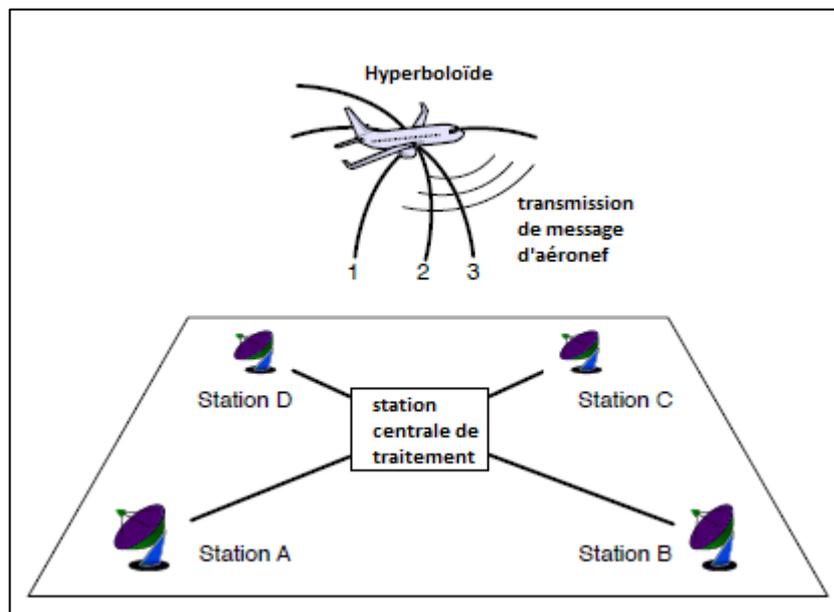


Figure I .15 : Architecture multilatération de base.

I.4 Surveillance dépendante automatique (ADS) :

L'ADS "Automatic Dependent Surveillance" est un concept qui permet de donner les informations relatives au vol, que ce soit automatique ou sur demande. Il existe deux types de surveillance dépendante :

I.4.1 ADS-C :

I.4.1.1 Définition :

L'ADS-C fonctionne en mode connecté, il faut donc établir une connexion entre l'avion et la station intéressée par les informations qu'il va envoyer (en général une station de contrôle aérien au sol). Ensuite, selon le "contrat" ainsi négocié, l'avion va automatiquement envoyer une seule fois, périodiquement, ou sur événement sa position.

L'ADS-C est généralement utilisé dans les zones désertiques et océaniques, en utilisant des liaisons par satellite.

I.4.1.2 Les informations transmises via l'ADS-C :

- la position de l'avion.
- sa route prévue.
- sa vitesse (sol ou air).
- des données météorologiques (direction et vitesse du vent, température...).

I.4.1.3 Les avantages et Les inconvénients de l'ADS-C :

❖ Les avantages :

- l'utilisation pour la surveillance des zones sans couverture radar ;
- la transmission de l'information route « prévue » ;
- la liaison de données air/sol (comme pour le Mode S et l'ADS-B).

❖ Les inconvénients :

- il dépend entièrement de l'avion et de la véracité des données qu'il transmet.

- L'ADS-C utilise des liaisons par satellite. Comme ces liaisons sont coûteuses, la cadence d'émission des informations est généralement faible, par exemple toutes les minutes ou toutes les dix minutes.

I.4.2 ADS-B :

I.4.2.1 Définition

L'ADS-B, en revanche, fonctionne en mode diffusion : il n'y a pas d'établissement de connexion. L'avion envoie régulièrement sa position et d'autres informations par une diffusion radio dite "ADS-B out" à tous les utilisateurs intéressés, typiquement le contrôle au sol, mais aussi les autres avions s'ils sont équipés d'un récepteur (dit ADS-B "in"). La fréquence d'émission de la position dépend de la phase du vol, par exemple toutes les dix secondes en route et toutes les secondes en approche.

I.4.2.2 Les informations transmises via l'ADS-B :

Les données ADS-B sont diffusées toutes les demi-secondes sur une liaison de données numérique à 1090 MHz.

Les émissions peuvent inclure:

- Identification du vol (indicatif ou numéro d'appel du numéro de vol)
- Adresse de l'avion OACI 24 bits (code de cellule unique au monde)
- Position (latitude / longitude)
- Intégrité / précision de la position (limite de protection horizontale du GPS)
- Altitudes Barométriques et Géométriques
- Taux vertical (taux de montée / descente)
- Angle de piste et vitesse au sol (vélocité)
- Indication d'urgence (lorsque le code d'urgence est sélectionné)
- Identification de position spéciale (quand IDENT est sélectionné)

I.4.2.3 Les avantages et Les inconvénients :

❖ Les avantages :

- Accroître le niveau de sécurité.
- Situation du trafic disponible simultanément à bord de l'aéronef et devant le contrôleur.

CHAPITRE I : généralités sur la surveillance aérienne

- Amélioration du filet de sauvegarde.
- Efficacité et capacité élevées.
- Utilisation, dans un environnement non radar, des mêmes services fournis par un radar.
- Réduction des normes de séparation (à long terme avec de nouvelles procédures).
- Performance accrue des outils de décision mis à la disposition du contrôleur.

❖ Les inconvénients :

- Les applications envisagées seront des informations, comme les informations de navigation, transmissent via **ADS-B**. Chaque défaut non détecté aurait des conséquences graves.
- Les avions non équipés ne sont pas visualisés.
- Problèmes de facteurs humains : partage des responsabilités entre le pilote et le contrôleur.

Tableau II.2: Caractéristiques de performance du capteur de surveillance [4].

Technologie de surveillance	Couverture	Précision	Intégrité	Période de mise à jour
Radar de surveillance primaire (PSR)	S-band 60-80 NM L-band 160-220 NM	Dans la gamme : 0,1 NM RMS ou 0,2 NM 2σ En azimut : 0,15 degré RMS ou 0,3 degré 2σ	Aucun rapport d'intégrité fourni.	4 - 15 seconds
Radar de surveillance secondaire (SSR) Mode A/C	200 NM-250 NM	Dans la plage : 0,03 NM RMS En azimut : 0,07 degré RMS ou 0,14 degré 2σ pour les erreurs aléatoires.	Aucun rapport d'intégrité fourni.	4 - 15 seconds
Radar de surveillance secondaire (SSR) Mode S	200 NM-250 NM	Identique au SSR (Mode A / C)	Aucun rapport d'intégrité fourni.	4 - 12 seconds
Multilatération (MLAT)	200 NM	10-500 mètres	Aucun rapport d'intégrité fourni	1 - 5 seconds
ADS-B	200 NM-250 NM	Déterminé par l'avionique de l'aéronef et indépendant de la portée du capteur. Pour le GPS, 95 % moins de 0,1 NM	Intégrité de position garantie à $1 * 10^{-7}$ grâce à l'algorithme RAIM en avionique. La valeur d'intégrité est liée dans le message ADS-B.	0.5 - 2 seconds

Chapitre II

Surveillance

Dépendant

Automatique -

Diffusion (ADS-B)

II.1 Historique

- Le premier segment (2006-2010) comprend la construction de stations au sol dans un certain nombre de zones clés. Ces zones ont été choisies comme sites d'essai ADS-B en raison de leur volume de trafic élevé ou de leur proximité avec les infrastructures ADS-B existantes (Kansas, Nebraska et Louisville).

- Le deuxième segment (2009-2014) de la mise en œuvre aux États-Unis consiste à compléter la couverture des stations au sol des États-Unis dans l'espace aérien SSR existant et à augmenter jusqu'à 40% de l'équipement des aéronefs. L'expansion sera probablement réalisée en complétant l'infrastructure des aéroports et de l'espace aérien au sein d'un ARTCC afin de maximiser les avantages pour une région.

Le segment 2 comprend également la finalisation de la définition «ADS-B Out».

- Par segment 3 (2015-2020), 100% des aéronefs doivent être équipés d'au moins «ADS-B Out», la définition finale de «ADS-B In» étant créée. Plus d'applications de l'ADS-B seront certifiées.

- Enfin, dans le segment 4 (2020-2025), les équipements de surveillance hérités, en particulier le SSR, doivent être mis hors service. Les applications nécessitant un équipement complet seront entièrement implémentées. [10].

II.2 DESCRIPTION GÉNÉRALE

II.2.1 Définition

ADS-B est une nouvelle technologie de surveillance avec laquelle l'avion transmet des données d'une manière automatique à partir des systèmes embarqués en mode de diffusion, ce qui permet de partager ces informations avec des stations au sol et d'autres avions.

II.2.2 Objectif

L'objectif principal de l'ADS-B est de déterminer la position d'un aéronef, puis de diffuser automatiquement ces informations, ainsi que son altitude, son indicatif d'appel, son cap et son type d'aéronef (c'est-à-dire sans signal d'interrogation SSR) vers un autre aéronef et en vol contrôle des installations au sol. L'ADS-B est automatique en ce sens qu'il ne nécessite aucune action ou entrée de la part du pilote et qu'aucune interrogation depuis le sol n'est requise. Il est également dépendant du fait qu'il repose sur un

CHAPITRE II: Surveillance Dépendant Automatique -Diffusion

équipement embarqué pour collecter les données ADS-B et les diffuser à d'autres utilisateurs de l'ADS-B. Il s'agit également d'un moyen de surveillance et de coordination du trafic.

Les équipements de station au sol ADS-B comprennent un récepteur, une antenne et un moniteur de site. Il s'agit d'un système de liaison de données qui utilise normalement le même transpondeur, mais fonctionne indépendamment des systèmes de radar et d'alerte et d'évitement des collisions de trafic (TCAS). La plupart des transpondeurs de radar de surveillance secondaire mode moderne (SSR) sont capables de transmettre des données SSR et ADS-B (également appelées "squitters étendus"). Les transpondeurs de mode A / C plus anciens ne prennent pas en charge ADS-B.

L'ADS-B a été créé dans un souci de compatibilité et de facilité de transition. Il a été construit en utilisant des aspects similaires du mode de transmission de surveillance de l'avion actuel appelé Mode S ou mode select. Le mode S consiste à interroger l'avion à l'aide d'un numéro d'identification spécifique. Seul l'aéronef possédant le numéro d'identification correct répondra à une interrogation avec ses informations de vol. Les types de transmission antérieurs au mode S comprennent les modes A et C. L'identification de l'aéronef fournie par le mode A et l'altitude fournie par le mode C. Le mode S offre de meilleures capacités, principalement sous la forme d'informations sur l'aéronef, qui incluent l'identité, l'intention, les capacités et la localisation.

L'ADS-B est similaire au mode S en ce qu'il utilise la même fréquence de transmission de 1090 MHz. Il diffère par le fait que le message a 112 bits, une longueur de 120 μ s et qu'il s'agit de messages "séquestres". Un message de squitter est simplement un message transmis qui n'est invoqué par aucune interrogation. Dans la figure ci-dessous qui montre le transpondeur ADS-B.

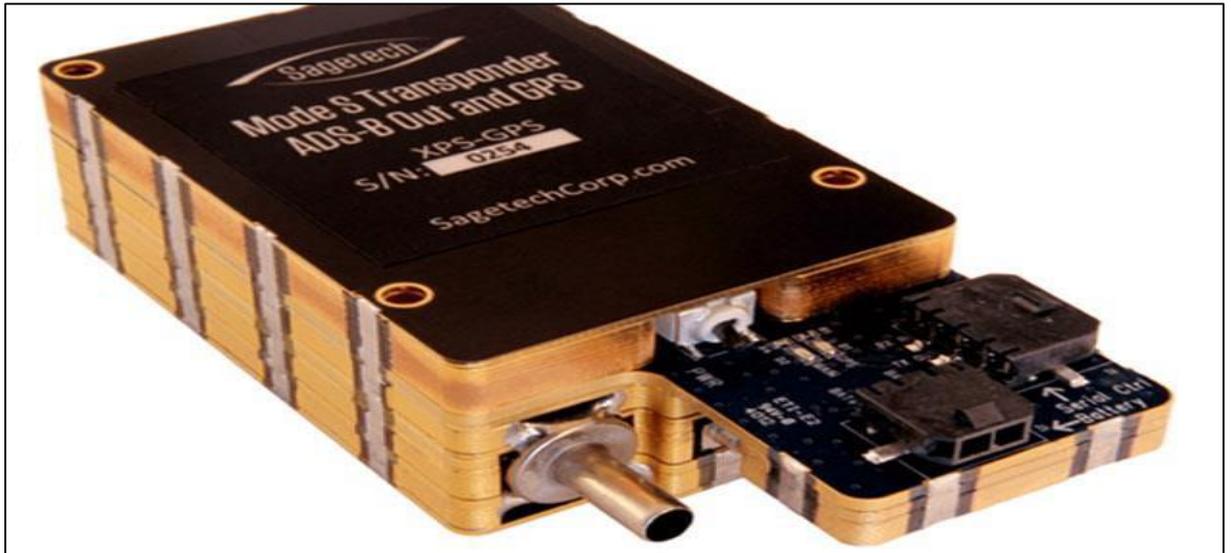


Figure II.1 : ADS-B transpondeur.

II.2.3 L'abréviation :

- **Automatic** : Il est toujours activé et ne nécessite aucune intervention de l'opérateur
- **Dependent** : Cela dépend d'un signal GNSS précis pour les données de position
- **Surveillance** : Il fournit des services de surveillance "semblables à un radar", un peu comme RADAR
- **Broadcast** : Il diffuse en continu la position de l'aéronef et d'autres données sur tous les aéronefs ou stations au sol équipés pour recevoir l'ADS-B

II.3 Principe

Un avion avec ADS-B détermine sa position à l'aide du GPS. L'avion diffuse ensuite cette position à intervalles rapides, ainsi que son identité, son altitude, sa vitesse et d'autres données. Les stations au sol ADS-B dédiées peuvent recevoir les émissions et relayer les informations au contrôle de la circulation aérienne pour un suivi précis de l'aéronef.

Le système ADS-B diffuse des données toutes les demi-secondes sur une liaison numérique à 1090 MHz et, à l'instar du radar, il est limité à la "ligne de vue". La capacité d'une station au sol à recevoir un signal dépend de l'altitude, de la distance du site et du terrain obstruant. La portée maximale de chaque station au sol ne peut pas dépasser 250 miles nautiques. Dans l'espace aérien entourant immédiatement chaque station au sol, la couverture de surveillance s'étendra jusqu'à la surface. La figure 3.3 ci-dessous montre comment cela fonctionne.

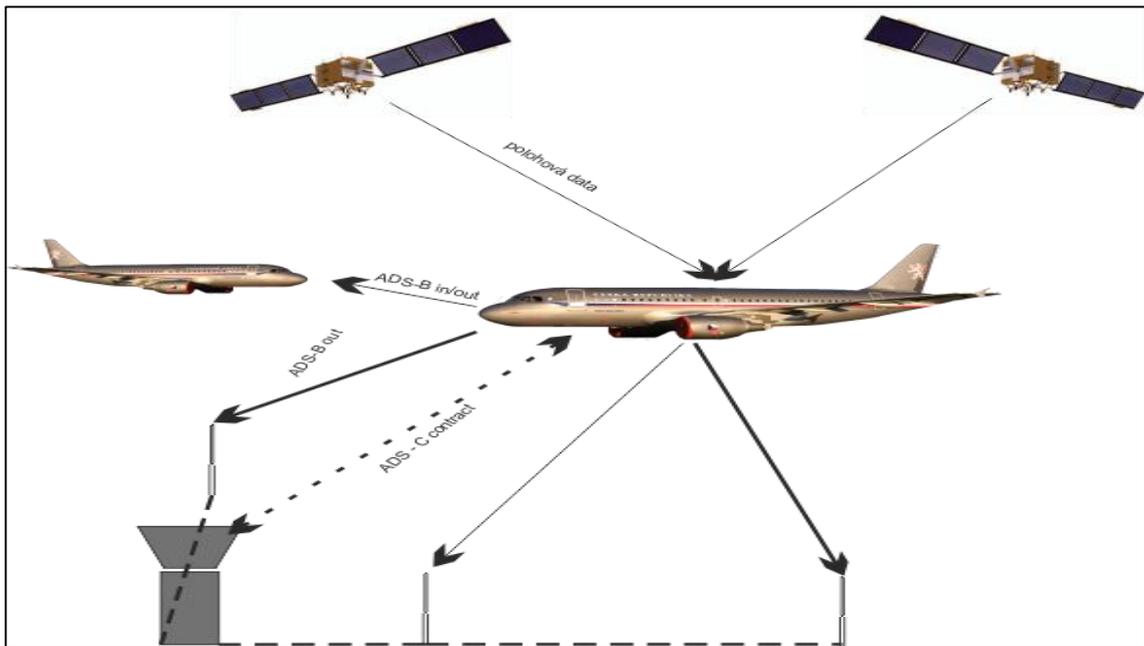


Figure.II.2 : Principe de l'ADS-B.

