

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA.

Institut d'Aéronautique et Etudes Spatiales.



Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER
Aéronautique

Option : ***CNS/ATM***

THEMES

**Méthodes de Surveillance et Simulation de la Multilateration par le
Filtre de Kalman**

Encadré par :

-Mr ZABOT Ammar

Elaboré et présenté par :

Melle BENSENANE Ilham

Promotion : 2013

الملخص

ركز الموضوع الذي ناقشته على دراسة مختلف نظام الرصد والمحاكاة من قبل مرشح كألمان .

وصفت أنظمة المراقبة (TCAS ، رادار ، ADS ، multilateration) و أسلوب عملها فضلا عن مزاياها وعيوبها، واقترحت تركيب الرادارات وإعلانات أخرى لأفضل تغطية في الجزائر.

محاكاة multilateration بواسطة مرشح كألمان تصفية تصريحي لإثبات أن أداء خطأ التعريب وتوهين في بيئة NLOS تحسنت بنسبة النحو الأمثل تتعزز KF

Abstract:

The subject I have treated is the study of different surveillance systems and simulation multilateration by the Kalman filter,

I described surveillance systems "TCAS, RADAR, ADS, multilateration" and their mode of operation as well as their advantages and disadvantages and proposed the installation of radars and other ads for best coverage in Algeria.

Simulation of multilateration by Kalman filter KF allowed me to demonstrate that performance of localization and attenuation error in NLOS environment is best improved by KF

Résumé

Le sujet que j'ai traité porte sur l'étude des différents systèmes de surveillance et la simulation de la multilateration par le filtre de kalman,

J'ai décrit les systèmes de surveillance « TCAS, RADAR, ADS, MULTILATERATION » et leurs mode de fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients et on a proposé l'installation d'autre radars et ads pour une meilleures couverture en Algérie.

La simulation de la multilateration par le filtre de kalman KF ma permit de démontré que la performance de la localisation et de l'atténuation d'erreur dans un environnement NLOS est optimale améliorée par KF.

*Tout d'abord, je tiens à exprimer tous mes remerciements et louanges à **DIEU** tout puissant qui m'a donné la force et la patience pour accomplir ce modeste travail.*

La rédaction de ce mémoire m'a permis d'apprécier la qualité des gens, qui m'ont apporté beaucoup d'aide et de soutien dans ma recherche et que je souhaite aujourd'hui les remercier :

*Mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadreur **Mr ZABOT Ammar**, chargé de cours à l'institut d'Aéronautique de **BLIDA**, qui m'a prodigué sans compter conseils et observations, qui a répondu à toutes mes sollicitations et qui m'a sans cesse encouragé à persévérer.*

Mes vifs remerciements vont également à l'ensemble du corps enseignants de l'institut aéronautique de Blida qui m'ont accompagné et guidé tout au long de mon cursus universitaire pour mener à bien cette recherche.

*En fin, Un autre merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail. En particulier **ma famille**, sans qui l'achèvement de ce travail aurait été beaucoup plus difficile ainsi que mes **ami(e)s**.*

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : LES SYSTEMES « RADRA ET ADS »	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Radar primaire.....	4
I.2.1 l'equation du radar.....	5
I.2.2 Les avantages du radar primaire:.....	6
I.2.3 Les inconvénients du radar primaire.....	6
I.3 Radar secondaire.....	6
I.3.1 les avantages et les inconvénients du radar secondaire.....	7
I.3.2 Le Transpondeur Mode S.....	8
I.3.3 la couverture SSR attendue en Algerie	10
I.4 La Surveillance Dépendante Automatique ADS:.....	12
I.4.1 La Surveillance Dépendante Automatique-Contract (ADS-C):.....	12
I.4.1-1 Fonctionnalités :.....	14
I.4.1-2 -Avantage et limites de l'ADS-C :.....	14
I.4.2 La surveillance dépendante automatique-Broadcast (ADS-B) :.....	15
I.4.2-1 Le concept ADS-B :.....	15
I.4.2-2 Fonctionnalité ADS-B:.....	16
I.4.2-3 L'environnement de l'ADS-B :.....	17
I.4.2-4 Contenu du message ADS-B :.....	18
I.4.2-5 Les applications ADS-B :.....	19
I.4.2-6 Medium ADS-B (Les liaisons de données) :.....	21
I.4.2-7 Limitations ADS-B :.....	23
I.4.2-8 Comparaison entre l'ADS-C et l'ADS-B :.....	24
I.4.2-9 La couverture ADS-B proposés en Algérie :.....	24
I.5.Conclusion :.....	26

CHAPITRE II : DESCRIPTION DU SYSTEME D'EVITEMENT DE COLLISION
"TCAS ".....

II.1 Introduction.....	27
II.2 Définition du système TCAS.....	30
II.3.Caractéristiques du TCAS II.....	31
II.4 Les composants du système TCAS :.....	31
II.4.1 Unité d'ordinateur TCAS :.....	32
II.4.2- Antennes :.....	32
II.4.3 La boîte de commande ATC/TCAS :.....	33
II.5 Les caractéristiques du système TCAS :.....	34
II.5.1 - La portée :.....	34
II.5.2 - Le taux de rapprochement « TAU » :.....	34
II.5.3 - L'évitement :.....	34
II.5.4 - L'altitude :.....	35
II.5.5 - Niveau de sensibilité :.....	35
II.5.6 - Préavis d'alarme :.....	36
II.6 LA LOGIQUE DU SYSTEME TCAS :.....	37
II.6.1 Poursuite :.....	37
II.6.2. Avis de trafic :.....	39
II.6.3 - Détection de menace :.....	40
II.6.4 - Avis de résolution :.....	40
II.6.5 - Choix de l'avis :.....	42
II.6.6 - Choix du sens du RA :.....	43
II.6.7 - Suivi du RA par la logique :.....	44
II.6.8 - Logique multi-intrus :.....	45
II.6.9 - Fin du RA :.....	46
II.7 Alertes TCAS :.....	46
II.8.Phraséologies TCAS :.....	47
II.9. Visualisation RAs TCAS II :	49
II.10. Conclusion :.....	51

CHAPITRE III : LA MULTILATERATION

III.1 Introduction.....	52
III.2 Generalites :	52
III.3 Principe :.....	53
III.4 Technique de la multilateration :.....	54
III.4.1 Localisation :.....	54
III.4.2 Signaux cible.....	56
III.4.3 Identification :.....	56
III.4.4 Interrogations :.....	57
III.5 Systeme Cooperatif , Independant	58
III.5.1 Architectures système :.....	59
III.6 Les Performances de la multilateration mode "S" sur un aéroport.....	60
III.7. Géométrie TDOA :.....	61
III.8. Mesure de la différence de temps dans un système TDOA :.....	64
III.9 Les avantages et Les inconvénients la multilatération.....	69
III.10 Conclusion:.....	69
CHAPITRE IV : Simulation de la Multilateration par Filtre de Kalman	
IV.1 INTRODUCTION « Logiciel Matlab » :.....	70
IV.2 METHODES DE SIMULATION :.....	71
IV.2.1 Filtre de Kalman :.....	71
IV.3 Simulation et analyse des résultats:.....	75
IV.3.1 Simulation de ligne non -of -Sight canal de propagation:.....	75
IV.3.2 Analyse de simulation Résultat du canal de propagation:.....	77
IV.3.3 Simulation de Multilatération modèle.....	79
IV.3.4 Analyse de simulation Résultat de l'algorithme de Multilatération:.....	79
IV.3.5 Simulation KF.....	80
IV.3.6 Analyse de simulation Résultat de KF:.....	86
IV.4conclusion	87

INTRODUCTION GENERALE

L'évolution du trafic aérien international dans les dernières années a été suivie étroitement par l'installation de nouveaux systèmes dans les services de sécurité de la navigation aérienne, dits les systèmes de CNS/ATM.

Ces systèmes de navigation aérienne sont maintenant mis en application et globalement actionnés, et la responsabilité de leur maintenance, qui est la garantie d'un fonctionnement aux normes et recommandations de l'OACI, est souvent déléguée au personnel technique qui est identifié en tant qu'Electronicien de la Sécurité Aérienne.

Pour renforcer et améliorer la sécurité, la capacité, et l'efficacité du système de la navigation aérienne de l'espace algérien, l'Etablissement National de la Navigation Aérienne (ENNA) a sélectionné Thales Air Traffic Management (ATM) pour la fourniture de systèmes d'aide à la navigation et à l'atterrissage.

Jusqu'à l'année 2004, la seule méthode utilisée dans le contrôle de la circulation aérienne était la méthode de contrôle aux procédures qui se base sur les comptes rendus de positions des aéronefs effectués par les pilotes. Toutefois un système de visualisation du radar de Palma (Espagne) a été mis en place depuis quelques années au niveau du centre de contrôle régional pour la surveillance des avions en entrée et sortie de la FIR Algérienne.

21 juillet 2005 ayant pour objet l'intention de mise en œuvre du contrôle radar dans la partie Nord de la FIR Alger.

Le système automatique algérien de contrôle du trafic aérien (SAACTA) se compose de cinq (05) stations radar, d'un système de traitement de données radar (RTP & MTP) et d'un système de traitement de données plan de vol (FDP).

Le système de contrôle du trafic aérien (ATC) peut utiliser le radar primaire de surveillance et le radar secondaire de surveillance seuls ou en combinaison pour assurer les services de contrôle de la circulation aérienne.

Le système radar est destiné à fournir les services de contrôle, de surveillance et d'information radar de route dans les trois secteurs du nord de la FIR Alger (TMA Centre Alger, TMA Nord Est et TMA ORAN) et le service radar d'approche en zone terminale de l'aérodrome d'Alger.

En complément pour la partie surveillance, la Surveillance Dépendante Automatique Contract (ADS-C) est utilisée au CCR d'Alger pour les espaces aériens non couverts par les radars et pour la moitié sud de l'Algérie.

Nous présentons les technologies qui ont récemment été mises à disposition du contrôle aérien à savoir, les radars PSR et SSR, et l'ADS-C/ADS-B en faisant ressortir les avantages et inconvénients de chacune d'elles. Par ailleurs, cette démarche nous a permis de montrer qu'à long terme et dans un certain contexte opérationnel, ces technologies montreront probablement leurs limites, des améliorations pourront alors être apportées au contrôle aérien Algérien en termes de sécurité et de capacité, notamment par l'utilisation de la technique de la multilatération aux aéroports qui ne sont pas équipés de radar d'approche.

Mes recherches consistent à réaliser une étude des méthodes de surveillance et une simulation de la multilatération qui se compose de :

- *Introduction Générale*
- *Chapitre 01 : Les Systèmes « Radar et ADS »*
- *Chapitre 02 : description du système d'évitement de collision « TCAS »*
- *Chapitre 03 : la multilatération*
- *Chapitre 04 : simulation de la multilatération par le Filtre de Kalman*
- *Conclusion Générale*

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Comparaison entre l'ADS-C et l'ADS-B.....	24
Tableau II.1 : Seuils d'alerte en fonction de l'altitude.....	36
Tableau II.2 : Phraséologies TCAS.....	47
Tableau III.1 : Les signaux disponibles.....	57
Tableau III.2 : Classes de surveillance.....	58
Tableau III.3 : Les performances de la multilatération mode S recommandées dans le document ED 117 de l'EUROCAE.....	60
Tableau III.4 : unités d'échelle de temps approximatives pour l'enregistrement de différents types d'ondes.....	67
Tableau IV.1 : Affichage des paramètres de simulation de canaux NLOS.....	75
Tableau IV.2 : perte de chemin [dB] valeurs en matière de renforcement modèle canal NLOS.....	77
Tableau IV.3 : Nombre réel et la valeur estimée de l'emplacement de la balise optimisé par algorithme de LM.....	79
Tableau IV.4 : moyenne et l'erreur de l'écart type entre la position réelle et estimée dans l'Algorithme KF.....	86

LISTE DES FIGURES

Fig. I.1 : Couverture Radar Actuelle.....	3
Fig. I.2 : Limitations du radar secondaire.	8
Fig. I.3 : Visibilité SSR proposé global pour le niveau de vol 100.....	10
Fig. I.4 : Visibilité SSR proposé global pour le niveau de vol 200.....	11
Fig. I.5 : Visibilité SSR proposé global pour le niveau de vol 300.....	11
Fig.I.6 : Transfert de données ADS-B.....	16
Fig. I.7: Architecture ADS-B.....	16
Fig.I.8: CDTI (Cockpit Display of Traffic Information). Image CENA.....	19
Fig.I.9 : Surface de surveillance par ADS-B.....	20
Fig.I.10 : Transpondeur 1090.....	21
Fig .I.11: Couverture AD-B FL100.....	25
Fig .I.12: Couverture AD-B FL200.....	25
Fig .I.13: Couverture AD-B FL300.....	26
Fig.II.1 Mode d’interrogation du système TCAS.....	28
Fig.II.2 : Visualisation des informations TCAS sur un Variomètre.....	30
Fig.II.3 : Les Composants du système TCAS.....	31
Fig.II.4 : TCAS computer.....	32
Fig.II.5 Diagramme de rayonnement des antennes directionnelles.....	33
Fig. II.6 Antenne omni directionnelle vu de haut.....	33
Fig. II.7 : Boite de commande TCAS /ATC.....	34
Fig. II.8 Fonctions de la logique TCAS.....	38
Fig. II.9 Détection des intrus au sol.....	39
Fig. II.10 Limite de RA	42
Fig.II.11 : Choix du sens du RA	43
Fig.II.12 : RA sans croisement d’altitude.....	43
Fig.II.13 : RA avec augmentation du taux de descente.....	44
Fig.II.14 : RA avec inversion de sens.....	45
Fig.II.15 : Différents configuration du RA TCAS	49
Fig.II.16 : RA sur horizon artificiel.....	50
Fig.II.17 : RA sur le VSI.....	50
Fig.II.18 : RA sur EFIS –ROSE mode avec « traffic display».....	50

LISTE DES FIGURES

Fig.III.1 Une hyperbole deux bâchés.....	53
Fig.III.2 : Schéma de principe de la localisation multilatération.....	55
Fig.III.3 : Géométrie TDOA.	61
Fig.III.4a : Signal d'impulsion.....	64
Fig.III.4b : Signal à grande bande.....	65
Fig.III.4c : Signal à bande étroite.....	66
Fig. IV.1 : Étapes du Filtre de Kalman.....	73
Fig. IV.2: canal NLOS mis en œuvre avec AWGN.....	76
Fig. IV.3: canal NLOS mis en œuvre avec “AWGN” et “AWGN et ϵ ”.....	76
Fig. IV.4: Simulation de l'algorithme de Multilatération montrant les positions réelles et estimées de la balise.....	78
Fig. IV.5: Simulation de la balise passive en 3 dimensions (5 itérations).....	79
Fig.IV.6: Performance KF avec l'erreur matrice de covariance $Q = 0, 16$ m et le gain $K=0,8284$	80
Fig. IV.7: différence d'erreur KF entre la position réelle et estimée d'erreur de matrice de covariance $Q = 0, 16$ m et de gain $K = 0, 8284$	81
Fig. IV.8: Performance KF avec l'erreur matrice de covariance $Q = 0, 04$ m et le gain $K = 0, 6180$	82
Fig. IV.9: différence d'erreur KF entre la position réelle et estimée d'erreur de matrice de covariance $Q = 0, 04$ m et de gain $K = 0, 6180$	83
Fig. IV.10: Performance KF avec l'erreur matrice de covariance $Q = 0, 01$ m et le gain $K = 0, 3904$	84
Fig. IV.11: différence d'erreur KF entre la position réelle et estimée d'erreur de matrice de covariance $Q = 0, 01$ m et de gain $K = 0, 3904$	85

LISTE DES FIGURES

ABREVIATION

A

AD	Air data
ADS-B	Automatic Dependant Surveillance-Broadcast
ADS-C	Automatic Dependant Surveillance—Contract
AGL	Above ground level
ATC	Air traffic control
ACC	<i>Area control center</i>
APT	<i>Airoport Surface Surveillance</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>

C

CCR	Centre de Contrôle Régional.
CPA	Closest point of approach
CNS/ATM	Communication Navigation Surveillance / Air Traffic Management
CDT	Cockpit Display of Traffic

D

DMOD	Distance Modification
DME	Distance measuring equipment
DB	Décibel

ABREVIATION

E

EFIS	Electronics flight instrument system
ENNA	Etablissement National de la Navigation Aérienne

F

FAA	Federal Aviation Administration
FL	Flight Level
FIR	Flight Information Région
FANS	Futur Air Navigation Systems
FK	Filtre de Kalman

G

GPS	Global Positioning Système
-----	----------------------------

I

IDENT	Identification
INS	Installation Navigation Système
IVSI	Indicator Vertical Speed Instrument

L

LM	Levenberg Marquard
----	--------------------

M

MDF	Miss Distance Filter
MHZ	Méga Hertz

ABREVIATION

N

NLOS	Non-Line-of-Sight
------	-------------------

O

OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
------	--

P

PFD	Primary flight display
PSR	Primary surveillance radar
PA	Pilotage automatique

R

RA	Resolution Advisory
----	---------------------

S

SSR	Secondary Surveillance Radar
-----	------------------------------

T

TA	Traffic Advisory
TAU	Time to closest point of approach
TDOA	Time Difference Of Arrival
TCAS	Traffic alert and collision avoidance system

V

VHF	Very High Frequency
-----	---------------------

I.1 Introduction :

Jusqu'à l'année 2004, la seule méthode utilisée dans le contrôle de la circulation aérienne était la méthode de contrôle aux procédures qui se base sur les comptes rendus de positions des aéronefs effectués par les pilotes. Toutefois un système de visualisation du radar de Palma(Espagne) a été mis en place depuis quelques années au niveau du centre de contrôle régional pour la surveillance des avions en entrée et sortie de la FIR Algérienne.

Par ailleurs l'Etablissement National de la Navigation Aérienne a réalisé un vaste Programme de modernisation de ses moyens et systèmes de traitement automatique à l'usage des services du trafic aérien. Ce programme nommé TRAFCA pour Traitement Automatique de Fonctions de la Circulation Aérienne a entre autres pour objectif de mettre en œuvre un système de visualisation en temps réels des mouvements aériens dans l'espace national. A cet effet, il a été réalisé pour la partie surveillance, l'installation de cinq radars ALENIA MARCONI ; un primaire PSR (ALGER) et cinq secondaires mono pulse SSR (ALGER, EL BAYADH, EL OUED, ORAN, ANNABA) de portée théorique 256 NM / FL 600; localisés comme suit :

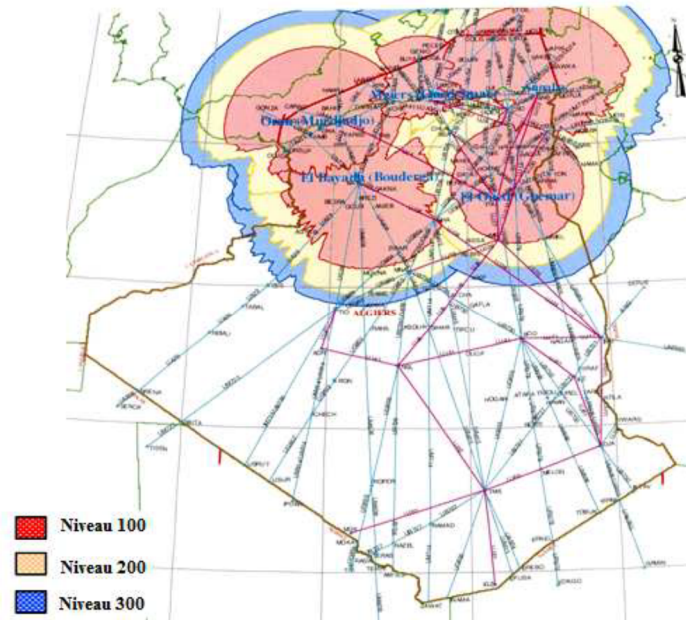


Figure I.1 : Couverture Radar Actuelle.

Il faut noter que les couvertures présentées sur la figure I.1 sont indicatives et valables au moins à partir du niveau FL150. En effet, la couverture se dégrade en fonction de la présence du relief, en particulier sur la région de Boussaâda.

En complément pour la partie surveillance, la Surveillance Dépendante Automatique Contract (ADS-C) est utilisée au CCR d'Alger pour les espaces aériens non couverts par les radars et pour la moitié sud de l'Algérie.

Un radar de surface est également installé à l'aérodrome Houari Boumediene pour la gestion des mouvements au sol qui cause certains problèmes après la finalisation du projet d'extension des parkings avions ainsi l'existence de plusieurs zones aveugles pour le contrôleur, notamment lors de l'évolution des avions dans la zone de fret.

Dans cette partie nous présentons les technologies qui ont récemment été mises à disposition du contrôle aérien à savoir, les radars PSR et SSR mode S, l'ADS-C/CPDLC en faisant ressortir les avantages et inconvénients de chacune d'elles. Par ailleurs, cette démarche nous a permis de montrer qu'à long terme et dans un certain contexte opérationnel, ces technologies montreront probablement leurs limites, des améliorations pourront alors être apportées au contrôle aérien Algérien en termes de sécurité et de capacité, notamment par l'implémentation de l'ADS-B.:

I.2. Le radar primaire :

Le radar primaire est un équipement de détection ayant une portée d'environ 100 Nm (Pour les radars civils), muni d'un faisceau fin balayant en azimut sur 360° autour de la station pour fournir la position d'une cible en coordonnées polaires (distance et azimut) en contrôle de la circulation aérienne, cette visualisation des aéronefs dans un volume d'espace donné fournit aux contrôleurs une vue en plan du trafic considéré ; son intérêt principal: c'est que la cible qu'il éclaire reste passive. Les impulsions du signal hyperfréquence émises sont réfléchies par la cible puis reçues par le radar même qui en est l'origine. Donc, l'écho de cette cible provient directement de l'impulsion émise par le radar.

Toute fois la détection des mouvements au sol par le radar primaire est plus délicate que celle des mouvements en vol, à cause de la présence plus marquée des échos de sol. Elle ne s'avère nécessaire que dans les cas de mauvaise visibilité de la plate-forme aéroportuaire depuis la tour de contrôle ou dans les cas d'une forte complexité de circulation sur l'aire de manœuvre. Un radar de surface apparaît apporter un complément de sécurité en permettant au contrôleur tour de vérifier que la piste est inoccupée, d'identifier les véhicules et les avions et de présenter une situation du trafic au sol équivalente à celle du trafic en vol.

Le radar PSR, installé à proximité (environ 5 Km) de l'aérodrome d'Alger, est destiné principalement au contrôle d'approche compte tenu du volume de trafic relativement important traité par cet aérodrome. Il possède une portée théorique de 80 NM et détecte les aéronefs jusqu'à FL270.

I.2.1 -L'équation du radar :

L'équation du radar est un bilan des puissances sur le trajet aller-retour d'une onde émise par un radar. Celle-ci dépend des caractéristiques du radar (antenne, circuits électroniques, guide d'onde, pertes de signal, etc.), de celles de la cible et du milieu traversé le long du trajet. Les premières sont constantes alors que les deuxièmes et troisièmes varient dans le temps et l'espace.

L'établissement de l'équation du radar consiste à faire le bilan de puissance sur le trajet aller/retour du signal émis. La puissance reçue par l'antenne réceptrice d'un radar est donnée par :

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2 \sigma_0}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2}$$

P_r = Puissance reçue (Watt)

G_r = gain de l'antenne réceptrice (dB)

P_t = Puissance transmise (Watt)

λ = longueur d'onde du radar (mètre)

G_t = gain de l'antenne émettrice (dB)

R_t = distance cible-radar émetteur (mètre)

R_r = distance cible-radar récepteur (mètre)

σ = section efficace ou surface équivalente radar (coefficient de réflexion de la cible)

I.2.2- Les avantages du radar primaire sont :

_ Aucun équipement embarqué n'est nécessaire pour la détection de la cible, ce qui permet la détection des cibles non-coopératives

_ Il peut être utilisé pour la surveillance au sol

_ Excellente résolution, intéressante pour le guidage.

I.2.3 -Les inconvénients du radar primaire sont :

_Les cibles ne peuvent pas être identifiées

_L'altitude des cibles ne peut pas être déterminée

_Il nécessite des émissions puissantes, ce qui tend à limiter la portée

_Coût d'infrastructure très élevé

I.3.Le radar secondaire :

Le système de surveillance radar secondaire (SSR) est composé de deux éléments : une station sol interrogatrice et un transpondeur embarqué dans l'avion. Le transpondeur répond aux interrogations de la station, la renseignant sur sa distance et son azimuth. Les radars SSR installés en Algérie sont destinés au contrôle en route et d'approche. Le SSR se développa avec l'utilisation du Mode A/C puis du Mode S pour l'aviation civile.

Un mode d'interrogation de transpondeur aéronautique est le format que prend une série d'impulsions émise par un radar secondaire ou un système équivalent (Automatic dependent surveillance-broadcast), et le « format », ou le « code », de la réponse d'un transpondeur

aéronautique. Ce mode d'interrogation est utilisé pour obtenir un certain nombre d'informations sur les avions équipés du système.

Dans sa forme la plus simple, un « mode » est généralement déterminé par l'espacement entre deux ou plusieurs impulsions d'interrogation. Il existe différents modes, 1 à 5 pour les militaires et A, B, C, D et le mode S pour l'usage civil.

Mode A → délivre un code à quatre chiffres en système octal, il est attribué par le contrôle aérien (à usage militaire ou civil)

Mode C → indique l'altitude–pression sous forme d'un code octal à quatre chiffres (à usage militaire ou civil)

Mode S → retourne divers formats d'information sur une interrogation sélective. Chaque avion se voit attribuer une adresse fixe codée sur 24 bits (usage civil et militaire)

Les transpondeurs Mode A/C fournissent l'identification (code Mode A) et l'altitude (code Mode C) de l'avion en réponse aux interrogations. Par conséquent, la station connaît la position (en trois dimensions) et l'identité des cibles.

I.3.1 - Avantages et inconvénients du radar secondaire:

➤ **Les avantages sont :**

- La possibilité d'avoir des informations d'identifications de l'aéronef (mode A) et d'altitude (mode C)
- La portée qui peut atteindre 250 NM à 280 NM.
- Il est beaucoup moins sujet aux parasites que le radar primaire.
- introduit l'avantage de liaison de données air/sol.

➤ **Les inconvénients majeurs sont :**

Le chevauchement synchrone ou garbling consistant en la superposition des réponses de deux avions se trouvant à la même distance du radar.

- Les réponses asynchrones ou fruit correspondant à la réception d'une réponse qu'un avion fait à l'interrogation d'un autre radar, et pouvant créer un plot fictif.
- Coût d'infrastructure élevé.
- Nombre limité de "code A", ce qui pose problème dans les zones denses ; dans la logique SSR, chaque avion se voit allouer un code constitué de 4 chiffres (chiffre strictement inférieur à 8). Il se trouve que le nombre de combinaisons possibles (4096) peut devenir insuffisant dans les zones de trafic très denses.

