

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de L'ingénierat
Département : Electronique
Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Electronique
Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Suivi de trajectoire d'un véhicule aérien par un radar secondaire

Présenté par : **BENCHANA OUSSAMA**

Encadrant : **TAIBI Mahmoud** Grade Professeur Université : Badji-Mokhtar ANNABA

Jury de Soutenance :

HAMDI Rachid	Prof	Université BADJI-MOKHTAR ANNABA	Président
TAIBI Mahmoud	Prof	Université BADJI-MOKHTAR ANNABA	Encadrant
AMARA Fethi	MCB	Université BADJI-MOKHTAR ANNABA	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciement

" الحمد والشكر لله "

En tout premier lieu, je remercie du plus profond de mon cœur ALLAH de m'avoir éclairé vers le bon chemin. Je tiens à remercier ma famille pour leurs apports affectifs et leurs sacrifices.

Je remercie aussi mon encadreur Mr. Mahmoud Taïbi pour sa patience tout au long de ce travail.

Je remercie également le Président et les membres du Jury qui me font l'honneur d'accepter de juger mon travail. Sans oublier bien entendu tous les enseignants qui ont contribué par leurs savoirs et leurs encouragements au long de mon parcours.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce travail de près ou de loin et qui méritent d'y trouver leurs noms.

Dédicace

Tout d'abord, je veux rendre grâce à Dieu,

C'est ainsi que je dédie ce travail à :

A ma mère pour sa tendresse, sa patience et encouragement avec toute mon affection

*A tous mes amis ainsi qu'à toutes les personnes que j'ai connues, qui m'ont aidé,
soutenu et encouragé.*

*A tous les enseignants de la spécialité pour leurs soutiens. Avec lesquels j'ai
beaucoup appris*

ملخص:

يتم تتبع مركبة جوية بواسطة نظام رادار من خلال تقدير سرعة المركبة وموقعها من خلال إشارة الرادار. مفتاح خوارزمية تتبع هدف الرادار هو القدرة على تتبع الهدف بدقة، أي ضمان دقة الخوارزمية. في مشروع نهاية الدراسة هذا، نهدف إلى التعرف على أنظمة الرادار بالإضافة إلى تقنيات تتبع المسار وخوارزمية تتبع الهدف. يتم تقديم نتائج محاكاة MATLAB / SIMULINK للتحقق من فعالية المراقبين في مشاكل تقدير الإشارة وكذلك لإعادة بناء حالات النظام. استخدمنا تقنية تشخيصية قائمة على المراقب من KALMAN تتبع الهدف.

الكلمات المفتاحية: رادار ، تعقب ، مرشح كلمان ، مراقب ، تقدير.

Résumé

La poursuite d'un véhicule aérien par un système radar est obtenue par l'estimation de la vitesse et de la position du véhicule à partir d'un signal radar. La clé de l'algorithme de poursuite de cible radar est la capacité à suivre la cible avec précision, c'est-à-dire à assurer la précision de l'algorithme.

Dans ce projet de fin d'étude, nous avons pour objectif de connaître les systèmes Radars ainsi que les techniques de suivi la trajectoire et l'algorithme de suivi la cible. Les résultats de simulation de MATLAB / SIMULINK sont présentés pour valider l'efficacité des observateurs dans les problèmes d'estimation des signaux ainsi pour la reconstruction des états des systèmes. Nous avons utilisé une technique de diagnostic basée sur un observateur de KALMAN pour suivi la cible

Mots clés : Radar, poursuite, filtre de Kalman, observateur, estimation.

Abstract

Tracking an aerial vehicle by a radar system is achieved by estimating the speed and position of the vehicle from a radar signal. The key to the radar target tracking algorithm is the ability to track the target accurately, i.e. ensure the accuracy of the algorithm.

In this end-of-study project, we aim to learn about Radar systems as well as trajectory tracking techniques and the target tracking algorithm. MATLAB / SIMULINK simulation results are presented to validate the effectiveness of observers in signal estimation problems as well as for the reconstruction of system states. We used an observer-based diagnostic technique from KALMAN for target tracking.

Keywords: Radar, tracking, Kalman filter, observer, estimate.

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Présentation schématique d'un radar	3
Figure I.2 Cellule sous test dans le bruit thermique en présence d'un bord de clutter	10
Figure I.3 Cellule sous test dans le bruit thermique et le clutter	11
Figure I.4 Cellule sous test dans le bruit thermique en présence des cibles interférentes	11
Figure I.5 : Présence concomitante de bruit thermique, bord de clutter et cibles interférentes	11
Figure I.6 : Classification des systèmes radar	12
Figure I.7 : Radar avec image et radar sans image	12
Figure I.8 : L'effet doppler	15

Chapitre II :

Figure II.1 : Schéma de fonctionnement d'un radar secondaire	21
Figure II.2 : Structure de L'interrogation	23
Figure II.3 : Fréquence de répétition	23
Figure II.4 : Modes d'interrogations standards	24
Figure II.5 : Message de réponse	25
Figure II.6 : Réponse sur lobes secondaires	28
Figure II.7 : Phénomène de trajets multiples	29
Figure II.8 : La technique d'écartométrie	32
Figure II.9 : Courbe OBA (Off Boresight Angle)	32
Figure II.10 : Structure de l'interrogation Mode S	33
Figure II.11 : Format de la réponse Mode S	34
Figure II.12 : Exemple de panneau de contrôle d'un transpondeur de mode S	35

Chapitre III :

Figure III.1 : Processus de suivi des cibles	40
Figure III.2 Systèmes de coordonnées utilisées dans les radars aéroportés	41
Figure III.3 Fenêtre de corrélation	43
Figure III.4 Boucle de suivi	44

Figure III.5 Mesure de la portée	45
Figure III.6 Suivi	48
Figure III.7 Système LTI	51
Figure III.9 : Le cycle du filtre de Kalman	54
Chapitre IV :	
Figure IV Extension MATLAB	60
Figure IV.1: Position de la cible par rapport au temps	61
Figure IV.1.a: fait un Zoom de Position (vraie, mesurée, estimée)	61
Figure IV.2 : la vitesse de la cible par rapport à la valeur de vitesse estimée	62
Figure IV.3 : l'erreur quadratique moyenne de la vitesse et la position de cible.	63
Figure IV.4. Espace de travail MATLAB GUI associé à la conception " <i>My Radar</i> ".	64
Figure IV.4.a Espace de travail MATLAB GUI	65
Figure IV.5 trajectoire d'entrée non corrompue	67
Figure IV.6 trajectoire d'entrée corrompue	67
Figure IV.7 position x corrompue et non corrompue	68
Figure IV.8 position y corrompue et non corrompue	68
Figure IV.9 position z corrompue et non corrompue	69
Figure IV.10 Trajectoire de la cible et trajectoire filtrée	69
Figure IV.11 vitesse vrai et estimé de la cible sur x, y et z	69
Figure IV.12 la position de la cible sur x y et z	70
Figure IV.13 Gains du filtre de Kalman en fonction du temps	72

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Plages de fréquences radar	16
Tableau IV.1. Liste des sorties générées par la simulation " <i>kalman_gui.m</i> ".	66

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces	II
Résumé	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VI
Introduction générale	XII
Chapitre I : Généralité sur les radars	
I.1 Introduction	1
I.1.1 Origine du mot radar	2
I.1.2 Description du radar	2
I.2 Principe de fonctionnement et Composantes d'un système radar	3
I.2.1 L'émetteur	3
I.2.2 Le duplexeur	4
I.2.3 L'antenne Radar	4
I.2.4 Le récepteur	5
I.2.5 un étage de traitement	5
I.2.6 Ecran	5
I.3 Equation des radars	6
I.3.1 Surface réfléchissante effective σ	7
I.3.2 Paramètres de Radar	8
I.4 Différents types de bruit	8
I.4.1 Bruit thermique	9
I.4.2 Fouillis (clutter)	9
I.4.3 Bord de clutter	10