II.4 Catégories d'application d'ADS-B

- Applications air-air : réception des messages ADS-B par un aéronef, donc possibilité pour le pilote de voir les avions à proximité.
- Applications air-sol : fourniture des messages ADS-B aux contrôleurs du trafic aérien et/ou aux appareils de navigation aérienne ou sol
- Applications sol-sol : indication de la position précise et identification de l'avion et des autres véhicules équipés pour la surveillance de la surface d'aéroport

II.5 L'équipement avionique de l'ADS-B :

L'ADS-B comprend deux segments principaux :

❖ ADS-B "Out" :

Est la principale fonction que la FAA a traitée. Un aéronef doté d'ADS-B "Out" a la capacité de diffuser sa position, sa vitesse et son altitude aux contrôleurs de la circulation aérienne et aux autres avions équipés de l'ADS-B. Selon une exigence de la FAA, tous les avions qui volent dans l'espace aérien américain, qui nécessite actuellement un transpondeur doivent être équipés de capacités ADS-B "Out" avant le 1er janvier 2020 [11].

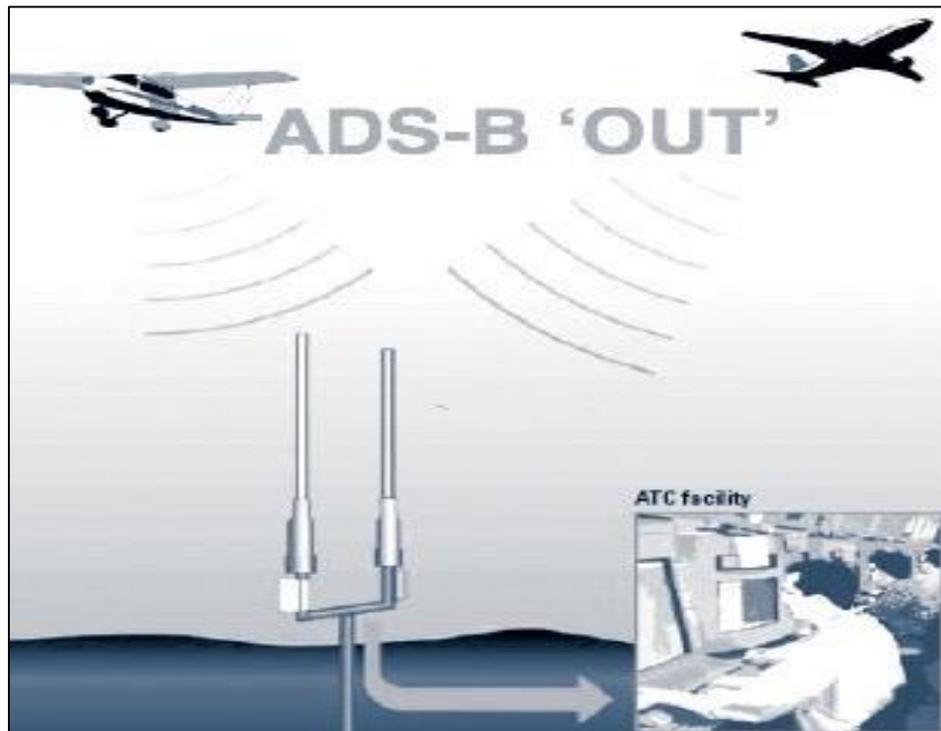


Figure II.3: fonctionnement de l'ADS-B "Out".

❖ **L'ADS-B "In" :**

Reste une fonctionnalité facultative, au moins pour l'instant. La capacité ADS-B "In" permettra aux aéronefs de recevoir des informations sur la circulation et les conditions météorologiques en temps réel sur l'écran de l'habitacle de l'avion. La fonction ADS-B "In" va au-delà des systèmes de trafic actuels (tels que TCAS), car elle offre des données plus précises et plus de paramètres que les systèmes TCAS actuels. Par exemple, TCAS peut afficher la distance verticale de l'avion mais pas latérale. ADS-B "In" affiche la vitesse, les emplacements, l'altitude et les vecteurs des autres avions participants, ainsi que de nombreuses autres données [11].



Figure II.4 : fonctionnement de l'ADS-B IN

II.6 Les technologies de l'ADS-B

Il existe trois types de liaisons de données pour la transmission des signaux ADS-B qui sont :

II.6.1 Le 1090 ES (1090 MHz Extended Squitter)

Dans la désignation 1090 ES, 1090 signifie que la fréquence porteuse des signaux ADS-B (pour ce mode de transmission) est 1090 MHz, ES signifié Extended Squitter. Le 1090ES est une évolution des transpondeurs radar mode S qui émettent sur la fréquence 1090 Mhz sur les avions équipés mode S et TCAS, ces transpondeurs permettent déjà d'envoyer et recevoir des messages de 56 bits, utilisés par le TCAS. La modification leur permettra d'envoyer des messages de 112 bits suffisants pour l'ADS-B "Out" et éventuellement de les recevoir par l'ADS-B "In".

Au sol, les informations ADS-B sont reçues soit par un radar mode S, soit par une simple antenne omnidirectionnelle bien moins coûteuse. Comme les avions commerciaux sont presque tous déjà équipés du TCAS, le 1090ES est une solution relativement peu coûteuse pour ces avions. Il n'en est pas de même pour les autres avions, en particulier les petits avions privés, pour lesquels l'installation ADS-B en 1090ES est très coûteuse [12].

II.6.2 VDL mode 4

VDL mode 4 est un moyen de communication, fonctionnant dans la bande VHF aéronautique pour les équipements de navigation (118-137 Mhz). Pour la surveillance, VDL mode 4 rend les services de l'ADS-B et du TIS-B (qui permet à l'ADS-B de fournir des informations météorologiques graphiques générées par le trafic et le gouvernement). Pour la communication, VDL mode 4 permet de rendre le service CPDLC de communication contrôleur-pilote par liaison de données et non plus par la voix, le VDL mode 4 est d'un coût plus abordable que le 1090ES pour l'aviation générale [12].



FigureII.5 : Aviation transpondeur VDL mode 4.

II.6.3 L'UAT

L'UAT est un transpondeur spécifiquement conçu pour l'ADS-B, aussi bien "in" que "out" et fonctionnant à 978Mhz. L'UAT est un système spécifiquement américain. Les créateurs de l'UAT espèrent que le coût de cet équipement sera bientôt suffisamment abordable pour qu'il soit installé sur tous les avions privés. En outre, c'est un besoin qui semble spécifiquement américain, l'UAT permettant l'implémentation du service TIS-B [12].

Tableau II.1 : Comparaison entre VDL, MOD 4 et 1090ES [13].

1090ES	VDL4	UAT
canal unique	multicanal	canal unique
Fréquence 1090MHz	Fréquence 108 – 137MHz	Fréquence 978MHz
accès aléatoire	Time slot Access	Time slot Access
Bande passante de données de canaux fixe et limitée	bande passante 19.2kbps	bande passante 2-3 MHz
Taux de notification	Taux de notification	Taux de notification
ADS-B : fixe	ADS-B : variable	ADS-B : fixe
Extension au mode S	Nouveau système	Nouveau système
Soutenir la diffusion air-air, liaison montante, liaison descendante	Soutenir la diffusion air-air, liaison montante, liaison descendante	Soutenir la diffusion air-air, liaison montante, liaison descendante
Norme d'OACI existe	Norme d'OACI existe	Norme d'OACI existe
équipement obligatoire	équipement d'essai	équipement d'essai

II.7 Services ADS-B :

II.7.1 Service d'information sur la circulation – diffusion générale (TIS-B)

TIS-B est un service client qui fournit aux aéronefs équipés ADS-B Out / In des informations de surveillance sur les aéronefs qui ne sont pas équipés de l'ADS-B. Pour être qualifié de cible TIS-B, un aéronef doit être équipé d'un transpondeur et se trouver dans la zone de couverture radar [14].

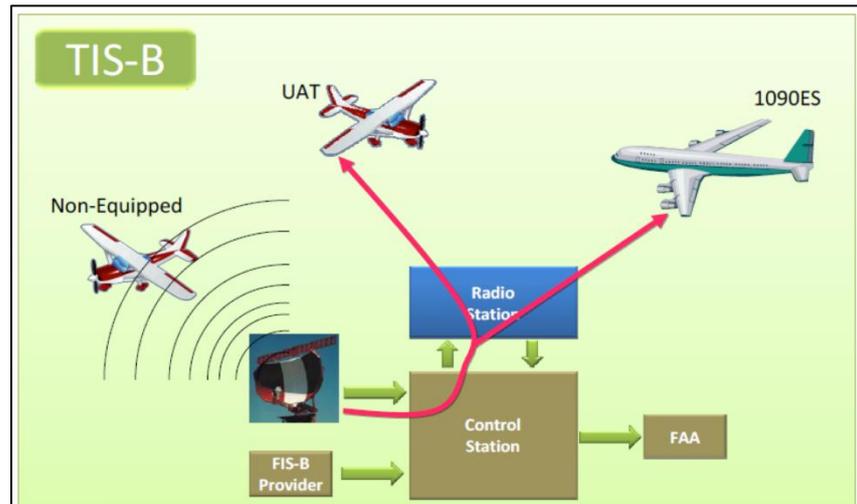


Figure II.6 : Données de liaison montante d'aéronefs non équipés ADS-B pour la connaissance de la situation des aéronefs.

II.7.2 Service d'information de vol – diffusion générale (FIS-B)

FIS-B fournit les données météorologiques et aéronautiques au poste de pilotage. Ce service n'est pas un service client, mais est toujours diffusé dans l'espace aérien sur la fréquence UAT. Cette information n'est pas diffusée sur la fréquence 1090 MHz [14].

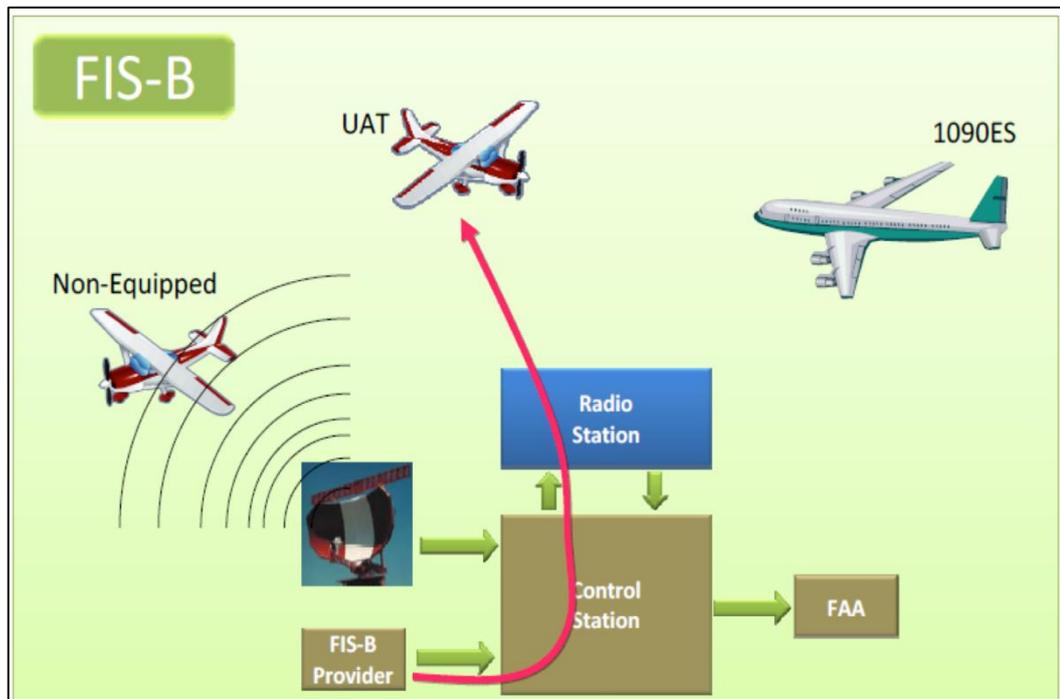


Figure II.7. : liaison montante d'informations météorologiques et autres informations de vol pour les aéronefs équipés d'un système UAT.

➤ Les informations fournissent par FIS-B :

- Rapports météorologiques de l'aviation (METAR)
- Rapports météorologiques à l'aviation non routiniers (SPECI)
- Prévisions de zone terminale (TAF) et amendements
- Cartes de précipitations NEXRAD (régionales et CONUS)
- Avis aux aviateurs (NOTAM) Données de vol et de centre de vol
- Conditions météorologiques des aviateurs (SIGMET) et
- SIGMET de convection
- Statut de l'espace aérien à usage spécial (SUA)
- Restrictions de vol temporaires (TFR)
- Vents et températures en altitude
- Rapports de pilote (PIREPS)



Figure II.8 : Affichage de la météo avec ADS-B.

II.8 Surveillance dépendante automatique - retransmission (ADS-R) :

L'ADS-R prend les informations de position reçues au sol des aéronefs équipés d'UAT et les rediffuse sur la fréquence 1090 MHz. De même, l'ADS-R rediffuse des

CHAPITRE II: Surveillance Dépendant Automatique -Diffusion

données à 1090 MHz à destination des utilisateurs d'UAT. De concert avec TIS-B, l'ADS-R fournit à tous les aéronefs équipés de l'ADS-B In un espace aérien et un trafic de surface en surface complets. L'ADS-R fournit des données de trafic dans un rayon de 15 nm à 5000 pieds au-dessus ou en-dessous de la position de l'avion récepteur [14].

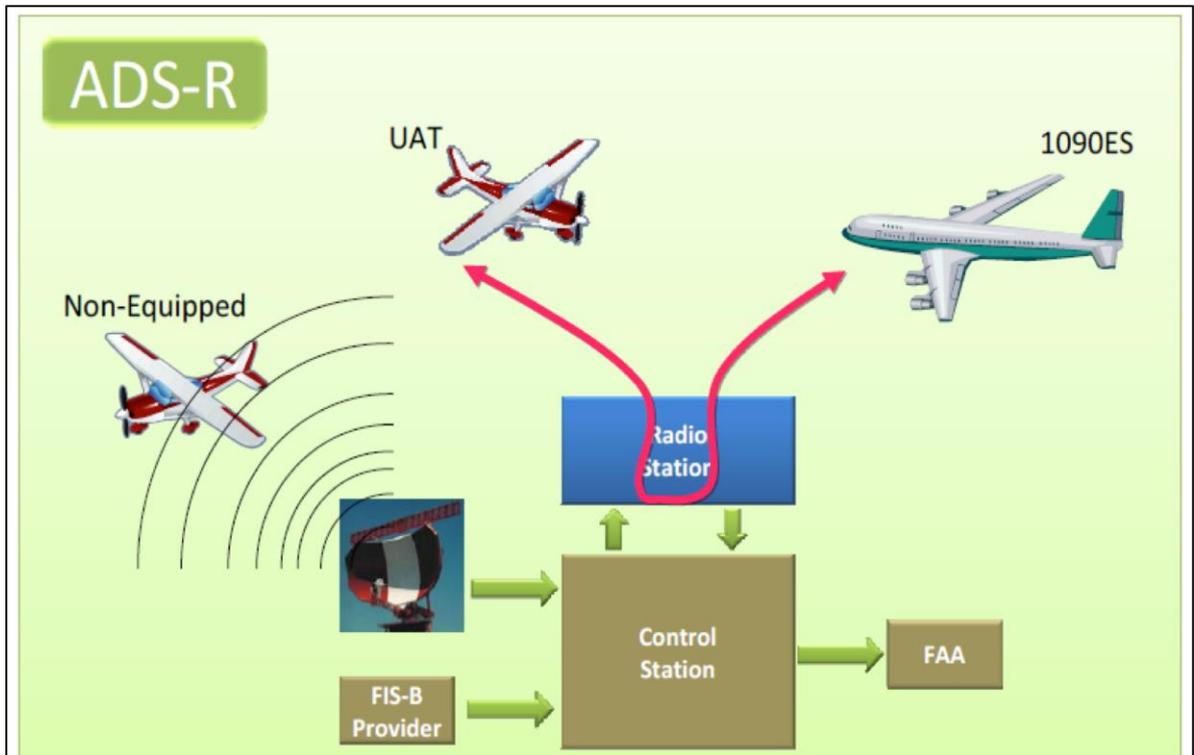


Figure II.9: réticulation des données ADS-B pour la connaissance de la situation des aéronefs.