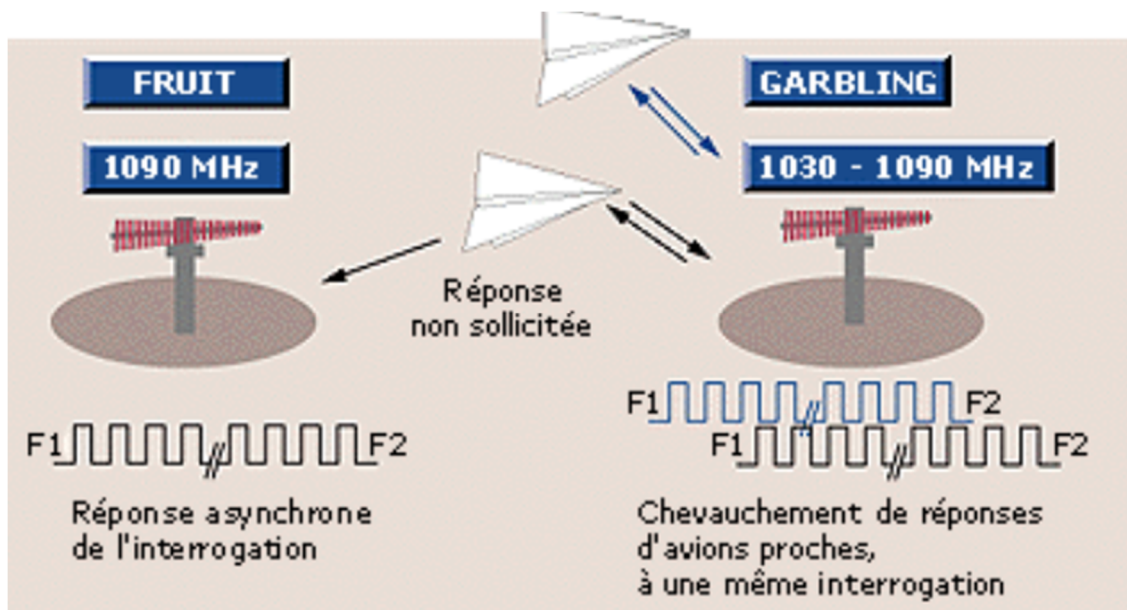


Figure I.2: Limitations du radar secondaire.

I.3.2 -Le Transpondeur Mode S :

Le transpondeur Mode S (S pour sélectif) est une amélioration du Mode A/C. Il en contient toutes les fonctions, mais permet également une interrogation sélective des cibles grâce à l'utilisation d'une adresse unique codée sur 24 bits, ainsi qu'une liaison de données bidirectionnelle permettant l'échange d'informations air/sol. Il est destiné à éviter les interrogations multiples lorsqu'il y a plusieurs radars dans les zones à fort trafic et qui permet un système anticollision automatique. Les transpondeurs en mode S sont compatibles avec les modes A et C. C'est ce type de transpondeur qui permet au TCAS II (système anticollision en vol) et à l'ADS-B (automatic dependent surveillance-broadcast) de fonctionner. Il permet aux

radars secondaires des stations de contrôle du trafic aérien au sol de déterminer la position de l'avion dans l'espace surveillé. Il permet également de donner une information de position aux autres avions se trouvant à proximité (40 milles nautiques, 8700 pieds au-dessus ou en dessous) si ces derniers sont équipés du système TCAS

Dans de nombreux pays le mode S est obligatoire dans les espaces aériens contrôlés. Certains pays exigent même que tous les aéronefs soient équipés en mode S, même dans les espaces aériens non contrôlés. Cependant, dans le cadre de l'aviation générale cette réglementation a ses limites en raison du coût de l'équipement, de son faible intérêt dans les espaces aériens non contrôlés et de l'énergie électrique nécessaire pour les aéronefs où elle est limitée comme les aérostats ou les planeurs.

➤ **Principe de Fonctionnement du transpondeur mode S :**

Le radar secondaire du contrôle aérien émet un signal d'interrogation constitué d'une impulsion codée sur la fréquence 1 030 MHz à laquelle le transpondeur répond par une autre impulsion codée sur la fréquence 1 090 MHz. La réponse décodée apparaît sur l'écran radar au sol sous forme d'un plot, accompagné d'un code octal à quatre chiffres. La fonction ident du transpondeur envoie un code particulier qui fait apparaître en gras l'écho associé sur l'écran radar du contrôleur

Le transpondeur mode S dont le codage 56 et 112 bits permet au radar d'interroger chaque aéronef séparément. Beaucoup plus précis (la transmission de l'altitude pouvant se faire par incréments de 25 pieds contre 100 pour le mode C) il permet également la transmission d'autres types de données, comme le numéro de vol de l'aéronef et l'altitude de vol sélectionnée par le pilote. La sélectivité joue un rôle dans les espaces denses, où le contrôleur peut « interroger » de manière sélective un ensemble d'avions avec son radar secondaire.

➤ **Les inconvénients des transpondeurs en mode S :**

Le principal problème avec les transpondeurs en mode S est que les pilotes ont parfois tendance à entrer de mauvaises immatriculations dans leurs transpondeurs. Dans ce cas, les performances du TCAS II et du radar secondaire de surveillance peuvent être dégradées

I.3.3 La couverture SSR attendue en Algérie :

En plus des antennes radar du Nord de l'Algérie dont nous avons parlé ci-dessus, la figure I.6 nous montre également l'installation des six (06) stations radar proposés : Akfadou, Ghardaïa, Illizi, Djanet, Tamanrasset et In Salah.

Les stations Akfadou et Ghardaïa ont comme profil de combler le manque des premières antennes, plus particulièrement la réception du trafic à basse altitude (FL100). Les autres antennes au Sud du pays, déterminent une couverture appréciable à basse altitude, surtout dans les régions à forte densité de trafic.

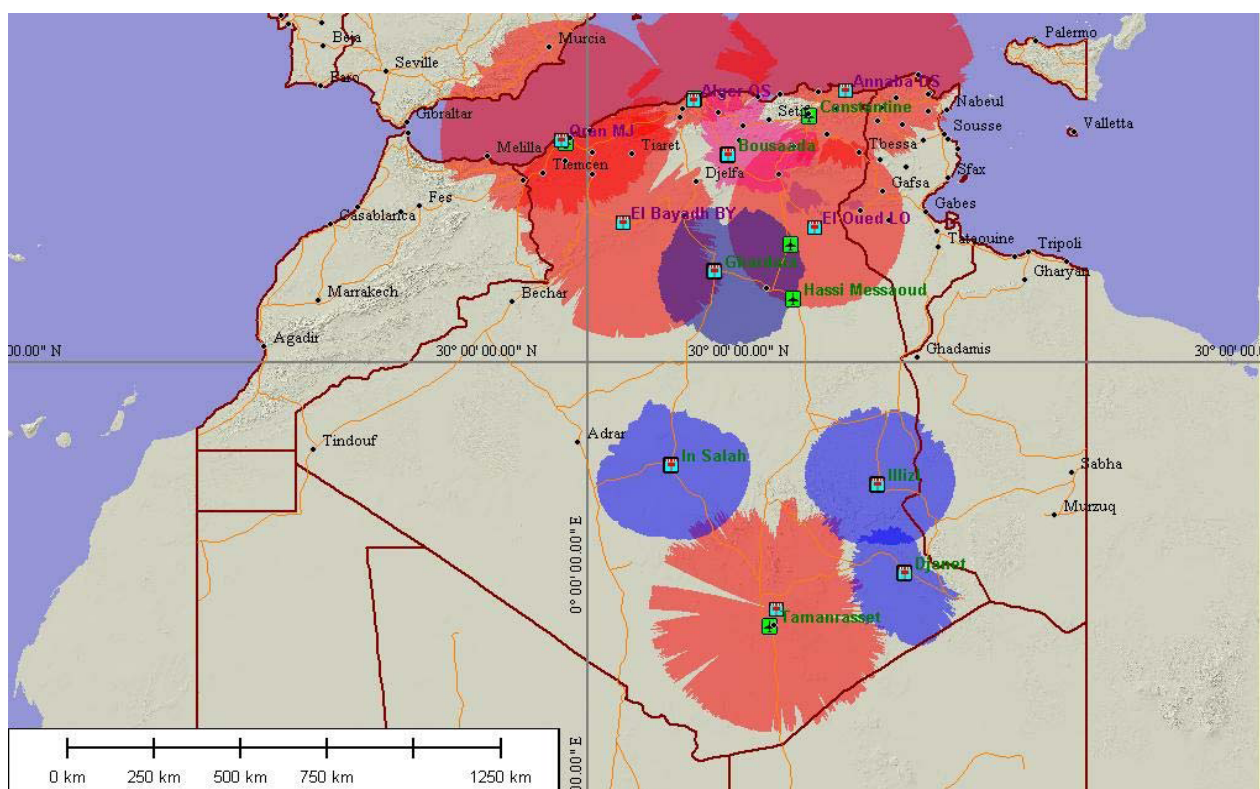


Figure I.3 : Visibilité SSR proposé global pour le niveau de vol 100.

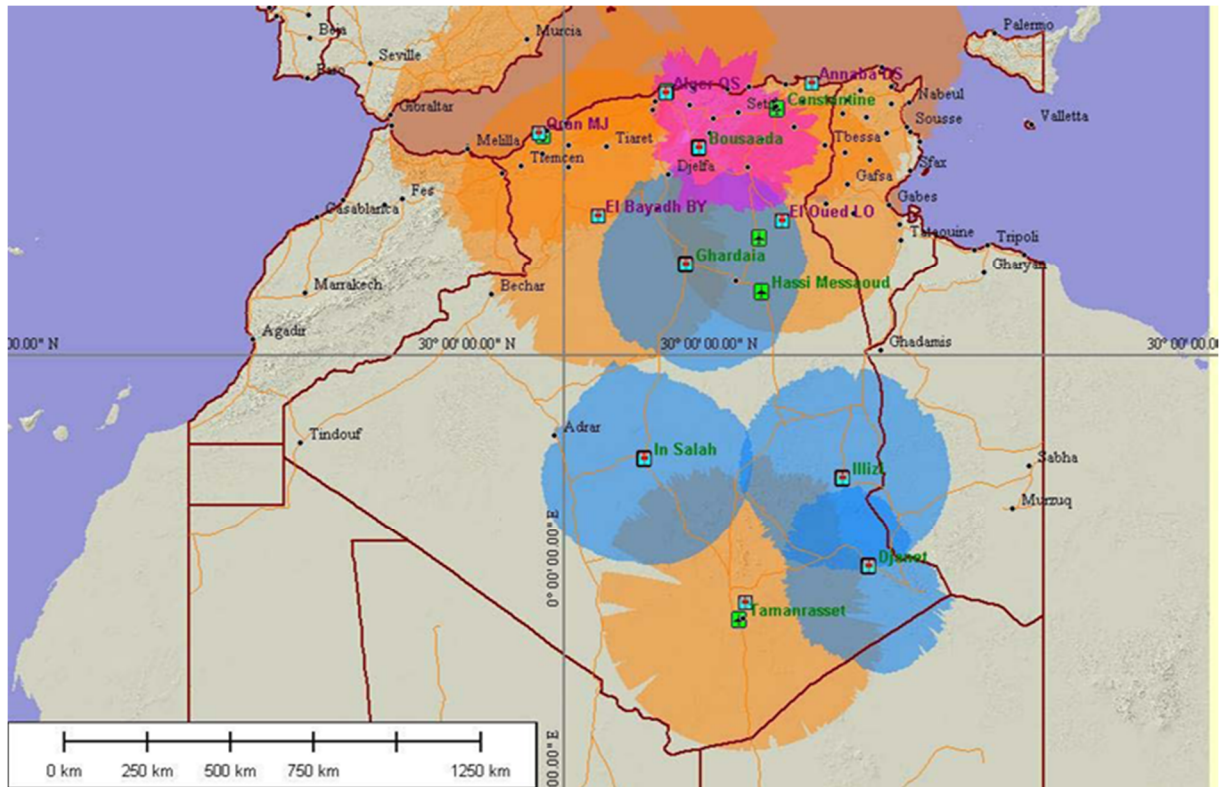


Fig. I.4 : Visibilité SSR proposé global pour le niveau de vol 200.

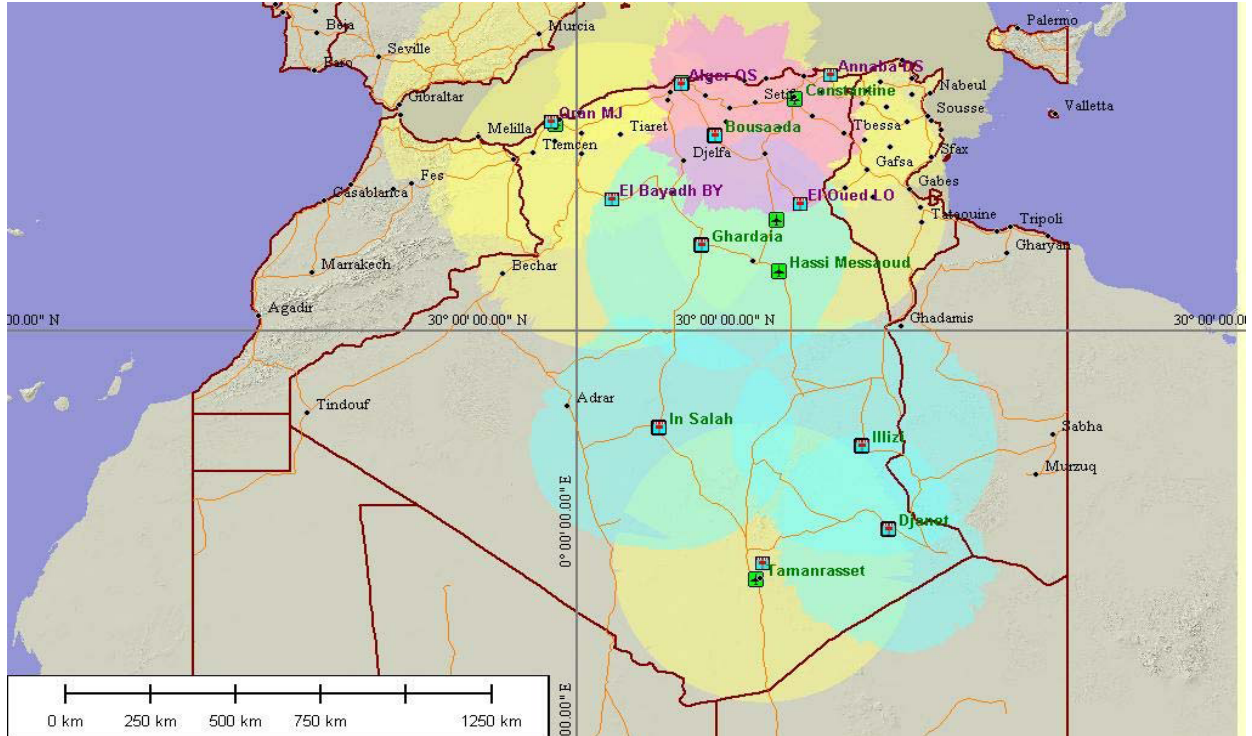


Fig. I.5 : Visibilité SSR proposé globale pour le niveau de vol 300

Les figures I.7 et I.8, montrent les mêmes dispositions des antennes, à la différence du trafic à une plus haute altitude voire niveau de vol (FL200 et FL300). Nous constaterons une meilleure couverture et une bonne prise en charge du trafic.

Remarque :

Les cartes présentées ci-dessus ne simulent toutefois pas la couverture totale, suite au manque des sites radars de Hassi Messaoud et Constantine.

Les figures suivantes pallient à ce problème par la simulation de la couverture de tous les sites proposés sauf Ain Salah. Cependant elle illustre également le manque dans la couverture totale de la FIR.

I.4 La Surveillance Dépendante Automatique ADS :

➤ **Introduction :**

Au début des années 90, le groupe FANS de l'OACI donnait naissance au concept CNS-ATM « Communication Navigation Surveillance - Air Traffic Management », dont l'objet principal était de faire face à l'accroissement du trafic aérien et ce grâce à des outils sol et bord plus performants mais aussi par une amélioration des échanges pilote - ATC. Les aspects communication et navigation furent traités au travers des liaisons de données, du concept ATN appliqué aux communications contrôleur-pilote (CPDLC) et du GNSS tandis que, pour la partie surveillance, apparaissait le concept ADS qui se divise en deux parties ADS-B (surveillance dépendante automatique broadcast) et ADS-C (surveillance dépendante automatique- contract).

I.4.1 La Surveillance Dépendante Automatique-Contract (ADS-C) :

L'ADS-C est une technique de surveillance air/sol pour laquelle l'avion transmet au sol automatiquement, dans le cadre d'un ou plusieurs contrats établis entre bord et sol ; un report périodique de sa position et tout autre paramètre demandé par le contrôle via une liaison de données point à point.

Il existe trois medium de communication sol/bord qui peuvent être utilisés : la VHF data Link mode 2 ou VDL mode 4, Squitter 1090 et UAT.

L'ADS-C nécessite un réseau de télécommunication mobile capable de maintenir une connexion "point à point" entre un aéronef en vol et une station fixe au sol

Les données transmises incluent au minimum :

- L'identification de l'aéronef
- La position 4D (position 3D et le temps de génération du message ADS time stamp)
- La précision des reports ADS-C calculés, appelée FOM.
- Des données additionnelles peuvent être aussi transmises telles que le cap, la vitesse, etc. Le contrat ADS-C est le mécanisme par lequel, un centre ATC équipé spécifie les conditions dans lesquelles les reports entre le système bord et la fonction sol doivent s'exécuter.

Les contrats peuvent être soit de type périodique soit de type événementiel sur demande

:

- ✓ Dans le cadre d'un contrat périodique, l'avion transmet des messages ADS-C dont la teneur et la fréquence d'émission sont prédéfinies par les utilisateurs sol. Le contrat périodique demeure actif jusqu'à l'émission de message d'annulation.
- ✓ Dans le cas d'un contrat événementiel, l'avion émet un message ADS-C lorsque l'avion détecte une condition de déclenchement, il peut s'agir : du passage à la verticale d'un point de compte-rendu de position ou d'un de cheminement "waypoint", du début d'exécution d'une manœuvre déchargement d'altitude ou de cap, de la déviation latérale par rapport à la route...etc. Ces événements sont prédéfinis par le contrôleur.

On parle également du contrat à la demande pour lequel l'avion émet des messages ADS-C à la demande des utilisateurs sol.

Un aéronef peut avoir plusieurs contrats simultanément avec plusieurs fonctions sol distinctes (par exemple avec le centre ATC et les opérations aériennes de la compagnie). Un maximum de cinq correspondants est possible à ce jour. Néanmoins, chaque contrat ADS-C est spécifique entre une fonction sol et un aéronef.

I.4.1-1 Fonctionnalités :

1. Établissement et fonctionnement du contrat à la demande :

- Un seul compte rendu peut être demandé à n'importe quel moment par le système sol.
 - Des données ADS facultatives peuvent être demandées en plus.
2. Établissement et fonctionnement du contrat événement :

Le système sol peut demander à l'avionique de transmettre des comptes rendus ADS lorsque des événements spécifiés se produisent (Changement de vitesse verticale, de point de cheminement, d'écart latéral, de niveau...)
 3. Établissement et fonctionnement du contrat périodique :

Permet au système sol de demander des comptes rendus périodique à un aéronef.
 4. Annulations des contrats :

L'avionique accuse réception de l'annulation et cesse de transmettre les comptes rendus ADS correspondant.
 5. Établissement et fonctionnement du mode d'urgence :

Permet à l'avionique de déclencher le mode d'urgence sur demande du pilote ou automatiquement.
 6. Annulation du mode d'urgence.

I.4.1-2 -Avantage et limites de l'ADS-C :

➤ **Les avantages :**

- L'ADS-C permet d'assurer la fonction de surveillance là où le SSR n'est pas économiquement envisageable ni -possible. C'est le cas des vastes espaces aériens océaniques et par similitude les vastes étendues désertiques comme ceux du sud Algérien.
- L'ADS-C permet au système ATC d'acquérir automatiquement certaines données de bords comme la route vraie, la vitesse etc.... Cette acquisition a pour effet d'améliorer la connaissance de la situation aérienne par le contrôleur et de réduire les minima de séparation. A cet effet, EUROCONTROL estime que l'ADS-C a le potentiel de réduire les normes de séparations appliquées dans les espaces aériens procéduraux.
- Lorsque l'ADS-C repose sur la liaison des données par satellite, il permet au contrôle sol d'acquérir des données de surveillance en basse altitude et dans les autres zones où le radar et la VHF, du fait de leur limitation de portée optique est aveugle.
- Les données ADS peuvent être utilisées dans les techniques d'économie de carburant. Par exemple : en améliorant l'utilisation des routes flexibles en zone océanique par

l'optimisation des taux de changement de niveau de vol qui permet aux avions d'évoluer à leur niveau de vol optimal.

➤ **Les limites :**

- Le délai de transmission, sol air (up-Link) et air sol (down-Link) reste élevé. Ce délai, en moyenne, supérieur à 30 secondes, interdit l'utilisation de l'ADS-C en approche et dans les zones à forte et moyenne densité de trafic.
- Le système est tributaire des prestataires de services.
- Selon le type d'équipement, le FOM peut fournir un cercle d'incertitude plus ou moins précis.
- Les coûts de connexion au réseau communications restent relativement importants.
- Taux d'actualisation de la position élevé (quelques minutes).
- Liaison point à point ; les messages échangés ne sont pas visibles aux autres pilotes

I.4.2 La surveillance dépendante automatique-Broadcast ADS-B :

I.4.2-1 Le concept ADS-B :

L'ADS-B est une application de surveillance qui, au moyen d'une liaison de données en mode diffusion, permet la transmission périodique de paramètres tels que l'identification, la position et l'intégrité de la position d'un aéronef ou d'un véhicule. Tout usager, au sol ou en vol, à portée de diffusion, peut décider de recevoir, traiter et afficher ces paramètres. Les informations ADS-B sont diffusées sans que l'émetteur sache quels usagers les reçoivent et sans qu'il entende un accusé de réception ou une réponse.

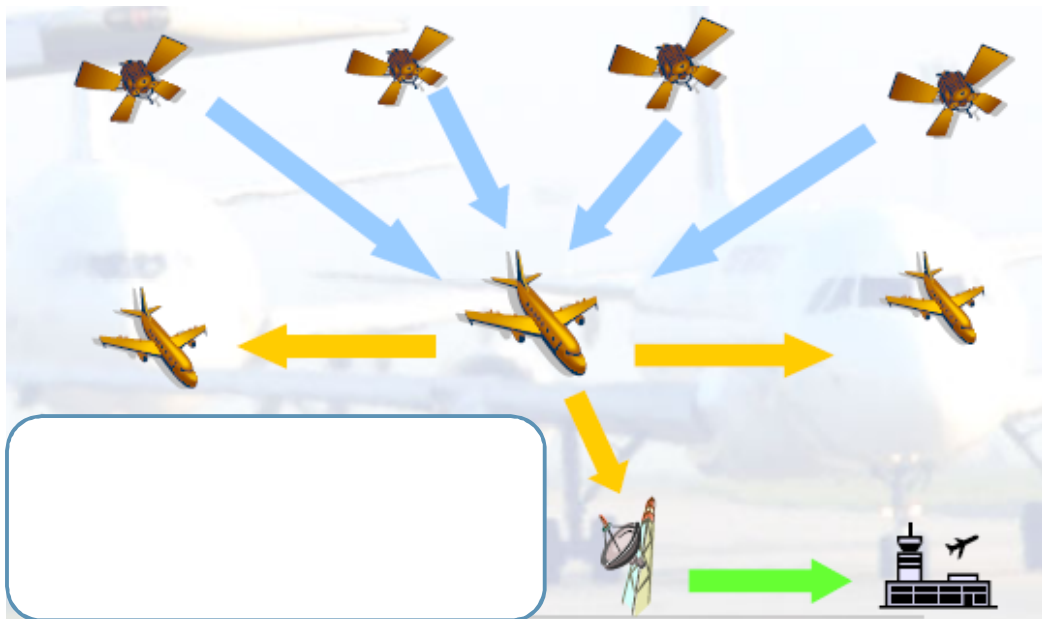


Figure .I.6 : Transfert de données ADS-B

I.4.2-2 Fonctionnalité ADS-B:

L'ADS-B est automatique du fait qu'aucune action de l'équipage de conduite ou du contrôleur n'est requise pour qu'une information soit transmise. La surveillance est dépendante du fait que les informations touchant la surveillance dépendent des références de navigation et des capacités de diffusion associées à l'émetteur qui les transmet.

Un système ADS-B se compose des éléments suivants :

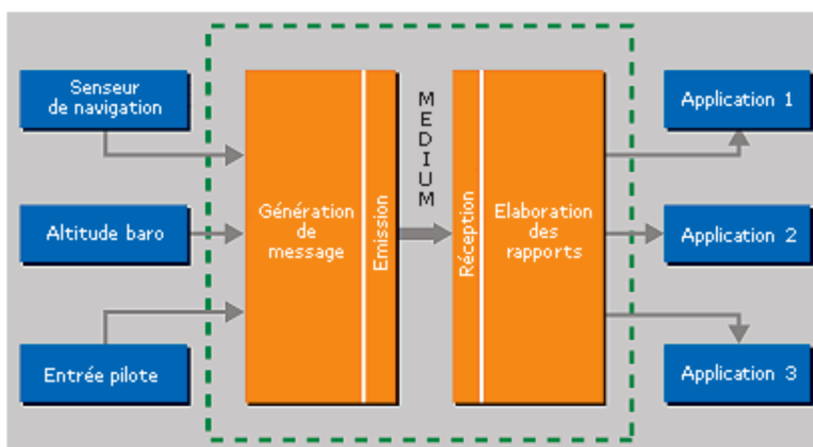


Figure.I.7: Architecture ADS-B.

- Un sous-système de transmission comprenant la fonction de génération (qui fusionne les données provenant des senseurs avion ou d'entrées pilote pour rédiger le message ADSB) et la fonction de transmission de messages.
- Un médium de diffusion par liaison de données.
- Un sous-système de réception comprenant les fonctions de réception des messages et d'assemblage ou élaboration des rapports dans l'aéronef, le véhicule ou le système terrestre qui synthétise les messages réceptionnés pour utilisation dans le cadre de diverses applications.
- Il convient d'observer que certains usagers de l'ADS-B peuvent être capables de transmettre sans recevoir, tandis que certains usagers au sol sont capables de recevoir sans transmettre ni les sources des informations transmises ni les applications des usagers ne sont considérées comme faisant partie du système ADS-B, mais leurs caractéristiques de performance doivent faire partie de la définition de performance globale du système ADS-B.

I.4.2-3 L'environnement de l'ADS-B :

Les environnements opérationnels dans lesquels l'ADS-B sera utilisé peuvent avoir une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

a) infrastructure hétérogène, de l'absence totale de moyen de surveillance à la coexistence de l'ADS-B avec différents types de sources de données conventionnelles telles que :

✓ Le radar primaire de surveillance qui est un système indépendant, car les systèmes de traitement associés lui permettent de déterminer les données d'avion telles que la position, la vitesse et non coopératif, car il nécessite l'emport d'aucun équipement embarqué spécifique. Par contre, il ne connaît ni l'altitude, ni l'identité des aéronefs qu'il détecte.

✓ Le radar secondaire de surveillance est un système quasi indépendant car mise à part l'information d'altitude, il calcule ses propres données de surveillance, mais coopératif car il nécessite la disponibilité du transpondeur. Par contre, il ne voit pas les aéronefs non équipés de transpondeurs.

b) variété des niveaux d'équipements embarqués.

c) variété des types d'espace aérien (c'est-à-dire, niveaux différents de densité de trafic).

d) variété des phases de vol, c'est-à-dire activités à la surface des aéroports, dans les TMA, en route, en espace continental, en espace océanique, etc.

e) variété des types d'applications et de services dans des environnements différents.

Ce dernier problème ne pourra être définitivement résolu qu'à partir du moment où tous les aéronefs seront équipés ADS-B. Cependant, comme il n'est prévu, à ce jour, par aucun d'Etat, d'imposer l'emport d'un équipement ADS-B à bord des aéronefs.

I.4.2-4 Contenu du message ADS-B :

Il dépendra de différents paramètres tels que l'application pour laquelle il est utilisé, le média et donc la taille du message disponible.

- Adresse OACI 24 bits identifiant de façon unique l'émetteur.
- Indicatif d'appel qui correspond à l'identifiant avion pour les besoins de communications vocales (il s'agit souvent du numéro de vol).
- Vecteur d'état incluant la position avion, sa vitesse et la qualité de ces données.
- Statut (urgence/priorité).
- Intention (cela pourrait inclure le ou les prochain(s) point(s) où la trajectoire avion sera modifiée).