I.4.4 Cibles interférentes	10
I.5 Classification des systèmes radar	12
I.5.1 Radar imageur et Radar non imageur	12
I.5.2 Radar primaire	12
I.5.2.1 Radars à impulsions	13
I.5.2.2 Radars à onde continue	13
I.5.2.2.1 Radars à onde continue non modulée	13
I.5.2.2.2 Radars à onde continue modulée	14
I.5.3 Radar secondaire	14
I.5.4 Radars bistatiques	14
I.5.5 Radar Doppler	15
I.6 Plage de fréquence radar	16
I.7 Applications des radars	17
I.8 Conclusion	18

Chapitre II : Radar secondaire

II.1 Introduction	19
II.2 C'est quoi le radar secondaire SSR	19
II.3 Comparaison entre radar secondaire et radar primaire	20
II.4 Principe d'opération	21
II.4.1 Principe des traitements	22
II.5 format d'interrogation	23
II.6 Message de réponse	24
II.7 Mode	26
II.7.1 Mode A	26
II.7.2 Mode C	26
II.7.3 Mode S	26

II.7.4 Mode militaire	26
II.8 Codes	27
II.9 Problèmes en RADAR secondaire	28
II.9.1 Réponse sur lobes secondaires	29
II.9.2 Trajets multiples	30
II.9.3 Problème d'interférence	30
II.10 Le Monopulse (MSSR)	31
II.10.1 Principe du Monopulse	31
II.10.2 Technique d'écartométrie	31
II.11 Le mode SELECTIF mode "S"	32
II.11.1 Caractéristique	33
II.11.2 interrogation Mode S	33
II.11.3 Les réponse Mode S	34
II.12 Le transpondeur	34
II.12.1 Définition	34
II.12.2 Rôle et fonctionnement du transpondeur	35
II.13 Conclusion	36
 Chapitre III : Techniques de poursuite d'objets mobiles	
III.1 Introduction	37
III 2. Processus de suivi (Tracking Process)	38
III 2.1 Fusion de plusieurs détections	38
III 2.2 Zone adaptable du taux constant de fausses alertes (TCFA)	38
III.2.3 Initialisation de trajectoire	39
III.2.4 Lissage des trajectoires et extrapolation	39
III.2.5 Vecteurs de trajectoire et mise à jour de celles-ci	39
III.2.6 Fin d'une trajectoire	39

III.3. Systèmes de coordonnées	41
III.4 Suivi d'une cible unique (STT : Single-Target Tracking)	42
III.4.1 Définition	42
III.4.2 Acquisition-Présence	43
III.4.3 Structure générale des boucles de poursuite	44
III.4.4 Suivi de la distance	44
III.4.4.1 Le discriminateur	45
III.4.4.2 La fonction de transfert de la boucle	45
III.4.4.3 Le marqueur de distance	46
III.5 Suivi d'angle	46
III.6 Suivi des tracés	47
III.6.1 Définition	47
III.6.2 Estimation de la trajectoire	47
III.6.3 Gestion et mise à jour du suivi	49
III.7 Représentation de la variable d'état d'un système LTI	50
III.8 Suivi pendant le balayage (TWS)	51
III.9 Filtres de poursuite	52
III.9.1 Filtre à gain fixe	52
III.9.2 Le filtre $\alpha\beta$	52
III.9.3 Filtre $\alpha\beta\gamma$	53
III.9.4 Le filtre de Kalman	53
III.11 Conclusion	58
Chapitre IV : Simulation	
IV.1 Outils de développement Matlab R2014a	59
IV.2 Pourquoi utiliser Matlab	59
IV.3 Fonction MATLAB "kalman_filter.m"	60

IV.4 Présentation de l'application	63
IV.5 Conclusion	71
Conclusion générale	72
Références Bibliographiques	73

Introduction générale

Le suivi de cible est un domaine très vaste. Son objectif est de suivre le mouvement d'un appareil mobile dans un espace défini par la zone de détection d'un ou plusieurs capteurs. Ainsi, le suivi se produit après la phase de détection de mouvement. Il utilise plusieurs domaines de traitement du signal et d'automatisation

- Traitement d'image et/ou traitement de signal acoustique, selon le mode de perception utilisé (visuel, acoustique, radar) ;
- Filtrage pour éliminer le bruit de la trajectoire mesurée et prédite de la position cible prise ;
- Fusion de capteurs, puisqu'il est difficile pour un seul capteur de suivre un mouvement, il est nécessaire de considérer le travail collaboratif de différentes résolutions et différents types de capteurs ;

• Contrôler automatiquement le capteur de mouvement pour suivre la trajectoire cible

Depuis plusieurs années, ce domaine de recherche a attiré l'attention de nombreuses personnes et plusieurs algorithmes d'estimation de trajectoire d'une cible sont apparus. L'intérêt tient à la diversité des applications, essentiellement dans les domaines militaires et civils tels que la défense antimissile balistique, l'alerte rapide de défense aérienne, la surveillance des champs de bataille maritimes et terrestres et le contrôle du trafic aérien, le suivi des cibles de manière fiable et précise est poursuivi en permanence par des systèmes de suivi de capteurs comme le radar.

Un système radar de poursuite mesure les coordonnées d'une cible et fournit des données qui peuvent être utilisées pour déterminer la trajectoire de la cible et prédire sa position future. La totalité ou une partie seulement de la plage de données radar, de l'angle d'élévation, de l'angle azimut et du doppler, utilisé pour prédire la position future.

Le contrôle de trafic aérien est actuellement assuré par les systèmes radars secondaires [1-5] (SSR) et primaires (PSR)

L'utilisation des radars secondaires dans l'aviation commence à être de plus en plus intéressante vu la communication entre l'avion et Tour de contrôle par des messages codés par rapport à celle du radar primaire.

Les algorithmes de poursuite, qui sont essentiellement basés sur le filtre de Kalman, seront introduits. Ce filtre est très utilisé, en raison de son optimalité pour l'estimation de l'état d'une cible dans le cas linéaire Gaussien.

Le but de La poursuite d'un véhicule aérien par un système radar est de mettre à jour les éléments de la piste (position, vitesse,...) de chaque avion en utilisant les informations issues d'une station radar secondaire.

La problématique qui se pose alors est de savoir au regard de l'observation et d'hypothèses sur le système, comment estimer au mieux le signal utile. Wiener fut le premier à proposer en 1949 une solution dans le cas où les signaux mis en jeu sont stationnaires. Il développa un estimateur linéaire minimisant l'erreur quadratique moyenne obtenue en résolvant l'équation de Wiener-Hopf.

Kalman proposa, en 1960, une alternative au filtre de Wiener qui s'affranchit de la stationnarité du processus observé et de celui caché. Le filtre de Kalman est basé sur un modèle d'état linéaire qui met en équation l'évolution du signal utile, et sa relation au signal mesuré ainsi que sur un critère d'optimisation qui exploite toutes les observations, de l'instant initial à l'instant courant

Plan de la thèse

Cette thèse est organisée comme suit :

Dans **le premier chapitre**, fait l'état de l'art des systèmes radar ainsi que leur classification et les différents types avec les notions de base qui les caractérisent ainsi que l'équation de Radar.

Le second chapitre décrit dans un premier temps les généralités sur le radar secondaire de surveillance, telles que le principe de fonctionnement, les principaux problèmes de détection et l'évolution des solutions apporter par les concepteurs.