Pour se conformer au mandat 2020, les aéronefs évoluant dans un espace aérien de classe A situé entre 18 000 et le niveau de mer moyen jusqu'au niveau de vol 600 inclusivement doivent diffuser les données de position ADS-B Out à l'aide de la liaison Mode S 1090ES ADS-B. Les aéronefs évoluant dans un espace aérien désigné exclusivement inférieur à 18 000 pieds peuvent utiliser le 1090ES ou un UAT.



Figure II. 10 : L'écran TAS-A d'Avidyne combine les systèmes ADS-B et de surveillance active dans une seule unité.

II.9 Paramètres de performance ADS-B :

II.9.1 La précision ADS-B

La précision de l'ADS-B est définie comme une mesure de la différence entre la position de l'aéronef signalée dans le champ ADS-B et la position vraie. Il est également défini comme le bruit lorsque le bruit est supposé suivre une distribution gaussienne et que la valeur RMS est indiquée (OACI, 2006b). L'exactitude de l'ADS-B est également analysée en fonction de l'indicateur de qualité représentant l'exactitude de l'estimation de position incluse dans le message ADS-B.

La précision de la position horizontale est évaluée comme la distribution de l'erreur de mesure de la position horizontale. Pour l'ADS-B, la précision de la position horizontale est définie comme le rayon d'un cercle centré sur la position signalée de la cible, de sorte que la probabilité que la position réelle de la cible soit à l'intérieur du cercle est de 95 % (OACI, 2006b).

La précision verticale est définie comme la distribution de l'erreur de mesure de la position verticale. Pour l'ADS-B, l'altimètre barométrique de l'avion fournit l'altitude à l'émetteur de l'ADS-B et est transmis à la station au sol de l'ADS B (OACI, 2006b). De plus, l'ADS-B fournit également l'altitude géométrique dérivée par le système de navigation embarqué. Toutefois, les données d'altitude de l'altimètre barométrique constituent l'exigence normalisée actuelle pour les opérations ATC, même si l'altitude géométrique fournit une plus grande précision. Par conséquent, la précision de la position verticale peut être mesurée par rapport à l'altitude géométrique. Les éléments qui contribuent à l'exactitude de l'ADS-B comprennent la précision de la fonction de navigation à bord qui fournit les données de positionnement au système ADS-B [15].

II.9.2 L'intégrité ADS-B

L'intégrité ADS-B est le niveau de confiance selon lequel les erreurs seront correctement détectées. Le risque d'intégrité est la probabilité qu'une erreur supérieure à un seuil donné dans les informations ne soit pas détectée plus longtemps qu'un délai d'alerte prédéterminé (OACI, 2006b). L'intégrité de la position horizontale de l'ADS-B est le niveau de confiance qui peut être placé dans la source de navigation pour fournir l'entrée à la position rapportée de l'ADS-B. Ceci est représenté par l'indicateur de qualité d'intégrité dérivé de l'indicateur d'intégrité de la position de la source de navigation [15].

II.9.3 La continuité ADS-B

La continuité ADS-B est la probabilité que le système remplisse sa fonction requise sans interruption imprévue, en supposant que le système soit disponible lors du lancement de la procédure (OACI, 2006b). La continuité de l'ADS-B comprend [15] :

- la continuité des fonctions affectant tous les aéronefs (par exemple, fonction de satellite, fonction d'acquisition de données au sol): exprimée en nombre de perturbations par an;
- la continuité de système affectant un seul aéronef (par exemple, fonction de transpondeur): exprimée par heure de vol; et
- la continuité des sources de navigation (y compris les constellations de satellites) de qualité suffisante dans la région, qui affecte de nombreux aéronefs.

II.9.4 La disponibilité de l'ADS-B

La disponibilité de l'ADS-B est la capacité du système d'exécuter sa fonction requise au début de l'opération prévue. La disponibilité est mesurée en quantifiant la proportion de temps pendant laquelle le système est disponible par rapport au temps que le système devrait être disponible. Les périodes de maintenance planifiée ne sont pas incluses dans la mesure de disponibilité (OACI, 2006b). La disponibilité de l'ADS-B comprend [15] :

- la disponibilité des fonctions affectant tous les aéronefs (par exemple, fonction de positionnement externe, fonction d'acquisition de données au sol);
- la disponibilité du système n'affectant qu'un seul aéronef (fonction de transpondeur, par exemple): exprimée par heure de vol; et
- La disponibilité de sources de navigation (y compris les constellations de satellites) de qualité suffisante dans la région affectera de nombreux aéronefs.

II.9.5 La latence ADS-B

La latence ADS-B est le délai entre la détermination de la position de l'aéronef par le système de navigation embarqué et la réception de la position par la station sol. La mesure de latence affecte directement la précision de la position [15].

Tableau II.2: Résumé des exigences de performance de la surveillance ADS-B [15].

article	intégrité	précision	Continuité	latence
système global ADS-B	$\leq 10^{-5}$ par heure de vol (par rapport à la carte réseau) avec un délai d'alerte ≤ 10 secondes	< 150 mètres pour une séparation de 3 NM	Taux de mise à jour de ≤ 2 secondes	Latence totale $\leq 1,5$ seconde dans 95% des transmissions. Latence non compensée $\leq 0,6$ seconde dans 95% des transmissions. Latence non compensée $\leq 1,0$ seconde

				dans 99% des transmissions.
--	--	--	--	-----------------------------

II.10 Différence entre RADAR et systèmes ADS :

- L'infrastructure ADS présente un faible coût par rapport au RADAR classique. En effet, la station réceptrice a besoin seulement d'une antenne permettant de recevoir les signaux ADS, le reste des traitements étant faits à bord des appareils.
- Dans le système ADS la position est déterminée par les instruments de bord, il est donc beaucoup plus précis que le radar.
- Le radar primaire est un système indépendant et non coopératif. Il ne fournit pas l'altitude, l'identification... Le radar secondaire est indépendant (à l'exception de l'altitude) et coopératif, mais ne détecte pas les avions non équipés de transpondeur. Alors que l'ADS est dépendante et coopératif.
- Avec l'ADS on peut surveiller et suivre les avions dans les régions où on ne peut pas installer de radar.



Figure II.11. Antenne d'ADS-B

II.11 Amélioration d'ADS-B de la limite de système surveillance actuel

Il est clair que les performances de l'ADS-B sont telles qu'elles peuvent potentiellement supporter l'augmentation de la demande de transport aérien, ce que les systèmes de surveillance actuels, en raison de leurs limitations opérationnelles, ne peuvent pas atteindre. Le tableau II-3 montre une comparaison entre le système ADS-B et le système de surveillance actuel basé sur les applications de surveillance requises par l'OACI pour répondre à la demande croissante de transports aériens.

Tableau II.3: comparaison entre le système ADS-B et le système de surveillance

Application de surveillance	Système de surveillance actuel	Système ADS-B
Meilleure connaissance de la situation du trafic aérien	Conscience de la situation limitée dans les zones isolées	La connaissance de la situation dans une zone

	<p>et océaniques, limitée à la ligne de mire et sujette à de graves évanouissements et interférences.</p>	<p>donnée dépend du mouvement des aéronefs équipés de l'ADS-B dans cette zone au moment (t). Les aéronefs sont indépendants de l'ATC pour obtenir une connaissance de la situation.</p>
<p>Équivalent radar</p>	<p>Capable de détecter les cibles coopératives (SSR) et non coopératives (PSR) dans une plage limitée.</p>	<p>Fournit une précision améliorée et un taux de mise à jour de position plus élevé, ce qui améliorera le service de surveillance. Ne détecte que les cibles équipées ADS-B.</p>
<p>Acquisition visuelle améliorée</p>	<p>Acquisition visuelle limitée. Les méthodes classiques «voir et éviter» ont atteint leur limite en raison de la vitesse croissante des aéronefs, de la mauvaise visibilité dans le poste de pilotage moderne et de la charge de travail de l'équipage de conduite durant certaines phases de vol.</p>	<p>Offre une capacité d'acquisition visuelle améliorée en ce qui concerne la procédure «voir et éviter» qui s'applique aux opérations VFR / VFR et IFR / VFR. Ceci est fourni par l'utilisation de l'application CDTI (affichage du trafic dans le cockpit).</p>
<p>Opérations de surface de l'aéroport</p>	<p>La sortie du radar de mouvement de surface (SMR) se dégrade lors de</p>	<p>L'ADS-B offre une nouvelle source d'informations sur la surveillance aéroportuaire</p>

	<p>fortes pluies et disparaît à cause de la visibilité directe.</p>	<p>pour une gestion plus sûre et plus efficace des mouvements au sol dans les aéroports. Les véhicules au sol des aéroports devraient également être équipés de l'ADS-B afin de générer un affichage complet de la connaissance de la situation.</p>
<p>Séparation améliorée</p>	<p>Fournir un faible taux de mise à jour de 4s-12s.</p>	<p>La précision améliorée et un taux de mise à jour de 1 à 2 secondes permettent une séparation réduite. Cela permettra ultérieurement de redistribuer les tâches liées au séquençage et à la fusion du trafic entre l'ATC et les aéronefs. Il permettra également la mise en place de procédures en route dans l'espace aérien non radar, permettant ainsi aux aéronefs équipés de l'ADS-B de descendre et de gravir les niveaux de vol de chacun. Cela se traduira par une utilisation optimisée de la capacité de l'espace aérien.</p>

II.12 Mise en application

- Les USA ont fait de l'ADS-B le socle de leur "next generation air transportation system" ("nextGen"). La politique de la FAA est d'utiliser le 1090ES pour les vols commerciaux et l'UAT pour les autres avions. La FAA est en train (2009) de déployer un réseau de stations ADS-B (mixtes 1090ES et UAT) sur tout son territoire.
- la Chine est en cours de déploiement d'un système ADS-B couvrant le centre du pays et utilisant l'UAT.

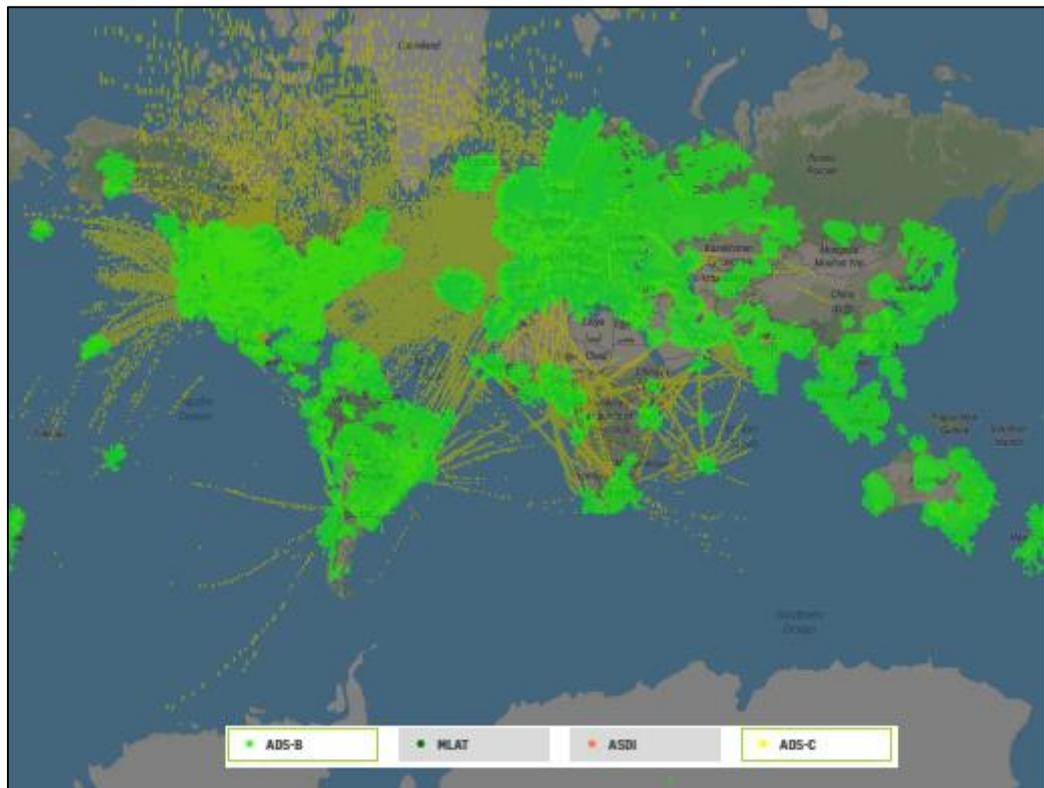


Figure II. 12 : couverture ADS-B et ADS-C dans le monde.

CHAPITRE II: Surveillance Dépendant Automatique -Diffusion

- L'Europe n'a pas encore choisi de support physique, mais les expérimentations en cours (eurocontrol, France, Allemagne, Belgique,...) utilisent principalement le 1090ES, en effet une simple modification logicielle des radars mode S existants leur permet de servir de station réceptrice pour l'ADS-B. La VDL mode 4 est privilégiée par la Suède, et par certaines compagnies aériennes. De toute manière, l'Europe étant bien couverte par les radars, l'implémentation de l'ADS-B est vue comme moins urgente qu'aux USA. Une expérimentation intéressante, "cristal med", vise à installer une couverture ADS-B du centre de la méditerranée.
- L'Australie est en train de déployer l'ADS-B en 1090ES, en commençant par les zones côtières (18 stations opérationnelles en décembre 2008) [16].

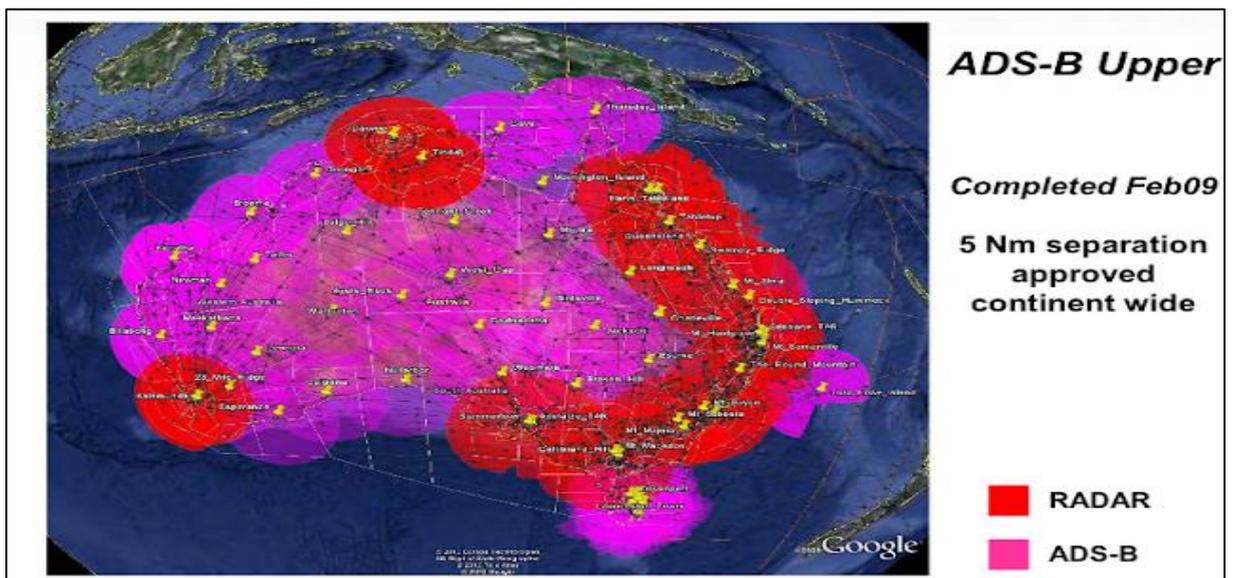


Figure II. 13 : couverture ADS-B et radar dans L'Australie

- L'OACI a normalisé le 1090ES et la VDL mode 4.
- ADS-B dans Algérie :

La présente circulaire d'information aéronautique a pour objet d'informer les exploitants des aéronefs équipés de FANS1/A de la mise en œuvre de la surveillance dépendante automatique ADS/C (Automatic Dependent Surveillance) dans l'espace aérien Algérien, à compter du 06 Février 2008 à 00h01 UTC [17].