Certains de ces paramètres seront transmis systématiquement tandis que d'autres dépendront de l'application, de la situation de l'avion (urgence...), avec des périodes de rafraîchissement fonction de la phase de vol. Les périodes actuellement proposées sont:

-10s pour les zones en route ;

-5s pour les zones terminales ;

-1s pour les opérations sur surface aéroportuaire (exigence OACI pour le SMGCS).

I.4.2-5 Les applications ADS-B :

Deux catégories d'application sont définies :

- **AS** : Airborne Surveillance / Applications Air-Air

Pour une meilleure connaissance du trafic environnant grâce à la présence d'un CDTI (Cockpit Display of Traffic Information).

Le but est de donner à terme la possibilité aux pilotes d'effectuer leurs propres séparations ; ceci entraînera graduellement le transfert de la responsabilité de séparation du contrôleur vers le pilote → 'Free Flight' ;



Figure .I.8: CDTI (Cockpit Display of Traffic Information). Image CENA

- **GS** : Ground Surveillance/ Applications Air-Sol :

Leur but est d'améliorer les procédures actuelles. Elles sont classées en :

- ATC surveillance for en route airspace (ADS-B-ACC) ;
- ATC surveillance in terminal areas (ADS-B-TMA);
- ATC surveillance in non-radar areas (ADS-B-NRA) ;
- Airport surface surveillance (ADS-B-APT).

1. ADS-B-RAD : ATC surveillance en zone radar route et TMA

- Améliore la surveillance en route dans les zones déjà couvertes par le radar ;
- Constitue un secours en cas de panne Radar ;
- moyen unique de surveillance dans les zones à faible et moyenne densité de trafic (validation en cours, nécessite une étude de sécurité)

2. ADS-B-NRA: ATC surveillance en zone non radar

- Permet la surveillance dans les zones non radar; Ex : zones océaniques; désertiques ... où le niveau de trafic et le coût de l'équipement Radar et son exploitation ne justifient pas son installation.
- La surveillance pour les besoins du service d'informations de vols et service d'alerte
- Service de type Radar : Application des normes de séparation Radar ; sujet à une étude de sécurité et validation en cours.

3. ADS-B-APT : Airport surface surveillance

- Fournit une nouvelle source d'informations de surveillance pour une gestion plus sûre et plus efficace des mouvements au sol dans les aéroports dotés ou pas de SMGCS (Surf. Mov. Guid. and Cont. Syst.)
- Aéronefs et véhicules au sol peuvent être dotés d'équipements de visualisation des mouvements au sol ;

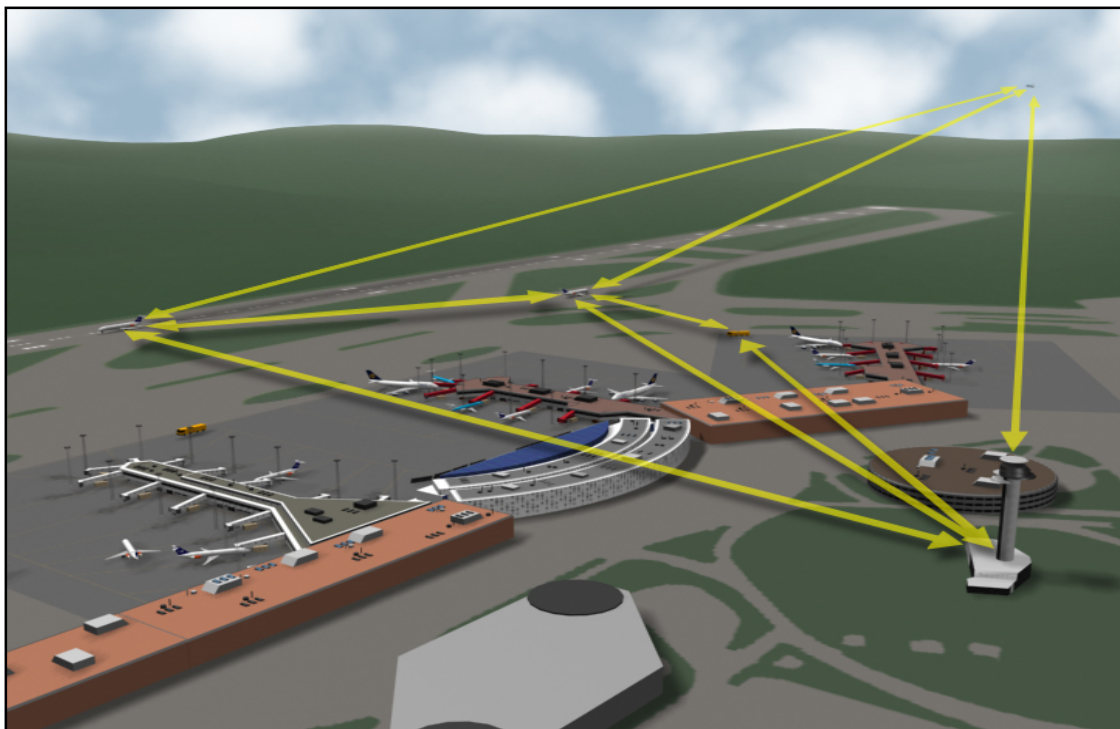


Figure .I.9: Surface de surveillance par ADS-B

I.4.2-6 Medium ADS-B (Les liaisons de données) :

A ce jour, trois media différents sont disponibles avec des degrés de standardisation et de validation différents :

- Le mode S squitter long ou 1090 ;
- La VDL mode 4, soutenue par l'Aviation Civile Suédoise ;
- L'UAT, développé par la MITRE.

Ces trois media concurrents sont actuellement testés par Eurocontrol dans le cadre de son programme ADS, par la FAA au travers du programme Safe Flight 21 ainsi que dans divers projets soutenus par la Commission Européenne. Toutes ces études, dont le déroulement s'échelonne sur plusieurs années, ont pour objet de tester ces trois media pour diverses applications de surveillance, de valider leur utilisation et de proposer un planning d'implémentation.

A ce jour, seuls des résultats préliminaires ont été publiés qui permettent d'avoir une idée partielle des performances respectives de ces équipements. Cependant, il est impossible de dire lequel ou lesquels de ces média seront retenus en tant que liaison de données pour l'ADS-B. Néanmoins, il apparaît qu'un équipement mixte pourrait être nécessaire, pour des besoins d'interopérabilité, mais aussi pour assurer un niveau de sécurité compatible avec la criticité de l'application.



Figure .I.10 : Transpondeur 1090.

➤ **Critères de choix :**

Aucun Etat ne s'est actuellement prononcé en faveur d'une des trois liaisons de données ou n'a proposé de mettre en place des applications de surveillance exigeant un tel choix. Parmi les critères à considérer pour prendre une décision, on trouve en particulier :

- Les performances de la liaison de donnée, qui détermineront sa capacité à participer aux diverses applications envisagées ;
- Son intégration dans les architectures sol et embarquées actuelles, qui impactera le coût global.

a) Performance :

Les trois liaisons de données sont actuellement comparées pour les paramètres suivants :

- La période de rafraîchissement des données qui doit être conforme, en fonction des phases de vol, aux données présentées précédemment ;
- La portée en terme de liaison air-air et air-sol ;
- La capacité est le nombre d'avions maximal pris en compte simultanément par la liaison de données ;
- L'intégrité des données transmises, implique la capacité du système à transmettre le message ADS-B sans qu'une altération ne soit détectée ;
- La disponibilité de la liaison, sans qu'elle ne soit affectée par une panne ;

b) Intégration dans l'architecture actuelle :

Afin de garantir une mise en place à court terme de certaines applications utilisant l'ADS-B, il est nécessaire que l'intégration des équipements et en particulier de la liaison de données soit la plus aisée possible, et nécessite le moins de modifications possibles des architectures sol et bord.

A ce niveau, il est indéniable que le mode S « Extended Squitter » a l'avantage. En effet, le mode S est d'ores et déjà en place et ne nécessite qu'une modification logicielle alors que pour les autres liaisons de données, des architectures spécifiques doivent être développées et de nouvelles antennes installées ce qui pourrait s'avérer une contrainte majeure pour des aéronefs de faibles dimensions.

L'attribution d'une nouvelle fréquence pour l'UAT, ou de plusieurs pour la VDL mode 4, dans des gammes déjà surchargées, constitue une contrainte supplémentaire. Une récente

étude réalisée par Eurocontrol a démontré que pour la zone terminale de Francfort, sept fréquences seraient nécessaires pour la VDL mode 4 et 5 pour la région terminale de Bruxelles. Mais le mode S présente aussi des contraintes. En particulier, cette liaison constitue un point commun entre les systèmes de surveillance sol, l'ADS-B ainsi que pour le filet de sauvegarde qu'est l'ACAS. Toute panne de l'équipement pourrait avoir des conséquences graves sur les opérations des aéronefs.

I.4.2-7 Limitations ADS-B :

Plusieurs applications peuvent exploiter l'ADS-B cependant, la capacité de l'ADS-B à informer tous les avions environnants équipés de sa position présente aussi plusieurs inconvénients :

- Toute information erronée (en particulier la position) émise par un aéronef, sans que cela soit détecté, peut avoir des conséquences dangereuses en fonction du type d'application mise en place ;
- Une confiance excessive de la part du pilote, qui pourrait avoir l'impression d'avoir une connaissance parfaite des trafics environnants alors que seuls les avions équipés transmettent leur position.

I.4.2-8 Comparaison entre l'ADS-C et l'ADS-B :

<i>ADS-B</i>	<i>ADS-C</i>
<i>_ Le message est envoyé systématiquement ;</i>	<i>_ Les messages sont envoyés dans le contexte d'un contrat ;</i>
<i>_ Le contenu n'est pas fixe ;</i>	<i>_ Les messages sont envoyés à un destinataire connu ;</i>
<i>_ Aucun destinataire n'est désigné ;</i>	<i>_ Loin du concept de la surveillance à temps réel.</i>
<i>_ Pas aussi loin du concept moyen de la surveillance en temps réel.</i>	

Tableau I.1 : Comparaison entre l'ADS-C et l'ADS-B

I.4.2-9 La couverture ADS-B proposés en Algérie :

Neuf (09) stations seront nécessaires afin de répondre aux besoins de surveillances Il sera nécessaire de déployer les stations suivantes :

1. Installer une station à Alger qui servira de back up pour le radar d'Alger, sachant que la TMA centre constitue le secteur le plus dense en terme de trafic en Algérie
2. Installer deux stations au niveau des aéroports de Boussaâda et d'El Goléa pour combler le manque de couverture du secteur Sud-Centre. La transmission de données peut se faire par des liaisons en fibre optique entre les stations ADS/B et le CCR Alger.
3. Pour couvrir les principaux axes Nord-Sud et Particulièrement une région d'ombre à l'extrême Sud-ouest du pays ; deux stations supplémentaires seront nécessaires à Chenachen et Adrar ; ces stations devront être autonomes car implémentées dans des zones désertes difficilement accessibles. Les transmissions de données se feront probablement via VSAT vu l'éloignement de ces dernières.
4. Doubler, voire remplacer les radars en fin de vie par l'ADS/B, quatre autres stations devront être déployées.

Les figures ci-dessous montrent l'emplacement de l'ADS/B aux différents niveaux de vols (Alger ; Boussaâda ; El Goléa ; Chenachene ; Adrar ; Oran ; Annaba ; El Bayadh ; El Oued

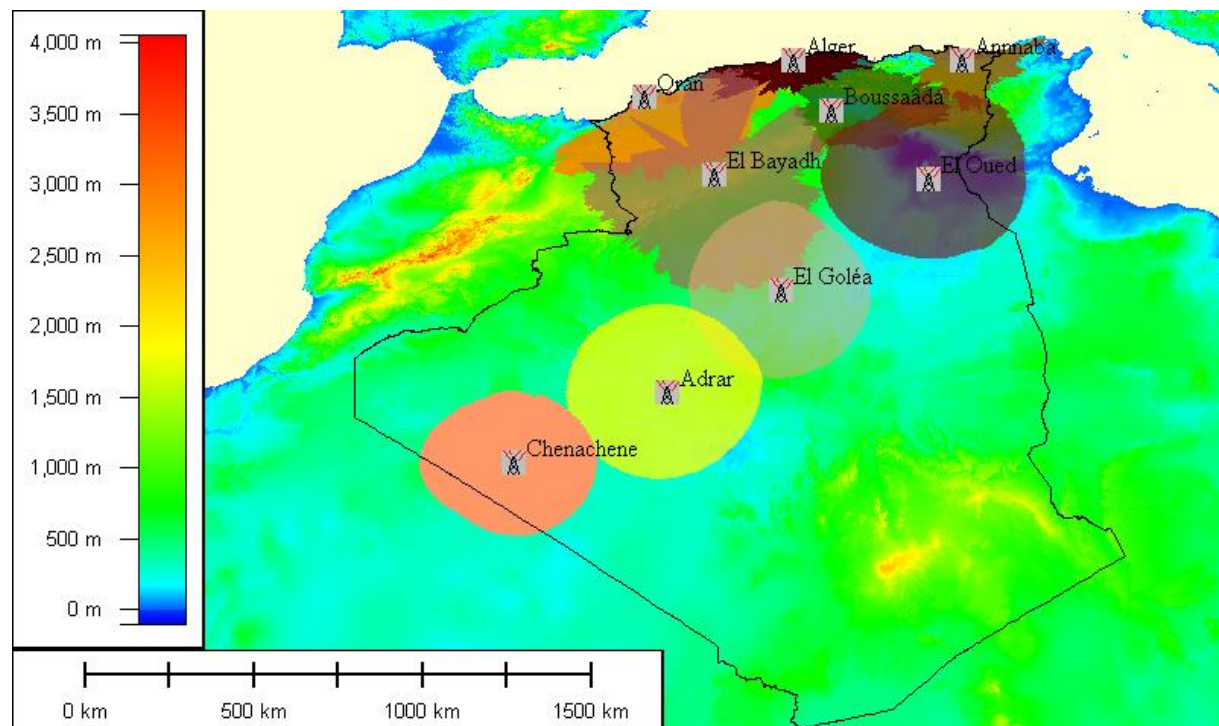


Figure .I.11: Couverture AD-B FL100.

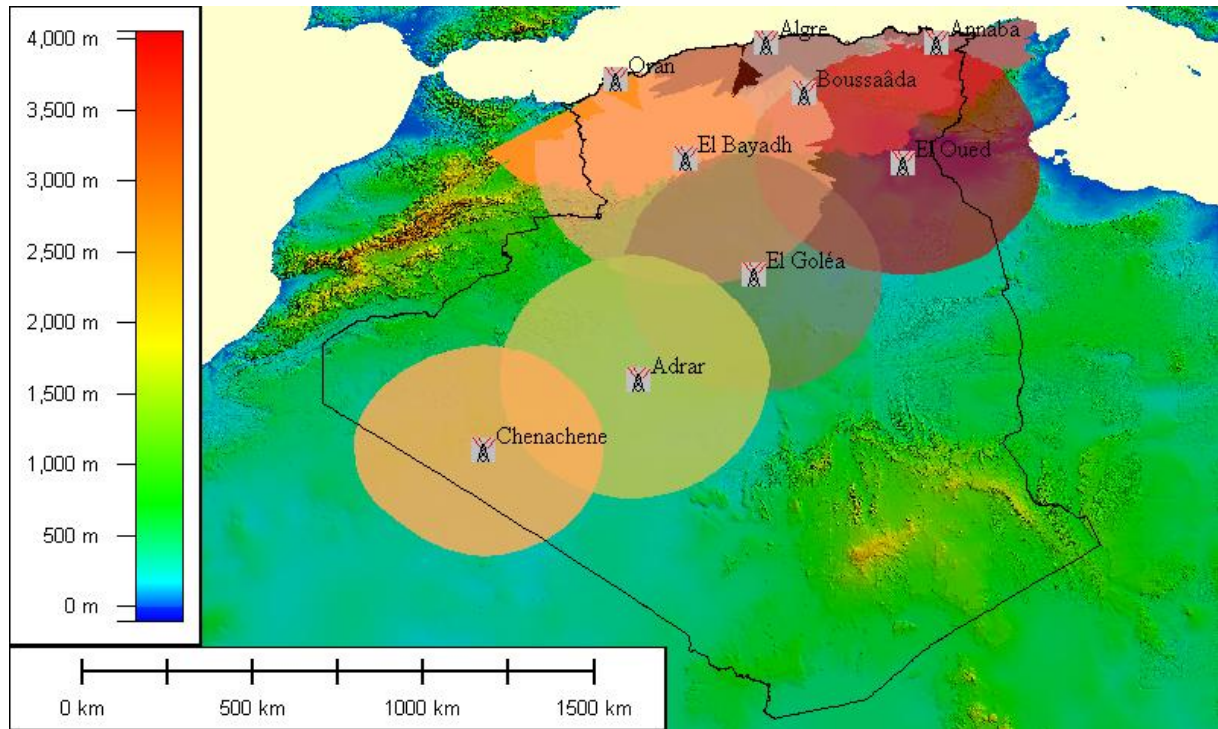


Figure .I.12: Couverture AD-B FL200.

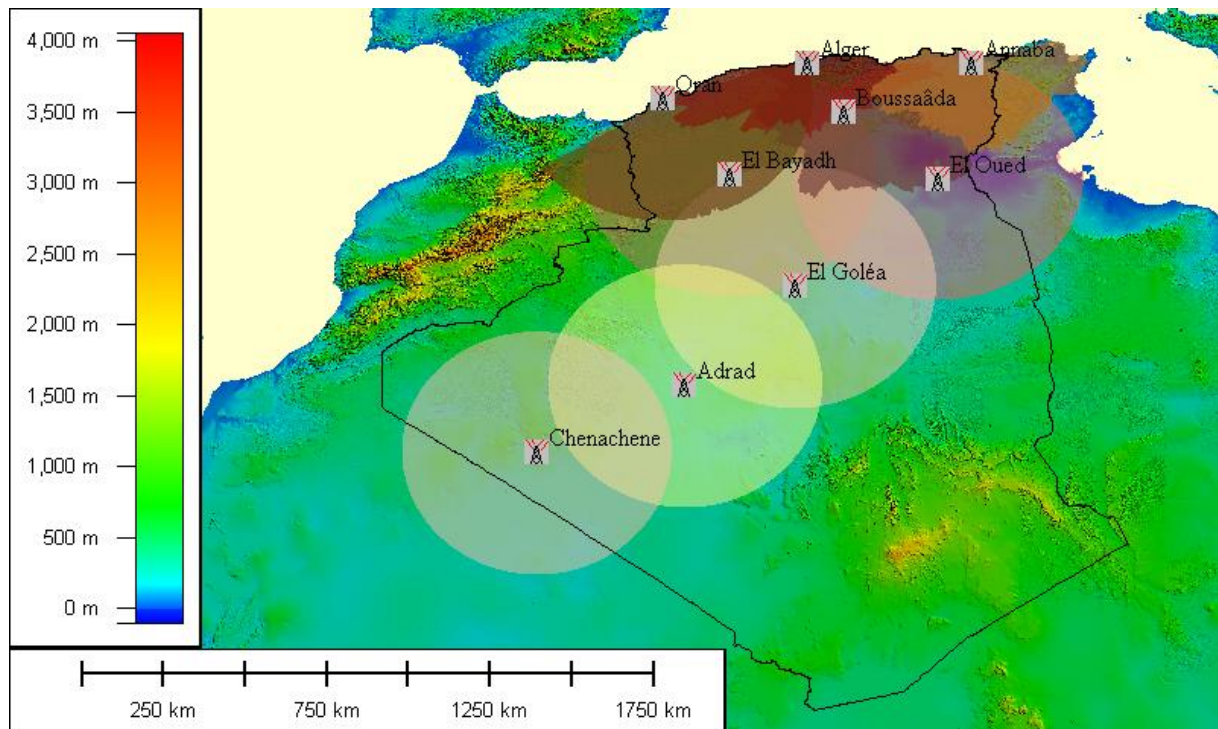


Figure .I.13: Couverture AD-B FL300.

I.5. Conclusion :

L'Algérie jouit d'une position géographique privilégiée quant au passage de certains flux de trafic Europe-Afrique. L'analyse du système CNS/ATM et notamment de sa partie surveillance montre que des compléments ainsi que des améliorations peuvent être envisagés afin de rehausser le niveau de sécurité des vols et augmenter la capacité de l'espace aérien. Ces mesures nécessitent l'installation d'autres moyens de surveillances modernes reposant sur une technologie performante, fiable et accessible comme le SSR-S, l'ADS-B et la multilatération. Il faut équiper les avions de systèmes autonomes tels que le système anticollision TCAS.

II.1. Introduction:

Le système TCAS a été pensé suite à un accident au-dessus du Grand Canyon le 30 Juin 1956 entre deux avions de compagnies aériennes américaines. A cette époque la technique ne pouvait pas suivre et il a fallu « attendre » un autre accident le 21 Août 1986 entre un DC-9 d'Aeromexico et un avion privé au-dessus de Cerritos en Californie, près de Los Angeles, pour accélérer ce programme (la FAA avait déjà lancé ce programme en 1981).

En fait, le système TCAS permet de signaler à un pilote si un autre avion est dans son espace et s'il y a risque de collision, dans cette éventualité, le système TCAS donne un ordre d'évitement au pilote.

Le système fonctionne de la même manière que le radar secondaire de surveillance (SSR) basé au sol pour déterminer la distance entre les autres aéronefs

Un autre objectif du TCAS est de répandre l'utilisation de transpondeurs mode S pour aider à réduire la congestion de bandes 1030-1090 MHz

A ce jour 3 versions de TCAS existent TCAS I, TCAS II et TCAS III. Aujourd'hui le TCAS II est en fonction.

-Le TCAS I est le plus rudimentaire des systèmes TCAS il a été conçu pour les petits avions, il fonctionnait avec des transpondeurs mode –C et donnait au pilote une indication de cap et de distance sur un écran, c'était au pilote de surveiller cet écran en permanence.

- Le system TCAS II est le système le plus sophistiqué qui est destiné à être utilisé sur des avions commerciaux de plus grande taille il donne en plus une indication au pilote ; il le conseil sur la manœuvre à faire en cas de risque de collision, ce qui se nomme les RA (Resolution advisory).

En cas de RA le pilote entend une alarme audio et sur l'écran est affichée la manœuvre à faire (monter ou descendre uniquement, pas de manœuvre gauche-droite), et aussi il fonctionne avec des transpondeurs mode S mais est compatible avec le mode C (à la

base pour la période de transition TCAS I / TCAS II, mais également pour les avions équipés uniquement de transpondeurs mode C, sans TCAS).

- Le TCAS III quant à lui n'a pas encore vu le jour, mais il est basiquement le même que TCAS II, il permettra en plus de faire une manœuvre latéral (droite gauche). Ceci sera possible lorsque les antennes directionnelles seront plus « précises ». D'autres paramètres sont également évoqués, comme la transmission de la position GPS par les transpondeurs, les intentions de vol, la vitesse

Le TCAS emploie la méthode d'interrogation de « cri de chuchotement » en commençant avec des interrogations de basse puissance.

Le système TCAS reçoit des réponses d'aéronef à proximité, il augmente alors la puissance d'interrogation afin de recevoir des réponses des avions qui sont à des distances supérieures, Afin de supprimer les réponses des plus proche aéronefs, la second interrogation mode C est précédée par deux ms avec une impulsion d'amplitude de la première interrogation.

De cette façon l'avion le plus proche est celui qui a été interrogé par la première impulsion de plus faible puissance

Le récepteur TCAS reçoit la deuxième impulsion et sera considérées comme l'impulsion P1 et ensuite la troisième impulsion comme l'impulsion P3 parce qu'il a l'espacement approprié. Ce processus peut être répété si nécessaire pour augmenter la gamme du TCAS

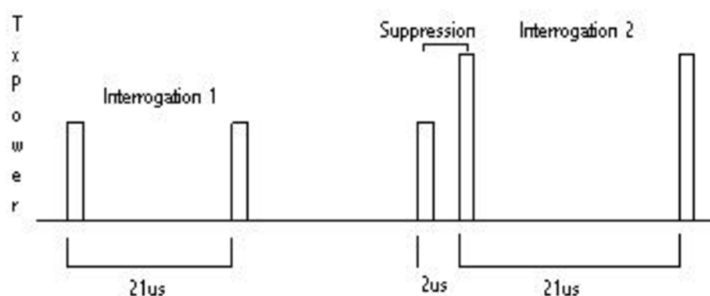


Figure1I.1 Mode d'interrogation du système TCAS

Une autre façon pour que le système TCAS puisse localiser l'avion est par l'utilisation du Mode S squitter. En écoutant pour squitters d'autre transpondeurs Mode S. Le système TCAS peut apprendre les numéros d'identification de cet avion. Alors le TCAS peut faire des appels individuels à cet avion en utilisant le transpondeur Mode S pour acquérir les informations sur l'emplacement et l'altitude nécessaire sans activer des réponses d'autre transpondeurs Mode A/C

TCAS II et TCAS III se servent des bits de données supplémentaires dans le transpondeur Mode S pour répondre aux manœuvre de coordonnées entre les avions , Si les deux avions sont équipés d'un TCAS quand une unité TCAS décide qu'une manœuvre évasive doit être entreprise le TCAS dit à l'autre avion dans un mode S spéciale la réponse de la manœuvre qui l'entreprendra ,de cette façon le seconde TCAS peut assurer qu'il ne donne pas la manœuvre d'image inversée a son pilote.

Une autre avance que l'on peut voir dans le TCAS III est l'utilisation d'antennes directionnelles. Cette version de TCAS utilise huit monopoles chargés de sommet qui sont arrangés dans un modèle circulaire

Cette antenne tient compte de la subdivision du rayon principale dans 22.5° d'incréments Une impulsion P2 est alors transmise dans le modèle de différence comme arrivé dans SSR pour limiter le nombre d'avion répondant .Ce nombre accru d'éléments dans l'antenne tient aussi compte d'une meilleure mesure de comportement

Une exactitude de $\pm 4^{\circ}$ est normale dans le TCASIII

Un système TCAS est composé de 2 transpondeurs mode S et leur antenne associées, d'un calculateur TCAS avec ces antennes, et d'indicateur (soit sur les EFIS de l'avion soit sur des afficheurs dédiés spécialement, IVSI par exemple (le variomètre). Sur l'image ci-dessous, par exemple, le système TCAS est réalisé sur un IVSI

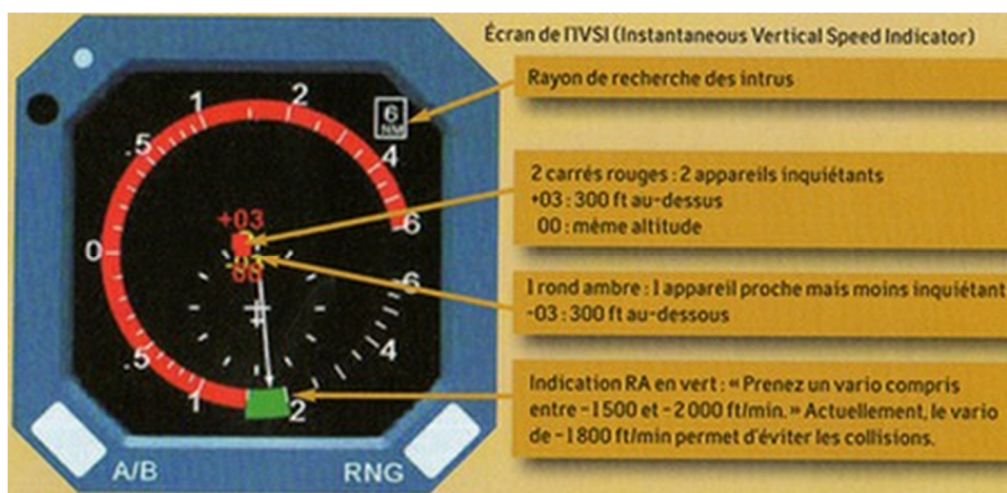


figure.II.2 : Visualisation des informations TCAS sur un Variomètre

II.2. Définition du système TCAS

Le TCAS (Traffic Alerteand Collision Avoidance System) est un système d'anticollision embarqué qui assure la détection, et la poursuite, des avions évoluant à proximité de l'avion équipé de ce système , signaler la présence des avions qui constituent une menace de collision et conseille aux avions des manœuvres visant à résoudre le conflit de manière qui assure la gestion de trafic et la sécurité des avions.