Dans **le troisième chapitre**, Présente d'abord la situation de base du suivi de cible, le système de suivi multi-cible typique et suivi une seul cible. Nous exposons de manière plus approfondie les différentes méthodes et l'algorithme de suivi la trajectoire de la cible et on a défini l'algorithme de filtre de kalman et Les filtres $\alpha\beta$ et $\alpha\beta\gamma$

Enfin, dans **le quatrième chapitre**, Dans cette thèse, la procédure de suivi la trajectoire de la cible est estimée par simulation.

La conclusion générale regroupe les différentes conclusions sur les études menées et indique quelques perspectives pour poursuivre les cibles et parfaire les résultats.

Chapitre I : GENERALITES SUR LES RADARS

I.1 Introduction

Le RADAR est l'une des merveilles du vingtième siècle. C'est un système électromagnétique utilisé pour détecter la présence des objets mobiles et déterminer leur trajectoire, leur vitesse, leur point de contact le plus proche, et d'autres données, tout en transmettant des ondes radioélectriques, dont la longueur d'onde varie de quelques centimètres à environ 1 m [1]. Il en extrait alors l'information nécessaire sur la cible à partir du signal échoïque. Son histoire de détection a débuté par les travaux du physicien britannique James Clerk Maxwell, en 1864, qui a prédit mathématiquement que les radiations, qui seront connues ensuite sous le nom d'ondes électromagnétiques, ont quelques propriétés communes avec les ondes lumineuses. En particulier, la vitesse de propagation et la réflexion par les objets métalliques et diélectriques. Ceci a été démontré par le physicien allemand Heinrich Rudolf Hertz en 1886. L'ingénieur allemand Christian Hülsmeier fut le premier, en 1904, à suggérer l'utilisation d'échos radio dans un appareil de détection afin d'éviter les collisions en navigation. Ensuite, en 1917, Nikola Tesla établit les principes théoriques (fréquences et niveaux de puissance) du futur radar. En 1922, un dispositif similaire fut proposé par l'inventeur italien Guglielmo Marconi. Par la suite, le radar fut développé progressivement, grâce à l'action de nombreux savants, ingénieurs et techniciens. Plus tard, et au cours de la deuxième guerre mondiale (Bataille d'Angleterre), Watson Watt a pu réaliser un détecteur radio que les américains lui ont attribué le nom de RADAR qui est la contraction de l'expression 'Radio Detection And Ranging', qui signifie détection de la présence et mesure de la distance d'objets à l'aide d'ondes électromagnétiques, ou tout simplement 'radiorepérage'. Depuis cette époque, le radar n'a cessé de se perfectionner tant sur le plan technologique que par la variété mises en jeu. Ce système permet de détecter la présence d'objets (cibles) qui ne peuvent être visibles en estimant leurs positions d'après le temps de retour du signal émis par le radar après sa réflexion par un objet, et leurs vitesses grâce au changement de fréquence du signal par effet Doppler. Les premières utilisations opérationnelles du radar eurent lieu pendant la seconde guerre mondiale afin de détecter depuis la côte l'approche de formations aériennes, et de navires. Les radars ont aujourd'hui une très grande variété d'applications dans de nombreux domaines telles que: militaire, maritime, météorologie, circulation et sécurité routière, scientifique, etc..... Au point

de vue militaire, il a modifié progressivement les caractéristiques de la guerre aérienne en supprimant presque complètement la surprise dans le déroulement des opérations; en effet, il permet de détecter, non sans quelques limitations, à grande distance, les avions et les navires, de suivre leur route, de jour comme de nuit, à travers les nuages, les brouillards et les fumées artificielles. Grâce à lui, l'alerte peut être déclenchée avec préavis, les populations averties et parfois protégées, les moyens de réaction sont ainsi dirigés vers les agresseurs. Le radar reste ainsi un élément indispensable à la mise en œuvre d'une aviation moderne. Associé à des ordinateurs électroniques qui traitent instantanément les informations reçues et les transforment pour les visualiser et les exploiter immédiatement, il est plus que jamais à la base des systèmes de défense aérienne [2].

I.1.1 Origine du mot radar

Le mot radar est un néologisme issu de l'acronyme anglais *RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging, que l'on peut traduire par « détection et estimation de la distance par ondes radio », « détection et télémétrie radio », ou plus simplement « radiorepérage ». Cet acronyme d'origine américaine a remplacé le sigle anglais précédemment utilisé : RDF (*Radio Direction Finding*) [3].

I.1.2 Description du radar

Un radar émet de puissantes ondes, produites par un oscillateur radio et transmises par une antenne. La portion de l'énergie du faisceau qui est réfléchi et renvoyée au récepteur lorsque le faisceau rencontre un obstacle dans l'atmosphère est appelée l'*écho radar* (ou *écho-radar*). Bien que la puissance des ondes émises soit grande, l'amplitude de l'écho est le plus souvent très petite mais ces signaux radio sont facilement détectables électroniquement et peuvent être amplifiés de nombreuses fois. Il existe différentes façons d'émettre ces ondes. Les plus utilisées sont :

- les ondes pulsées, où le radar émet une impulsion et attend le retour ;
- le radar à émission continue, où l'on émet continuellement à partir d'une antenne et on reçoit à l'aide d'une seconde.

En analysant le signal réfléchi, il est possible de localiser et d'identifier l'objet responsable de la réflexion, ainsi que de calculer sa vitesse de déplacement grâce à l'effet Doppler. Le radar peut détecter des objets ayant une large gamme de propriétés réfléchissantes, alors que les autres types de signaux, tels que le son ou

la lumière visible, revenant de ces objets, seraient trop faibles pour être détectés. De plus, les ondes radio peuvent se propager avec une faible atténuation à travers l'air et divers obstacles, tels les nuages, le brouillard ou la fumée, qui absorbent rapidement un signal lumineux. Cela rend possible la détection et le pistage dans des conditions qui paralysent les autres technologies [3].

I.2 Principe de fonctionnement et Composantes d'un système radar

Le radar fait usage de l'écho produit par un obstacle situé sur la trajectoire d'une onde électromagnétique. Dans la majorité des cas, l'émetteur et le récepteur sont connectés à une antenne commune: c'est cette situation qui est considérée ici. Le temps qu'il faut à une onde électromagnétique pour aller de l'émetteur à l'obstacle, puis de l'obstacle au récepteur est mesuré et permet de calculer la distance R .

La variation de fréquence du signal sert à déterminer la vitesse relative de l'obstacle par rapport à la source. La direction dans laquelle se trouve l'obstacle est obtenue en pointant une antenne à faisceau étroit dans la direction donnant le plus grand signal réfléchi. Le schéma de principe d'un radar est donné à la figure (I.1), dans laquelle sont représentés symboliquement tous les termes qui le caractérisent [5][6][7].