Plan de Développement de la Gestion de l'Espace Aérien (PDGEA) Les objectifs :

- Mise à jour de l'actuel système de traitement automatique des fonctions de la circulation aérienne (TRAFCA) pour la partie Nord de l'espace aérien National
- Création d'un deuxième Centre de Contrôle Régional au sud de l'Algérie avec des moyens similaires à ceux du nord (avec l'introduction de l'ADS-B et de radar mode S)

Des infrastructures CNS (RADAR mode S, VHF, ADS/B) déjà défini dans ce plan vont être implémentées lors du déploiement de ce projet qui s'inscrit dans les projets de l'ENNA à court terme (Annexe 04) [18].

II.13 Sécurisation de l'ADS-B:

L'ADS-B étant non crypté, n'importe qui pourra suivre le trafic aérien avec un simple récepteur ADS-B, ce qui peut poser des problèmes de sécurité. Il en va de même à bord, ainsi un avion piraté qui connaît le trafic environnant pourrait être dirigé vers un autre avion en plein vol. Ce risque nouveau est l'objet de débats aux USA [11].

Chapitre III

Décodage de donnée de message ADS-B

III Décodage de donnée de message ADS-B

III.1 Principes de base de l'ADS-B

III.1.1 Structure des messages :

Un message ADS-B de 112 bits est composé de 5 parties.

Tableau III.1: composition de message ADS-B

DF 5	CA 3	OACI 24	Donnée 56	PI 24
------	------	---------	-----------	-------

Tout ADS-B doit commencer par le format 17 ou 18 en cas de message TIS-B. Ils correspondent à 10001 ou 10010 en binaire pour les 5 premiers bits. Les bits 6-8 sont utilisés comme un identificateur supplémentaire, qui a des significations différentes dans chaque sous-type ADS-B [19].

Le tableau III.2 suivant présente les renseignements clés d'un message ADS-B.

Tableau.III.2: Structure de message ADS-B

nBits	Bits	Abréviation	NOM
5	1-5	DF	Format de liaison descendante
3	6-8	CA	Capacité (identifiant supplémentaire)
24	9-32	ICAO	Adresse avion de l'OACI
56	33-88	Donnée	Les données
	[33-37]	[TC]	Code de type
24	89-112	PI	Parité / ID de l'interrogateur

Il est intéressant de noter que « l'ADS-B Extended squitter » envoyé à partir d'un transpondeur Mode S utilisation Format 17 (DF=17). Sous-systèmes de transmission ADS-B sans transpondeur et TIS-B Les émetteurs utilisent le format 18 (DF=18). En utilisant

DF=18 au lieu de DF=17, un sous-système de réception ADS-B/TIS-B saura que le message provient d'équipements qui ne peuvent être interrogés [19].

Un exemple :

Message brut en hexadécimal:
8D4840D6202CC371C32CE0576098

Tableau.III.3: présentation de donnée de message avec 3 bases.

HEX	8D	4840D6	202CC371C32CE0	576098
BIN	10001 101	010010000100 000011010110	[00100]0000010110011 00001101110001110000 110010110011100000	010101110110 000010011000
DEC	17 15		[4]	
	DF CA	ICAO	[TC] --- Donnée ---	PI

III.1.2 Adresse de l'OACI :

Dans chaque message ADS-B, l'expéditeur (aéronef d'origine) peut être identifié à l'aide de l'adresse de l'OACI. Il est situé de 9 à 32 bits en binaire (ou 3 à 8 en hexadécimal). Dans l'exemple ci-dessus, 4840D6 ou 010010000100. Une adresse unique de l'OACI est assignée à chaque transpondeur Mode-S d'un aéronef. Ainsi, il s'agit d'un identifiant unique pour chaque aéronef. Vous pouvez utiliser l'outil de requête (World Aircraft Base de données) de mode-s.org pour en savoir plus sur l'avion avec une adresse donnée de l'OACI. Par exemple, en utilisant l'exemple précédent OACI : 4840D6, il retournera le résultat d'un Fokker 70 avec enregistrement PH-KZD [19].

III.1.3 Types de messages ADS-B :

Pour identifier les informations contenues dans un message ADS-B, nous devons examiner le code de type du message, indiqué aux bits 33 à 37 du message ADS-B (ou aux 5 premiers bits du segment DATA) [19].

Dans le tableau III.4 qui suit, les relations entre chaque code de type et l'information qu'il contient sont indiquées.

Tableau.III.4: Code de type ADS-B et contenu.

Code de type	Contenu
1-4	Identification de l'aéronef
5-8	Position de la surface
9-18	Position aérienne (avec altitude barométrique)
19	Vitesses aéroportées
20-22	Position aérienne (avec hauteur GNSS)
23-27	Réservé
28	État de l'aéronef
29	État et état de la cible
30	Réservé
31	État de fonctionnement de l'aéronef

III.1.4 Somme de contrôle ADS-B :

Cela fait partie intégrante de la communication numérique. Il est important tout simplement parce que les erreurs habituellement causées par les interférences dues au bruit, à la dégradation des canaux et à la décoloration à voies multiples sont impossibles à éviter dans un système de communication donné, il est donc nécessaire de développer une technique pour le contrôler. Deux méthodes de contrôle des erreurs sont la demande de répétition automatique (ARQ) et la correction des erreurs d'acheminement (FEC). ARQ qui a été utilisé dans ce travail utilise un code de détection d'erreur comme la vérification de redondance cyclique (CRC) et la vérification de parité. Le bit de parité pour les données ADS-B est calculé par un contrôle de redondance cyclique (CRC) avec un polynôme de génération et en utilisant les 88 premiers bits du message ADS-B et ajoute ensuite la parité

à la fin du message ADS-B. Le polynôme du générateur CRC utilisé pour générer le bit de parité pour ce projet est illustré ci-dessous [20] :

$$G(X) = 1 + X^3 + X^{10} + X^{12} + X^{13} + X^{14} + X^{15} + X^{16} + X^{17} + X^{18} + X^{19} + X^{20} + X^{21} + X^{22} + X^{23} + X^{24} \quad (1.1)$$

L'ADS-B utilise un contrôle de redondance cyclique pour valider l'exactitude du message reçu. Où les 24 derniers bits sont les bits de parité. Le pseudo-code suivant décrit le CRC

Processus:

$$\text{GENERATOR} = 11111111111111010000001001$$

$$\text{Les 88 bits premiers de données} \otimes \text{ GENERATEUR} = 112 \text{ bits}$$

En vérifier les 24 bits du message :

Si n'a pas contient des '1' le message ne contient aucun erreur.

III.2 Identification de l'aéronef

Un message d'identification d'aéronef a DF: 17 ou 18, et TC: 1 à 4, le 56 bits

Le champ de données est configuré comme suit:

Tableau.III.5: présentation de champ de donnée de message d'identification de l'aéronef

Abbr	TC	EC	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
nBits	5 bits	3 bits	6 bits							

TC : code de Type

EC : catégorie d'émetteur

C* : un caractère

Pour décoder les caractères, une table de correspondance est nécessaire pour mapper les nombres en caractères. Il est défini comme suit, où le # n'est pas utilisé et _ représente une séparation

#ABCDEFGHIJKLMNQRSTUWXYZ#####_#####0123456789#####

En résumé, les caractères et leurs représentations décimales sont:

A - Z : 1 - 26

0 - 9 : 48 - 57

_ : 32

La valeur CE en combinaison avec la valeur TC définit la catégorie de l'aéronef (comme: lourd, grand, petit, léger, planeur, etc.). Lorsque EC est défini sur zéro, ces informations ne sont pas disponibles [19].

Par exemple:

8D4840D6202CC371C32CE0576098

La structure du message est la suivante:

	DF...	CA.	ICAO-----	Donnée-----			PI....
HEX :	8	D	4840D6	2	0	2CC371C32CE0	576098
BIN :	10001	101	*****	00100	000	*****	*****
DEC :	17	15		4	0		
				TC	*		

Notez que le code de type est à l'intérieur de la trame de donnée (5 premiers bits). Avec DF = 17 et TC = 4, nous pouvons confirmer qu'il s'agit d'un message d'identification d'aéronef. Les indicatifs d'avion peuvent alors être décodés [19].

Dans l'exemple de message précédent, il est facile de décoder le segment de données :

Tableau.III.6: présentation de caractères de message d'identification

HEX	20	2CC371C32CE0							
BIN :	001000	001011	00110	00110	11000	11000	11001	11001	10000
	00		0	1	1	0	0	1	0
DEC:		11	12	13	49	48	50	51	32
LTR:		K	L	M	1	0	2	3	-

Donc, l'indicatif d'appel final de l'avion décodé est: KLM1023

III.3 Rapport de position compact

Les informations de position dans les messages ADS-B sont codées dans un format de rapport de position compact (CPR). L'idée générale derrière la CPR est de pouvoir encoder plus de décimales de coordonnées en utilisant moins de bits. Pour ce faire, on négocie l'ambiguïté et le temps des positions mondiales avec une précision de position locale [19].

III.3.1 Le CPR et les fonctions

Bien sûr, l'algorithme de CPR est plus compliqué, mais le principe est très similaire à celui de l'exemple précédent. Si un seul message est donné, il est possible de trouver plusieurs solutions réparties dans le monde. La combinaison de deux (différents types de) messages donnera le résultat final [19].

Dans le codage CPR, la Terre est divisée en plusieurs zones (similaire à la grille de l'exemple précédent). Et l'algorithme de codage est également plus compliqué (décrit dans une section ultérieure). Tout d'abord, nous allons lister ici quelques paramètres et fonctions communes utilisés dans le processus de décodage [19].

III.3.2 Nombre de zones de latitude géographiques

Nombre de zones de latitude géographiques entre l'équateur et un pôle. Il est réglé sur $NZ = 15$ pour le codage CPR Mode-S.

III.3.3 La fonction floor(x)

La fonction floor (x) définit comme la plus grande valeur entière k, telle que

$k \leq x$, par exemple:

$\text{floor}(5.6) = 5$

$\text{floor}(-5,6) = -6$

III.3.4 La fonction de module:

La fonction de module mod (x, y) retourne:

$$x - y * \text{floor}\left(\frac{x}{y}\right) \quad (1.2)$$

Où y ne peut pas être zéro

III.3.5 Nombre de zones de longitude "NL(lat)":

Indique la fonction «nombre de zones de longitude», étant donné l'angle de latitude lat. La valeur entière renvoyée est contrainte dans [1, 59], calculée comme suit [19]:

$$NL(lat) = \text{floor} \left(\frac{2\pi}{\arccos \left(1 - \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2 * NZ}\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi}{180} * lat\right)} \right)} \right) \quad (1.3)$$

Pour les latitudes proches de l'équateur ou des pôles, l'une des valeurs suivantes est renvoyée:

$$\text{lat} = 0 \rightarrow NL = 59$$

$$\text{lat} = +87 \rightarrow NL = 2$$

$$\text{lat} = -87 \rightarrow NL = 2$$

$$\text{lat} > +87 \rightarrow NL = 1$$

$$\text{lat} < -87 \rightarrow NL = 1$$

III.4 Positions aéroportées

Un message de position aérienne a un format de liaison descendante 17 (ou 18) avec un code de type de 9 à 18

Les messages sont composés comme indiqué dans le tableau III.7 suivant [19] :

Tableau.III.7: Bits de message de position aéroportés expliqués

Bits de données	MSG Bits	N-bit	Abbr	Contenu
33-37	1-5	5	TC	Code de type
38-39	6-7	2	SS	Statut de surveillance
40	8	1	NICsb	NIC supplément-B
41-52	9-20	12	ALT	Altitude
53	21	1	T	Tempe
54	22	1	F	Indicateur de trame pair / impair RCP
55-71	23-39	17	LAT-CPR	Latitude au format RCP
72-88	40-56	17	LON-CPR	Longitude au format RCP

Deux types de messages de position (images impaires et paires) sont diffusés en alternance.

Il y a deux façons différentes de décoder une position aéroportée à partir de ces messages :

- Position inconnue, utilisant les deux types de messages (aussi appelée position non ambiguë dans le monde)
- Connaître la position précédente en n'utilisant qu'un seul message (aussi appelé position locale non ambiguë)

III.4.1 Position globale non ambiguë (décodage avec deux messages)

Message impaire ou pair?

Pour chaque trame, le bit 54 détermine s'il s'agit d'une trame impaire ou paire:

0 ==> trame paire

1 ==> trame impair

Par exemple, les deux messages suivants sont reçus:

8D40621D58C382D690C8AC2863A7

8D40621D58C386435CC412692AD6

	ICAO24	Donnée	CRC
8D	40621D	58C382D690C8AC	2863A7
8D	40621D	58C386435CC412	692AD6

Les données utiles au format binaire:

Tableau.III.8 : Présentation de données de 2 messages en binaire.

Donnée						
TC	...	ALT	T	F	CPR-LAT	CPR-LON
01011	000	110000111000	0	0	10110101101001000	01100100010101100
01011	000	110000111000	0	1	10010000110101110	01100010000010010

Dans les deux messages, nous pouvons trouver $DF = 17$ et $TC = 11$, avec la même adresse ICAO24 40621D. Ces deux trames sont donc valables pour décoder les positions de cet avion.

Supposons que le premier message est le dernier message reçu.

La représentation des coordonnées par CPR**Tableau.III.9** La représentation des coordonnées par CPR en binaire

F	CPR Latitude	CPR Longitude
0	10110101101001000	01100100010101100
1	10010000110101110	01100010000010010

====> plus récent

Étape 1: Convertissez la chaîne binaire en valeur décimale :

En décimal :

Tableau.III.10 La représentation des coordonnées par CPR en décimal

0	93000	51372
1	74158	50194

LAT_CPR_EVEN: 93000 / 131072 -> 0.7095

LON_CPR_EVEN: 51372 / 131072 -> 0.3919

LAT_CPR_ODD: 74158 / 131072 -> 0.5658

LON_CPR_ODD: 50194 / 131072 -> 0.3829

Comme la latitude et la longitude du CPR sont codées sur 17 bits, 131072 (2^{17}) est la valeur maximale. Les valeurs résultantes à partir des calculs représentent les pourcentages de cette valeur maximale [19].

Étape 2: Calculez l'indice de latitude j

Utilisez l'équation suivante:

$$j = \text{floor}\left(59 * LAT_{cprE} - 60 * LAT_{cprO} + \frac{1}{2}\right) \quad (1.4)$$

Étape 3: Calculez Latitude

Tout d'abord, deux constantes seront utilisées:

$$dLat_{even} = \frac{360}{4 * NZ} = \frac{360}{60} \quad (1.5)$$

$$dLat_{odd} = \frac{360}{4 * NZ - 1} = \frac{360}{59}$$

Ensuite, nous pouvons utiliser les équations suivantes pour calculer les latitudes relatives:

$$\begin{aligned} Lat_{even} &= dLat_{even} * [mod(j; 60) + LAT_{cprE}] \\ Lat_{odd} &= dLat_{odd} * [mod(j; 59) + LAT_{cprO}] \end{aligned} \quad (1.6)$$

Pour l'hémisphère sud, les valeurs tomberont de 270 à 360 degrés. Nous devons faire Assurez-vous que la latitude est comprise dans l'intervalle [-90, +90]:

$$\begin{aligned} Lat_{even} &= Lat_{even} - 360 \text{ si } (Lat_{even} \geq 270) \\ Lat_{odd} &= Lat_{odd} - 360 \text{ si } (Lat_{odd} \geq 270) \end{aligned} \quad (1.7)$$

La latitude finale est choisie en fonction de l'horodatage des images, la plus récente étant utilisé :

$$Lat = \begin{cases} Lat_{even} ; & \text{si } (T_{even} \geq T_{odd}) \\ Lat_{odd} & \end{cases} \quad (1.8)$$

Dans l'exemple :

$$Lat_{even} = 52.25720214843750$$

$$Lat_{odd} = 52.26578017412606$$

$$Lat = Lat_{even} = 52.25720$$

Étape 3: Vérifier la cohérence de la zone de latitude

Calculer NL (Lat E) et NL (Lat O). Si ce n'est pas le même, deux positions sont situées à des zones de latitude différentes. Le calcul d'une longitude globale n'est pas possible. Quittez le calcul et attendez les nouveaux messages. Si deux valeurs sont identiques, nous procédons au calcul de la longitude [19].