Le TCAS est un système autonome d'anticollision récemment embarqué par la FAA (Fédéral Aviation Administration) avec les sociétés BENDIX/KING et HONEYWELL.

Ce système fournit au pilote des informations sur le trafic dans l'environnement immédiat de l'avion, en donnant un ordre d'évitement dans le plan vertical lorsqu'il détecte un risque de collision ou de rapprochement estimé dangereux avec un autre avion.

Les tests en vol effectués en 1988 et 1989 ont montrés qu'il s'agit d'un système sûr utilisable, Il améliore la sécurité dans toutes les zones à forte densité de trafic,

II.3. Caractéristiques du TCAS II :

- Equipement embarqué, interrogeant les **transpondeurs SSR** environnants
- Critère d'anti-abordage basé sur un **temps de vol**
- **Indépendant** de tout système sol, de l'ATC
- **Indépendant** du P.A. et des systèmes NAV (GPS, INS...)
- Destiné à l'**anti-abordage uniquement**

II.4. Les composants du système TCAS :

Le TCAS est désigné principalement à fonctionner comme un « back up » pour le système ATC, sa principale fonction est la surveillance et le contrôle de la circulation aérienne.

Une installation TCAS est constituée des composants suivants:

- ✓ **Unité d'ordinateur TCAS**
- ✓ **Antennes**
- ✓ **Boîte de commande ATC /TCAS**

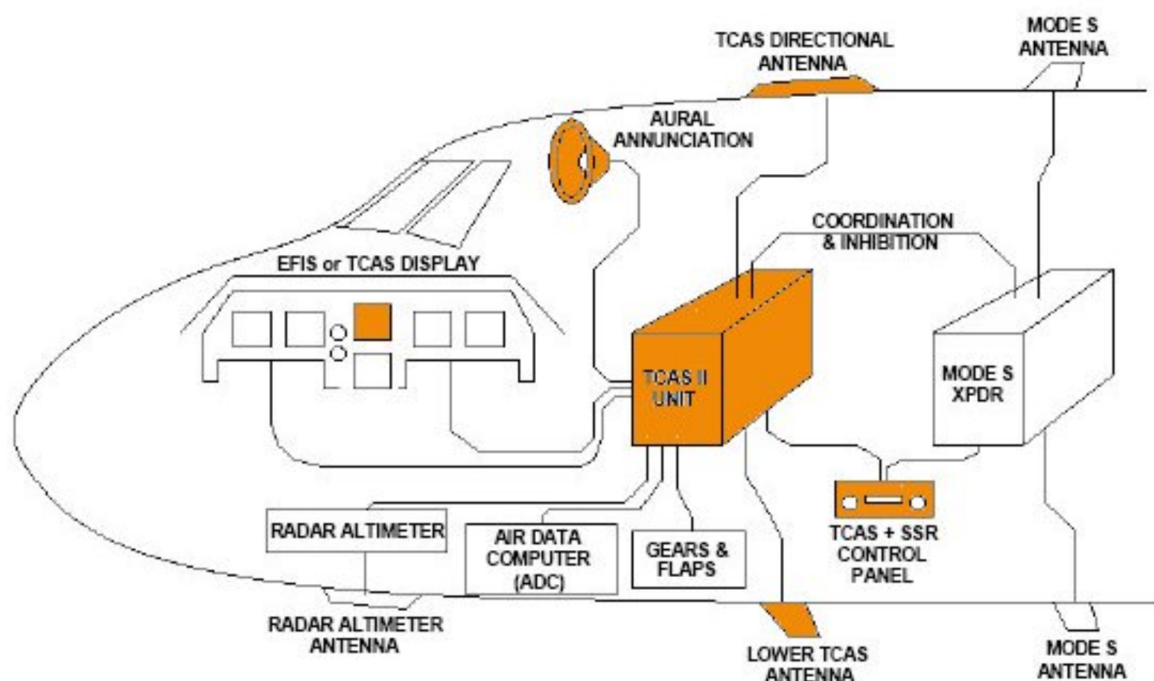


Figure .II.3 : Les Composants du système TCAS

II.4.1 - Unité d'ordinateur TCAS :

Cette unité effectue la surveillance de l'espace aérien, le suivi des intrus, son propre suivi de l'altitude de l'avion, la détection des menaces, propose des résolutions (RA). Détermine la manœuvre et la sélection, et la génération d'alertes.

Le processeur TCAS utilise altitude pression pour contrôler les paramètres logiques d'évitement des collisions qui déterminent le volume de protection autour de l'avion TCAS.



Figure .II.4 : TCAS computer

II.4.2 - Antennes :

Les antennes utilisées par le TCAS II comprennent une antenne directionnelle qui est montée sur la partie supérieure de l'appareil et une antenne omnidirectionnelle ou une antenne directive montée sur la partie inférieure de l'aéronef. La plupart des installations utilisent l'antenne directionnelle en option sur le fond de l'appareil.

En plus des deux antennes TCAS, deux antennes sont également nécessaires pour le transpondeur Mode S. Une antenne est montée sur la partie supérieure de l'appareil tandis que l'autre est montée sur la partie inférieure. Ces antennes permettent au transpondeur mode S de recevoir les interrogatoires à 1030MHz et répondre aux interrogations reçues à 1090 MHz.

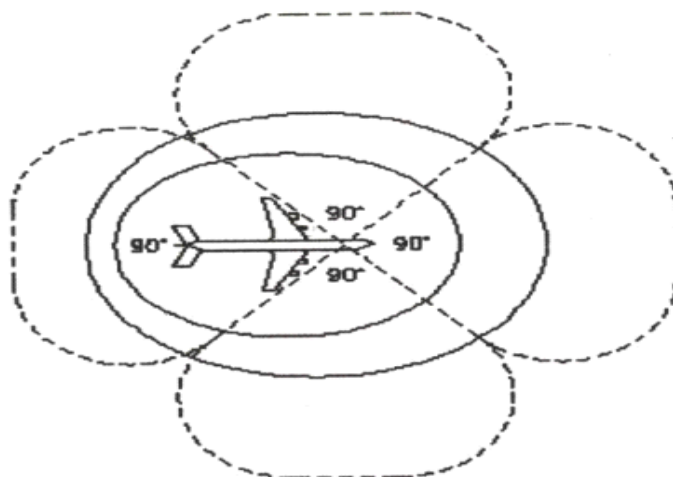


Figure.II.5 : Diagramme de rayonnement des antennes directionnelles



Figure .II.6 : Antenne omni directionnelle vue de haut

II.4.3 - La boîte de commande ATC/TCAS :

La boîte de commande ATC/TCAS commande le TCAS computer par :

➤ **Switch de choix de fonction :**

Ce Switch est pour choisir un de ces modes de TCAS:

- Mode TA seulement. Ce mode (TA) empêche l'affichage de mode RA.
- Mode TA/RA. Les affichages montrent toutes les cibles. Ce mode est le fonctionnement normal de TCAS.

Vous pouvez utiliser la touche "test" au centre du commutateur pour faire un test des systèmes ATC et de TCAS.



Figure .II.7 : Boite de commande TCAS /ATC

II.5. Les caractéristiques du système TCAS :

II.5.1 - La portée :

Le TCAS définit la portée en mesurant le temps entre l'interrogation initiale et la réponse reçue, le calcul de la portée est défini de la même manière que l'équipement de mesure de distance (DME).

Le rapport de distance des intrus est utilisé seulement pour rehausser les connaissances des situations au pilote.

II.5.2 - Le taux de rapprochement « TAU » :

L'évitement de collision est basé sur le TAU. Celui-ci utilise la portée de la cible et le taux de la portée pour déterminer le taux de rapprochement.

Le TAU représente le temps minimum pour le besoin de l'équipage afin de distinguer la menace de collision et de donner l'avis d'évitement.

II.5.3 - L'évitement :

L'évitement est défini à partir de la phase de transport de la relation du signal et de réponse du signal dans l'antenne directionnelle du TCAS.

Cette phase est calculée à l'intérieure par le processus TCAS.

L'évitement n'est pas défini à partir des données contenues dans les réponses du signal et il n'est pas facteur de performance de capacité d'évitement de collision dans le système.

II.5.4 - L'altitude :

L'information de l'altitude est utilisée pour déterminer le taux de montée ou le taux de descente basés sur les changements d'altitudes et afficher l'intrus, la flèche déviante indique le mouvement vertical de l'intrus (montée ou descente) à plus de 500 pieds par minute.

II.5.5 - Niveau de sensibilité :

La logique d'anti-abordage ou logique TCAS (Trafic Collision Avoidance System) est une logique prédictive, Elle repose sur les deux notions fondamentaux : niveau de sensibilité et préavis d'alarme. Le niveau de sensibilité est en fonction de l'altitude et définit le niveau de protection, il varie de 1 à 7. Plus ce niveau est grand, plus la protection est grande.

Un compromis est nécessaire entre la protection que doit fournir la logique d'anti-abordage et les fausses alarmes liées au caractère prédictif de la logique. Cet équilibre est obtenu par la commande du niveau de sensibilité ou SL (Sensitivité Level), qui contrôle les dimensions d'un " volume de protection " théorique autour de chaque avion équipé TCAS.

Côté pilote, trois modes de fonctionnement du TCAS sont disponibles : 'STAND-BY', 'TA-ONLY' et 'AUTOMATIC'. La logique convertit ces modes en niveaux de sensibilité :

- Quand le mode '**STAND-BY**' est sélectionné par le pilote (SL=1), le TCAS ne transmet pas d'interrogation. Normalement, ce mode est utilisé lorsque l'avion est au sol ou en cas de dysfonctionnement du système.
- En mode '**TA-ONLY**' (SL=2), le TCAS remplit la fonction de surveillance. Cependant, Seuls les TA sont fournis. Le TCAS n'élabore pas de RA , il est sélectionné entre 0 et 1000 ft AGL (Above Ground Level) mesurés par le radioaltimètre.
- Quand le pilote sélectionne le mode '**AUTOMATIC**', le TCAS détermine automatiquement le SL en fonction de l'altitude de l'avion.

Du SL niveau 3 au SL niveau 7, les TA et RA sont présentés pour déterminer le niveau de sensibilité requis au-dessus de 2600 ft AGL environ,

La logique utilise l'altitude par rapport au calage standard (1013,25 hPa) fournie par l'altimètre barométrique.

II.5.6 - Préavis d'alarme :

Le préavis d'alarme repose principalement sur le temps (et non pas la distance) pour atteindre le point de rapprochement maximal ou CPA (Closest Point of Approach), il intègre une protection supplémentaire en distance pour le cas des rapprochements lents.

Le TAU est un seuil qui est comparé au temps avant le CPA, calculé en divisant la distance entre les avions par la vitesse de rapprochement. Le TCAS utilise le principe de TAU pour la plupart de ses fonctions d'alerte.

Les valeurs de TAU sont fonction du SL de manière à éviter qu'un intrus puisse se rapprocher très près en distance sans déclencher de TA ou de RA, les limites de protection provenant du principe de TAU sont modifiées si la vitesse de rapprochement est très faible, Cette modification appelée DMOD (Distance MODification) Fournit une protection supplémentaire dans le cas de conflit avec une vitesse de rapprochement faible. Les valeurs de DMOD sont également en fonction du SL.

Les valeurs de TAU et de DMOD figurent sur le tableau II.1. Les valeurs présentées s'appliquent dans un cas général. Toutefois, les valeurs de TAU liées au RA peuvent être réduites pour certains types de géométrie (tels que les stabilisations à 1000 ft) de manière à diminuer le nombre de fausses alarmes.

<i>ALTITUDE</i>	<i>SL</i>	<i>VALEUR DU TAU (S)</i>		<i>VALEUR DE DMOD (NM)</i>	
		<i>TA</i>	<i>RA</i>	<i>TA</i>	<i>RA</i>
<i>0-1000ft</i>	<i>2</i>	<i>20</i>	<i>Pas de RA</i>	<i>0,30</i>	<i>Pas de RA</i>
<i>1000-2350ft</i>	<i>3</i>	<i>25</i>	<i>15</i>	<i>0,33</i>	<i>0,20</i>
<i>2350-FL50</i>	<i>4</i>	<i>30</i>	<i>20</i>	<i>0,48</i>	<i>0,35</i>
<i>FL50-FL100</i>	<i>5</i>	<i>35</i>	<i>25</i>	<i>0,75</i>	<i>0,55</i>
<i>FL100-FL200</i>	<i>6</i>	<i>40</i>	<i>30</i>	<i>1,00</i>	<i>0,80</i>
<i>> FL200</i>	<i>7</i>	<i>48</i>	<i>35</i>	<i>1,30</i>	<i>1,10</i>

Tableau II.1 : Seuils d'alerte en fonction de l'altitude

II.6 LA LOGIQUE DU SYSTEME TCAS :

II.6.1 – Poursuite :

A partir des informations de surveillance (distance oblique, gisement et altitude) fournies chaque seconde (toutes les cinq secondes en cas de “surveillance réduite”), la logique TCAS calcule la vitesse de rapprochement de chaque intrus, afin de déterminer le temps en secondes avant le CPA ainsi que la distance horizontale à ce point. Si l'intrus est équipé d'un transpondeur codant l'altitude, la logique TCAS prévoit l'altitude de l'intrus au CPA.

La vitesse verticale de l'intrus est obtenue en mesurant le temps qui lui est nécessaire pour franchir des tranches d'altitude de 100 ou 25 ft selon le type d'information reçue

La logique TCAS utilise les données d'altitude pression de l'avion de référence, soit directement via le codeur altimétrique, soit via le calculateur de bord.

Elle détermine ainsi l'altitude de l'avion, sa vitesse verticale et l'altitude relative de chaque intrus.

Les sorties des algorithmes de poursuite (distance oblique, distance horizontale au CPA, vitesse de rapprochement et altitude relative des intrus) alimentent les algorithmes d'avis de trafic et de détection de menace.

En dessous de 1700 ft AGL, la logique TCAS estime la hauteur de l'intrus par rapport au sol en utilisant son altitude pression, son radioaltimètre et l'altitude pression de l'intrus. Comme indiqué sur la figure.II.9, si cette hauteur est inférieure à 380 ft, le TCAS considère que l'intrus est au sol et ne génère donc pas d'alarmes T A ou RA.

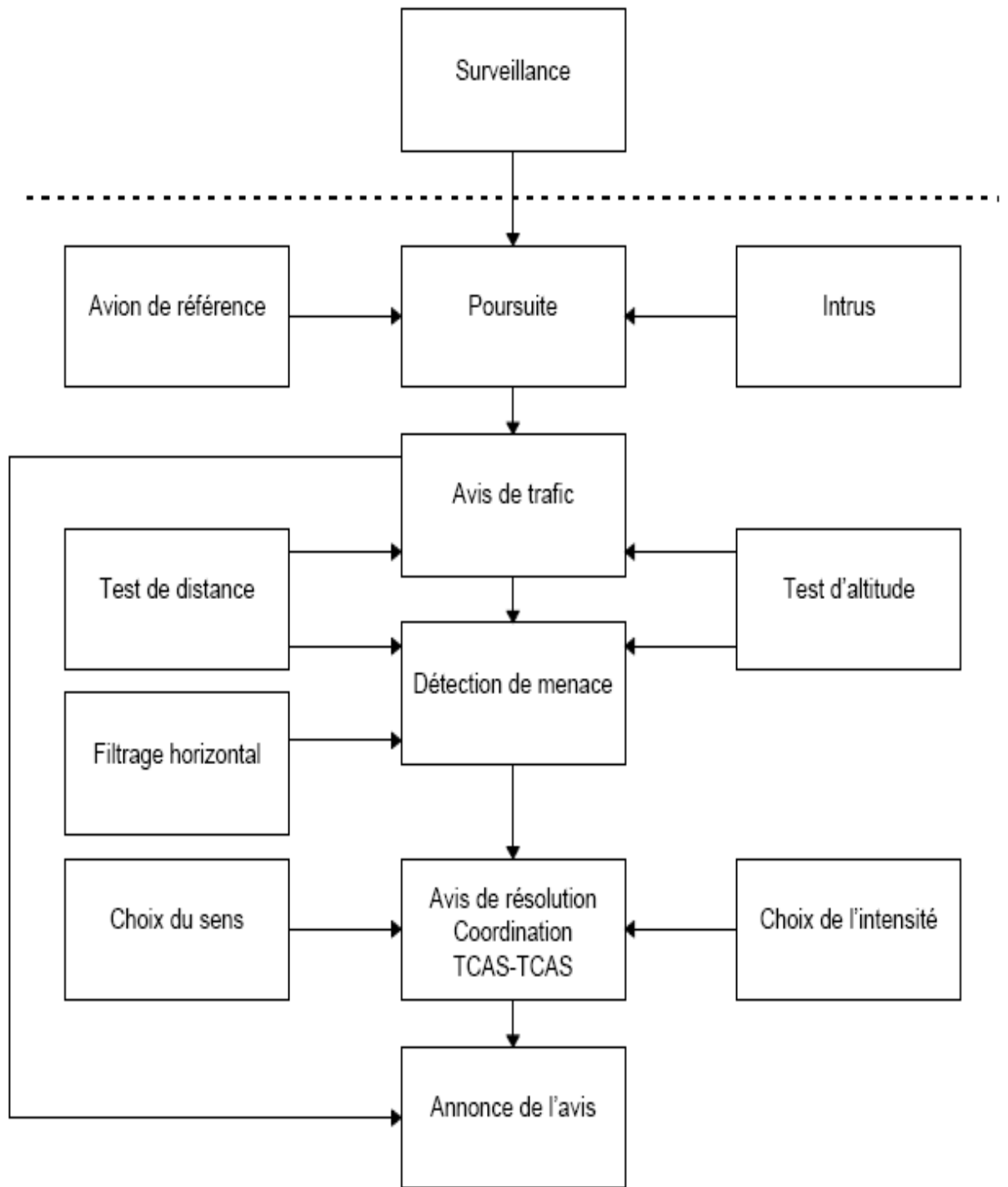


Figure .II.8 : Fonctions de la logique TCAS

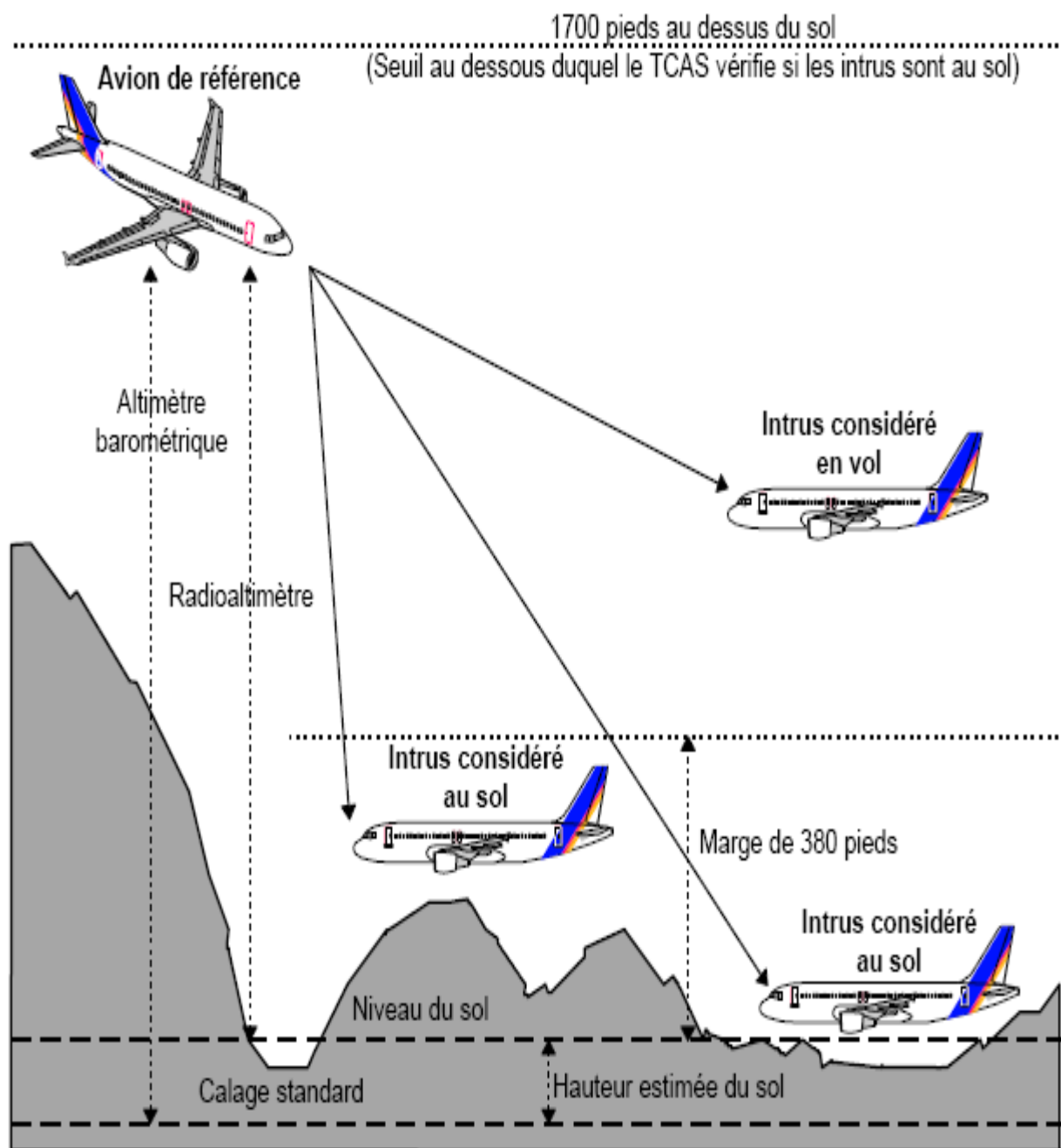


Figure II.9 : Détection des intrus au sol

II.6.2 - Avis de trafic :

Le système TCAS émettra des avis de circulation TA (trafic advisory) pour prévenir l'équipement de bord de la présence de menaces possibles, L'avis de circulation TA est généré pour un intrus signalant l'altitude en mode C lorsqu'un test de distance et un test d'altitude sont l'un et l'autre évidents pendant le même cycle de fonctionnement.

Il est recommandé que pendant l'affichage d'avis de circulation ou de résolution, les avions situés à moins de 11KM (6NM) dans le plan horizontal et, si l'altitude est signalé à

moins de 370 m (1200 ft) dans le plan vertical, soient également affichés. Ces aéronefs devaient être distingués (à l'aide des symboles ou de couleurs) des menaces et des menaces possibles, qui devraient apparaître plus en évidence à l'affichage.

II.6.3 - Détection de menace :

Les tests de distance et d'altitude sont exécutés à chaque cycle pour tout intrus reportant son altitude. Tous les deux doivent être satisfaits pour qu'un intrus soit déclaré menace.

On rappelle que les seuils horizontaux d'alarme ne sont pas basés sur la distance à un instant donné mais sur le temps à venir avant le CPA. Ces valeurs dépendent donc des vitesses et des caps des avions impliqués ainsi que du niveau de sensibilité, pour un intrus donné le "volume de protection" théorique autour de l'avion équipé TCAS est en général une sphère tronquée avec un rayon égal à la norme du vecteur vitesse relatif multiplié par le temps TAU.

Le volume est également tronqué latéralement par une fonction de filtrage horizontal ou MDF (Miss Distance Filter). Le MDF a pour objet de diminuer le nombre de fausses alarmes pour des géométries où la distance horizontale prévue au CPA est suffisante d'un point de vue anti-abordage.

Le filtre est théoriquement efficace pour des valeurs supérieures à deux fois DMOD ; Dans le cas général, pour des géométries de conflit avec une vitesse verticale de rapprochement faible, les seuils verticaux de déclenchement pour les RA varient entre 600 et 800 ft suivant l'altitude de l'avion de référence. Pour une vitesse verticale de rapprochement élevée, un RA est déclenché dès que l'estimation de l'instant où l'intrus et l'avion de référence seront à la même altitude, est inférieure aux valeurs de TAU (cf. tableau 1), Suivant la géométrie du conflit et la qualité de la poursuite verticale de l'intrus, le RA peut être différé, voire non généré. Aucun RA ne peut être généré pour des avions ne reportant pas leur altitude.

II.6.4 - Avis de résolution :

Le système TCAS générera un avis de résolution pour toutes les menaces, sauf les cas où il n'est pas possible de sélectionner un avis de résolution dont on peut prévoir qu'il

assurera une séparation adéquate, soit à cause de l'incertitude du diagnostic de la trajectoire de vol de l'intrus, soit parce qu'il y a un risque élevé qu'une manœuvre de la menace annulera l'effet de l'avis de résolution.

➤ **Sélection de l'avis de résolution**

Le système TCAS générera l'avis de résolution qui doit, selon les prévisions, assurer une séparation adéquate avec toutes les menaces et qui influencent sur la trajectoire de vol actuelle de l'aéronef.

➤ **Les types d'avis de résolution**

Il existe plusieurs types de génération de d'avis de résolution et qui sont : avis de résolution (RA), avis de résolution à augmentation de taux de variation, avis de résolution à franchissement d'altitude, avis de résolution à limite de vitesse vertical, avis de résolution complémentaire en vigueur ,avis de résolution complémentaires (RAC),avis de résolution correctif , avis de résolution inversé, avis de résolution positif, avis de résolution préventif, avis de résolution « vers le bas » , avis de résolution « vers le haut ».

➤ **Efficacité de l'avis de résolution**

L'avis de résolution ne commandera ni continuera à recommander une manœuvre ou une restriction de manœuvre qui est plus susceptible, étant donné l'éventail des trajectoires probables de la menace, de réduire la séparation que de l'augmenter, sous réserve des dispositions de maintien de la force de l'avis de résolution et des dispositions de la non modification du sens d'un avis de résolution en vigueur.

➤ **Limite des avis de résolution**

Les manœuvres d'évitement vertical résultant de l'avis de résolution dépendant de la capacité de l'avion à exécuter les manœuvres d'évitement.

On prend un exemple, s'il est juste à 500 pieds du sol, il n'est pas pratique de générer un avis de résolution parce que la capacité de génération d'avis de résolution d'avion est limitée à cette altitude.

La figure ci-dessous illustre les limites d'avis de résolution, l'installation du TCAS peut comprendre les limites de performance d'avion « Hard Wird » basées sur les limitations opérationnelles de la couverture de l'espace aérien nécessaire. L'équipage doit se rappeler de ne pas violer les limites de performance de l'avion dans la réponse d'avis de résolution RA du système TCAS.