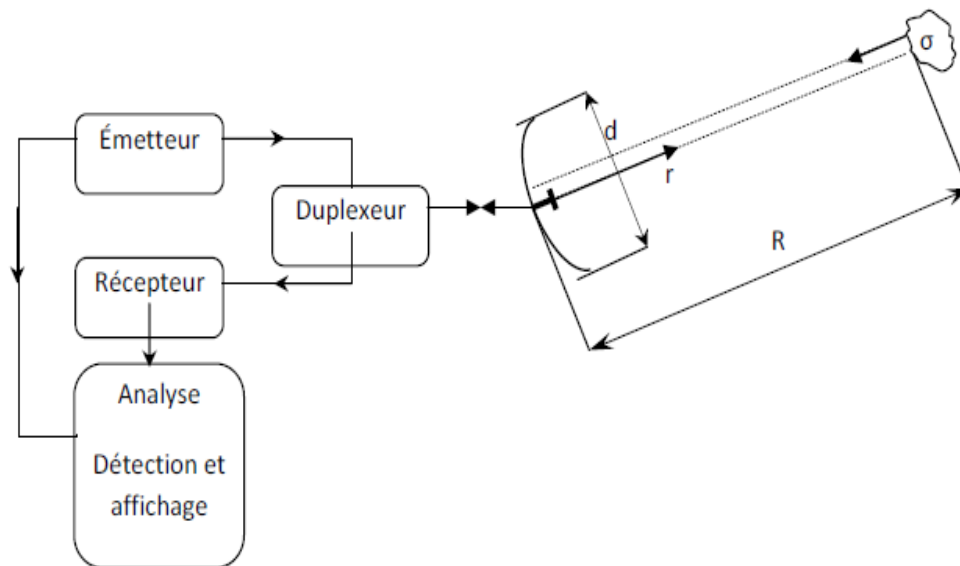


Figure I.1 : Présentation schématique d'un radar

I.2.1 L'émetteur

L'émetteur, site du radar, est un circuit oscillateur qui produit des pulsations électromagnétiques à très hautes fréquences. Il comprend un oscillateur permanent, un amplificateur et un modulateur. Le modulateur c'est un circuit électronique permet de

fractionner l'onde continue produite par l'oscillateur en impulsions. Il permet de stocker l'énergie pendant les périodes séparant deux émissions successives et de la restituer pendant le temps très bref de l'émission radar. Un radar émet de 500 à 3000 impulsions par seconde et chaque impulsion a une durée $\tau=0,1$ à $0,5 \mu s$. L'opérateur peut varier le rythme et la durée des impulsions, en fonction de la zone à couvrir. Des impulsions plus courtes produisent une image plus nette mais demande un rythme d'émission plus rapide. Puisque l'écho ne peut être reçu tant que l'impulsion entière n'est pas émise, la longueur de l'impulsion détermine également la portée minimale.

I.2.2 Le duplexeur

C'est un commutateur électronique qui dirige l'onde vers l'antenne lors de l'émission ou le signal échoïque depuis l'antenne vers le récepteur lors de la réception quand on utilise un radar monostatique. Il permet donc d'utiliser la même antenne pour les deux fonctions, avec une perte minimale. Il est primordial qu'il soit bien synchronisé puisque la puissance du signal émis est de l'ordre du mega-watt ce qui est trop important pour le récepteur qui traite des signaux d'une puissance de l'ordre de quelques nano-watts. Au cas où l'impulsion émise serait dirigée vers le récepteur, celui-ci serait instantanément détruit.

I.2.3 L'antenne Radar

C'est l'élément le plus visible du radar et également le plus connu du profane. Son rôle est de concentrer l'énergie émise par le radar dans un angle solide déterminé. Le meilleur rendement d'une antenne radar est obtenu en la fixant à une hauteur de 3 à 6 mètres au-dessus du niveau de la mer, à l'endroit le plus dégagé possible. Placée plus haut, l'antenne devient sensible aux mouvements de roulis et de tangage. Placée trop bas, ses radiations sont dangereuses pour les personnes qui s'en approchent. L'antenne radar est dessinée de façon à concentrer l'énergie des impulsions émises en un faisceau horizontal étroit. Pour repérer les cibles, l'antenne émet sur le plan horizontal, un rayon très étroit (2 à 4°). Plus l'antenne est large, plus le faisceau est étroit. Sur le plan vertical, le rayon de balayage se situe entre 20 et 40° , et son centre est dirigé vers l'horizon de façon à tenir compte du roulis et du tangage sans perdre les cibles de vue. Les antennes radar doivent avoir une directivité élevée. La directivité d'une antenne caractérise la manière dont celle-ci concentre son rayonnement dans une certaine direction de l'espace pour envoyer un faisceau étroit étant donné que la largeur du

faisceau est proportionnelle à la longueur d'onde du rayonnement et inversement proportionnelle à la largeur de l'antenne. Si le faisceau est trop grand, il y a gaspillage d'énergie. Par contre, s'il est trop petit, un objet se trouvant sous la portée de l'antenne, ne peut, en plus, être repéré. Par conséquent, en général, aucune antenne n'est parfaite.

I.2.4 Le récepteur

Le récepteur est l'élément le plus délicat et souvent le plus complexe du radar. Il est installé près de l'antenne. Il doit amplifier et mesurer un signal extrêmement faible à une fréquence extrêmement haute. Les amplificateurs mobiles ne pouvant remplir directement cette fonction. En effet, le signal est converti et amplifié par un circuit superhétérodyne à une fréquence intermédiaire d'environ 30 MHz. La fréquence très élevée du signal radar nécessite l'utilisation d'un oscillateur et d'un mélangeur de signaux avec une précision beaucoup plus élevée que pour les récepteurs radio ordinaires. Des circuits appropriés ont été mis au point, utilisant comme oscillateurs des tubes hauts puissances à hyperfréquences, autrement dit, les klystrons. La fréquence intermédiaire est amplifiée de manière classique. Le signal est ensuite envoyé dans un ordinateur.

I.2.5 Un étage de traitement de signal

Permettant de traiter le signal brut afin d'en extraire des données utiles à l'opérateur (détection, suivi et identification de cible; extraction de paramètres météorologiques, océanographiques, etc.). Le tout est contrôlé par le système électronique du radar, programmé selon un logiciel de sondage. Les données obtenues sont alors affichées aux utilisateurs [5].

I.2.6 Écran

L'écran est la partie utile du radar, celle sur laquelle se font la navigation et la détection des obstacles. Les progrès de la technologie ont permis de développer des écrans couleurs et balayeurs de gauche à droite et de bas en haut (le procédé est répété 60 fois par seconde). Un rayon rotatif synchronisé avec l'antenne balaie l'écran à la recherche d'objets. La représentation d'un objet sur l'écran s'appelle un spot.

I.3 Equation des radars

Etablir l'équation du radar consiste à faire un bilan des puissances sur le trajet aller-retour d'une onde émise. La puissance reçue par l'antenne réceptrice d'un radar est donnée par l'équation du radar [1] [8].

Forme générale :

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \quad (1.1)$$

Où : P_r = Puissance reçue (watts)

P_t = Puissance transmise (watts)

G_t = gain de l'antenne émettrice

G_r = gain de l'antenne réceptrice

λ = longueur d'onde du radar (mètres)

σ = section efficace ou surface équivalente radar(SER) (Radar Cross Section, RCS)
coefficient de réflexion de la cible, (mètres carrés)

R_t = distance cible-radar émetteur (mètres)

R_r = distance cible-radar récepteur (mètres)

Il est possible d'ajouter des termes de gains ou de pertes supplémentaires à cette équation, par exemple :

- perte d'énergie par diffusion de l'onde sur des particules en suspension dans l'atmosphère (pluie, neige...)
- perte d'énergie par bruit thermique sur les composants électroniques
- perte d'énergie par brouillage
- augmentation du rapport signal à bruit par compression d'impulsion

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2 L_t L_r} \quad (1.2)$$

Où : L_t , L_r sont les pertes totales en transmission et en réception, respectivement.