Calculer la longitude :

Si la trame paire vient plus tard $T_{EVEN} > T_{ODD}$:

$$ni = \max(Nl(Lat_{even}), 1) \quad (1.9)$$

$$dLon = \frac{360}{ni} \quad (1.10)$$

$$m = \text{floor}\left\{Lon_{cprEven} * [NL(Lat_{even}) - 1] - Lon_{cprOdd} * NL(Lat_{even}) + \frac{1}{2}\right\} \quad (1.11)$$

$$Lon = dLon * (\text{mod}(m, ni) + Lon_{cprEven})$$

Dans le cas où la trame impaire arrive le dernier T EVEN < T ODD:

$$ni = \max(NL(Lat_{even}) - 1, 1) \quad (1.12)$$

$$dLon = \frac{360}{ni} \quad (1.13)$$

$$m = \text{floor}\left\{Lon_{cprEven} * [NL(Lat_{odd}) - 1] - Lon_{cprOdd} * NL(Lat_{odd}) + \frac{1}{2}\right\} \quad (1.14)$$

$$Lon = dLon * (\text{mod}(m, ni) + Lon_{cprOdd}) \quad (1.15)$$

Si le résultat est supérieur à 180 degrés:

$$Lon = lon - 360 \text{ si } (lon \geq 180) \quad (1.16)$$

Dans l'exemple :

Lon: 3.91937

Calculer l'altitude

L'altitude de l'avion est beaucoup plus facile à calculer à partir de la trame de données. Les bits dans [19]:

Le champ d'altitude (cadre pair ou impair) est le suivant:

1100001 1 1000

^

Q-bit

Ce bit Q (bit 48) indique si l'altitude est codée en multiples de 25 ou 100 pieds. (0: 100 pi, 1: 25 pi).

Pour Q = 1, on peut calculer l'altitude comme suit:

Tout d'abord, supprimez le bit Q:

$$N = 1100001\ 1000 \Rightarrow 1560 \text{ (en décimal)}$$

La valeur finale de l'altitude sera:

$$Alt = N * 25 - 1000 \text{ (pieds)} \quad (1.17)$$

Dans cet exemple, l'altitude à laquelle l'avion vole est:

$$1560 * 25 - 1000 = 38000 \text{ pieds.}$$

Notez que l'altitude a une précision de +/- 25 m lorsque le bit Q est 1 et la valeur peut représenter des altitudes de -1000 à +50175 pieds.

La position finale

Enfin, nous avons les trois composantes (latitude / longitude / altitude) de la position de l'avion:

LAT: 52.25720 (degrés N)

LON: 3,91937 (degrés E)

ALT: 38000 pieds

III.4.2 Position localement non ambiguë (décodage avec un message)

Cette méthode donne la possibilité de décoder un avion en utilisant un seul message connaissant une position de référence. Cette méthode calcule l'indice de latitude (j) et l'indice de longitude (m) sur la base de cette référence et peut être utilisé avec l'un ou l'autre type de message [19].

La position de référence

La position de référence doit être proche de la position réelle (par exemple, la position de l'aéronef décodée, ou l'emplacement de l'antenne ADS-B), et doit être dans les 180 NM intervalle [19].

a. Calculer dLat :

$$dLat = \begin{cases} \frac{360}{4 * NZ} = \frac{360}{60} \text{ cas de message impair} \\ \frac{360}{4 * NZ - 1} = \frac{360}{59} \text{ ca de message pair} \end{cases} \quad (1.18)$$

b. Calculer l'index de latitude j :

$$j = \text{floor}\left(\frac{\text{LAT}_{\text{ref}}}{d\text{Lat}}\right) + \text{floor}\left(\frac{\text{mod}(\text{LAT}_{\text{ref}}, d\text{Lat})}{d\text{Lat}}\right) - \text{LAT}_{\text{cpr}} + \frac{1}{2} \quad (1.19)$$

c. Calculer l'altitude :

$$\text{Lat} = d\text{Lat} * (j + \text{Lat}_{\text{cpr}}) \quad (1.20)$$

d. Calculer dLon :

$$\text{Lat} = \begin{cases} \frac{360}{\text{NL}(\text{lat})} & \text{si NL}(\text{lat}) > 0 \\ 360 & \text{si NL}(\text{lat}) = 0 \end{cases} \quad (1.21)$$

e. Calculer l'indice de longitude m :

$$j = \text{floor}\left(\frac{\text{Lon}_{\text{ref}}}{d\text{Lon}}\right) + \text{floor}\left(\frac{\text{mod}(\text{Lon}_{\text{ref}}, d\text{Lon})}{d\text{Lon}}\right) - \text{Lon}_{\text{cpr}} + \frac{1}{2} \quad (1.22)$$

f. Calculer la longitude :

$$\text{Lon} = d\text{Lon} * (m + \text{Lon}_{\text{cpr}}) \quad (1.23)$$

Exemple :

Pour le même exemple de message:

8D40621D58C382D690C8AC2863A7

Reference position:

LAT: 52.258

LON: 3.918

La structure du message est la suivante:

8D40621D58C382D690C8AC2863A7

	ICAO24	Donnée	CRC
8D	40621D	58C382D690C8AC	2863A7

Données en binaire:

Tableau.III.11: représentation de données de message de position en binaire

Donnée						
TC	...	ALT	T	F	CPR-LAT	CPR-LON
01011	000	110000111000	0	0	10110101101001000	01100100010101100

Représentation CPR:

Tableau.III.12 : Représentation CPR de coordonnées

F	CPR Latitude	CPR Longitude
0	10110101101001000	01100100010101100
	93000 / 131072 0.7095	51372 / 131072 0.3919

- d_lat: 6
- j: 8
- lat: 52.25720
- m: 0
- d_lon: 10
- lon: 3.91937

III.5 Vitesse aéroportée

Il existe deux types de messages pour les vitesses, déterminés par un sous-type à 3 bits dans le message. Avec les sous-types 1 et 2, la vitesse de surface (vitesse au sol) est indiquée. Et dans les sous-types 3 et 4, la vitesse indiquée est indiquée.

Les types 2 et 4 sont destinés aux avions supersoniques. Donc, avant que nous ayons un autre avion commercial supersonique en vol, vous ne verrez aucun de ces types.

Dans le monde réel, très peu de messages du sous-type 3 sont signalés. Dans notre configuration, nous n'avons reçu que 0,3% de ces messages concernant le sous-type 1. Un message de vitesse d'aéronef a DF: 17 ou 18, TC: 19 et les codes de sous-type sont représentés dans les bits 38 à 40. Nous pouvons maintenant décoder ces messages [19].

III.5.1 Sous-type 1 (vitesse au sol)

Le sous-type 1 (vitesse subsonique, vitesse au sol) est diffusé lorsque l'information sur la vitesse au sol est disponible. La vitesse de l'avion contient des informations sur la vitesse et le cap. La vitesse et le cap sont également décomposés en composantes Nord-Sud et Est-Ouest [19].

Par exemple, le message suivant est reçu:

Message: 8D485020994409940838175B284F

Tableau.III.13 : Structure de message de vitesse en hexadécimal

	ICAO24	Donnée	CRC
8D	485020	99440994083817	5B284F

Convertir les données [99440994083817] en binaires:

Tableau.III.14 : structure de donnée de message de vitesse en binaire

Donnée						
TC	ST	IC	RESV_A	NAC	S-EV	V-EW
01011	001	0	1	000	1	0000001001

S-NS	V-NS	VrSrc	S-Vr	Vr	RESV_B	S_DIF	DIF
1	0010100000	0	1	000001110	00	0	0010111

Il y a plusieurs paramètres dans le message de vitesse. De gauche à droite, le nombre de bits indique le contenu du tableau III.15 suivant.

Tableau.III.15 : Explication des bits du message de vitesse dans l'air - Sous-type 1

Bits MSG	Bits de données	Len	Abbr	Contenu
33-37	1-5	5	TC	Code de type
38-40	6-8	3	ST	Sous-type
41	9	1	IC	changement d'indicateur
42	10	1	RESV_A	Réservé-A
43-45	11-13	3	NAC	incertitude de vitesse (NAC)

46	14	1	S_ew	Indicateur de vitesse est-ouest
47-56	15-24	10	V_ew	Vitesse Est-Ouest
57	25	1	S_ns	Indicateur de vitesse nord-sud
58-67	26-35	10	V_ns	Vitesse nord-sud
68	36	1	VrSrc	Source de débit vertical
69	37	1	S_vr	Signe de taux vertical
70-78	38-46	9	Vr	Taux vertical
79-80	47-48	2	RESV_B	Réservé-B
81	49	1	S_Dif	Diff de baro alt, panneau
82-88	50-56	7	Dif	Diff de baro alt

a. Vitesse horizontale

Pour calculer la vitesse horizontale et le cap, nous avons besoin de quatre valeurs: Vitesse S_ew, Signe de Vitesse Est-Ouest, Vitesse S_ns, Signe de Vitesse Nord-Sud. Et faites attention aux indications (signes) dans le calcul.

S_ns:

1 -> Volant du nord au sud

0 -> volant du sud au nord

S_ew:

1 -> volé d'est en ouest

0 -> volant d'ouest en est

La vitesse (v) et le cap (h) avec unité de nœud et degré peuvent être calculés comme suit:

$$V_{we} = \begin{cases} -1 * (V_{we} - 1); & \text{si } S_{ew} = 1 \\ (V_{we} - 1); & \text{si } S_{ew} = 0 \end{cases} \quad (1.24)$$

$$V_{sn} = \begin{cases} -1 * (V_{ns} - 1); & \text{si } S_{ns} = 1 \\ (V_{ns} - 1); & \text{si } S_{ns} = 0 \end{cases} \quad (1.25)$$

$$v = \sqrt{V_{we}^2 + V_{sn}^2} \quad (1.26)$$

$$h = \arctan2(V_{we}, V_{sn}) * \frac{360}{2\pi} \text{ (deg)} \quad (1.27)$$

En cas de valeur négative ici, nous ajouterons simplement 360 degrés.

$$h = h + 360 \text{ (si } h < 0)$$

Nous avons maintenant la vitesse et le titre de notre exemple:

V-EW: 0000001001 -> 9
 S-EW: 1
 V-NS: 0010100000 -> 160
 S-NS: 1
 $V_{\{we\}} = - (9 - 1) = -8$
 $V_{\{sn\}} = - (160 - 1) = -159$
 $v = 159.20 \text{ (kt)}$
 $h = 182.88 \text{ (deg)}$

b. Taux vertical

La direction du mouvement vertical des avions peut être lue dans le champ S vr, dans le message [19]

bit-69:

0 -> vers le haut

1 -> Bas

Le taux vertical réel Vr est la valeur des bits 70 à 78, moins 1, puis multiplié par 64 pieds / minute (pieds / minute). Dans notre exemple:

Vr-bits: 000001110 = 14

$$Vitesse\ réel = (Vr - 1) * 64 \quad (1.28)$$

$$Vr: (14 - 1) * 64 \Rightarrow 832 \text{ pi / min}$$

S-Vr: 0 => monter / Descendre

Nous voyons donc un avion descendant à une vitesse de descente de 832 ft / min.

Le champ Source de débit vertical (VrSrc) détermine s'il s'agit d'une mesure en altitude pression atmosphérique ou altitude géométrique:

0 -> Taux de changement d'altitude baro-pression

1 -> Taux de changement d'altitude géométrique

III.5.2 Sous-type 3 (vitesse)

Le sous-type 3 (subsonique, vitesse) est diffusé lorsque les informations de vitesse sol ne sont PAS disponibles, alors que la vitesse est disponible. La structure du message est similaire à la précédente. Examinons de près un exemple de décodage ici [19].

Message: 8DA05F219B06B6AF189400CBC33F

8D	ICAO24 A05F21	Donnée 9B06B6AF189400	CRC CBC33F
----	------------------	--------------------------	---------------

Convertir les données [9B06B6AF189400] en binaire :

TC	ST	IC	RESV_A	NAC	S-hdg	Hdg	AS-t	AS
10011	011	0	0	000	1	1010110110	1	0101111000

VrSrc	S-Vr	Vr	RESV_B	S_Dif	Dif
1	1	000100101	00	0	0000000

Les détails de tous les bits de données sont décrits dans le tableau III.16 suivant:

Tableau.III.16 : Explication des bits du message de vitesse en vol - Sous-type 3

Donnée MSG	Bits MSG	Len	Abbr	Contenu
33 - 37	1-5	5	TC	Code de type
38 - 40	6-8	3	ST	Sous-type
41	9	1	IC	Indicateur de changement d'intention
42	10	1	RESV A	Réservé-A
43 - 45	11-13	3	NAC	Incertitude de vitesse (NAC)
46	14	1	S hdg	Statut titre
47 - 56	15 -24	10	Hdg	Rubrique (proportion)
57	25	1	AS-t	Type de vitesse aérienne
58 - 67	26 - 35	10	AS	Vitesse aérienne
68	36	1	VrSrc	Source à débit vertical
69	37	1	S vr	Panneau de taux vertical
70 - 78	38 - 46	9	Vr	Taux vertical
79 - 80	47 - 48	2	RESV B	Réservé-B
81	49	1	S Dif	Différence avec Baro alt, signe
82 - 88	50 - 66	7	Dif	Différence avec Baro alt

a. Cap

S hdg rend le statut des données de cap:

0 -> données de cap non disponibles

1 -> données de cap disponibles

Hdg 10 bits représente la proportion des degrés d'un cercle complet, c'est-à-dire 360 degrés.

(Remarque: 0000000000 - 1111111111 représente 0 - 1023)

$$\text{Cap} = \frac{\text{Décimal(hdg)}}{1024} * 360^\circ \quad (1.29)$$

Dans notre exemple:

1010110110 -> 694

cap = 694 / 1024 * 360 = 243.98 (dégrée)

b. Vitesse (vitesse aérienne)

Pour savoir quel type de vitesse (TAS ou IAS), il faut d'abord regarder l'AS-t champ:

0 -> Vitesse indiquée (IAS)

1 -> Vitesse vraie (TAS)

Et puis la vitesse est simplement une conversion binaire à décimale de bits AS (en noeud).

Dans notre

Exemple:

0101111000 -> 376 nœuds

c. Taux vertical

La direction du mouvement vertical des avions peut être lue dans le champ S vr, dans le message [19].

bit-69:

0 -> vers le haut

1 -> Bas

Le taux vertical réel Vr est la valeur des bits 70 à 78, moins 1, puis multiplié par 64 pieds / minute (pieds / minute). Dans notre exemple:

Vr-bits: 000001110 = 14

Vr: (14 - 1) x 64 => 832 pi / min

S-Vr: 0 => monter / Descendre

Nous voyons donc un avion descendant à une vitesse de descente de 832 ft / min.

Le champ Source de débit vertical (VrSrc) détermine s'il s'agit d'une mesure en altitude pression atmosphérique ou altitude géométrique:

0 -> Taux de changement d'altitude baro-pression

1 -> Taux de changement d'altitude géométrique

Chapitre IV :

Simulations et résultats

IV.1 Aperçu de chapitre

Comme indiqué dans le chapitre précédent que l'ADS-B a un préambule connu sous le format de liaison descendante (DF) DF=17 qui signifie que le message est « extended squitter », le DF=17 signifie que le message est un TIS-B, notre objectif dans cette recherche est DF=17 et spécifiquement au bloc de données du message DF=17. Le processus de décodage a été montré en utilisant le script MATLAB.

IV.2 Validation du script ADS-B

Il est raisonnable de mettre en doute la validité du décodeur ADS-B, ADS-B dépend du code expliqué avec les organigrammes suivants et voici quelques exemples de messages et de résultats dans le programme MATLAB.