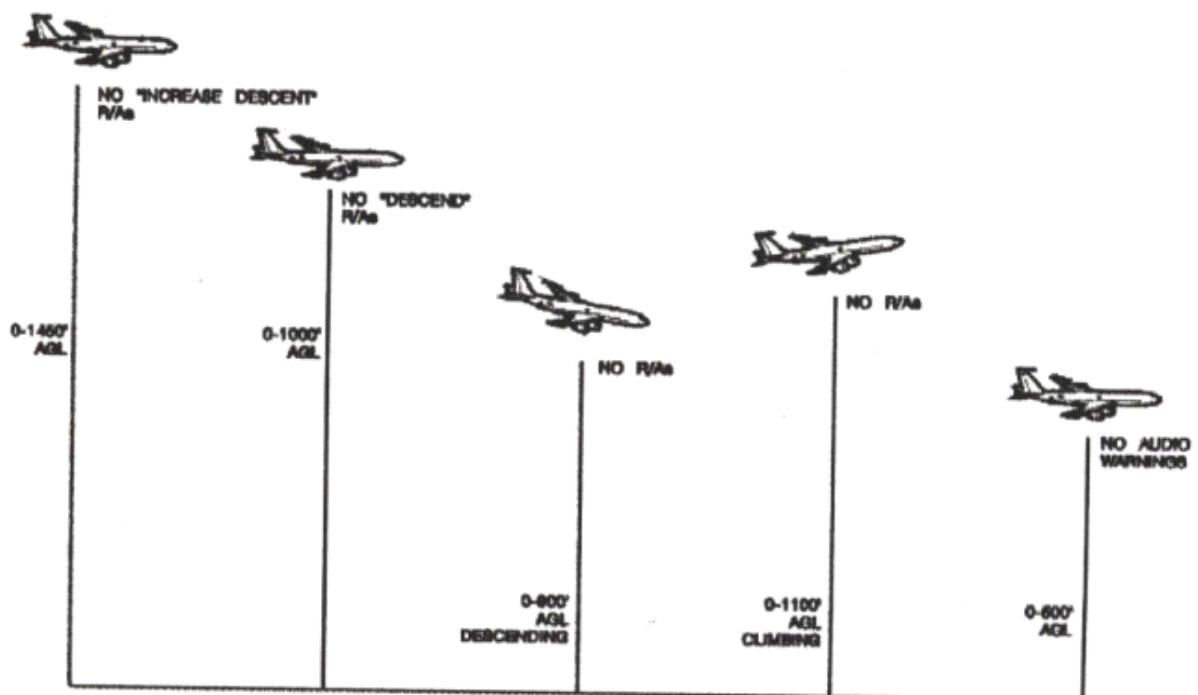


Figure .II.10 : Limite de RA

II.6.5 - Choix de l'avis :

Quand une menace est déclarée, le TCAS utilise un processus en deux étapes pour choisir le RA. Dans un premier temps, la logique TCAS sélectionne le sens du RA (évitement vers le haut ou vers le bas).

La logique modélise la trajectoire de l'intrus jusqu'au CPA en utilisant les résultats de la poursuite verticale et horizontale. La figure (II.10) montre les trajectoires qui résultent d'une montée ou d'une descente de l'avion TCAS à 1500 ft/mn en tenant compte d'une réaction standard du pilote (temps de réaction de 5 secondes et accélération Verticale de 0,25 g). La logique TCAS calcule la distance verticale prévue dans chacun des deux cas et sélectionne le sens qui assure le plus grand espacement vertical : dans l'exemple de la figure (II.11) le sens " vers le bas "

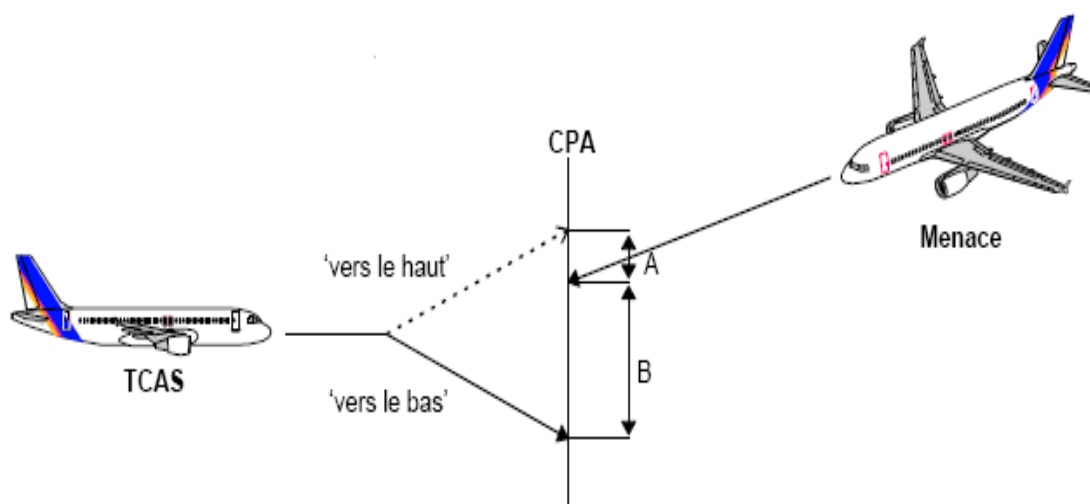


Figure .II.11 : Choix du sens du RA

II.6.6 - Choix du sens du RA :

Dans le cas où un croisement vertical est prévu avant le CPA, la logique TCAS sélectionnera le sens qui évite ce croisement pourvu que la distance verticale résultante soit suffisante au CPA.

La figure (II.12) illustre ce cas. La distance verticale de sécurité souhaitée connue sous le nom d'ALIM varie de 300 à 600 ft (700 ft au-delà du FL 420) en fonction de l'altitude de l'avion de référence, Si ALIM ne peut être assurée un RA avec croisement d'altitude est choisi des mécanismes de retardement visent toutefois à diminuer au maximum le nombre de croisements en altitude.

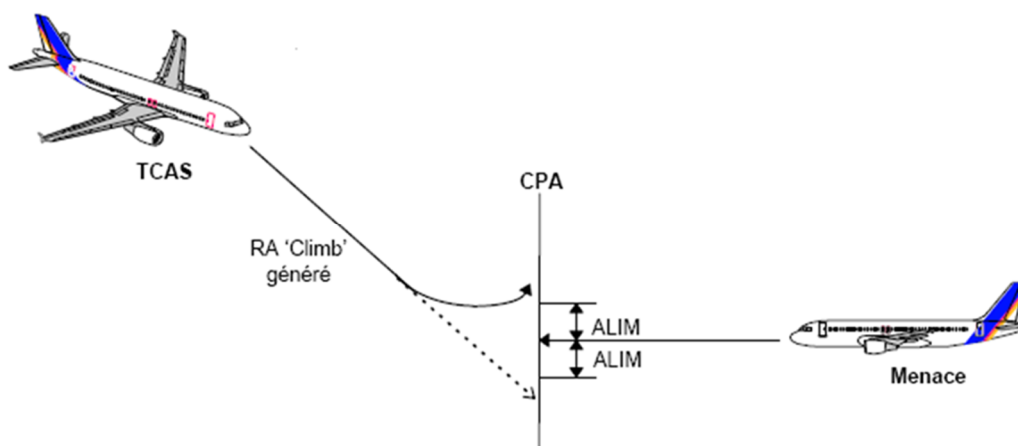


Figure .II.12: RA sans croisement d'altitude

La deuxième étape dans le choix du RA consiste à sélectionner son intensité, La manœuvre choisie est celle qui perturbe le moins la vitesse verticale de l'avion tout en assurant la distance verticale de sécurité, des avis ne modifiant pas la vitesse verticale de l'avion (avis préventif) peuvent être générés si les critères d'ALIM sont déjà satisfaits.

II.6.7 - Suivi du RA par la logique :

Durant tout le conflit, l'intensité de l'avis est évaluée et peut être modifiée soit par renforcement si le conflit le nécessite, soit par affaiblissement si la menace s'éloigne. L'affaiblissement du RA a pour objet de diminuer la déviation verticale.

Après le choix du RA, il peut arriver que la menace effectue une manœuvre verticale qui déjoue la solution proposée.

L'avion équipé du TCAS devra alors : soit accroître son taux de montée-descente de 1500 à 2500 ft/mn, soit inversé le sens de la manœuvre. Une seule inversion de sens est autorisée au cours d'un même conflit. Des exemples de ces manœuvres (augmentation du taux ou inversion du sens) sont donnés dans les figures (II.13) et (II.14)

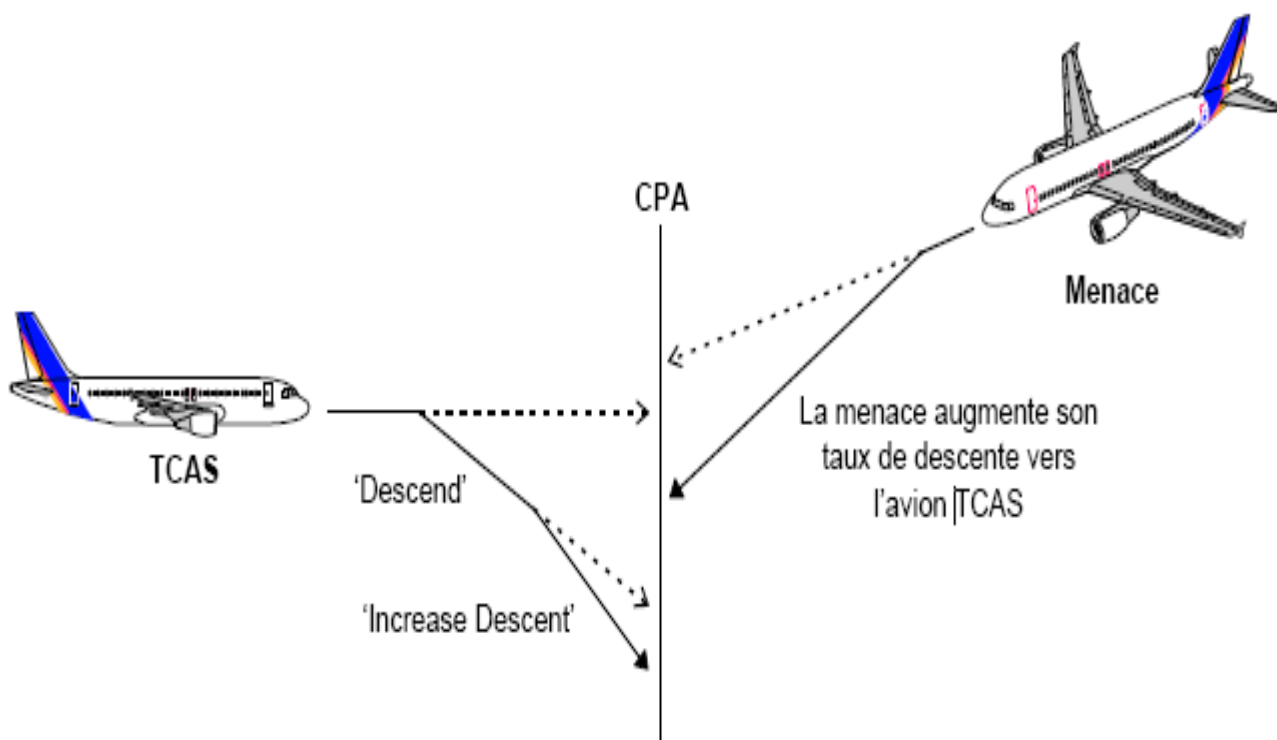


Figure II.13 : RA avec augmentation du taux de descente

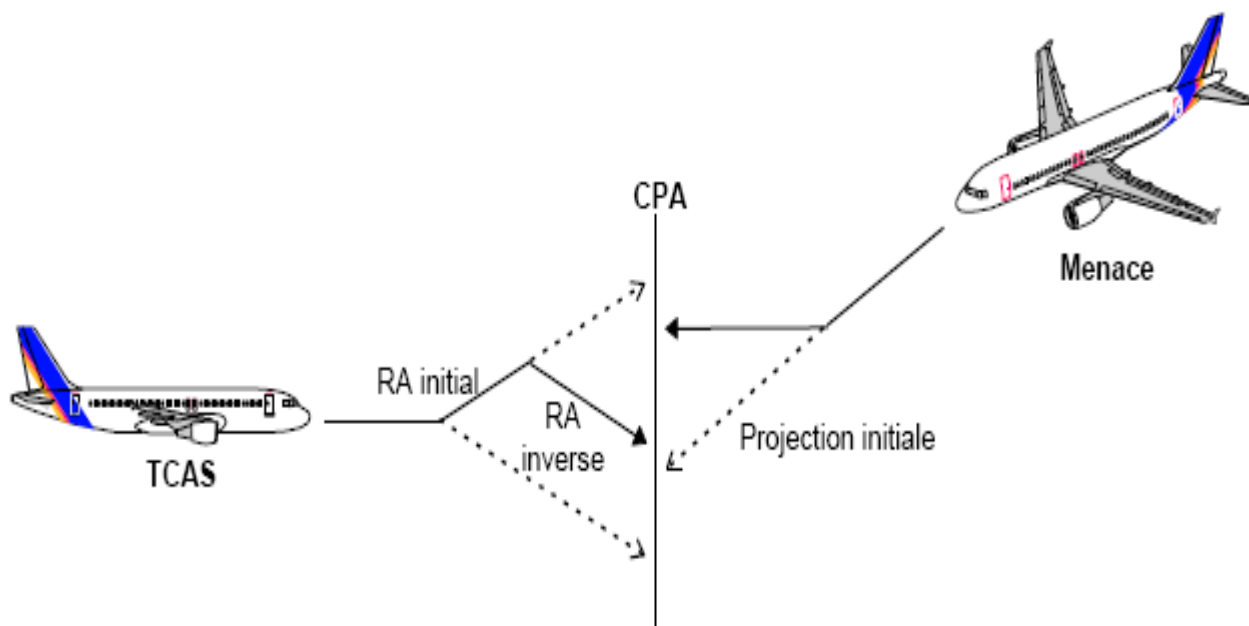


Figure .II.14 : RA avec inversion de sens

La logique TCAS peut inhiber les RA ‘Climb’ ou ‘Increase Climb’ dans certains cas en raison des limitations de performance de l’avion à haute altitude ou en configuration d’atterrissage, Ces limitations sont connues de la logique qui choisit alors un RA plus adéquat. Les limitations sont fixées au préalable par les autorités de certification en fonction du type d’avion.

Pour tous les types d’avion, les avis ‘Increase Descent’ sont inhibés en dessous de 1450 ft.

Tous les RA sont inhibés en dessous de 1000 ft.

II.6.8 - Logique multi-intrus :

Le TCAS est capable de gérer une situation multi-intrus soit en essayant de résoudre la situation avec un RA qui assure seul la distance verticale de sécurité avec chacune des menaces, soit en sélectionnant un RA qui conjugue une restriction à monter et une restriction à descendre.

II.6.9 - Fin du RA :

Dès que l'intrus n'est plus une menace (lorsque la distance entre l'avion de référence et l'intrus augmente ou lorsque la logique estime que la distance horizontale au CPA sera Suffisante), l'avis de résolution est annulé et une annonce de fin de conflit est faite. Le pilote doit alors retourner à sa clairance initiale.

II.7 Alertes TCAS :

TCAS II délivre les types de signalisations sonores suivants:

- **Avis de circulation (TA)**
- **Résolution (RA)**
- **Effacer des conflits**

Quand on établit une TA, les pilotes sont chargés pour lancer une recherche visuelle de la circulation causant la TA. Si le trafic est acquis visuellement, les pilotes sont chargés de maintenir la séparation visuelle de la circulation.

Les programmes de formation des pilotes indiquent également qu'aucun manœuvres horizontales doivent être faites uniquement fondée sur les informations figurant sur l'affichage de trafic de légers ajustements de la vitesse verticale en montée ou en descente, ou de légers ajustements à la vitesse tout en respectant l'autorisation de l'ATC sont acceptables.

Quand un RA est délivré, les pilotes sont censés répondre immédiatement à la RA à moins que cela ne compromette le fonctionnement en toute sécurité du vol. Cela signifie que les avions auront parfois à manœuvrer contrairement aux instructions de l'ATC ou ne pas tenir compte des instructions ATC. Dans ces cas, le contrôleur n'est plus responsable de la séparation de l'aéronef impliqué dans la RA jusqu'à ce que le conflit soit terminé.

D'autre part, l'ATC peut potentiellement interférer avec la réponse du pilote pour RA. Si une instruction ATC contradictoires coïncide avec une RA, le pilote peut supposer que l'ATC est pleinement conscient de la situation et fournit la meilleure résolution. Mais en réalité, l'ATC n'est pas au courant de la RA jusqu'à ce que le RA soit signalé par le pilote. Une fois que la RA est signalé par le pilote, l'ATC est nécessaire de ne pas tenter de modifier la trajectoire de vol de l'aéronef impliqué dans la rencontre. Par conséquent, on prévoit que le pilote de suit la RA, mais dans la pratique ce n'est pas encore toujours le cas.

Certains États ont mis en place "RA descendante» qui fournit aux contrôleurs de la circulation aérienne de l'information sur RA affichées dans le cockpit obtenu par le radars mode S.

Actuellement, il n'y a pas de dispositions de l'OACI concernant l'utilisation de la RA descendante par les contrôleurs de la circulation aérienne.

Les points suivants reçoivent l'accent au cours de la formation des pilotes:

- Ne pas manœuvrer dans une direction opposée à celle indiquée par le RA, car cela pourrait entraîner une collision.
- Informer le contrôleur de la RA dès que permis par membre d'équipage de la charge de travail après avoir répondu à la RA. Il n'est pas nécessaire de faire cette notification avant d'initier la réponse RA.
- Soyez attentif à la suppression des RA ou l'affaiblissement de RA ainsi que les déviations à une altitude autorisée sont minimisés.
- Si possible, se conformer à l'autorisation du contrôleur, par exemple, tourner à intercepter une voie aérienne ou piste, en même temps que de répondre à une RA.
- Lorsque l'événement RA est terminée, retourner rapidement à la clairance ATC précédente ou instruction ou se conformer à une autorisation de l'ATC révisée ou instruction.

II.8. Phraséologies TCAS :

<i>Catégorie</i>	<i>Texte</i>	<i>Signification</i>	<i>Mesures nécessaires</i>
<i>TA</i>	<i>Trafic, le trafic.</i>	<i>Intruder proche à la fois horizontalement et verticalement.</i>	<i>Tentative contact visuel, et être prêt à manœuvrer si un RA se produit.</i>
<i>RA</i>	<i>Climb; montée.</i>	<i>Intruder passera-dessous</i>	<i>Commencez escalade à 1500-2000 ft / min</i>

RA	<i>Descendre. Descendre.</i>	<i>Intruder passera au-dessus.</i>	<i>Commencez descendant à 1500-2000 ft / min</i>
RA	<i>Augmenter montée.</i>	<i>Intruder passera juste au-dessous</i>	<i>Monter à 2500 - 3000 ft / min.</i>
RA	<i>Augmenter descente.</i>	<i>Intruder passera juste au-dessus.</i>	<i>Descendez à 2500 - 3000 ft / min.</i>
RA	<i>Réduire grimper.</i>	<i>Intruder est probablement bien en dessous.</i>	<i>Grimper à un rythme plus lent.</i>
RA	<i>Réduire la descente.</i>	<i>Intruder est probablement bien au-dessus.</i>	<i>Descendre à un rythme plus lent.</i>
RA	<i>Grimpez; monter maintenant.</i>	<i>Intruder qui passait au-dessus, va maintenant passer en dessous.</i>	<i>Passer d'une descente à la montée.</i>
RA	<i>Descendre, descendre maintenant.</i>	<i>Intruder qui passait dessous, va maintenant passer au-dessus.</i>	<i>Passer d'une montée à la descente.</i>
RA	<i>Maintenir la vitesse verticale; maintenir.</i>	<i>Intruder sera évitée si le taux vertical est maintenu.</i>	<i>Maintenir le taux vertical actuel.</i>
RA	<i>Ajustez la vitesse verticale; régler.</i>	<i>Intruder considérablement loin, ou l'affaiblissement de la formation initiale RA.</i>	<i>Commencer à se stabiliser.</i>
RA	<i>Surveiller la vitesse verticale.</i>	<i>Intruder avance en vol en palier, au-dessus ou au-dessous.</i>	<i>Rester en vol en palier.</i>

RA	Crossing.	<i>En passant par le niveau de l'intrus. Habituellement ajoutée à une autre RA.</i>	<i>Procéder selon la RA associé.</i>
CC	<i>Effacer des conflits.</i>	<i>Intruder n'est plus une menace.</i>	<i>Revenir rapidement à la précédente autorisation de l'ATC.</i>

II.9. Visualisation RAs TCAS II :

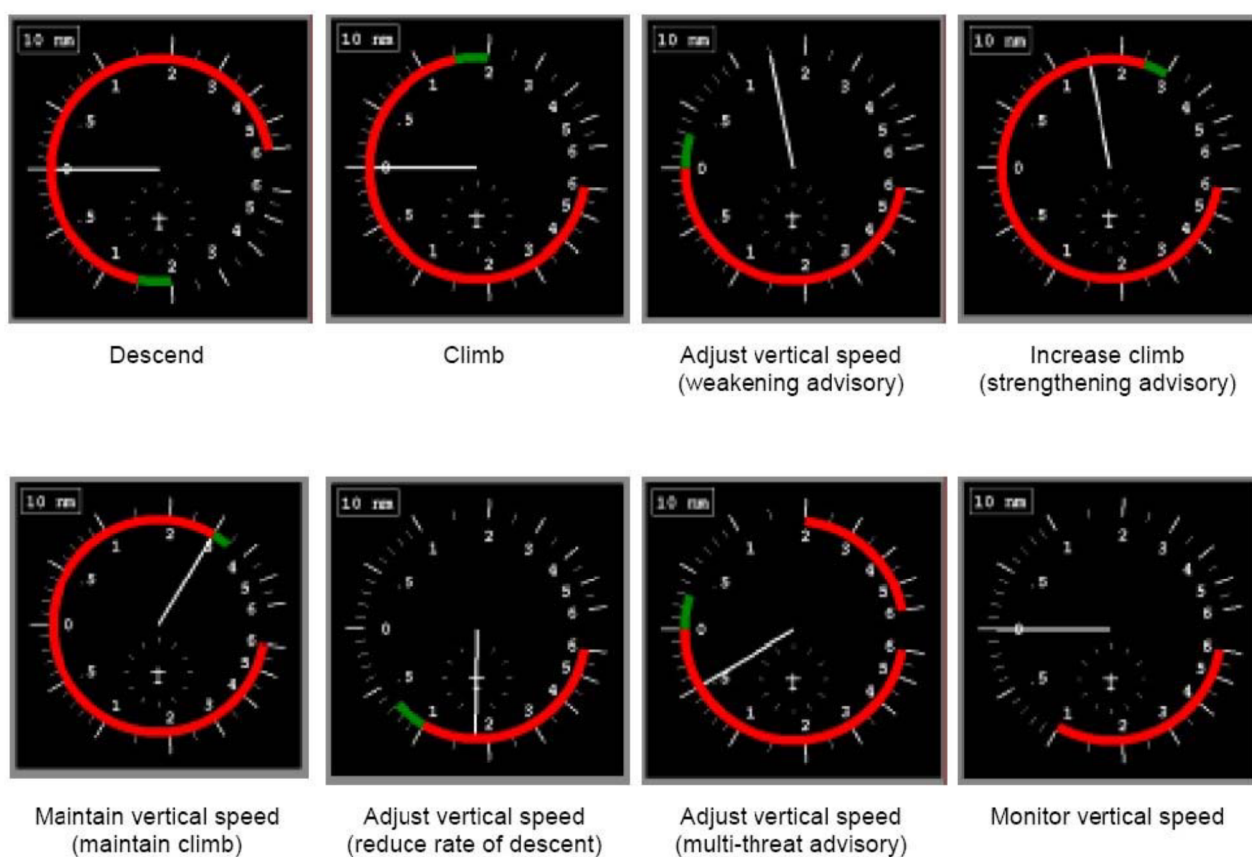


Figure II.15 : Différents configuration du RA TCAS

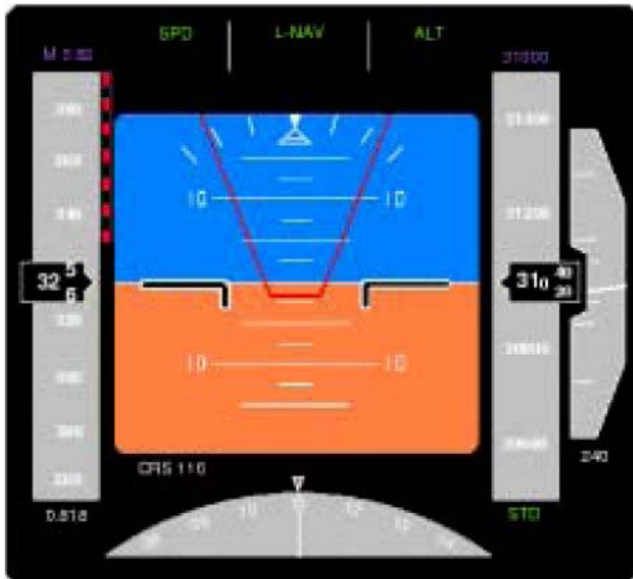


Figure .II.16 : RA sur horizon artificiel



Figure .II.17 : RA sur le VSI



Figure .II.18 : RA sur EFIS –ROSE mode avec « traffic display»

II.10. Conclusion :

- ❖ L'augmentation de la précision de navigation horizontale (RNP) aussi bien que verticale (MASPS) augmente le risque de collision en cas d'erreur

- ❖ Le délai de réaction est plus court pour le contrôleur

Malgré ses inconvénients (alarmes dérangeantes), le TCASII est plus que jamais nécessaire.

III.1 Introduction :

La Multilatération est une navigation technique basée sur la mesure de la différence de distance par rapport à deux ou plusieurs stations à des emplacements connus que les signaux de radiodiffusion à des moments connus. Contrairement aux mesures de distance ou d'angle absolu, la mesure de la différence de résultats de distance dans un nombre infini de positions qui satisfont la mesure. Lorsque ces emplacements possibles sont représentés, elles forment une courbe hyperbolique. Pour localiser l'emplacement exact le long de cette courbe, une deuxième mesure est effectuée à une paire différente des stations pour produire une seconde courbe qui croise la première. Quand les deux sont comparés, un petit nombre d'endroits possibles sont révélés, produisant un "fix".

La Multilatération est une technique courante dans radionavigation systèmes, où il est connu comme la navigation hyperbolique. Ces systèmes sont relativement faciles à construire car il n'y a pas besoin d'une horloge commune, et la différence dans la fréquence du signal peuvent être mesurée visiblement à l'aide d'un oscilloscope. L'introduction du microprocesseur simplifie considérablement l'exploitation, ce qui augmente considérablement la popularité pendant les années 1980. Le système le plus populaire de navigation hyperbolique était LORAN-C, qui a été utilisé partout dans le monde jusqu'à ce que le système ait été fermé en 2010. D'autres systèmes continuent d'être utilisés, mais l'utilisation généralisée de la navigation par satellite comme les systèmes GPS ont fait de ces systèmes en grande partie redondant.

III.2 Généralités :

Dans son rôle de surveillance, la multilatération permet de se passer des coûteuses antennes radar rotatives, en remplaçant le SSR par de petites stations peu coûteuses situées en position stratégique pour couvrir un volume d'espace aérien identique ou plus grand. Chacune de ces stations agit comme « poste d'écoute » passif, recevant instantanément les transmissions du transpondeur de chacun des aéronefs dans sa ligne de vue, jusqu'aux plus hautes altitudes des avions à réaction. Une ou plusieurs d'entre elles peuvent être des stations active/ passive combinées, émettant des signaux d'interrogation des transpondeurs identiques à ceux d'un SSR puis écoutant les réponses. Les stations de multilatération peuvent recevoir des réponses de tous les transpondeurs (mode A/C de base, mode S, IFF militaire et ADS-B).

Des protocoles normalisés sont utilisés pour communiquer les données au centre ATC. Le processus de multilatération est toutefois bien plus rapide, permettant aux contrôleurs de suivre le

trafic second par seconde, au lieu de visionner les cibles à chaque balayage de l'antenne rotative d'un SSR. Cette fréquence de poursuite produit une trace très régulière sur l'écran d'affichage du contrôleur, au lieu des « bonds » progressifs qui caractérisent les cibles du SSR. Qui plus est, l'implantation stratégique des stations d'écoute permet de recevoir les signaux des aéronefs dans des zones se trouvant au-dessous de la couverture du SSR ou bloquées par des constructions qui s'interposent. De nombreuses évaluations montrent que la multilatération est généralement plus précise, que le SSR classique.