Forme simplifié :

Dans la plupart des cas de petits radars, pour faire voisiner un émetteur très puissant et un récepteur très sensible, les deux utilisant la même antenne (radar monostatique), nous utilisons un duplexeur tels que: $R_t = R_r = D$ et $G_t = G_r = G$. L'équation (I.2) devient alors:

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D^4 L_t L_r} \quad (1.3)$$

Dans le cas de la détection d'une cible de type MDS (Minimum Discernable Signal), c'est-à-dire un objet pour lequel l'écho reçu a une puissance minimale telle que

$$P_r = P_{\min} = K^\circ T^\circ B S \quad (1.4)$$

En utilisant l'équation (1.3), la portée maximale s'écrit:

$$D_{\max} = \left[P_t \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{\min} L_t L_r} \right]^{1/4} \quad (1.5)$$

Où : k° est la constante de Boltzmann,

T° la température due au bruit du système,

B la bande passante du bruit au niveau du récepteur

S le rapport signal sur bruit (Signal-to-Noise Ratio, SNR) moyen, correspondant à une impulsion, à la sortie du détecteur linéaire ou quadratique

I.3.1 Surface réfléchissante effective σ

- σ : Surface Equivalente Radar (m²) : SER (ou RCS pour radar cross section) de la cible. Elle représente le rapport moyen entre l'énergie réémise par la cible dans la direction du radar et la densité d'énergie qu'elle reçoit. Elle peut varier de valeurs inférieures à 0.1 m² pour les avions furtifs et les missiles à plusieurs dizaines de m² pour les avions long-courrier. Elle se calcule de la façon suivante [9] :

$$\sigma = \frac{4\pi \cdot r^2 \cdot S_r}{S_t} \quad (1.6)$$

Avec :

➤ S_r : densité de puissance (W/m²) reçue par la cible à la distance r

➤ S_t : densité de puissance (W/m²) rétrodiffusée par la cible

On peut aussi définir la puissance disponible de bruit P_B à l'entrée du récepteur radar selon l'équation suivante :

$$P_B = k \cdot T \cdot B \cdot F \quad (1.7)$$

Avec :

- P_B : puissance de bruit (W) en entrée du récepteur. Elle donne le seuil minimal de puissance d'un écho-radar pour être différenciable du bruit de fond.

- k : constante de Boltzmann ($1,38.10^{-23}$ J/K)
- T : température (K) du récepteur.
- F : facteur de bruit du récepteur
- B : bande passante (s^{-1}) du récepteur

Ainsi, à partir de l'équation radar sur le signal utile, le rapport signal à bruit S/N est directement relié à la probabilité de détection du radar selon l'équation :

$$\frac{S}{N} = \frac{P_E G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 kT B F} \quad (I.8)$$

I.3.2 Paramètres de Radar

Il ressort de ce qui précède que le développement d'un radar pose un problème de choix des paramètres. Il faut en effet tenir compte de :

- 1- la puissance P_f fournie par le générateur (W);
- 2- le gain de l'antenne G ;
- 3- la fréquence f (GHZ) ou la longueur d'onde λ (m);
- 4- la portée R_{max} (m), qui est la distance maximale de détection;
- 5- la surface réfléchissante effective de la cible σ (m²);
- 6- le rapport signal sur bruit (P_r/N) minimum acceptable à l'entrée du récepteur, grandeur spécifiée par le système d'analyse du signal;
- 7- la bande passante du récepteur B (Hz);
- 8- la température de bruit globale ramenée à l'entrée du récepteur ($T_a + T_r$) en Kelvin.

Les trois premières grandeurs dépendent de l'émetteur, les trois dernières dépendent du récepteur. La portée et la surface réfléchissante effective définissent la cible à observer, ce sont les grandeurs géométriques qui spécifient le système. Pour que le radar fonctionne.

I.4 Différents types de bruit

Il existe de nombreuses sources de signaux indésirables que les radars doivent pouvoir ignorer plus ou moins, afin de se focaliser uniquement sur les cibles d'intérêt. Ces signaux peuvent avoir des origines passives et actives, internes (bruit thermique) et externes (cibles interférentes et/ou fouillis (Clutter), En général, la puissance du Clutter est beaucoup plus élevée que celle du bruit thermique. La capacité d'un radar à surmonter ces nuisances définit son rapport signal sur bruit (SNR). Plus le SNR est grand, plus le radar peut séparer efficacement une cible des signaux parasites [1].

I.4.1 Bruit thermique

Le bruit thermique est une source interne de variations aléatoires du signal, que tous les composants électroniques génèrent de façon inhérente à différents degrés. Il apparaît typiquement comme constitué de variations aléatoires superposées au signal d'écho reçu par le radar, lequel est celui qu'on recherche. Plus la puissance du signal désiré est faible, plus il est difficile de le discerner du bruit thermique (tenter d'entendre un murmure près d'une route encombrée est similaire). Ainsi, les sources de bruit thermique les plus importunes apparaissent au niveau du récepteur et beaucoup d'efforts sont faits pour minimiser ces facteurs. Le facteur de bruit est une mesure du bruit produit par un récepteur comparé à celui produit par un récepteur idéal. Ce ratio doit être minimal. Dans le cas des radars modernes, grâce aux hautes performances de leurs récepteurs, le bruit interne est inférieur ou égal au bruit de l'environnement extérieur, sauf si le radar est pointé vers un ciel dégagé, auquel cas l'environnement est si froid qu'il génère très peu de bruit thermique.

I.4.2 Fouillis (clutter)

Le fouillis radar ou fouillis d'échos, plus généralement appelés « échos parasites » (*clutter* en anglais), est une forme de parasitage du signal radar [3]. Ce phénomène apparaît lorsque des objets fixes, proches du radar comme des immeubles, des arbres, des collines, des vagues en mer, etc., font écran au faisceau du radar et provoquent des échos de retour.

Nous pouvons classifier les clutter en deux grandes familles. Les clutter de surface qui peuvent représenter les échos de la mer et de la terre et les clutter de volume qui sont généralement liés aux phénomènes météorologiques. Ces deux types de clutter sont tels que le rapport du signal sur clutter (Signal to Clutter Ratio, SCR) est très grand par rapport au rapport signal sur bruit (Signal to Noise Ratio, SNR). La présence des interférences induit, quant à elle, un rapport signal à interférence (Signal to Interference Ratio, SIR) beaucoup plus grand que le SNR. Le clutter peut être considéré comme homogène ou non homogène. La non homogénéité est causée essentiellement par l'effet de bord de clutter et/ou par la présence des cibles interférentes.

I.4.3 Bord de clutter

Dans la détection radar, une transition entre deux milieux de natures différentes telle que la transition d'un milieu terrestre vers un milieu maritime ou d'une zone claire vers une zone nuageuse et inversement produit un changement brusque dans la puissance du clutter. Cette transition est appelée bord de clutter. Elle pose deux types de problèmes dans la détection. Le premier se produit lorsque la cellule sous test (CST) baigne dans le bruit thermique alors qu'une partie des cellules de référence contient du clutter et du bruit thermique. Dans ce cas, le niveau du seuil de détection augmente, ce qui a pour effet de dégrader la détection. Ce phénomène est appelé effet de masque (masking effect) et est illustré dans la figure I.2. Le deuxième problème, quant à lui, se manifeste lorsque la cellule sous test baigne dans le bruit thermique et le clutter, alors qu'une partie des cellules de référence contient du bruit thermique uniquement. Dans ce cas, comme le montre la figure I.3, le seuil de détection diminue et le nombre de fausses alarmes devient important.

I.4.4 Cibles interférentes

Ils peuvent apparaître dans une ou plusieurs cellules de référence sous forme de pics. Elles peuvent se situer en aval ou en amont de la cellule sous test. Dans ce cas, le seuil de détection augmente et par conséquent, la probabilité de détection diminue. Ce phénomène que nous avons illustré en figure I.4, est connu sous le nom de l'effet de capture (Capture effect). La figure I.5 montre une situation dans laquelle il y a une mixture de tous les cas précédents. Ceci rend donc la détection extrêmement complexe et fait de ce modèle le cas le plus général [1].