IV.3 Résultats du décodage et de la simulation

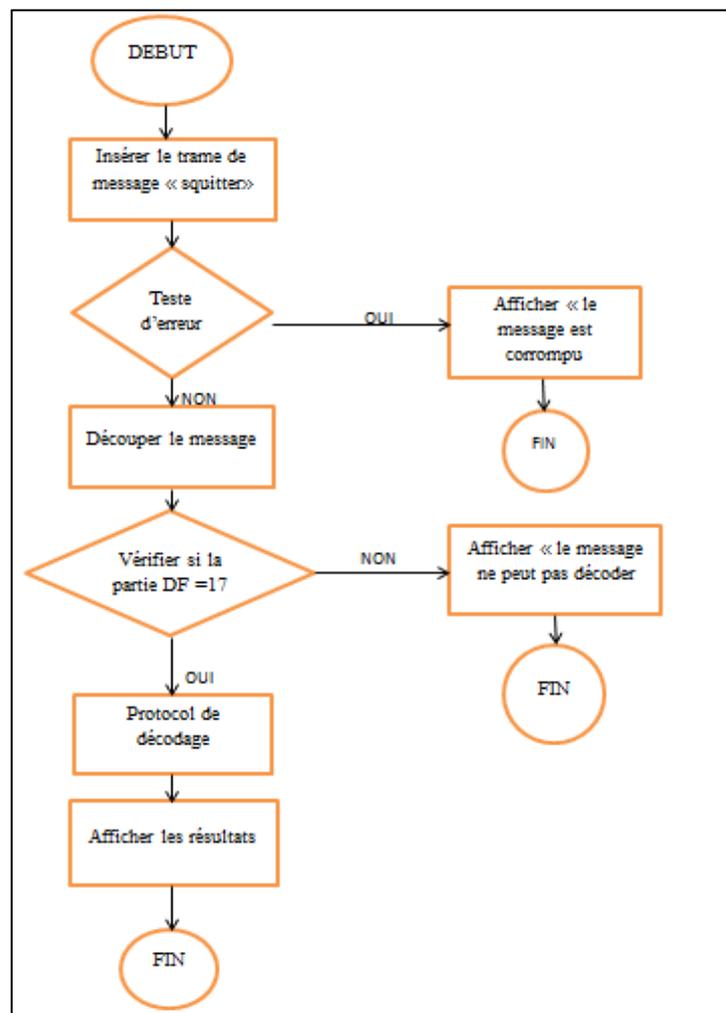
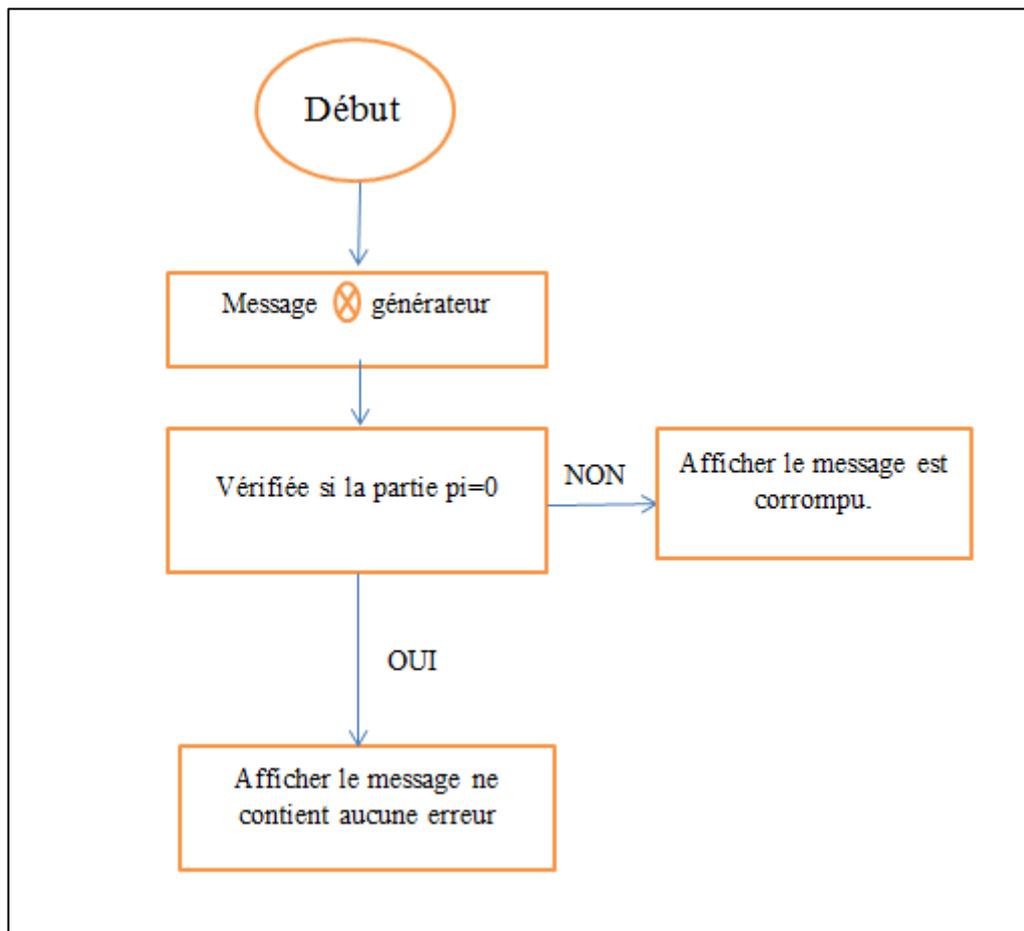


Figure IV.1: Organigramme générale du programme

IV.3.1 Test d'erreur :

**Figure IV.2:** Organigramme de test d'erreur.

- **Exemple n01 :** le message ne contient aucune erreur

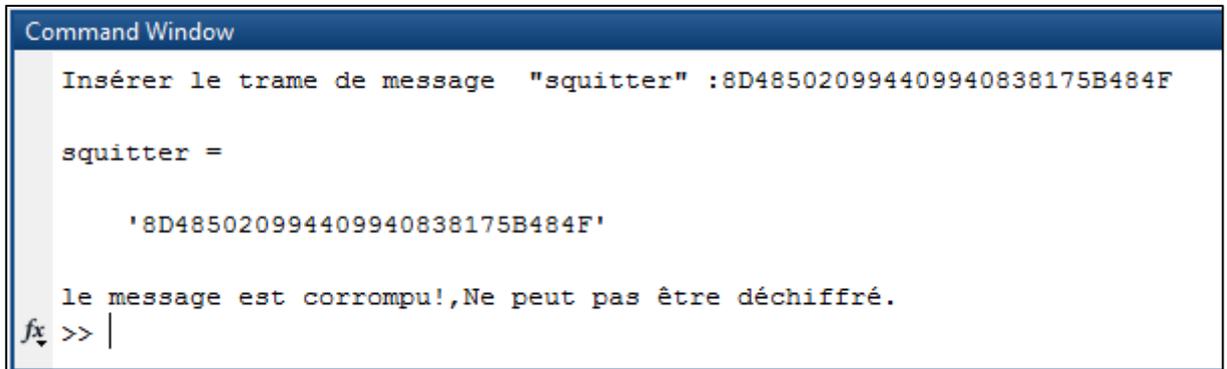
8D4840D6202CC371C32CE0576098

```
Command Window
Insérer le trame de message "squitter" :8D4840D6202CC371C32CE0576098
squitter =
    '8D4840D6202CC371C32CE0576098'
le message ne contien aucun erreur
```

Figure IV.3: résultats de simulation de l'exemple n01 de test l'erreur

- **Exemplen02** : le message contient des erreurs

Le message ADS-B : 8D4850209940838175B484F



```
Command Window
Insérer le trame de message "squitter" :8D485020994409940838175B484F
squitter =
      '8D485020994409940838175B484F'
le message est corrompu!,Ne peut pas être déchiffré.
fx >> |
```

Figure IV.4: résultats de simulation de l'exemple n02 de test l'erreur.

En voit que le message ne peut pas déchiffrée, par ce qu'il contient des erreurs.

IV.3.2 Détection de l'indicatif d'appel de l'avion « callsign »

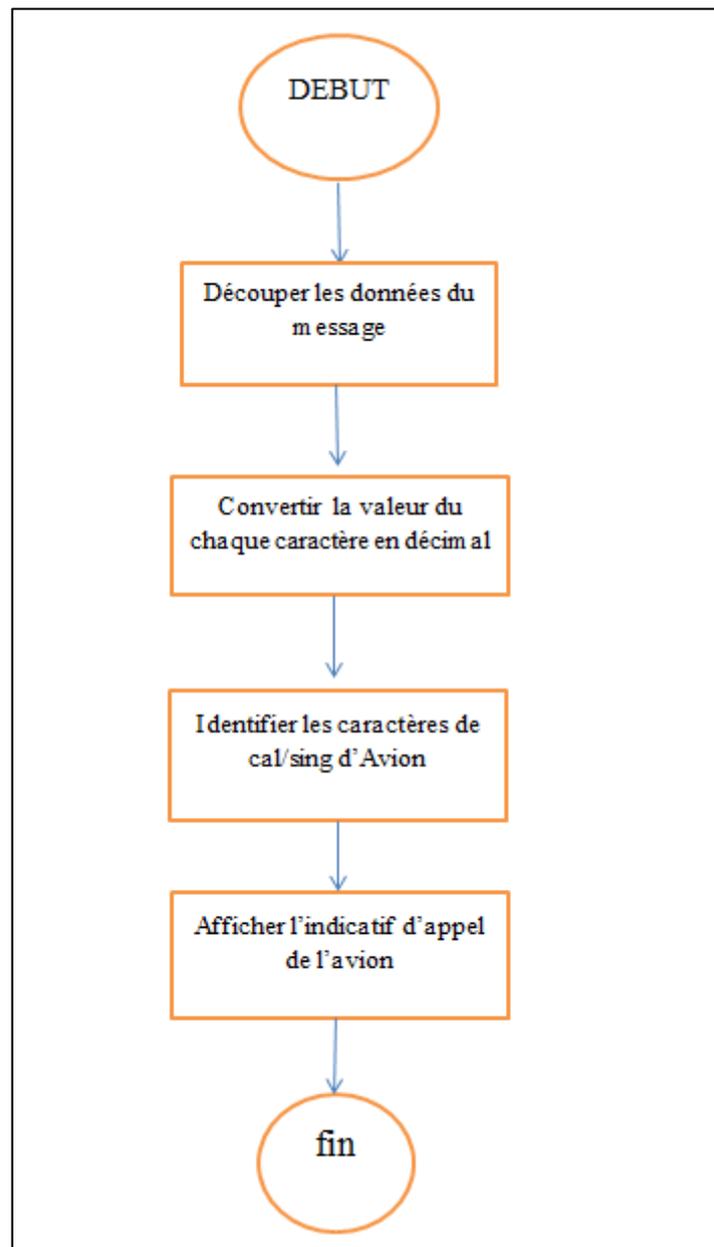


Figure IV.5: Organigramme de l'identification de l'aéronef.

– Exemple n 01 :

8D4840D6202CC371C32CE0576098

– Exemple n 02:

8D406B902015A678D4D220AA4BDA

```

Command Window
Insérer le trame de message "squitter" :8D4840D6202CC371C32CE0576098

squitter =

    '8D4840D6202CC371C32CE0576098'

le message ne contient aucun erreur

msg =

    struct with fields:

        DF: 17
        CA: 5
        ICAO: '4840D6'
        TC: 4
        DATA: [0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 0 0
        PI: [0 1 0 1 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0 0]

l'indicatif d'appel de l'avion est: KLM1023_
fx >> |

```

Figure IV.6: résultats de simulation de l'exemple n01 de l'identification d'un aéronef

```

Command Window
Insérer le trame de message "squitter" :8D406B902015A678D4D220AA4BDA

squitter =

    '8D406B902015A678D4D220AA4BDA'

le message ne contient aucun erreur

msg =

    struct with fields:

        DF: 17
        CA: 5
        ICAO: '406B90'
        TC: 4
        DATA: [1x56 double]
        PI: [1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1 0 1 0]

l'indicatif d'appel de l'avion est: EZY85MH_
fx >> |

```

Figure IV.7 : résultats de simulation de l'exemple n02 de l'identification d'un aéronef.

En voit que les 2 messages est bien déchiffré, d'après le découpage en a identifier que les 2 messages sont des messages d'identification d'aéronef et en peut attirez le Call Sign de l'avion.

IV.3.3 Calcule de la Position globale non ambiguë (décodage avec deux messages) :