III.3 Principe :

La Multilatération est couramment utilisé dans les applications de surveillance civile et militaire de localiser avec précision un émetteur pour avions, automobiles ou stationnaires en mesurant la "différence de temps d'arrivée" (TDOA) d'un signal provenant de l'émetteur à trois ou plusieurs sites de réception.

Si une impulsion est émise à partir d'une plate-forme, il arrivera des moments légèrement différents sur deux sites récepteurs séparés dans l'espace, le TDOA étant due à des distances différentes de chaque récepteur de la plate-forme. En fait, pour certains emplacements des deux récepteurs, un ensemble de sites d'émetteurs donnerait la même mesure de TDOA. Compte tenu de deux positions de récepteur et un TDOA connu, le lieu géométrique des emplacements possibles de l'émetteur est une moitié d'un de deux bâchés hyperboloïde.

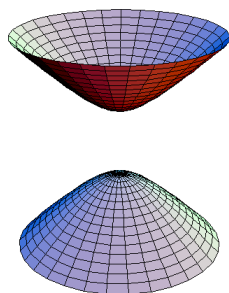


Figure III.1. Une hyperbole deux bâchés

En termes simples, avec deux récepteurs à des endroits connus, un émetteur peut être situé sur un hyperboloïde. Notez que les récepteurs n'ont pas besoin de savoir l'heure absolue où l'impulsion a été transmis - seulement la différence de temps est nécessaire.

Considérons maintenant un troisième récepteur à un troisième emplacement. Cela donnerait une seconde mesure TDOA et donc localiser l'émetteur sur un second hyperboloïde. L'intersection de ces deux hyperboloïdes décrit une courbe sur laquelle se trouve l'émetteur.

Si un quatrième récepteur est maintenant introduit, une troisième mesure TDOA est libre et l'intersection du troisième hyperboloïde résultant avec la courbe déjà trouvée avec les trois autres récepteurs définit un point unique dans l'espace. L'emplacement de l'émetteur est donc entièrement déterminé en 3D.

Dans la pratique, les erreurs dans la mesure de l'heure d'arrivée des impulsions signifient que la précision accrue peut être obtenue avec plus de quatre récepteurs. En général, les N récepteurs offrent $N - 1$ hyperboloïdes. Quand il ya $N > 4$ récepteurs, le $N - 1$ hyperboloïdes devrait, en supposant un modèle et des mesures parfaites, se croisent en un seul point. En réalité, les surfaces se croisent rarement, en raison de diverses erreurs. Dans ce cas, le problème de localisation peut être posé comme une optimisation problème et résolu en utilisant, par exemple, une méthode des moindres carrés ou un filtre de Kalman étendu. La résolution par le filtre de Kalman est l'objet du prochain chapitre.

En outre, le TDOA de multiples impulsions transmises de l'émetteur peut être en moyenne pour améliorer la précision.

III.4 Technique de la multilatération :

III.4.1 Localisation :

Un ensemble de plusieurs stations de réception, dispersées, traitent les signaux cible. Chaque paire de stations mesure la différence de dates de réception d'un même signal. Un résultat seul permet de situer l'émission sur un hyperboloïde : lieu des points à différence de distance constante de deux points de référence désignés comme foyers. La répétition de ces mesures, et l'accumulation des résultats sur le même signal reçu et sur plusieurs paires de stations mènent à la position cible par intersection de plusieurs hyperboloïdes.

Un total d'au moins trois mesures sur trois paires indépendantes de récepteurs est nécessaire à la localisation complète. La garantie que les traitements correspondent au même signal se fait par reconnaissance d'une cohérence spatiale des résultats : l'intersection de trois hyperboloïdes correspondants à des signaux différents n'étant certainement pas ponctuelle.

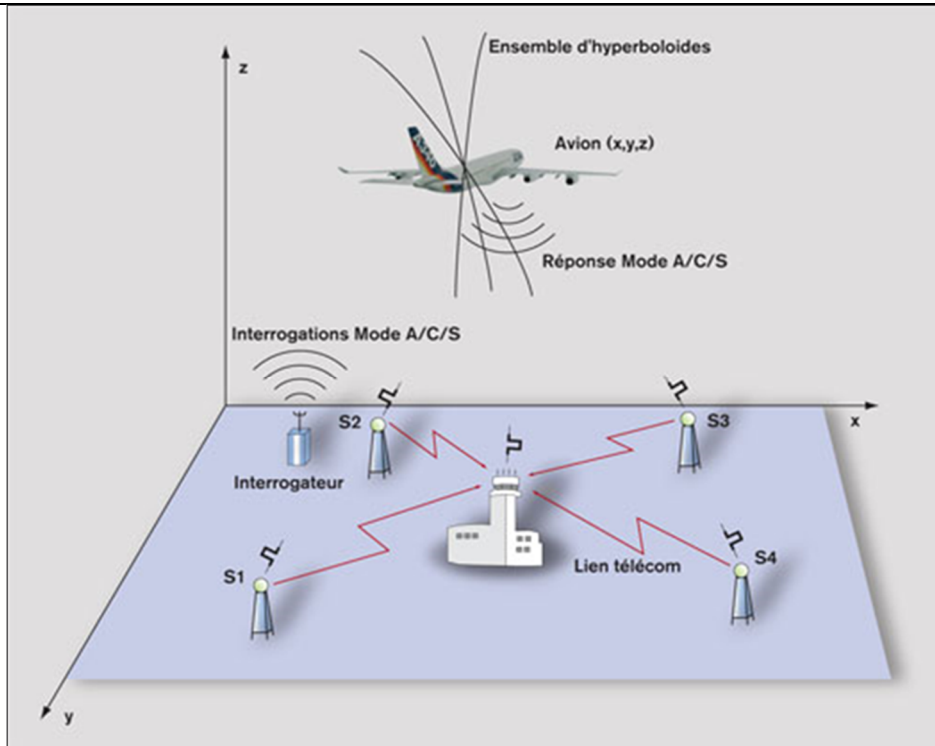


Fig. III.2 : Schéma de principe de la localisation multilatération.

La date d'émission cible n'est pas une référence nécessaire. Les signaux cibles peuvent donc être quelconques, asynchrones de toute chronométrie du système. Il n'existe ainsi pas de signal particulièrement dédié à la mesure ni sollicité pour elle. Les éventuels signaux préexistants sont même à privilégier pour alléger la charge radioélectrique globale.

Dans cette logique, les signaux SSR émis par les transpondeurs sont suffisamment universels à tous types d'exploitation pour avoir été choisis dans le domaine de multilatération ATC. En outre, leur capacité, largement développée à l'identification de cibles et au report de l'altitude barométrique, est bien sûr décisive pour compléter les fonctions de localisation seules.

Ces principes assurent une localisation 3D. La position verticale géométrique est essentielle dans certaines applications (HMU). Cependant, la position verticale par mesure barométrique (niveau de vol) reste nécessaire à l'exploitation.

III.4.2 Signaux cible :

Tous les signaux SSR, propres à la simple exploitation transpondeur ou générés par des liaisons existantes SSR ou ACAS indépendantes mais proches, sont exploitables pour la multilatération. Il s'agit :

- des émissions spontanées (squitters), structurellement asynchrones.
- des émissions de messages en réponse à des interrogations de radar ou d'ACAS voisins et parvenant dans la couverture. Asynchrones également car indépendants du système de multilatération.

En l'absence de tout message de types précédents, le système de multilatération sollicitera lui-même les signaux cible nécessaires : c'est le cas de la détection de transpondeurs Modes A-C hors couverture SSR.

Ces signaux existent. Il n'y a pas de fonction transpondeur nouvelle à prévoir et à déployer.

III.4.3 Identification :

La coopération de la cible permet la fonction d'identification dont la richesse dépendra des équipements bord : transpondeur Mode A-C ou Mode S.

- ✓ **Mode S** : les informations d'identification (Code A, flight ID) peuvent être directement sollicitées par échanges sélectifs. Les squitters transmettent l'adresse technique Mode S et certaines balises multilatération ont des fonctions d'émission d'interrogations Mode S adressées qui peuvent être mises en œuvre une fois cette adresse technique acquise.
- ✓ **Mode A-C** : Le simple décodage des signaux cibles (Codes A-C) devrait permettre la fonction d'identification et le report de la position verticale barométrique. Une difficulté reste pourtant de décider ce qui est identification ou niveau de vol. La particularité des réponses Codes A ou C (impulsion D1 non présente en code C), certains traitements de poursuite et une référence à l'altitude géométrique lèvent fréquemment l'incertitude. Cependant, la levée de toute ambiguïté d'identification passe par l'émission d'interrogations Modes A-C par le système de multilatération lui-même, qu'il faudra prévoir peu fréquentes et prudentes.

Tableau III.1 : Les signaux disponibles.

Format	Informations	Disponibilités	Qualité
Mode A	Identification (A)	Sur toute interrogation	12 bits
Mode C	FL (C)	SSR A-C (plus de 100/s par XPDR en espace central Europe)	Pas : 100 ft
Mode S squitter	@ Mode S	Spontané (taux #1 S)	24 bits
Mode S extended squitter	@ Mode S ; Position lat-long; FL ; FI (Flight Ident)	Spontané	24 bits WGS 84 Pas 25 ft
ACAS court	@ Mode S ; FL	Sur interrogation ACAS	24 bits 25 ft
ACAS long	@ Mode S ; FL ; coordination air/air		
Surveillance élémentaire Mode S	@ Mode S ; (A ou C) ; FL	Sur interrogation Mode S	25 ft
Surveillance enrichie Mode S	@ Mode S ; (A ou C) ; FL ; Data link		

III.4.4 Interrogations :

Le choix d'un système actif ou passif peut être dicté soit pour la sollicitation de signaux (qui seraient sinon inexistants) soit pour permettre ou compléter les fonctions d'identification. Les aspects fonctionnels liés à l'identification sont développés au paragraphe précédent.

III.5 SYSTEME COOPERATIF, INDEPENDANT 3D:

Tableau III.2 : Classes de surveillance.

Classification	Non-Coopératif		Coopératif	
			Indépendant	Dépendant
Fonctions	-		Indépendant	Dépendant
2D Distance/azimut	Radar primaire (dont civils)	2D	SSR	-
FL (niveau) Mesure barométrique	-	-	-	SSR, ADS, MLAT (pour compatibilité d'exploitation en FL)
3D Avec position verticale géométrique	Radar primaire (directifs en site)	3D	MLAT	ADS

Les systèmes de multilatération apparaissent comme les seuls systèmes civils indépendants 3D. Cette propriété a permis le développement et l'exploitation des équipements de contrôle des trajectoires verticales dits HMU, étape nécessaire à la mise en place des procédures RVSM de réduction des séparations verticales au-dessus du FL 290.

En exploitation Mode S le système sera prévu actif pour tirer tout le parti des informations que permettent les transactions adressées. Ceci, sans risque pour les cibles environnantes.

En Mode A-C, la situation est plus délicate car les interrogations sont nécessairement en appel général. L'avantage d'un système actif est alors à nuancer par l'utilisation d'antennes d'émission fixes, non directives, qu'elles soient omnidirectionnelles ou sectorisées. Sans sélectivité en azimut, les situations de garbling déjà évoquées se multiplient. Une façon habile de restituer une certaine sélectivité à l'interrogation en jouant sur la dispersion de la sensibilité des récepteurs transpondeurs.

Un autre problème peut être la charge imposée par un système d'interrogation Mode A-C non directif : tous les transpondeurs environnants répondent... A noter cependant que les taux d'interrogation A-C peuvent être prévus très faibles par rapport à ceux mis en œuvre en SSR.

III.5.1 Architectures système :

➤ **Nombre de balises :**

Théoriquement, pour une localisation 3D, il est nécessaire de disposer de quatre balises à portée radioélectrique de la cible.

En effet, trois balises (0, 1,2) fournissent deux mesures indépendantes seulement : t_0-t_1 ; t_0-t_2 . La différence t_2-t_1 se déduit des deux précédentes et n'apporte aucune information supplémentaire. Pour la couverture d'espaces vastes (approches ou En Route), en particulier aux altitudes basses, cette condition théorique appliquée aux contraintes de l'horizon radioélectrique mène à multiplier le nombre de balises pour la couverture d'un aéroport une localisation 2D peut suffire avec la condition théorique de disposer de trois balises en visibilité. Cependant, une contrainte forte s'exprime en termes d'environnement : masques, réflexions, trajets multiples. Il y a là encore souvent nécessité de multiplier les balises pour adapter la surface couverte à la présence d'obstacles proches.

Enfin la redondance, qui permet des choix et des moyennes, et la proximité de balises sont des facteurs de qualité de la détection et de la mesure en particulier de sa précision.

➤ **Synchronisation** :

Les systèmes de multilatération diffèrent par la méthode de mesure de la différence de temps d'arrivée du signal sur les paires de balises. Pour les signaux SSR, elle se fait par mesure de dates puis calcul de la différence dite TDOA (Time Difference Of Arrival).

Les systèmes diffèrent aussi par la manière de synchroniser les traitements des différents récepteurs. Si l'instant d'émission est indifférent, il y a nécessité de synchroniser les balises.

➤ **Couverture :**

La couverture d'un système de multilatération est l'ensemble des points à visibilité radioélectrique du nombre minimal de balises nécessaires à la localisation avec les performances exigées. En environnement encombré (surveillance sol), le nombre de balises et leur position sont adaptés au « contournement » des obstacles. En surveillance air, c'est un critère de visibilité radioélectrique qui prévaut, contraignant en particulier pour les altitudes faibles. L'avantage est dans tous les cas la souplesse de définition de la couverture sur des choix de position des récepteurs ou de déploiement de récepteurs supplémentaires.

III.6 Les Performance de la multilateration Mode « s » sur un aéroport:

Comme on a pu le voir, les performances sont directement liées à la géométrie, au nombre des balises de réception et à la précision de la synchronisation. On peut ainsi atteindre des précisions horizontales de quelques mètres mais on constate aussi une diminution de la précision lorsque la géométrie se dégrade ou bien en raison de la proximité des bâtiments.

L'Eurocae dans son MOPS pour la multilatération mode S utilisée dans un A-SMGCS, a tenté d'en définir les limites. Ces valeurs demandent encore à être validées par l'expérience mais elles correspondent à la fois aux possibilités des systèmes de multilatération mode S et aux besoins des A-SMGCS.

Tableau III.3 : Les performances de la multilatération mode S recommandées dans le document ED 117 de l'EUROCAE.

Renouvellement des données	1 seconde
Précision de position horizontale sur l'aire de manœuvre	7.5m à 95% 12m à 99%
Précision de la position au poste stationnement	20m renouvelée toutes les 5 secondes
Précision horizontale dans l'axe d'approche jusqu'à 2,5 NM	20m à 95%
Précision horizontale dans l'axe d'approche de 2,5NM à 5NM	40m à 95%
Probabilité de détection sur l'aire de mouvement d'un transpondeur actif	99,9%
Probabilité de détection sur le poste de stationnement d'un transpondeur actif	99,9% sur une période de 5 secondes
Probabilité d'identification	99,9%
Capacité du système	250 mobiles par seconde
Délai entre la réception mode S et la sortie multilatération	0,5 seconde
Temps d'initialisation du système à la mise en route	3 minutes
Temps d'initialisation d'une piste	5 secondes
Probabilité de fausse détection	10^{-4}
Probabilité de fausse identification	10^{-6}

III.7. Géométrie TDOA:

Géométrie des ondes sphériques émanant d'un émetteur et passant par plusieurs récepteurs.

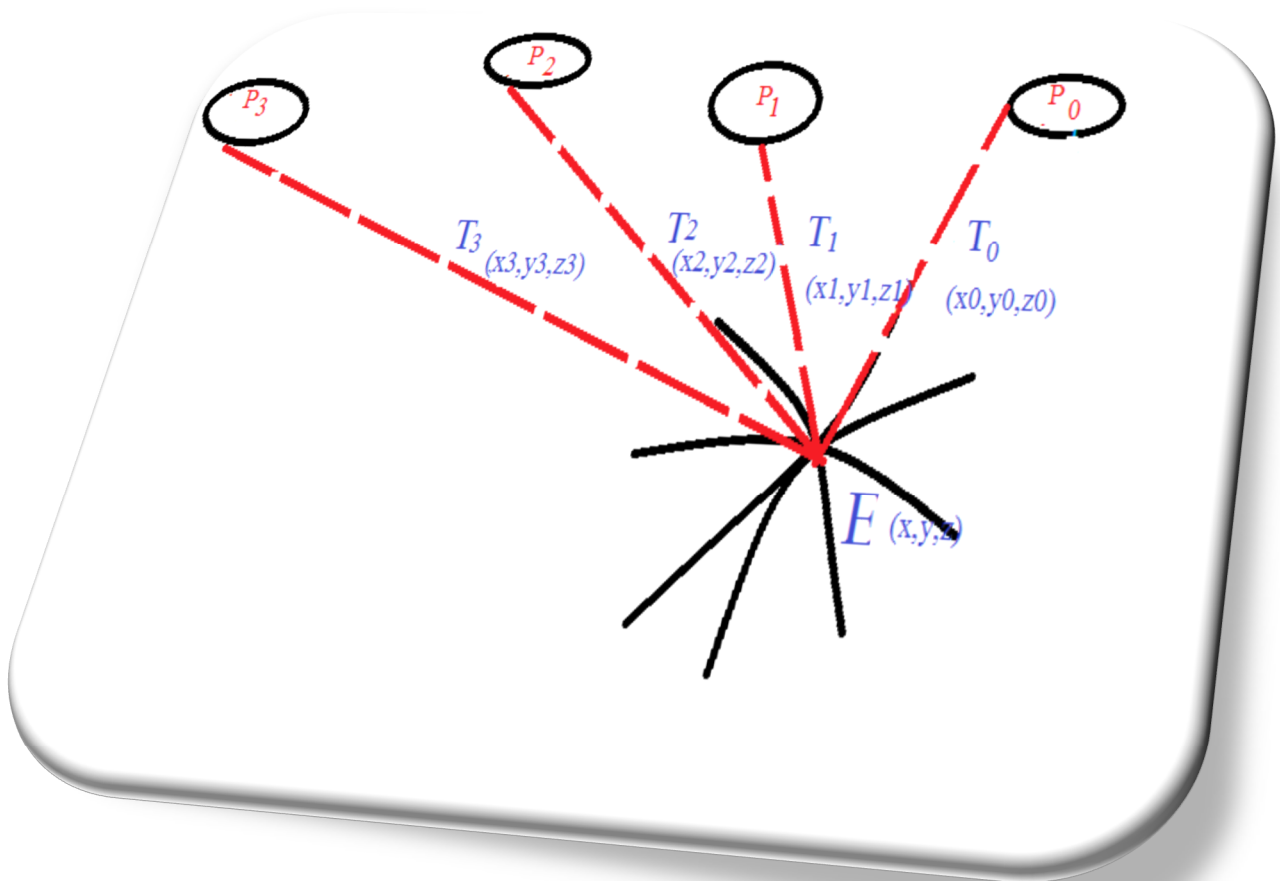


Figure III.3 Géométrie TDOA

Considérons un émetteur (E dans la figure III.3) à un vecteur de localisation inconnue

Que nous souhaitons localiser.

$$E = (x, y, z)$$

La source est à portée de 4 récepteurs à des emplacements connus

$$P_0, P_1, P_2, P_3$$

L'indice m désigne une quelconque des récepteurs :

$$P_m = (x_m, y_m, z_m)$$

$$0 \leq m \leq 3$$

La distance (R) à partir de l'émetteur de l'un des récepteurs en termes de coordonnées est

$$R_m = |\vec{P}_m - \vec{E}| = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + (z_m - z)^2} \quad (1)$$

Le temps (T) à partir de l'émetteur à l'un des récepteurs en termes de coordonnées est

$$T_m = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2} \quad (2)$$

On a :

$$T_0 = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}$$

$$T_1 = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}$$

$$T_2 = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2}$$

$$T_3 = \frac{1}{c} \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2}$$

Pour la multilatération on doit mesurer la différence du temps On suppose l'origine a $T_1(0, 0,0)$

On aura :

$$T_0 - T_1 = \frac{1}{c}(\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}) + BRUIT$$

$$T_0 - T_3 = \frac{1}{c}(\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2}) + BRUIT$$

$$T_0 - T_4 = \frac{1}{c}(\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} - \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2}) + BRUIT$$

$$T_1 - T_2 = \frac{1}{c}(\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}) + BRUIT$$

$$T_1 - T_3 = \frac{1}{c}(\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2}) + BRUIT$$

$$T_2 - T_3 = \frac{1}{c}(\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2}) + BRUIT$$

Ce système d'équations est à résoudre par le filtre de kalman qui sera l'objet du prochain chapitre.

III.8. Mesure de la différence de temps dans un système TDOA :