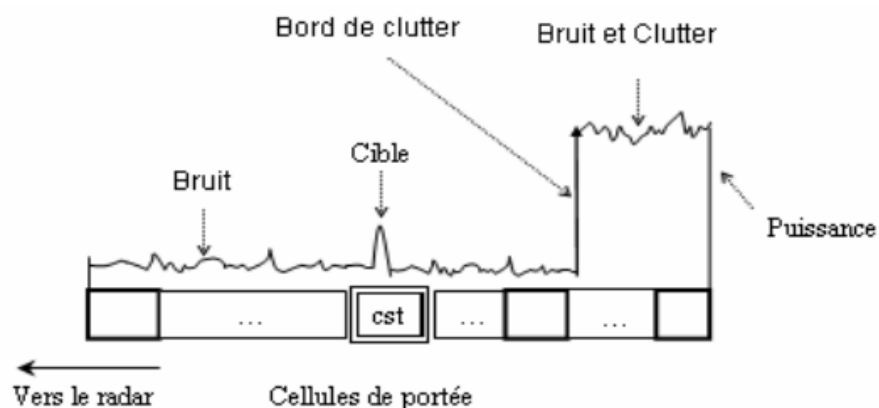


Figure I.2 Cellule sous test dans le bruit thermique en présence d'un bord de clutter

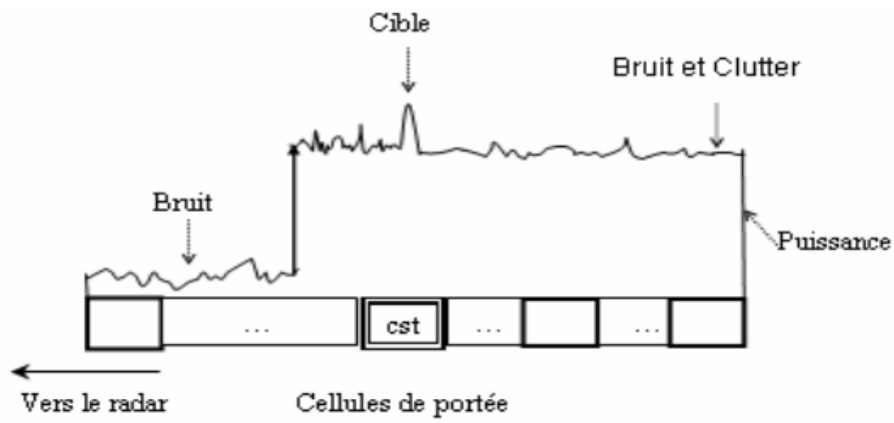


Figure I.3 Cellule sous test dans le bruit thermique et le clutter

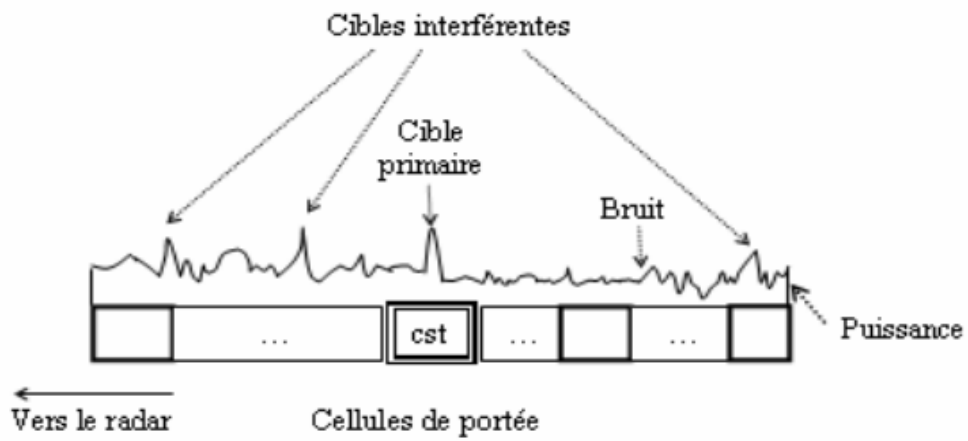


Figure I.4 Cellule sous test dans le bruit thermique en présence des cibles interférentes

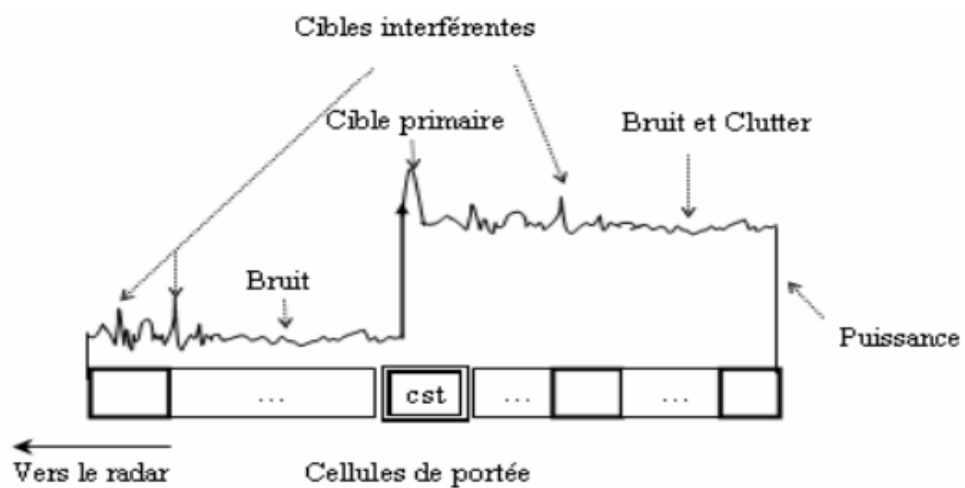


Figure I.5 : Présence concomitante de bruit thermique, bord de clutter et cibles interférentes

I.5 Classification des systèmes radar

En fonction des informations qu'ils doivent fournir, les équipements radars utilisent des qualités et des technologies différentes. Ceci se traduit par une classification des systèmes radars [10]:

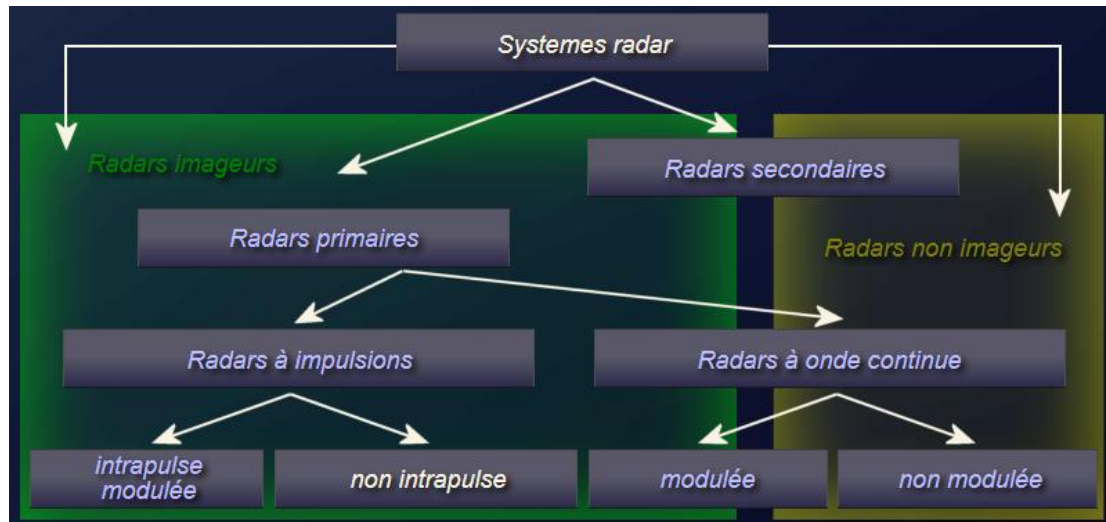


Figure I.6 : Classification des systèmes radar

I.5.1 Radars imageurs / Radars non imageurs

Un radar imageur permet de présenter une image de l'objet (ou de la zone) observé.