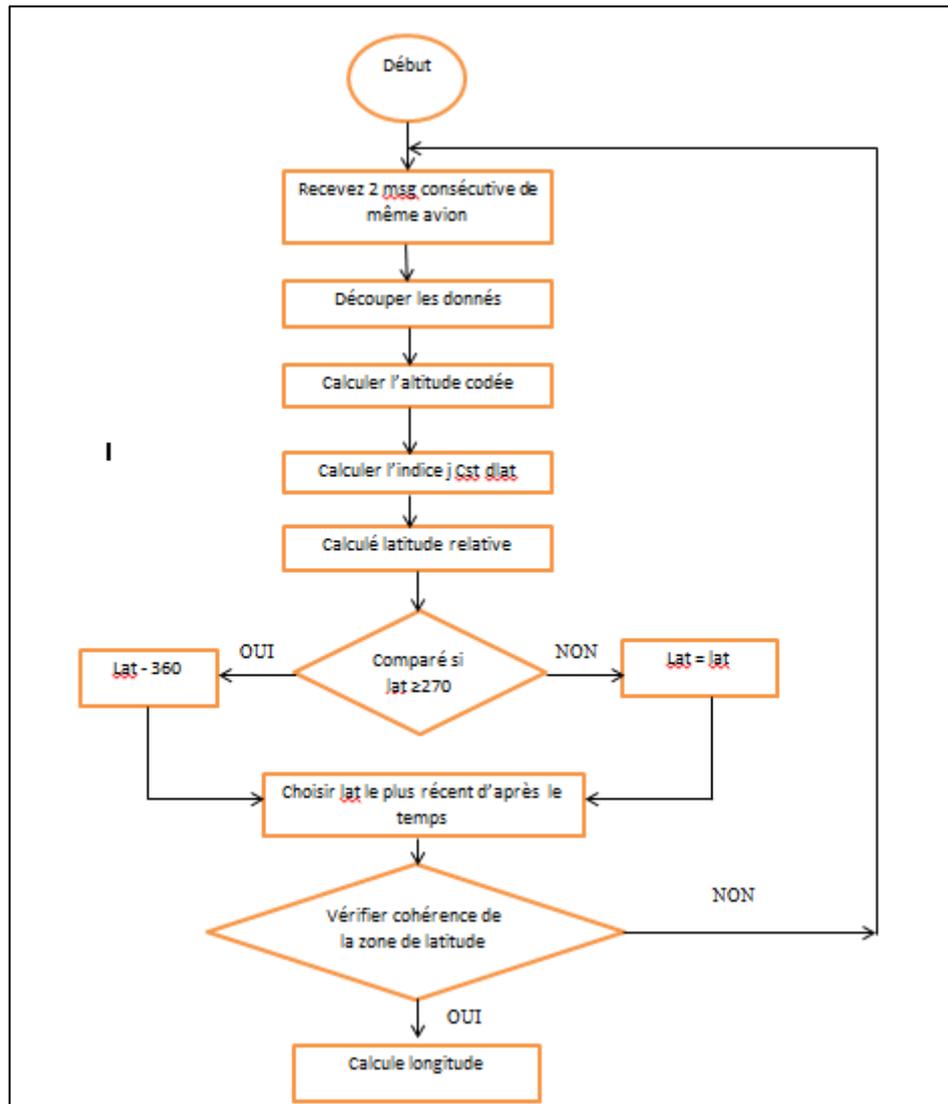


Figure IV.8: Organigramme pour calculer latitude

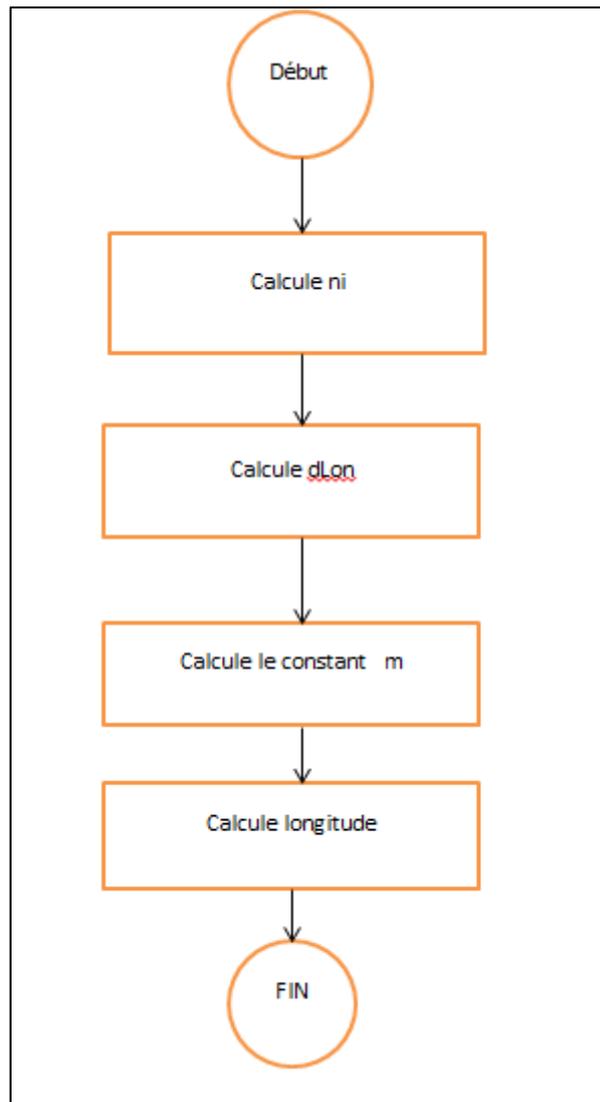


Figure IV.9 : Organigramme de calculer longueur

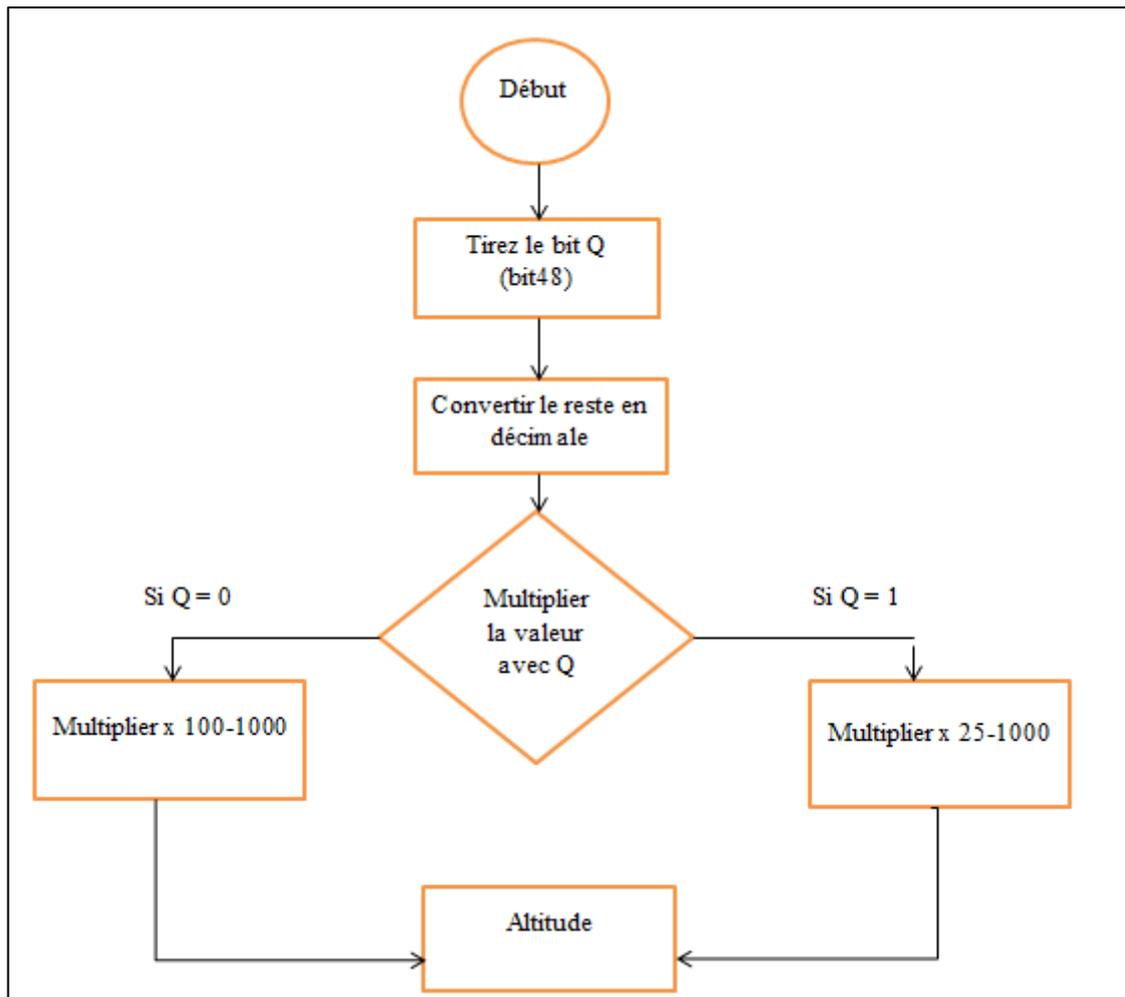


Figure IV.10 : Organigramme de calcul de l'altitude.

– Exemple n01 :

8D40621D58C382D690C8AC2863A7

8D40621D58C386435CC412692AD6

– Exmple n02 :

8D406B9058B9826F3F058743807B

8D406B9058B985DC7AFE467AEBF6

```

squitter =

      '8D40621D58C382D690C8AC2863A7'

le message ne contien aucun erreur

msg =

  struct with fields:

    DF: 17
    CA: 5
    ICAO: '40621D'
    TC: 11
    DATA: [0 1 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0
    PI: [0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 1]

```

Figure IV.11: affichage de donnée de 1er message 'exemple n01'

```

le message ne contien aucun erreur

MSG02 =

  struct with fields:

    DF: 17
    CA: 5
    ICAO: '40621D'
    TC: 11
    DATA: [0 1 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1 1 0
    PI: [0 1 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 1 0 1 1 0]

le messagele plus recent est (1 ou 2)!! : 1

```

Figure IV.12: affichage de donnée de 2em message 'exemple n01'

```

Command Window

MSG =

      'Le calcul des coordonnées est réussi!'

latitude actuelle de lavion est :52.2572°
longitude actuelle de lavion est :3.9194°
l'altitude actuelle de lavion est :38000 pieds

fx >>

```

Figure IV.13 : résultats de simulation de calculer de la position 'ex01'

```

Command Window

squitte =

    '8D406B9058B9826F3F058743807B'

le message ne contien aucun erreur

msg =

  struct with fields:

    DF: 17
    CA: 5
    ICAO: '406B90'
    TC: 11
    DATA: [1x56 double]
    PI: [1x24 double]

```

Figure IV.14 : Affichage de donnée de 1er message exemple n02

```

Command Window

le message ne contien aucun erreur

MSG02 =

  struct with fields:

    DF: 17
    CA: 5
    ICAO: '406B90'
    TC: 11
    DATA: [1x56 double]
    PI: [1x24 double]

```

Figure IV.15 :Affichage de donnée de 1er message exemple n02

```

Command Window

MSG =

    'Le calcul des coordonnées est réussi!'

latitude actuelle de lavion est :51.6518°
longitude actuelle de lavion est :4.9699°
l'altitude actuelle de lavion est :36000 pieds

fx >>

```

Figure IV.16 : Résultats de simulation de calculer de la position "ex02"

IV.3.4 Calcule de la position locale no ambiguïté :

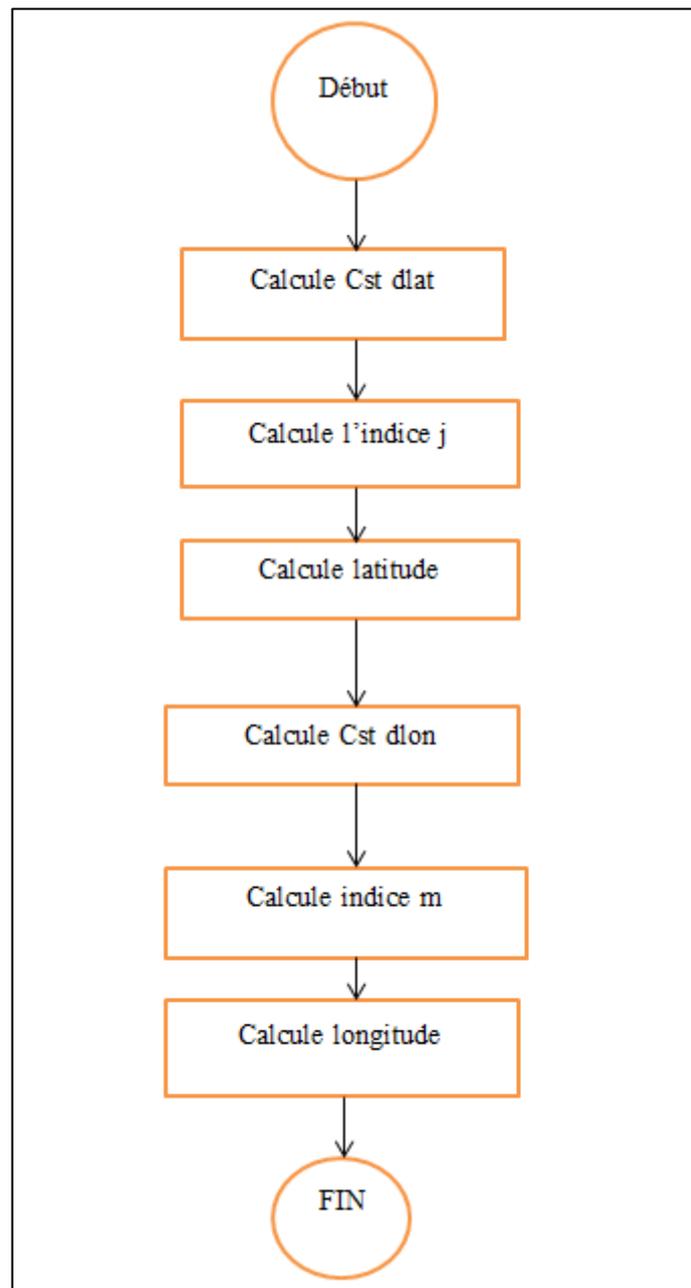


Figure IV.17: Organigramme de position locale no ambiguïté

– Exemple n01 :

8D40621D58C382D690C8AC2863A7

Latitude référentiel : 52.258

Longitude référentiel : 3.918

```
Command Window
Insérer le trame de message "squitter" :8D40621D58C382D690C8AC2863A7

squitter =

    '8D40621D58C382D690C8AC2863A7'

le message ne contien aucun erreur

msg =

    struct with fields:

        DF: 17
        CA: 5
        ICAO: '40621D'
        TC: 11
        DATA: [0 1 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 0 1 1 0 1 1 0 1 0 0
        PI: [0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 1 0 1 0 0 1 1 1]

est ce que les coordonnées de refrence exist ? : oui
```

Figure IV.18 : Affichage de donnée de message exemple 01

```
Command Window

coordLocExist =

    'oui'

inserer latitude referentiel :52.258
inserer longitude referentiel :3.918

Altitude =

    38000

latitude =

    52.2572

longitude =

    3.9194
```

Figure IV.19: Résultats de simulation de calculer de la position « ex01 »

– Exemple n 02 :

8F393324680D21DFADD3B1D02C4B

Latitude référentiel : 44.8065779

Longitude référentiel : -0.5995026

```

Insérer le trame de message "squitter" :8F393324680D21DFADD3B1D02C4B

squitter =

    '8F393324680D21DFADD3B1D02C4B'

le message ne contien aucun erreur

msg =

    struct with fields:

        DF: 17
        CA: 7
        ICAO: '393324'
        TC: 13
        DATA: [0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 1]
        PI: [1 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 1 0 1 1]

```

Figure IV.20 : Affichage de donnée de message exemple 02

```

coordLocExist =

    'oui'

insérer latitude référentiel :44.836316
insérer longitude référentiel :-0.710648

Altitude =

    1450

latitude =

    44.8106

longitude =

    -0.7418

```

Figure IV.21: Résultats de simulation de calculer de la position « ex02 »

IV.3.5 Calcule de Vitesse aéroportée :

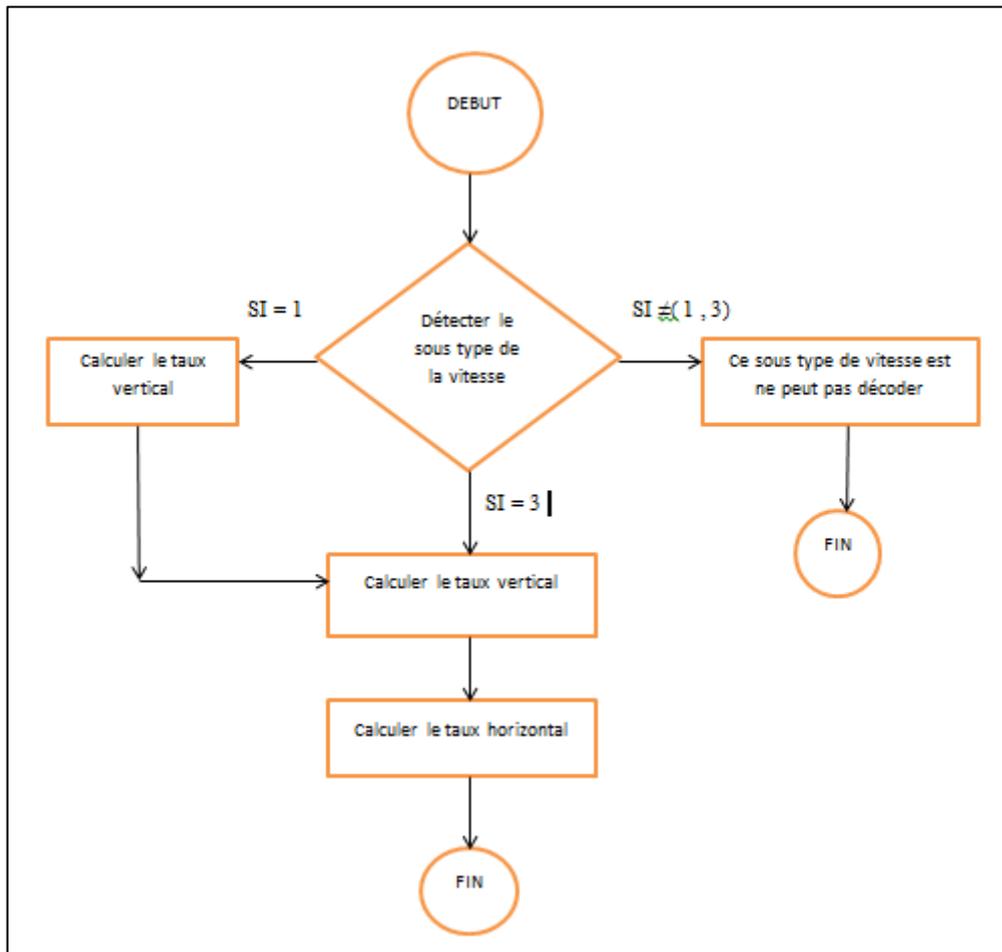


Figure IV.22 : organigramme de calcule de la vitesse.

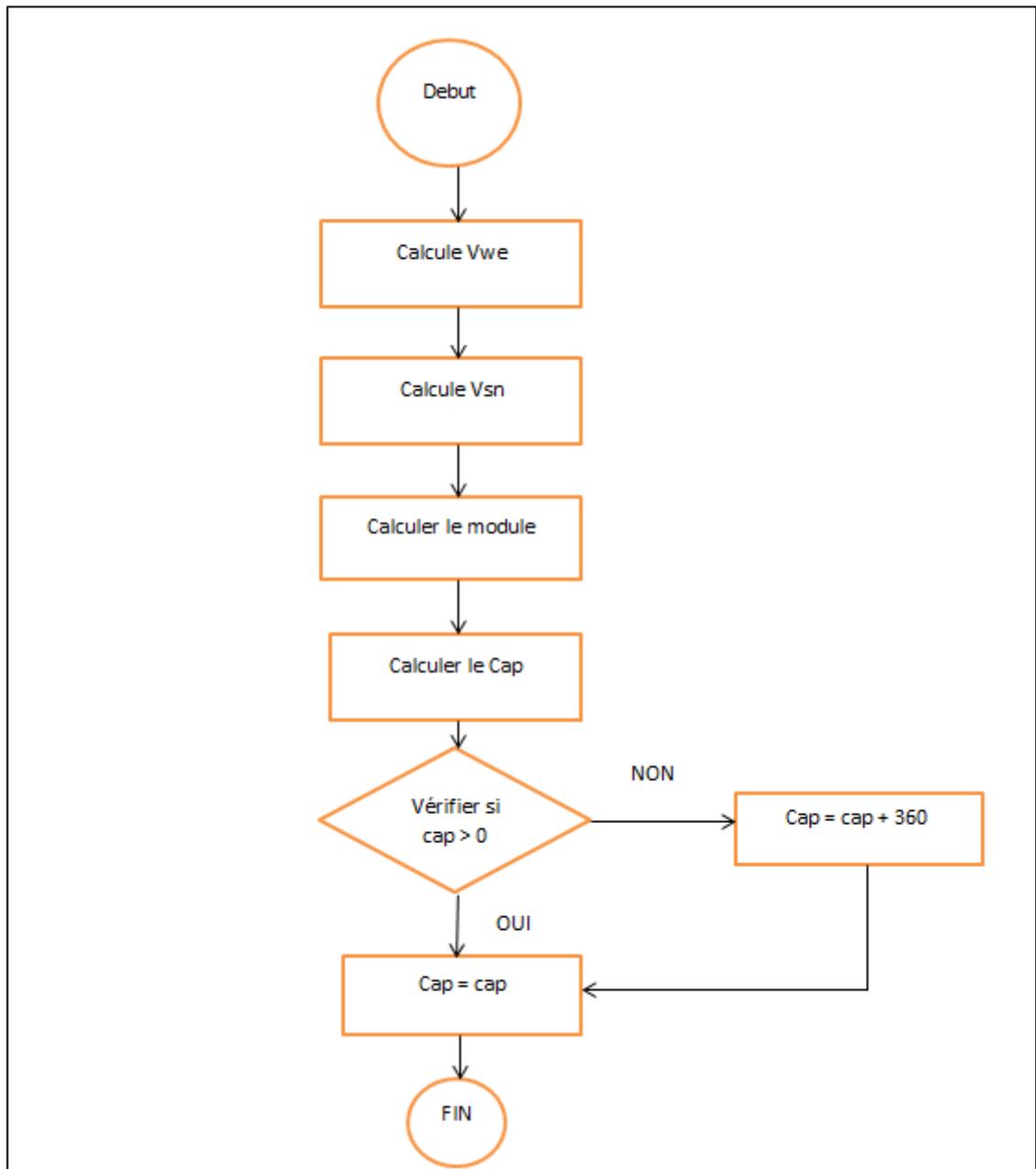


Figure IV.23: Organigramme de taux horizontale de sous-type 01.