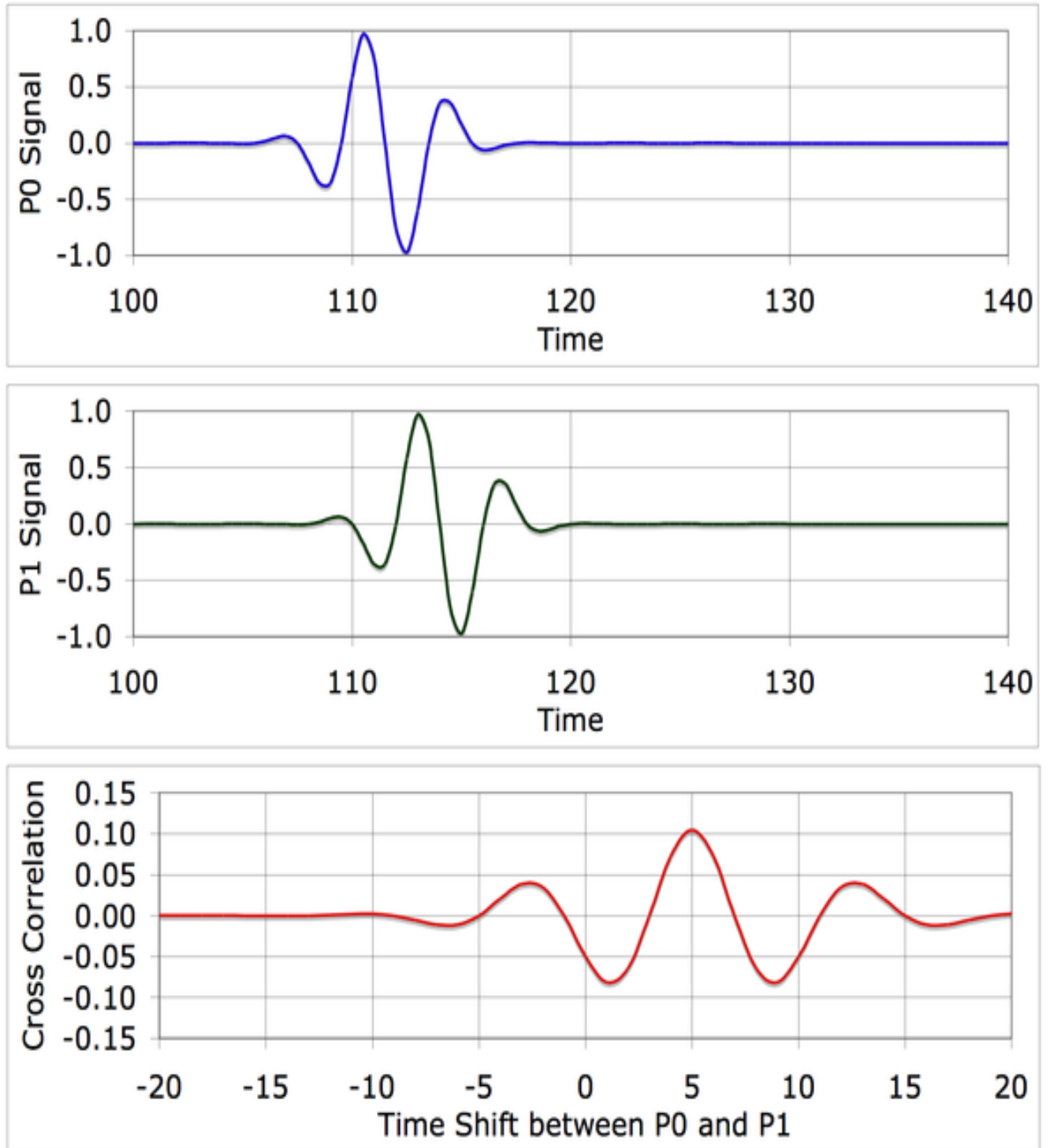


Figure III.4a. Signal d'impulsion

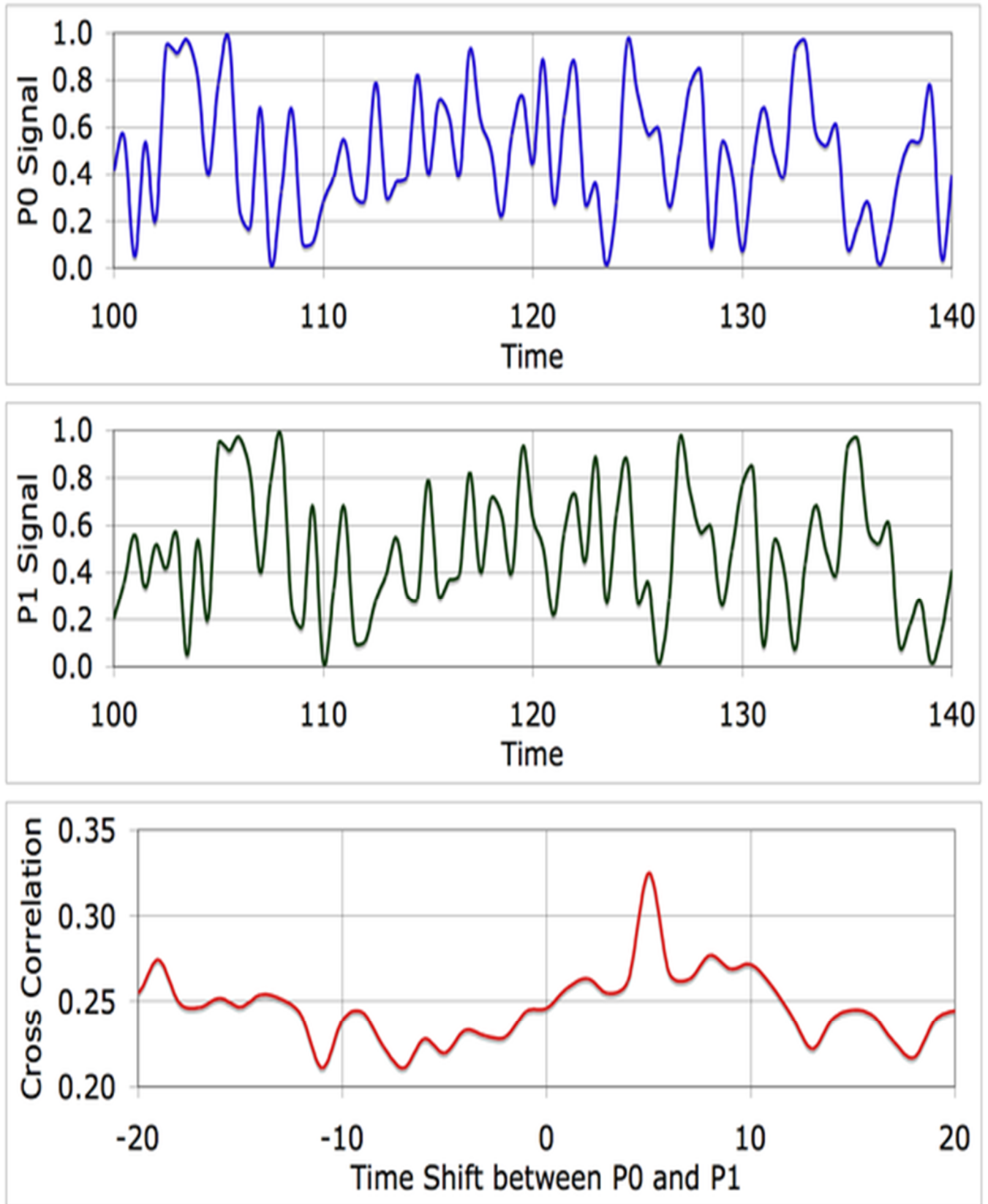
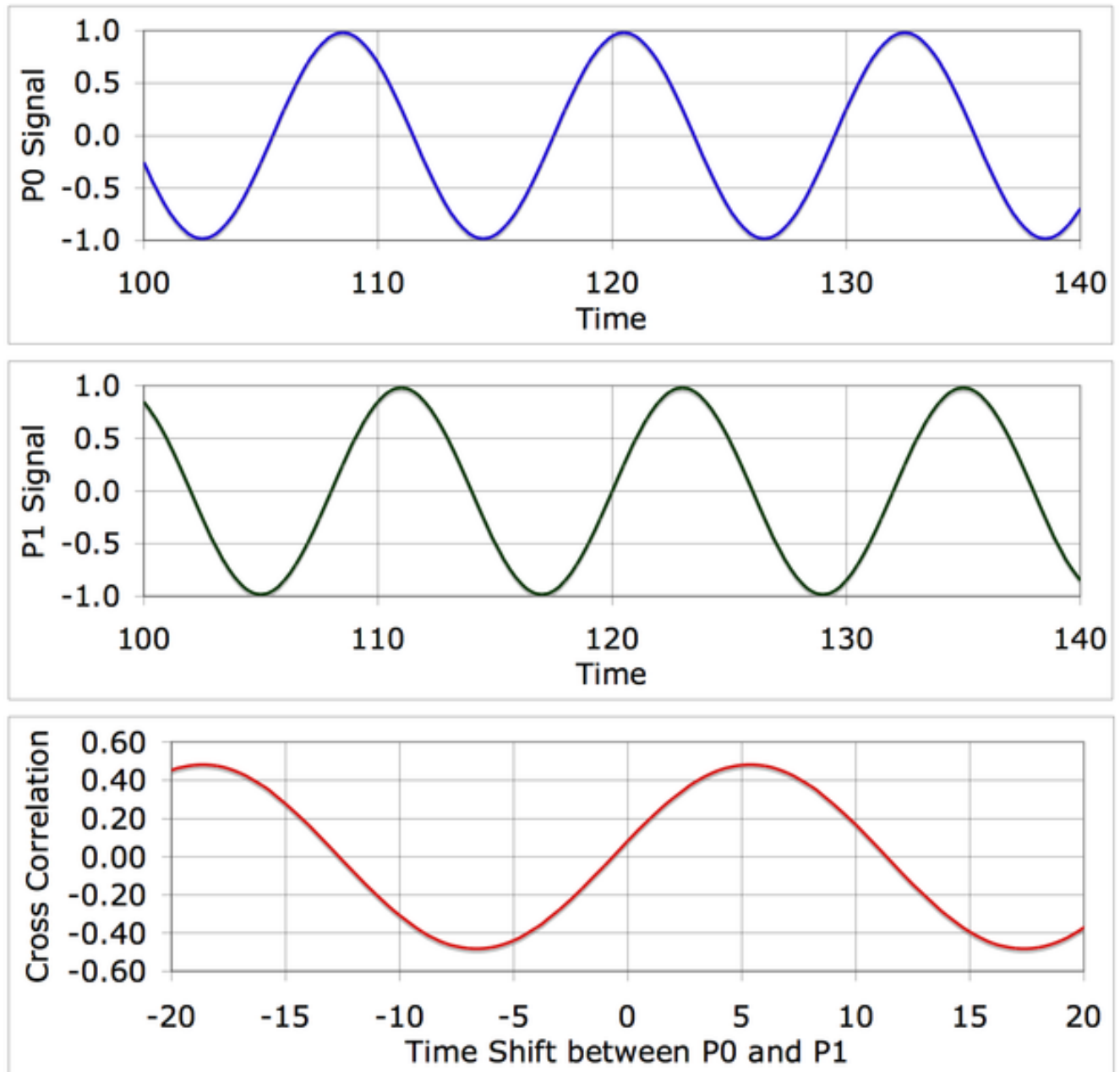


Figure III.4b. Signal à grande bande



La figure III.4C. Signal à bande étroite

➤ Exemples de mesure de différence de temps avec corrélation croisée.

La distance R_m dans l'équation 1 est la vitesse d'onde (v) fois le temps de transit (T_m). Un système de multilatération TDOA mesure la différence de temps (τ_m) d'un front d'onde de toucher chaque récepteur. L'équation TDOA pour les récepteurs m et 0 est

$$vT_m = vT_m - vT_0$$

$$vT_m = R_m - R_0 \quad (3)$$

La figure 4a est une simulation de la forme d'onde d'une impulsion enregistrée par les récepteurs P_0 et P_1. L'espacement entre les , P_1 et P_0 est telle que l'impulsion prend 5 unités de temps plus long pour atteindre P_1 que P_0. Les unités de temps dans la figure 4 sont arbitraires.

Le tableau suivant donne unités d'échelle de temps approximatives pour l'enregistrement de différents types d'ondes.

Tableau III.4 : unités d'échelle de temps approximatives pour l'enregistrement de différents types d'ondes.

Type de vague	Matériel	Unités de temps
Acoustique	Air	1 milliseconde
Acoustique	Eau	1/2 millisecondes
Acoustique	Rocher	1/10 millisecondes
Électromagnétique	Vide, air	1 nanoseconde

La courbe rouge dans la figure III.4a est la corrélation croisée fonction ($P_1 * P_0$). La fonction de corrélation croisée glisse une courbe dans le temps à travers l'autre et renvoie une valeur de crête lorsque les formes de courbe correspondent. Le pic au temps = 5 est une mesure du décalage de temps entre les formes d'onde enregistrées, qui est aussi la τ valeur nécessaire à l'équation 3.

La figure III.4b est le même type de simulation pour une forme d'onde à large bande à partir de l'émetteur. Le décalage dans le temps est de 5 unités de temps parce que la vitesse de la géométrie et de vague est le même que l'exemple de la figure 4a. Encore une fois, le pic de la corrélation croisée se produit à $\tau = 5$.

La figure III.4C est un exemple d'une forme d'onde continue, à bande étroite de l'émetteur. La fonction de corrélation croisée montre un facteur important lors du choix de la géométrie du récepteur. Il ya un pic au temps = 5 plus chaque incrément de la période de forme d'onde. Pour obtenir une solution de la différence de temps mesurée, le plus grand espace entre les deux récepteurs doit être plus proche d'une longueur d'onde du signal d'émetteur. Certains systèmes,

comme le Loran C et Decca mentionnés au plus tôt (rappelons le même calcul fonctionne pour récepteur et plusieurs émetteurs connus en mouvement), utilisez un espacement supérieur à 1 longueur d'onde et comprennent des équipements, comme un détecteur de phase, à compter le nombre de cycles qui passe par les émetteurs se déplace. Cela ne fonctionne que pour les formes d'onde continue, à bande étroite en raison de la relation entre la phase (θ), la fréquence (f) et le temps (T)

$$\theta = 2\pi f \cdot T$$

Le détecteur de phase ne verra que les variations de la fréquence mesurée du bruit de phase, qui sera une incertitude qui se propage dans la position calculée. Si le bruit de phase est suffisamment important, le détecteur de phase peut devenir instable.

✓ **Précision de multilatération est une fonction de plusieurs variables, notamment:**

- L'antenne ou capteur géométrie du récepteur (s) et émetteur (s) pour électronique ou optique de transmission.
- La précision de la synchronisation du système de récepteur, c'est à dire la stabilité thermique des pointages oscillateurs.
- La précision de la synchronisation de fréquence de l'émetteur oscillateurs avec les oscillateurs de récepteur.
- La phase de synchronisation du signal transmis avec le signal reçu, en tant que des effets de propagation, par exemple diffraction ou des changements de la réflexion de la phase du signal ainsi de déviation de l'indication de ligne de visée, à savoir les trajets multiples réflexions.
- La largeur de bande de l'impulsion émise (s), et donc le temps de montée des impulsions de signaux impulsionnels codés en transmission.
- Inexactitudes dans les emplacements des émetteurs ou récepteurs lorsqu'il est utilisé comme un lieu connu

La précision peut être calculée en utilisant la borne de Cramer-Rao et en tenant compte des facteurs ci-dessus dans sa formulation.

III.9 Les avantages et Les inconvénients la multilatération :

➤ **Les avantages :**

L'utilisation de la technologie SSR actuelle (aucune évolution des équipements embarqués n'est nécessaire)

Il convient à la surveillance au sol. Celle-ci en revanche nécessite un équipement Mode S des avions, étant donné que les transpondeurs Mode A/C sont la plupart du temps désactivés au sol pour limiter la pollution radioélectrique.

➤ **Les inconvénients :**

Les signaux doivent être correctement reçus par au moins quatre balises, ce qui pose le problème de l'emplacement de celles-ci, en particulier pour la surveillance en-route.

III.9 Conclusion :

La Stratégie de la surveillance a trois piliers principaux: Radar mode S, ADS-B, Multilatération, qui sont différents, mais complémentaires les uns des autres. Tout choix des techniques de surveillance ou d'une combinaison de techniques doit être pris sur la base des besoins opérationnels de surveillance, à la fois aérien et au sol et les aspects seront influencés par l'environnement et les considérations de coût-avantage.

IV.1 Introduction

Le langage MATLAB a été conçu par Cleve Moler à la fin des années 1970 à partir des bibliothèques Fortran, LINPACK et EISPACK2. MATLAB a ensuite évolué, en intégrant par exemple la bibliothèque LAPACK en 2005, en se dotant de nombreuses boîtes à outils (Toolbox) et en incluant les possibilités données par d'autres langages de programmation comme C++ ou Java.

Matlab est un logiciel pour effectuer des calculs numériques. Il a été conçu initialement pour faciliter le traitement des matrices mais il est maintenant utilisé dans tous les domaines des sciences qui nécessitent de faire des calculs.

Il existe deux modes de fonctionnement :

- ✓ Mode interactif : MATLAB exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'utilisateur.
- ✓ Mode exécutif : MATLAB exécute ligne par ligne un «fichier M» (programme en langage MATLAB).

➤ **Intérêts :**

- Programmation infiniment plus rapide pour le calcul et pour l'affichage
- Une librairie très riche
- Possibilité d'inclure un programme en C/C++
- Langage interprété : Pas de compilation donc pas d'attente pour compiler
- Possibilité d'exécuter du code en dehors du programme
- Code facile à comprendre et très lisible
- Une aide très bien faite

IV.2 Méthode de simulation :

➤ **introduction**

En 1960, R.E. Kalman a publié un article intitulé "A new Approach to Linear Filtering and Prediction Problems". Ses recherches le mènent à y décrire un processus qui sera connu comme le filtre de Kalman.

Le filtre de Kalman est un ensemble d'équations mathématiques qui permet une meilleure estimation de l'état futur d'un système malgré l'imprécision des mesures et de la modélisation son but c'est de donner une meilleure compréhension du filtre de Kalman. Nous présenterons dans un premier temps le filtre de Kalman appliqué aux systèmes suivant qui sera un système linéaire.

IV.2.1 Filtre de Kalman:

➤ Nous appliquons ici le filtre de Kalman à des systèmes qui peuvent être modélisés par une équation différentielle linéaire stochastique. Nous allons nous intéresser au cas discret qui est plus simple et surtout qui est le plus utilisé.

Nous partons donc de cette équation :

$$\begin{aligned}x(t) &= F(t)x(t) + B(t)u(t) + G(t)w(t) \\z(t) &= \end{aligned}$$

Avec les notations suivantes :

- x : l'état du système
- u : l'entrée de commande du système
- F, G, B : des matrices déterministes
- w : un bruit blanc appliqué au système

A cause du bruit, on ne peut pas résoudre cette équation et donc connaître exactement x . Pour résoudre ce système, nous utilisons donc des capteurs qui nous fournissent une approximation de l'état réel.

Les mesures données par les capteurs sont ainsi utilisées :

$$z(t_i) = H(t_i)x(t_i) + v(t_i)$$

Où :

- z est le vecteur de mesures des capteurs

- H est une matrice déterministe
- v est un vecteur de bruit Gaussien blanc

Les vecteurs de mesure ne sont pas non plus connus de manière précise, à cause du bruit de mesure. Le but du filtre va être de trouver une estimation \hat{x} la plus fiable possible, et ce avec les informations données par les capteurs et la valeur de x estimée à l'état précédent grâce à la première équation. Le filtre est donc récursif d'ordre 1. Il est possible d'utiliser un filtre de Kalman d'ordre supérieur en tenant compte de plusieurs étapes antérieures, ce qui le rend plus performant mais d'autant plus complexe.

Le Filtre de Kalman est très puissant grâce à l'utilisation d'un contrôle en feedback: il estime l'état du système puis améliore son résultat avec les informations bruitées fournies par les capteurs. Deux étapes permettent donc de calculer \hat{x} à un instant t_i :

- **Etape de prédiction :**

On estime $x(t_i)$ à l'aide de l'estimation corrigée de $x(t_{i-1})$

- **Etape de correction :**

À l'aide de $z(t_i)$ on corrige l'estimation de $x(t_i)$

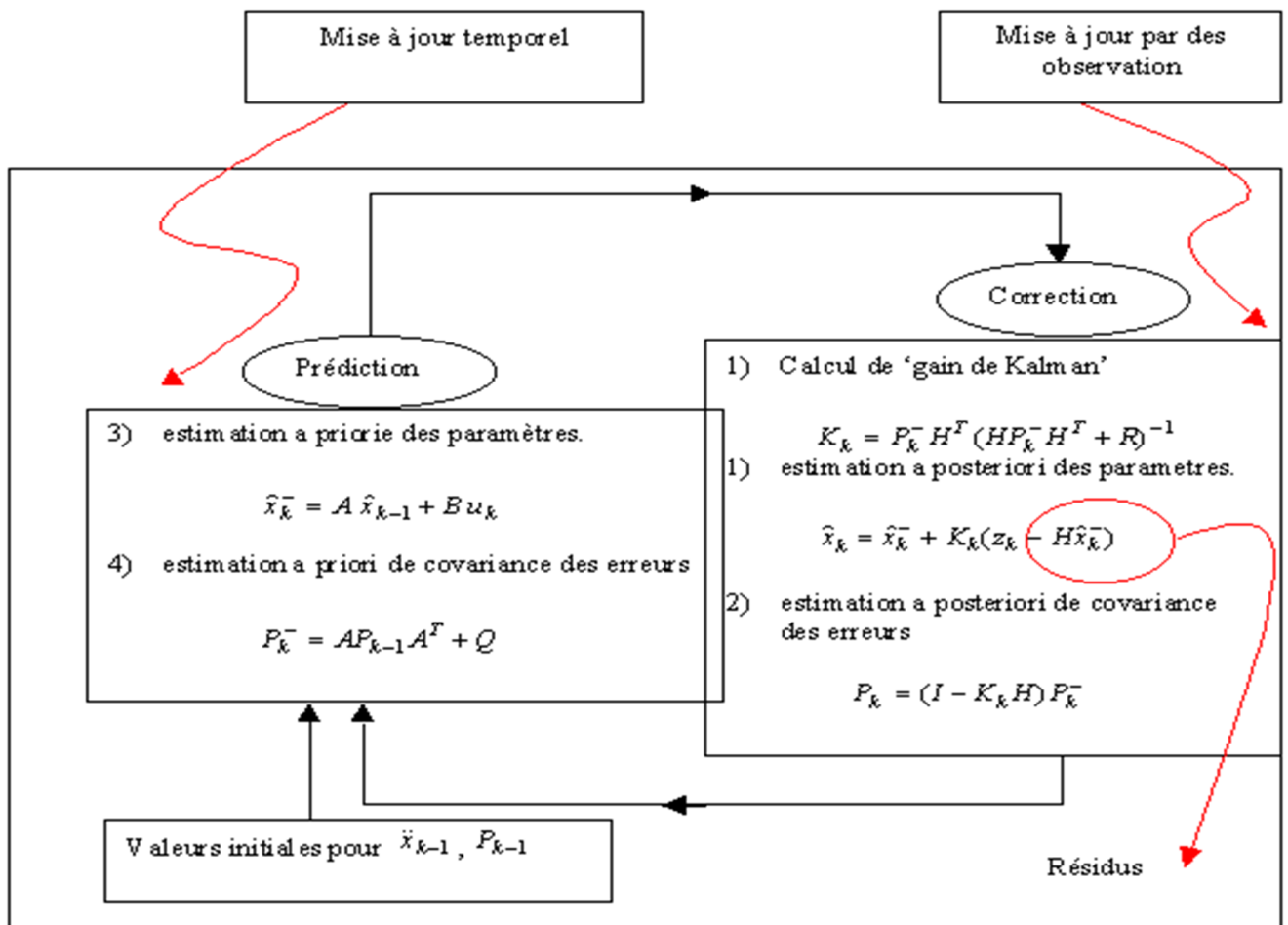
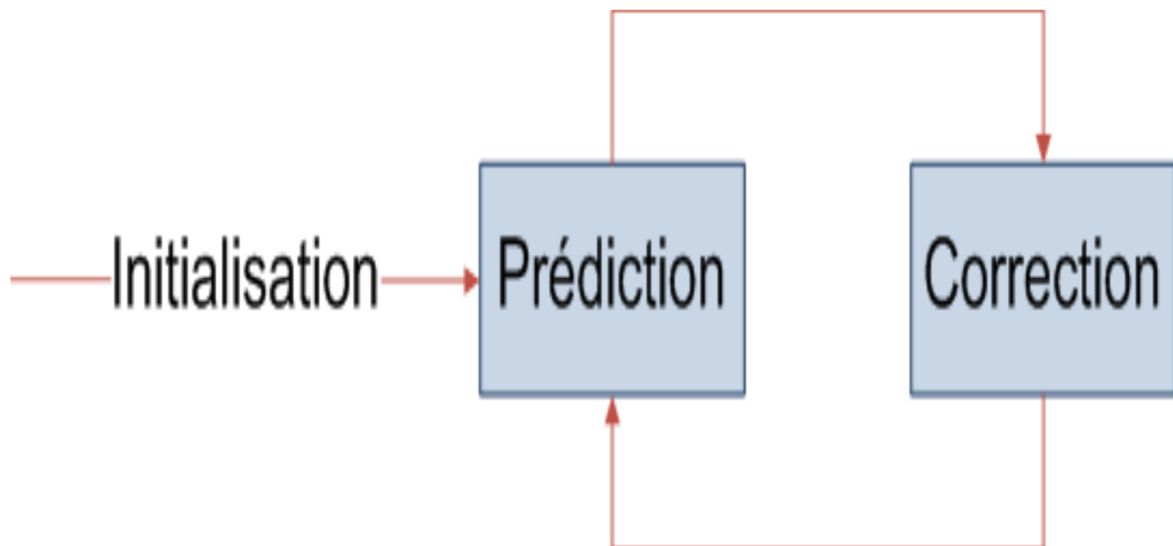


Figure IV.1 – Étapes du Filtre de Kalman

On utilise alors les deux notations temporelles suivant :

- t_i^- : prédiction au temps t_i , valeur théorique sans l'information des Capteurs.
- t_i^+ : correction à l'aide des informations des capteurs de la prédiction au temps t_i^-

D'après les équations précédentes, les estimateurs aux temps t_{i-1}^+ et t_i^- sont ainsi liés par l'équation :

$$\hat{x}(t_i^+) = F\hat{x}(t_{i-1}^+) + Bu(t_{i-1}^+)$$

On introduit la matrice de covariance de l'erreur d'estimation, aux temps prédits C et corrigés $P(t_i^+)$

$$P(t_i^-) = FP(t_{i-1}^-)F^T + Q$$

On écrit l'équation de correction en introduisant le gain k du filtre de Kalman :

$$\hat{x}(t_i^+) = \hat{x}(t_i^-) + k(t_i)[z_i - H(t_i)\hat{x}(t_i^-)]$$

On cherche logiquement à ce que l'estimateur soit le plus proche possible de l'état réel, ce qui correspond à minimiser la covariance de l'erreur au temps corrigé $P(t_i^+)$. En utilisant des méthodes utilisées en statistique on obtient l'expression du gain optimal :

$$K = P(t_i^-)H^T(H P(t_i^-) + R)^{-1}$$

Où R est la matrice de covariance du bruit v sur la mesure des capteurs.

A noter que sous les hypothèses de départ choisies dans cette partie le filtre de Kalman est optimal au point de vue mathématique, c'est à dire que l'on ne peut pas trouver un estimateur plus proche.

➤ **Conclusion**

Le filtre de Kalman est donc un ensemble d'équations très efficace pour obtenir la solution optimale d'un problème dont on n'a qu'une connaissance partielle. Son efficacité vient de son adaptabilité suivant le nombre de capteurs traités, la qualité des informations recueillies ou la modélisation du système qui peut être linéaire ou non, grâce au filtre étendu.

Le filtre de Kalman est avant tout un outil physique très important, utilisé dans de nombreux domaines de l'industrie, en particulier en balistique et plus généralement dans tous les domaines qui nécessitent une localisation très précise (radars, navigation...).

IV.3 Simulation et analyse des résultats :

IV.3.1 Simulation de canal de propagation ligne non -of -Sight :

La fréquence de fonctionnement utilisée dans le but de cette simulation est 866 MHz, ce qui est dans la plage de fréquence. Figure 2 et 3 montrent la sortie de simulation pour le modèle canal NLOS avec « AWGN » et « AWGN et ϵ » respectivement.

➤ **Tableau 1 : Affichage des paramètres de simulation de canaux NLOS**

Parameters	Values
Arbitraire Distance de référence loin (d0)	1 m
Distance de separation Émetteur-récepteur	10 m
Perte de chemin exposant (n)	4 to 6
Fréquence de fonctionnement	866 MHz
Vitesse de la lumière	$300 \cdot 10^6$ m/s
Bruit aléatoire supplémentaire ϵ	Des valeurs aléatoires de longueur n

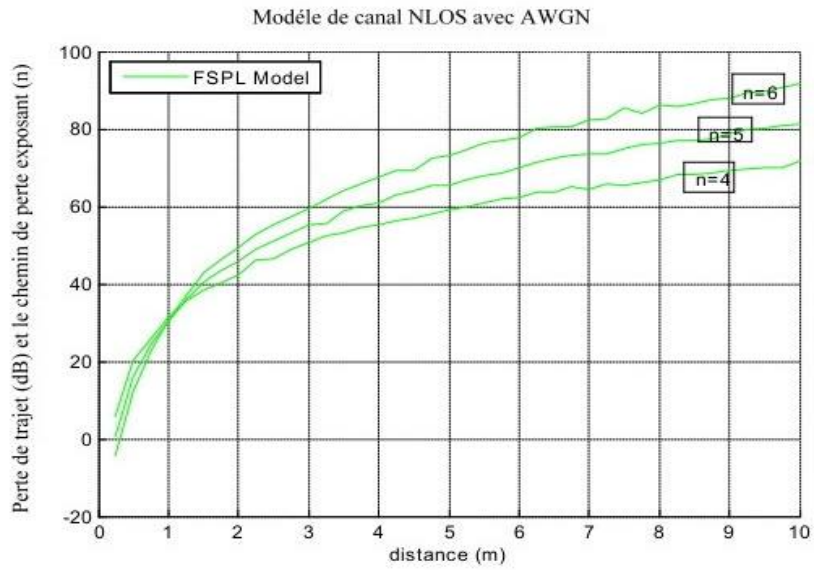


Figure IV.2 – canal NLOS mis en œuvre avec AWGN

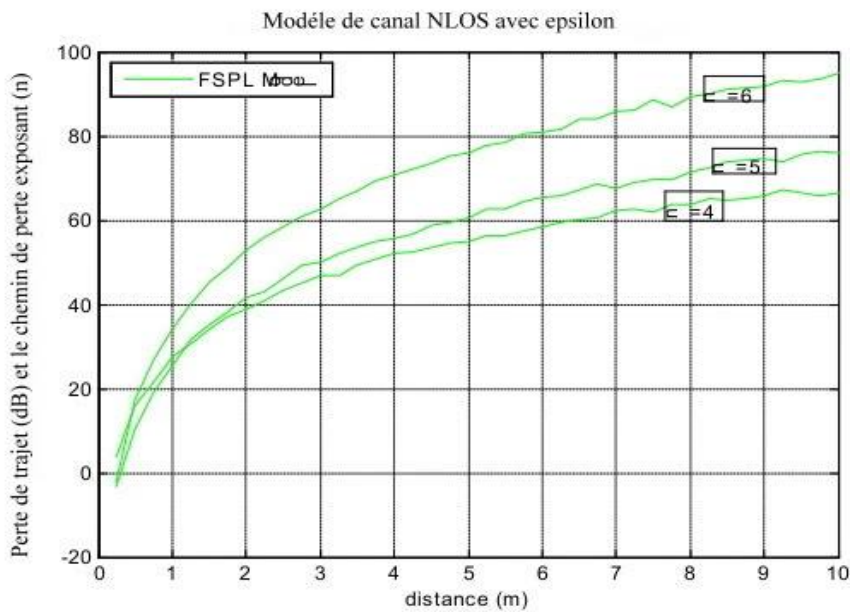


Figure IV.3– canal NLOS mis en œuvre avec AWGN et ϵ

0,6 et 0,7 en quelques secondes de la paire de chaque lecteur (RA RB, RA RC, RA RD, RC RB, RB RD, RC RD) ont été utilisées dans le calcul de l'erreur moyenne moins de fiabilité pré- traitement.

IV.3.2 Analyse de simulation Résultat du canal de propagation :

- **Tableau 2 : perte de chemin [dB] valeurs en matière de renforcement modèle canal NLOS :**

Perte de chemin exposant N	Perte de chemin [dB]	
	Modèle de canal NLOS avec AWGN	Modèle de canal NLOS avec AWGN et ϵ
04	73	65
5	82	78
6	92	96

Le résultat de NLOS modèle canal dans la Figure 2 et 3 montre que pour un bâtiment qui en est N 4-6, l'environnement connu de grandes fluctuations et perte de trajet due à la valeur aléatoire du bruit. C'est à la suite de la réflexion créé à partir de plusieurs sources telles que les surfaces au sol, des murs et des équipements dans l'aéroport. Le tableau 2 montre la perte de trajet à la fois du modèle de canal NLOS avec gaussien et le modèle de canal AWGN avec ϵ .

IV.3.3 Simulation du modèle Multilatération :

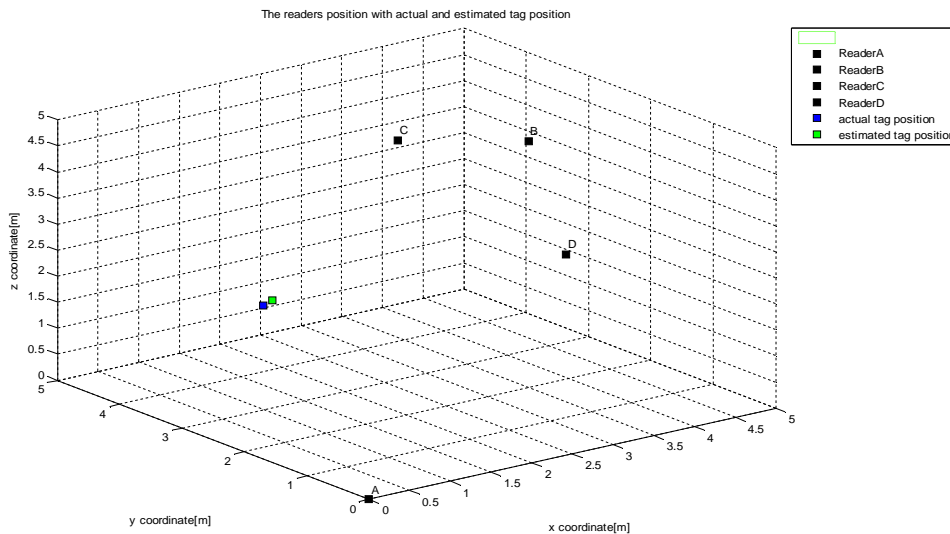


Figure IV.4 : Simulation de l'algorithme de Multilatération montrant les positions réelles ET estimées de la balise.