Les radars imageurs sont utilisés pour cartographier la Terre, les autres planètes, les astéroïdes et les autres objets célestes. Ils offrent aux systèmes militaires une capacité de classification des cibles.



Figure I.7: Radar avec image et radar sans image

Des exemples typiques de radar non

imageur sont les cinémomètres radars (les petits, sur le bord de la route...) et le radio altimètres. Ce type de radar est également appelé diffus mètre puisqu'il mesure les propriétés de réflexion de la région ou de l'objet observé. Les applications des radars secondaires non imageurs sont par exemple les dispositifs d'immobilisation antivols installés sur certains véhicules privés récents.

I.5.2 Radars primaires

Un radar primaire (PSR: Primary Surveillance Radars) émet des signaux hyperfréquences qui sont réfléchis par les cibles. Les échos ainsi créés sont reçus et étudiés. Contrairement à un radar secondaire, un radar primaire reçoit la partie réfléchi de son propre signal. Les radars primaires peuvent être de type deux dimensions (2D) donnant des mesures de distance et d'azimut ou trois dimensions (3D), une mesure complémentaire en angle de site (angle d'élévation dans le plan vertical) est alors disponible.

On distingue deux types de radar primaire [5] :

I.5.2.1 Radars à impulsions

Les radars à impulsions émettent des impulsions de signal hyperfréquence à forte puissance. Chaque impulsion est suivie d'un temps de silence plus long que l'impulsion elle-même, temps durant lequel les échos de cette impulsion peuvent être reçus avant qu'une nouvelle impulsion ne soit émise. Direction, distance et parfois, si cela est nécessaire, hauteur ou altitude de la cible, peuvent être déterminées à partir des mesures de la position de l'antenne et du temps de propagation de l'impulsion émise.

I.5.2.2 Radars à onde continue

Les radars à onde continue génèrent un signal hyperfréquence continu. Le signal réfléchi est reçu et traité, mais le récepteur (qui dispose de sa propre antenne) n'est pas tenu d'être au même emplacement que l'émetteur. Tout émetteur de station radio civile peut être simultanément utilisé comme un émetteur radar, pour peu qu'un récepteur relié à distance puisse comparer les temps de propagation du signal direct et du signal réfléchi. Des essais ont montré que la localisation d'un avion était possible par la comparaison et le traitement des signaux provenant de trois différentes stations émettrices de télévision.

I.5.2.2.1 Radars à onde continue non modulée

Le signal émis par ces équipements est constant en amplitude et en fréquence. Spécialisés dans la mesure des vitesses, les radars à onde continue ne permettent pas de mesurer les distances. Ils sont employés par exemple par la gendarmerie pour les contrôles de vitesse sur les routes (cinémomètres radars). Des équipements plus

récents (LIDAR) fonctionnent dans la bande de fréquence des lasers et permettent d'autres mesures que celle de la vitesse.

I.5.2.2 Radars à onde continue modulée

Le signal émis est constant en amplitude mais modulé en fréquence. Cette modulation rend à nouveau possible le principe de la mesure du temps de propagation. Un autre avantage non négligeable de ce type d'équipement est que, la réception n'étant jamais interrompue, les mesures s'effectuent en permanence. Ces radars sont utilisés lorsque les distances à mesurer ne sont pas trop grandes et qu'il est nécessaire d'effectuer des mesures ininterrompues (par exemple une mesure d'altitude pour un avion ou un profil de vents par un radar météorologique). Un principe similaire est utilisé par des radars à impulsions qui génèrent des impulsions trop longues pour bénéficier d'une bonne résolution en distance. Ces équipements modulent souvent le signal contenu dans l'impulsion afin d'améliorer leur résolution en distance. On parle alors de compression d'impulsion.

I.5.3 Radars secondaires

'Radars secondaires' ou SSR (Secondary Surveillance Radars), l'avion doit être équipé d'un transpondeur (transmetteur répondeur) qui répond à l'interrogation du radar en générant un signal codé. Cette réponse peut contenir beaucoup plus d'informations que celles qu'un radar primaire peut collecter (par exemple l'altitude, un code d'identification, ou encore un rapport de problème à bord comme une panne totale des radiocommunications).

I.5.4 Radars bistatiques

Un radar bistatique se compose de deux installations considérablement éloignées l'une de l'autre. L'un des sites abrite les équipements consacrés à l'émission, l'autre est consacré à la réception (un tel radar utilise donc également deux antennes, une sur chaque site).

I.5.5 Radar Doppler

Quand un radar illumine un objet en mouvement, la fréquence du signal réfléchi est décalée par rapport à celle du signal incident d'une valeur proportionnelle à la vitesse radiale de l'objet: c'est ce qu'on appelle *l'effet Doppler* (figure I.8) [5].

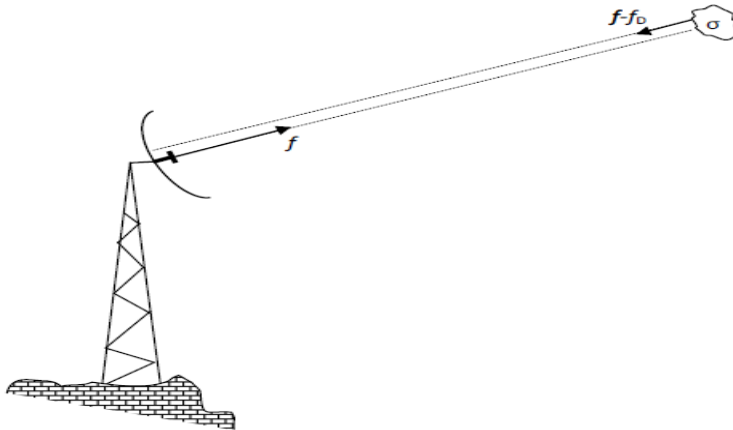


Figure I.8 : L'effet doppler

Un radar Doppler est un radar qui utilise l'effet Doppler-Fizeau de l'écho réfléchi par une cible pour mesurer sa vitesse radiale. Le signal micro-onde — émis par l'antenne directionnelle du radar — est réfléchi par la cible et comparé en fréquence avec le signal original aller et retour. Il permet ainsi une mesure directe et extrêmement précise de la composante vitesse de la cible dans l'axe du faisceau. Les radars Doppler sont utilisés pour la défense aérienne, pour le contrôle du trafic aérien, pour la surveillance des satellites, pour les contrôles de vitesse sur route, en radiologie et dans les réseaux d'assainissement [11].

I.6 Plage de fréquence radar

Le nom des plages de fréquences utilisées dans le monde des radars provient de la Seconde Guerre mondiale [12]. En effet, pour garder secret le développement de ce système, les militaires ont décidé de donner à ces plages des noms de code qui sont demeurés en usage depuis. Ils ont été adoptés aux États-Unis par l'*Institute of electrical and electronics engineers* (IEEE) et internationalement par l'*Union internationale des télécommunications*.

Le spectre des ondes électromagnétiques s'étend jusqu'à des fréquences de l'ordre de 1024 Hz. Cette bande de fréquence très large est divisée en „sous bandes“ afin de prendre en compte les différentes propriétés physiques des ondes qui la composent [10].