- exemple n 01 de vitesse de sous type 1 :

8D485020994409940838175B284F

- exemple n 02 de vitesse de sous type 1 :

8D406B909945DE0FE00805386431

```
DATA =  
  
  struct with fields:  
  
    TC: 19  
    ST: 1  
    IC: 0  
    RES_A: 1  
    NAC: 0  
    S_ew: 1  
    V_ew: 9  
    S_ns: 1  
    V_ns: 160  
    VrSrc: 0  
    S_vr: 1  
    Vr: 14  
    RES_B: 0  
    S_Dif: 0  
    Dif: 23
```

Figure IV.24: Affichage de donnée de message en décimal 'ex01'

```
Command Window  
  
- volant d'est en ouest  
- Volant du nord au sud  
- l'avion descend  
la viteese horizontale : 159.2011( kt)  
la viteese verticale : 832( pied/min)  
le cap : 182.8804 degre
```

Figure IV.25: Résultats de simulation de l'exemple n01

```
  struct with fields:  
  
    TC: 19  
    ST: 1  
    IC: 0  
    RES_A: 1  
    NAC: 0  
    S_ew: 1  
    V_ew: 478  
    S_ns: 0  
    V_ns: 127  
    VrSrc: 0  
    S_vr: 0  
    Vr: 2  
    RES_B: 0  
    S_Dif: 0  
    Dif: 5
```

Figure IV.26: Affichage de donnée de message en décimal 'ex02'

```

Command Window

- volant d'est en ouest
- volant du sud au nord
- l'avion monter
la viteese horizontale : 493.3609( Noeud)
la viteese verticale : 64( pied/min)
le cap : 284.7968 degreé
fx >>
    
```

Figure IV.27: Résultats de simulation de l'exemple n02

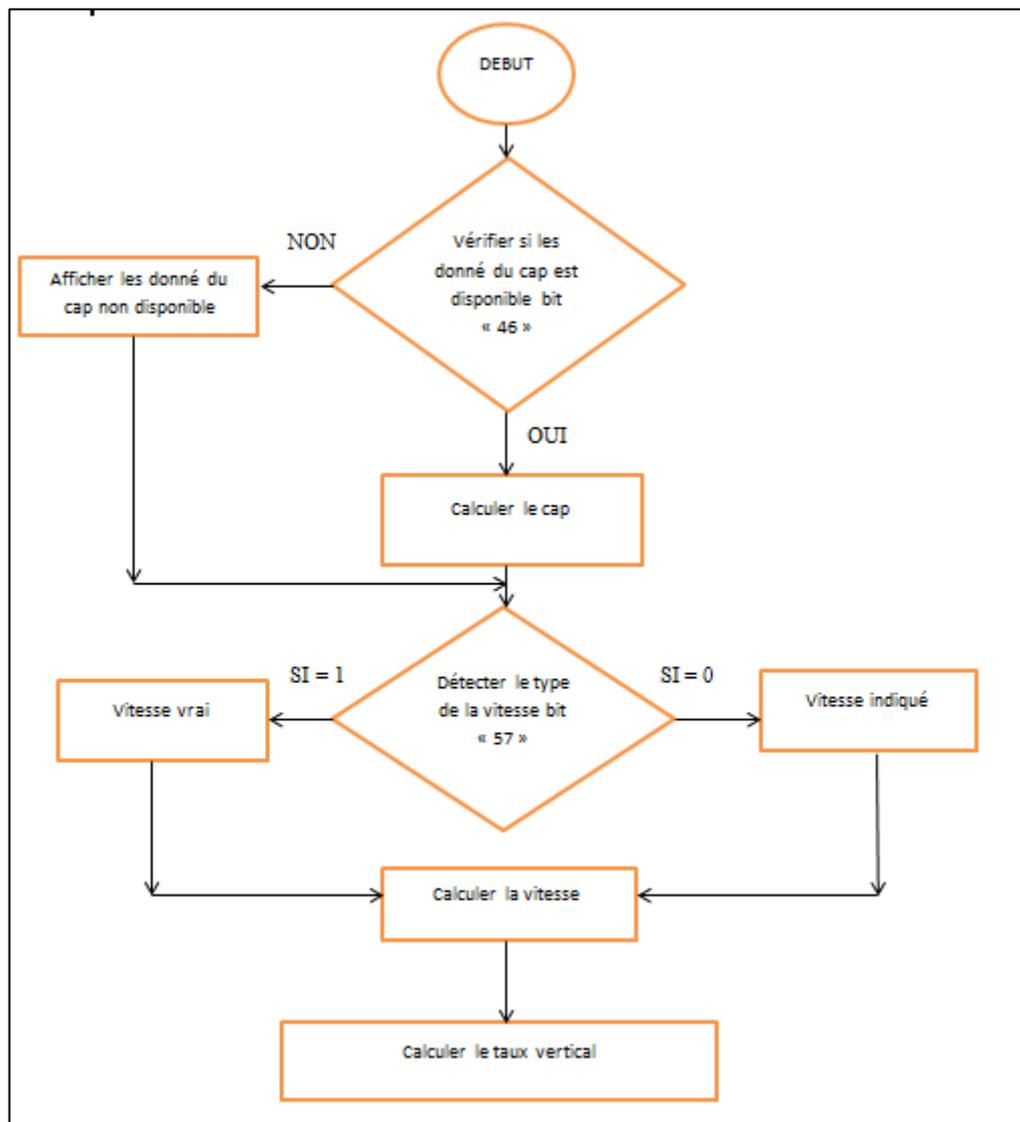


Figure IV.28: Organigramme de taux horizontale du vitesse de sous type 03.

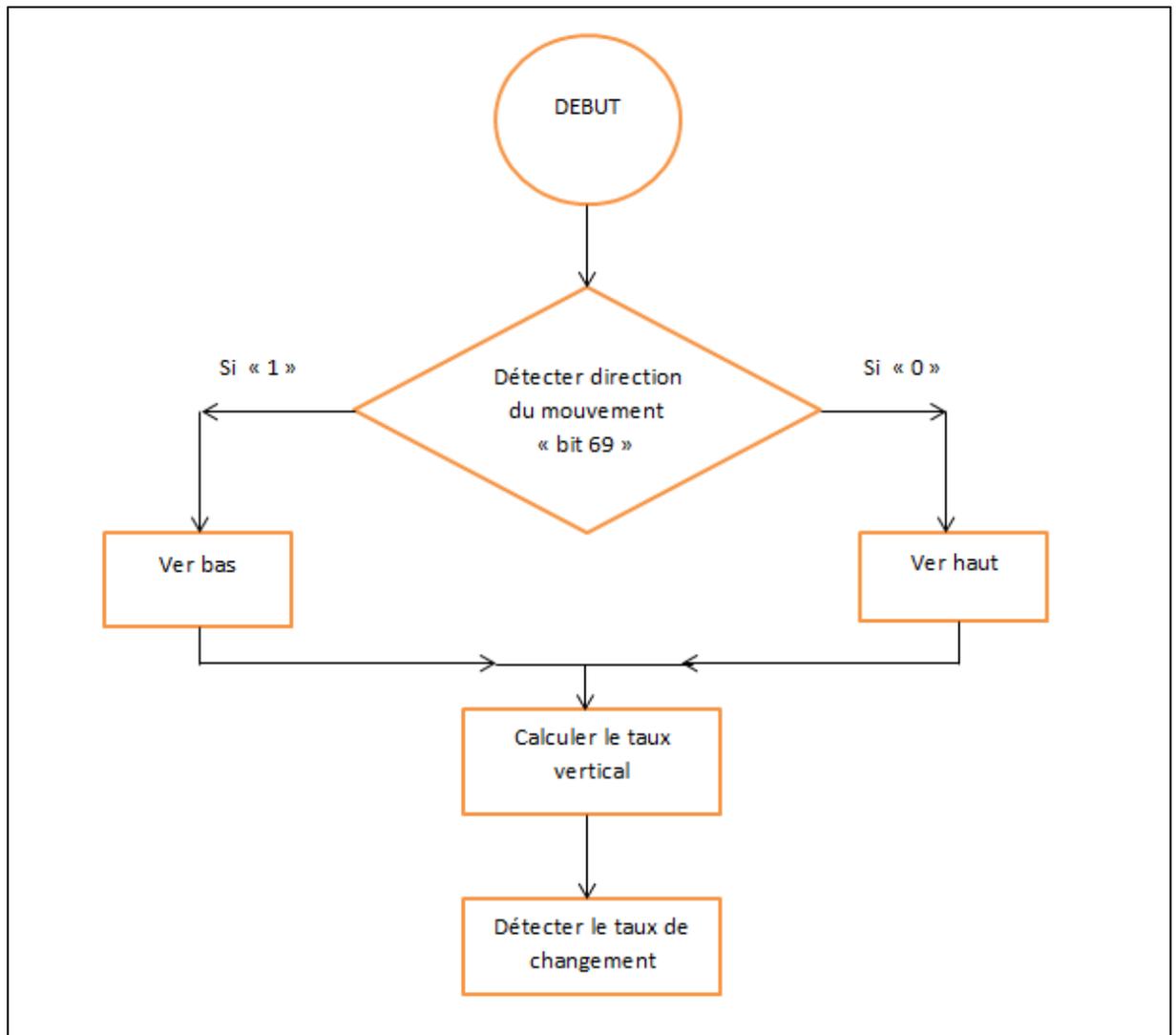


Figure IV.29: Organigramme de taux verticale sous type 01 ou 03

– **Exemple de message de vitesse de sous type 3**

8DA05F219B06B6AF189400CBC33F

```
Command Window
DATA = |
      struct with fields:
          TC: 19
          ST: 3
          IC: 0
          RES_A: 0
          NAC: 0
          S_hdg: 1
          Hdg: 694
          AS_t: 1
          AS: 376
          VrSrc: 1
          S_vr: 1
          Vr: 37
          RES_B: 0
          S_Dif: 0
          Dif: 0
```

Figure IV.30: Affichage de donnée de message en décimal

```
Command Window
données de cap disponibles
cap =
    243.9844
type de vitesse est : vitesse vrai (TAS)
v =
    376
- l'avion descend
la viteese horizontale : 376( Noeud)
la viteese verticale : 2304( pied/min)
le cap : 243.9844 degré
fx >> |
```

Figure IV.31: Résultats de simulation de l'exemple

Conclusion et perspectives

Cette recherche a présenté un aperçu des systèmes de contrôle de la circulation aérienne (ATC) passés, présents et futurs afin de fournir les informations de base nécessaires pour comprendre comment le système actuel a été mis en service, pourquoi ce système doit être remplacé et une introduction à la génération future systèmes d'ATC. En ce qui concerne les futurs systèmes de contrôle de la circulation aérienne, cet examen porterait sur le principal domaine de cette recherche, la surveillance dépendante automatique en mode diffusion (ADS-B).

Cette recherche était axée sur les messages de position ADS-B. L'ADS-B contient plusieurs formats de sous-types pour la diffusion des données d'aéronefs. Cette recherche a pour objet le format de liaison descendante (DF) 17. Ces messages contiennent des informations telles que l'identifiant de l'aéronef, l'altitude, la latitude, la longitude, le cap, la vitesse horizontale et verticale.

Le but de cette recherche était d'étudier le système de surveillance dépendante automatique - diffusion afin d'inclure la capacité de décodage des messages ADS-B si le script MATLAB a été écrit pour accepter le message ADS-B (DF 17) au format binaire.

Comme perspectives, il serait intéressant d'étendre ce projet en déchiffrant l'autre sous-type, tel que l'emplacement de l'avion dans le sol et le sous-type de message de vitesse 2 et 4. En plus de réaliser la couche physique de l'ADS-B à l'aide d'une carte Arduino ou FPGA pour recevoir les coordonnées des avions en temps réel et afficher sur une map.

BIBLIOGRAPHIE

1. Abdulrazaq Abdulaziz, Abdulmalik S.Yaro, Ashraf A. Adam, Mahmoud T. Kabir, Habeeb B. Salau : Optimum Receiver for Decoding Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) Signals, American Journal of Signal Processing 2015.
2. Yang Haomiao, Huang Rongshun, Wang Xiaofen, Deng Jiang, Chen Ruidong: EBAA: An efficient broadcast authentication scheme for ADS-B communication based on IBS-MR. Chinese Journal of Aeronautics, (2014).
3. Joe Zambrano, Rene Jr Landry: Integration of Simulink ADS-B (in/out) Model in SDR (Implementation and Operational Use of ADS-B).2015
4. Busyairah Syd Ali: 'A Safety Assessment Framework for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) and its Potential Impact on Aviation Safety', pages 22-36, November, 2013.
5. M.Lagha : "cours Radar", Institut d'aéronautique et d'étude spatial, page 1, 2016.
6. <http://tpe-la-furtivite.e-monsite.com/http-tpe-la-furtivite-e-monsite-com-/les-radars/les-types-de-radars.html#OJk6O95dyRWmiaLW.99>
7. https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_primaire
8. <http://www.radartutorial.eu/02.basics/Radars%20de%20contr%C3%B4le%20a%C3%A9rien.fr.html>
9. International Civil Aviation Organization. Third Edition (2004). Manual On The Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems.Doc 9684AN/951.
10. Edward A. Lester and R. John Hansman Report No. ICAT-2007-2 August 2007. Benefits and Incentives for ADS-B Equipage in the National Airspace System.
11. <https://www.thebalance.com/how-ads-b-works-a-look-at-the-foundation-of-nextgen-82559> "10-02-2019"
12. <http://sboisse.free.fr/technique/ADS-B.php> "17-03-2019".
13. Busyairah Syd Ali: 'A Safety Assessment Framework for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) and its Potential Impact on Aviation Safety', page 55, November, 2013
14. https://www.faa.gov/nextgen/equipadsb/capabilities/ins_outs/ "12-06-2019".
15. Busyairah Syd Ali: 'A Safety Assessment Framework for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) and its Potential Impact on Aviation Safety', pages 61-69, November, 2013.
16. https://fr.wikipedia.org/wiki/Automatic_dependent_surveillance_broadcast#Mise_en_application."12-06-2019".
17. ALGERIE/AIC/SERIE A/2008/AIC_02-2008.
18. OPERATION MANUAL OF CPDLC ALGIERS FIR / Version 3.0 June 2011.
19. Junzi Sun: The 1090MHz Riddle, An open-access book about decoding Mode-S and ADS-B data.2015

20. E. Chnag, R. Hu, D. Lai, R. Li, Q. Scott, T. Tyan (2000), The Story of Mode S: An Air Traffic Control Data-Link Technology, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA.

ANNEXES

Tableau I:Tableaux des caractères del'indicatif d'appelle de l'avion

				b5	0	0	1	1
				b6	0	1	0	1
b1	b2	b3	b4					
0	0	0	0			P	-	0
0	0	0	1		A	Q		1
0	0	1	0		B	R		2
0	0	1	1		C	S		3
0	1	0	0		D	T		4
0	1	0	1		E	U		6
0	1	1	0		F	V		7
0	1	1	1		G	W		8
1	0	0	0		H	X		9
1	0	0	1		I	Y		
1	0	1	0		J	Z		
1	0	1	1		K			
1	1	0	0		L			
1	1	0	1		M			
1	1	1	0		N			
1	1	1	1		O			