La figure 4 montre la simulation des emplacements des lecteurs comme suit: RA a été choisi comme référence coordonne dire $x_A = y_B = z_A = 0$, RB : $x_B = 4,8$, $y_B = 3,7$, $z_B = 3,5$, RC : $x_C = 3,8$, $y_C = 4.5$, $z_C = 3.5$, RD: $x_D = 2.8$, $y_D = 0,5$, $z_D = 3,5$ (en mètres) . Un lecteur est à l'origine tandis que les lecteurs B, C et D ont été positionnés au plan différent afin d'éviter corrélation dans la sortie. Cette position estimée est utilisée comme l'entrée dans l'algorithme de filtrage KF.

IV.3.4 Analyse de simulation Résultat de l' algorithme de Multilatération:

La limitation du système de communication et de l'environnement de propagation a conduit à une imprécision de la mesure de localisation TDOA. L'algorithme est basé géométriquement ce qui signifie que la position actuelle (sortie) de l'étiquette ne dépend pas de la position précédente du tag.

L'erreur moyenne est calculée en comparant la position réelle de la position estimée et la moyenne de la différence est calculée ainsi que l'écart-type. Figure 5 et le Tableau 3 montrent le résultat de la simulation de la position de la balise réelle et sa position estimée équivalente réalisée dans cinq itérations en 3D. Il a été observé qu'il ya un peu de déviation entre les positions réelles et estimées (la position réelle de l'étiquette est indiqué par le carré bleu alors que l'estimation est vert), ce qui est illustré par les résultats de l'écart type.

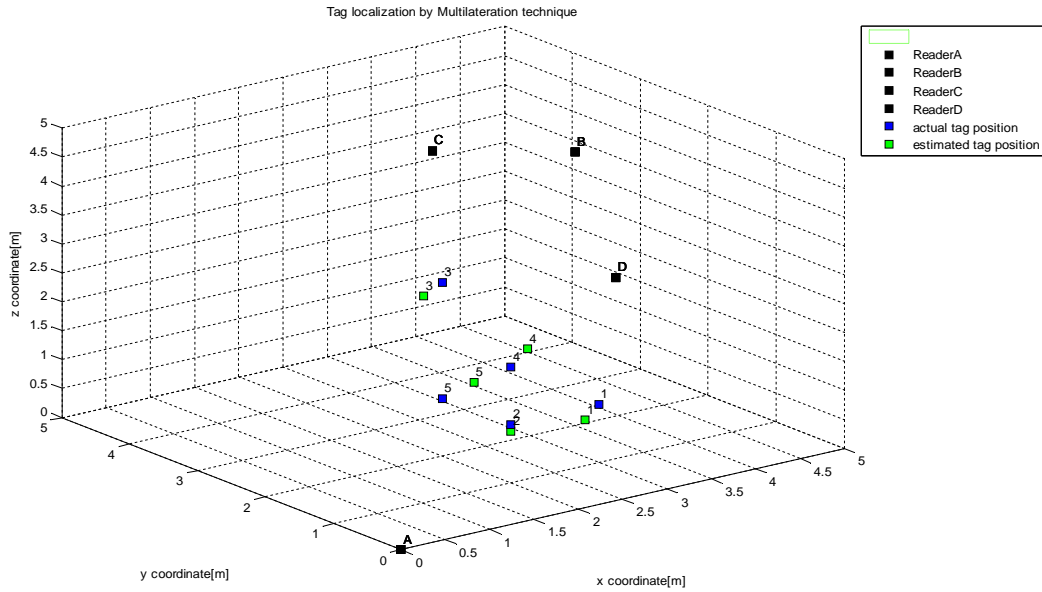


Figure IV.5 : Simulation de la balise passive en 3 dimensions (5 itérations).

➤ **Tableau 3 : Nombre réel et la valeur estimée de l'emplacement de la balise optimisé par algorithme de LM**

Position de l'étiquette réelle [m]			Lieu de la balise estimé optimiser par LM [m]			Erreur moyenne [m]	Écart-type Erreur [m]
x	Y	z	X	Y	Z		
3	1	1	2.7769	0.9158	0.8470	-0.0116	0.0694
2	1	1	1.9659	0.9465	0.9328	-0.0516	0.0166
2	2	3	1.7992	2.0200	2.8271	-0.1180	0.1202
2	1	2	2.1746	0.9764	2.2592	0.1368	0.1451
2	2	1	2.2420	1.8473	1.2677	0.1190	0.2356

IV.3.5 Simulation de KF:

Dans notre simulation, trois scénarios ont été étudiés en faisant varier manuellement le processus de bruit Q du modèle, tout bruit de mesure R a été maintenue constante. Nous avons constaté que le maintien constant bruit de mesure et de varier le bruit de traitement a un effet significatif sur le gain du filtre.

Les figures 6 à 11 montrent les résultats des deux KF avec l'effet de covariance variée matrice Q et R valeur constante sur l'emplacement réel et estimé tag.

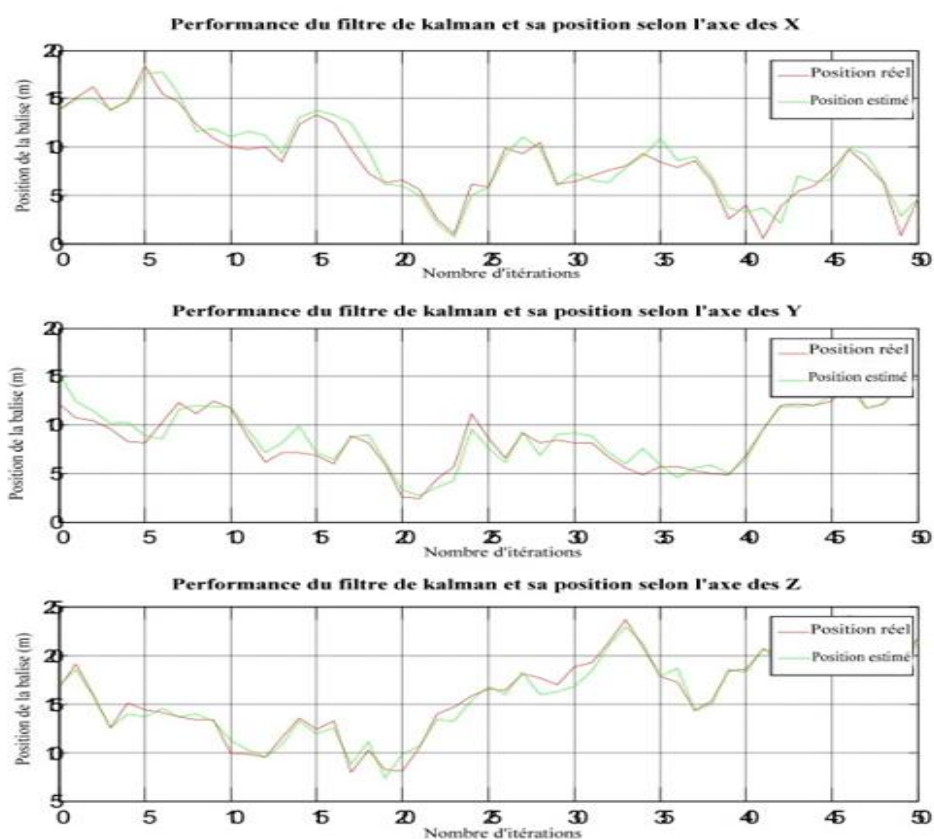


Figure 6 : Performance KF avec l'erreur matrice de covariance $Q = 0,16$ m et le gain $K = 0.8284$

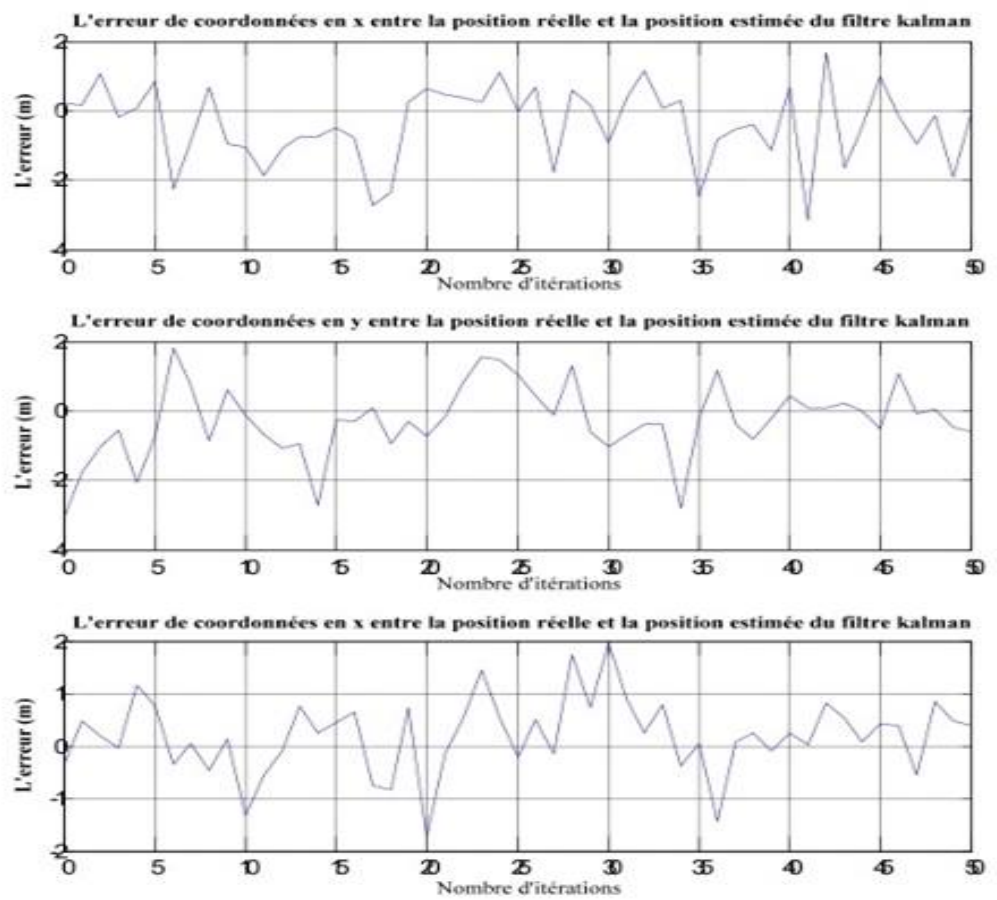


Figure 7 : différence d'erreur KF entre la position réelle et estimée d'erreur de matrice de covariance $Q = 0,16$ m et de gain $K = 0,8284$

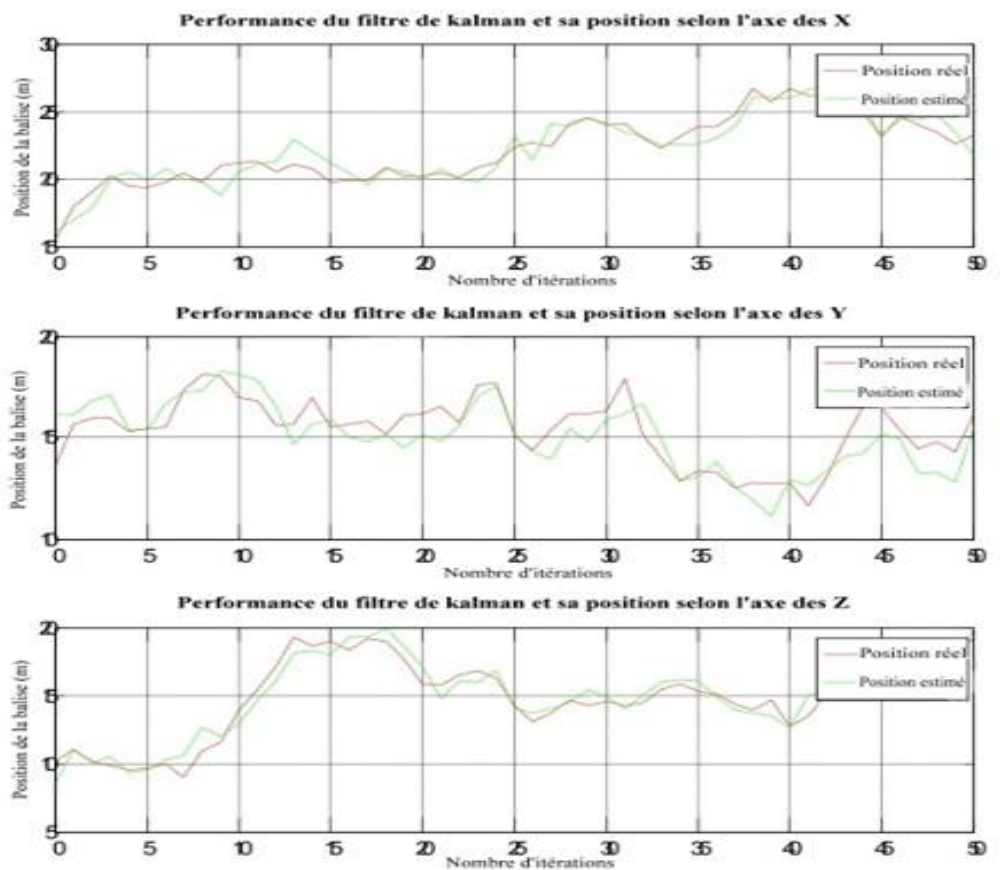


Figure 8 : Performance KF avec l'erreur matrice de covariance $Q = 0,04$ m et le gain $K = 0,6180$

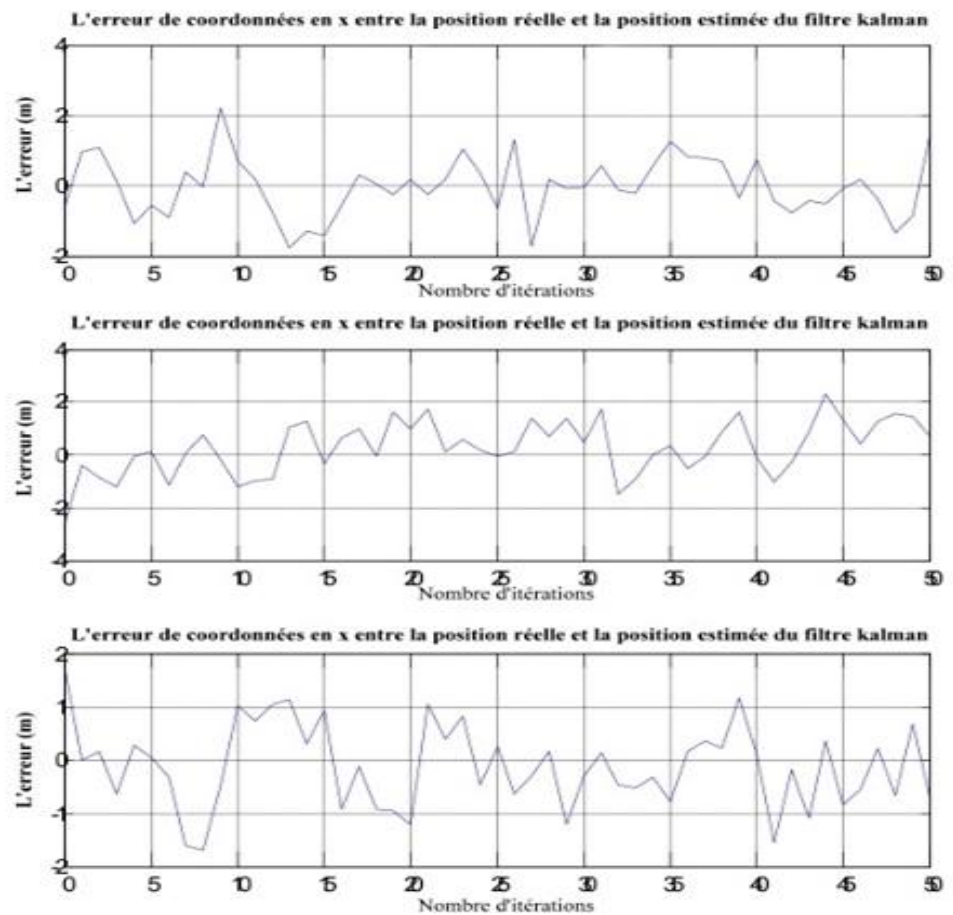


Figure 9 : différence d'erreur KF entre la position réelle et estimée d'erreur de matrice de covariance $Q = 0,04$ m et de gain $K = 0,6180$

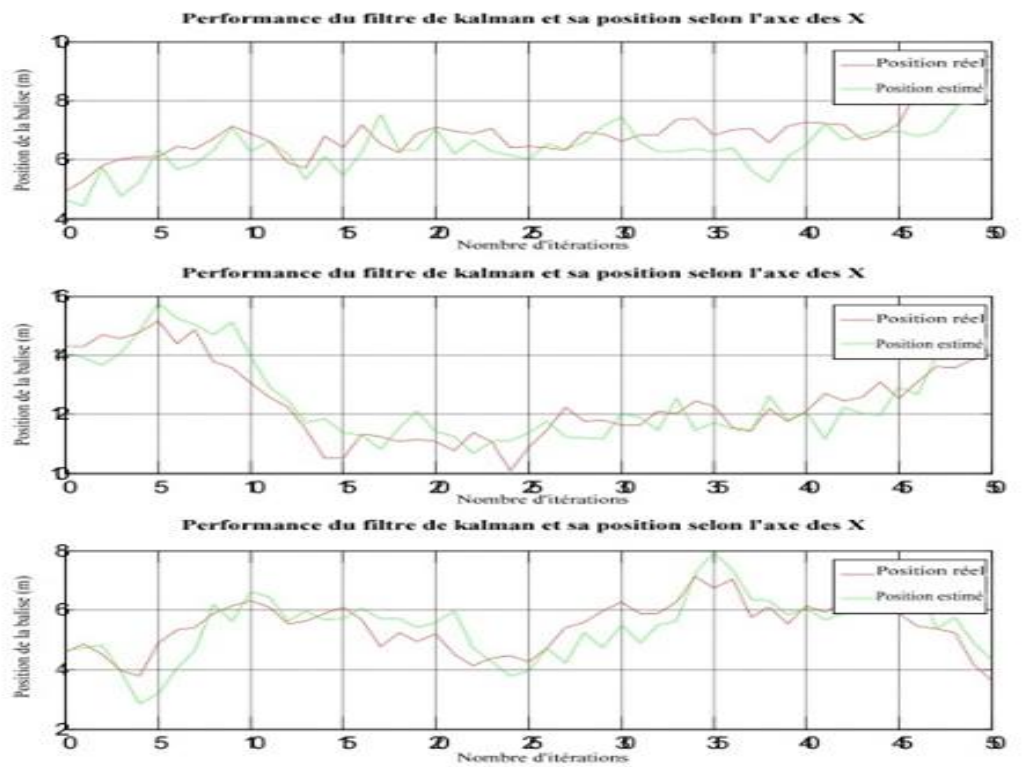


Figure 10 : Performance KF avec l'erreur matrice de covariance $Q = 0,01$ m et le gain $K = 0,3904$

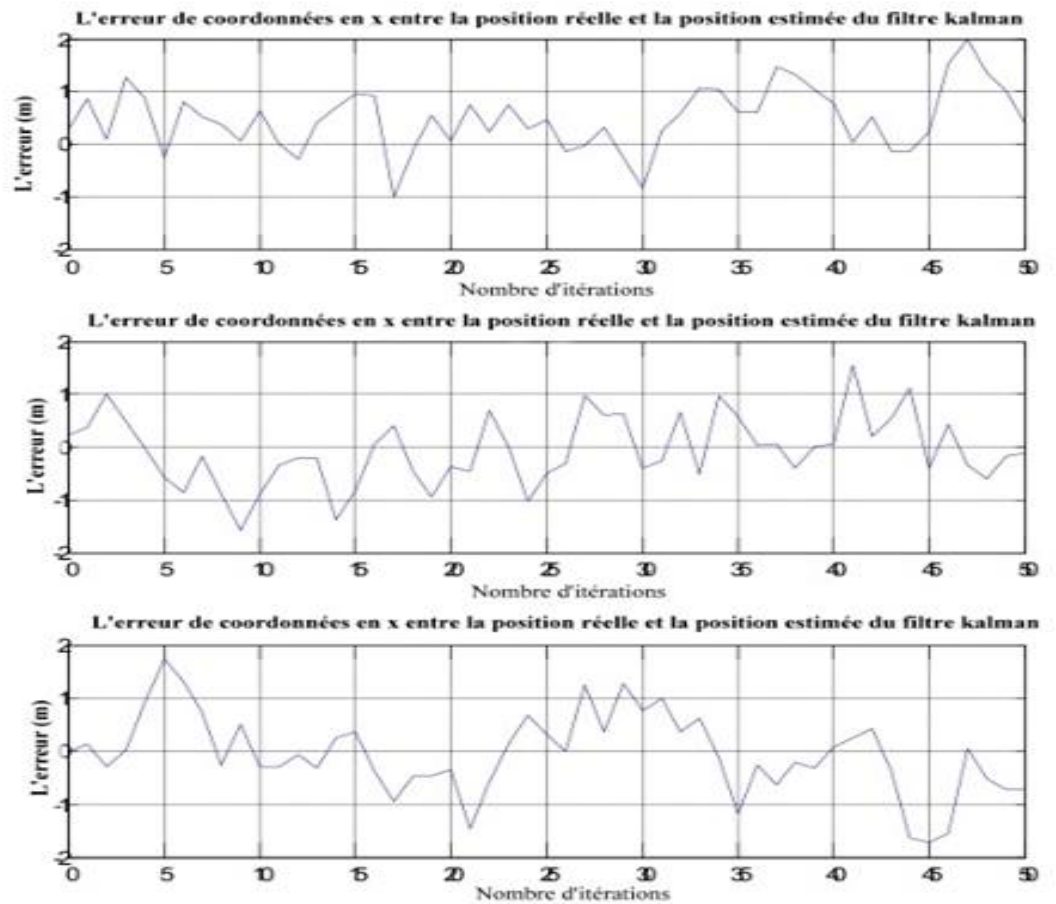


Figure 11 : différence d'erreur KF entre la position réelle et estimée d'erreur de matrice de covariance $Q = 0,01$ m et de gain $K = 0,3904$

IV.3.6 Analyse de simulation Résultat de KF:

Cette estimation du modèle a été réalisée dans un environnement bruyant. Le bruit dans le modèle prend en compte l'incertitude des modèles et des troubles d'entrée. Le bruit de mesure prend en compte le bruit en provenance des lecteurs et de l'effet des matrices de covariance à la fois de la mesure et du bruit de processus.

Figures 6 à 11 montrent les résultats des KF lorsque des modifications sont apportées au bruit de processus (Q) dans le système et le tableau 4 montre l'erreur moyenne et l'erreur de déviation standard à différents niveaux de Q dans l'algorithme KF. Il a été observé que dans un environnement bruyant (Q élevé), KF suivi de l'emplacement ou de la position de la balise avec plus de précision.

➤ **Tableau 4 : moyenne et l'erreur de l'écart type entre la position réelle et estimée dans l'Algorithme KF**

erreur covariance Q [m]	Gain du filtre K	erreur covariance R [m]	Nombre d'itérations	Coordonnées des balises	Moyenne erreur KF [m]	L'écart-type KF [m]
0.16	0.8284	0.04	50	X	-0.0773	0.22
				Y	-0.0589	0.21
				Z	0.0386	0.23
0.04	0.6180			X	-0.0040	0.17
				Y	0.0551	0.20
				Z	-0.0249	0.18
0.01	0.3904			X	0.0963	0.13
				Y	-0.0144	0.13
				Z	-0.0116	0.15

Conclusion :

La distance estimée par Multilatération a été corrompu par l'environnement bruyant, mais cela a été atténué par l'emplacement du filtre KF.

En raison des propriétés récursives de KF, connaissant les propriétés statistiques des données de localisation de balises passives, il était facile de réduire les erreurs NLOS efficace menée par le filtre de Kalman.

Cette tâche a été approché par la modélisation, la mise en œuvre et la simulation algorithme KF, cette méthode montre que la performance de la localisation et de l'atténuation d'erreur dans un environnement NLOS est optimale améliorée par KF.

Une description des systèmes de surveillance « TCAS, RADAR, ADS, MULTILATERATION » et leurs mode de fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients et une proposition d'installation d'autre radars et ads pour une meilleures couverture en Algérie mon permis une meilleur compréhension des systèmes de sécurité aérienne et leurs importances.

L'analyse de la simulation du canal de propagation nous montre une perte de trajet à la fois du modèle de canal NLOS avec gaussien et le modèle de canal AWGN avec ε due à la valeur aléatoire du bruit.

L'analyse de la simulation de l'algorithme de la Multilatération nous montre une petite déviation entre les positions réelles et estimées et ce qui a permis de calculé l'erreur moyenne et l'écart type.

Dans l'analyse de la simulation de KF nous avons étudié 3 scenarios en variant le bruit de traitement et maintenir bruit de mesure constant, Il a été observé que plus l'erreur de covariance(Q) est élevée le gain sera élevée ainsi que l'erreur moyenne et l'écart type.

Les figures6, 7, 8, 9,10 et11 présentent le rendement de KF au suivi de la position de la balise et il a été observé que KF suivi de l'emplacement de la balise avec une bonne précision.

La simulation de la multilateration par le filtre de kalman KF ma permit de démontré que la performance de la localisation et de l'atténuation d'erreur dans un environnement NLOS est optimale améliorée.

Par conséquent, un nouvel algorithme de filtrage pourrait être étudié ou mis en œuvre pour une meilleure performance, angulation, positionnement coopératif et technique l'EKF peut être utilisé pour une meilleure estimation de l'emplacement et une meilleure précision.

J'espère que mon projet contribuera positivement à l'institut d'aéronautique et fera l'objet d'un support pédagogique pour les futures promotions.

BIBLIOGRAPHIE

1/ Les ouvrages :

- L'équipe Northrop Grumman et de Jerry Thompson & Associates, Rapport d'étude « L'espace Aérien Algérien », 2003.
- LOUIS HENRY 1973 (Paris) «Dictionnaire AERO- TECHNIQUE anglais-français»
- Les cours de recherches de panne et d'organisation maintenance dispensés à l'institut d'aéronautique de Blida : niveau 3 année TS (promotion 2007)
- Service de la circulation aérienne. *Edition 2001. Annexe 11*

2/ les thèses :

- TERCHI FATIMA ZOH-QRA « Etude du système d'anti-collision Equipant l'avion BOMBARDIER DASH 8-Q400 » Département d'aéronautique Université de SAAD DAHLEB BLIDA (promotion 2007-2008)
- Iyeyinka Damilola Olayanju, Olabode Paul Ojelabi « Using Multilateration and Extended Kalman Filter for Localization of RFID Passive Tag in NLOS » Blekinge Institute of Technology February 2010.
- LAHRECHE Bahia BOUACIDA Aicha « Les outils de contrôle par liaison de données (ADS et CPDLC) » DEPARTEMENT D'AERONAUTIQUE UNIVERSITE SAAD DAHLEB – BLIDA (promotion 2009).