Les fréquences utilisées dans les radars sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.1 : Plages de fréquences radar

Nom de bande	Plage de fréquences	Longueurs d'onde	Commentaires
HF	3-30 MHz	10-100 m	Pour haute fréquence. Utilisée par les radars côtiers et les radars "au-delà de l'horizon".
P	< 300 MHz	1 m+	Pour précédent : appliquée <i>a posteriori</i> aux radars primitifs
VHF	50-330 MHz	0.9-6 m	Pour très haute fréquence. Utilisée par les radars à très longue portée et par ceux à pénétration de sol.
UHF	300-1000 MHz	0.3-1 m	Pour ultra haute fréquence. Radars à très longue portée pénétration de sol et de feuillage.
L	1-2 GHz	15-30 cm	Utilisée pour le contrôle aérien de longue portée et la surveillance aérienne.
S	2-4 GHz	7.5-15 cm	Pour court. Utilisée par les radars de trafic aérien local, les radars météorologiques et navals.
C	4-8 GHz	3.75-7.5 cm	Compromis entre les bandes S et X pour les transpondeurs satellitaires et les radars météo.
X	8-12 GHz	2.5-3.75 cm	Pour les radars météo, les radars de navigation, les radars à résolution moyenne de cartographie et la surveillance au sol des aéroports.
K _u	12-18 GHz	1,67-2,5 cm	Fréquence juste sous K pour les radars de cartographie à haute résolution et l'altimétrie satellitaire.
K	18-27 GHz	1,11-1,67 cm	sont utilisées pour la détection des gouttelettes de nuages en météorologie et dans les radars routiers.
K _a	27-40 GHz	0.75-1.11 cm	pour la cartographie, la courte portée, la surveillance au sol des aéroports, les radars routiers (34.300 ± 0.100 GHz).
mm	40-300 GHz	1 - 7,5 mm	Bande millimétrique subdivisée en quatre parties :
Q	40-60 GHz	5 mm - 7.5 mm	Utilisée pour les communications militaires.
V	50-75 GHz	6.0 - 4 mm	Très fortement absorbée par l'atmosphère.
E	60-90 GHz	6.0 - 3.33 mm	
W	75-110 GHz	2.7 - 4.0 mm	Utilisée comme radar anti-collisions automobile et pour l'observation météorologique à haute résolution.

I.7 Applications des radars

Les radars ont aujourd'hui une très grande variété d'applications dans de nombreux domaines [12] :

- militaire : radars de détection et de surveillance aérienne au sol ou embarqués (sur chasseurs pour le combat aérien et sur SDCA); radars de veille de surface sur les navires de guerre ; radars d'atterrissage ou d'appontage ; identification ami-

ennemi (IFF) ; autodirecteurs de missiles ; radars de détection terrestre ; radars d'artillerie ; brouilleurs radar ; satellites radar d'observation de la terre ;

- automobile : la technologie radar est utilisée pour diverses fonctions radar de régulation de distance, couverture des angles morts, radar de recul. Les fréquences utilisées sont de 24 puis 77 GHz dans l'Union européenne et aux États-Unis²⁰ ;
- aéronautique : contrôle du trafic aérien ; guidage d'approche d'aéroport ; radars d'altimétrie ; radars de navigation ;
- maritime : radar de navigation ; anti-collision ; balises radars ; transpondeur de recherche et sauvetage ;
- météorologie : détection de précipitations (pluie, neige, grésil, grêle, etc.) et de formations nuageuses. Les radars les plus récents utilisent l'effet Doppler et sont donc capables d'évaluer la vitesse de ces particules. Certains radars utilisent les polarisations verticale et horizontale pour donner une idée du mélange de formes des particules sondées ce qui, associé à leur intensité, peut indiquer le type de précipitation ;
- circulation et sécurité routière : contrôle de la vitesse des automobiles (voir cinémomètre), le modèle classique sur les routes de France est le Miradop (mini radar doppler) utilisé par les brigades de gendarmerie. Ils sont placés sur les autoroutes, dans les zones où les véhicules peuvent rouler à une vitesse supérieure à la vitesse maximale autorisée. Dans le même esprit, le radar de régulation de distance (ACC Adaptive Cruise Control) sur automobile permet de contrôler l'espace entre les voitures en utilisant les ondes électromagnétiques ou laser ;
- systèmes de sécurité (anti-intrusion) fonctionnant par l'évaluation de la présence d'un objet en mouvement par effet doppler. Les encombrants radars à cavité des années 1970-1980 ont été remplacés par de plus petits, nettement moins gourmands en énergie, généralement associés à un détecteur infrarouge (on parle alors de « double technologie »). En extérieur, on utilise également des couples émetteur-récepteurs disposés face à face ;
- radars de recul sur automobile : cette appellation « radar » est utilisée de manière abusive car on utilise des transducteurs acoustiques pour émettre et recevoir des ondes ultrasonores, et non des ondes électromagnétiques. Il s'agit donc plutôt d'un sonar que d'un radar à proprement parler ;

- scientifiques : embarqués sur satellite pour l'observation de la Terre ou du niveau des océans.

I.8 Conclusion

Les systèmes radar est donc aujourd'hui un système indispensable et très largement utilisé dans des applications civiles telles que la surveillance du trafic aérien, la météorologie ou encore la sécurité automobile.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les généralités des systèmes radar, avec les notions de base et les définitions des paramètres qui les caractérisent ainsi que la classification des différents types de Radar, tel que les équations avec leur utilisation.

Chapitre II : Radar Secondaire

II.1 Introduction

Le premier radar développé, désormais appelé radar primaire, a l'avantage de détecter et de localiser des cibles, tandis que celui sans interaction réfléchit les signaux radio. Bien qu'il ait l'avantage de ne pas interagir avec la cible, celle-ci ne doit être qu'à portée et en ligne de mire, mais le radar primaire est limité à la détection sans cible. Lorsque seul le radar primaire est présent, le numéro d'identification ne peut être obtenu qu'en connaissant le fonctionnement du pilote sur place.

La nécessité d'identifier les cibles facilement et en toute confiance a conduit au développement de la technologie pour assurer la sécurité des aéronefs en vol. Cet outil est appelé radar de surveillance secondaire (SSR) ou appelé radiobalise radar de contrôle du trafic aérien (ATCRBS) aux États-Unis. Sur la base du transpondeur spécifié.

Ce type de radar ne détecte pas la réflexion de l'écho sur l'avion comme le radar primaire, mais fonctionne en mode questions-réponses. C'est une surveillance coopérative. Puisque la cible participe activement à la détection, elle peut être assurée [14]. Ce dernier est équipé d'un répondeur (ou transpondeur). Le transpondeur est un récepteur radio, tandis que l'émetteur fonctionne sur la fréquence radar. Le transpondeur de l'avion cible répond au signal de requête SSR en envoyant une réponse codée, comprenant des applications SSR civiles et des systèmes IFF militaires [15].

Les systèmes SSR modernes peuvent échanger des informations et des données entre les appareils pour mettre en œuvre des systèmes anticollision. Le système IFF communique sous forme cryptée pour éviter d'être reconnu ou imité par l'ennemi, et est utilisé sur tous types de plates-formes militaires, y compris les véhicules terrestres et maritimes.

II.2 C'est quoi le radar secondaire SSR :

Le radar secondaire, ou bien l'IFF (Identification Friend Foe) est un système destiné à faciliter l'identification d'un mobile et l'obtention d'autres informations que sa position. Le système se compose essentiellement:

Au sol : d'un interrogateur associé au radar primaire (antennes liées mécaniquement).

À bord : d'une antenne omnidirectionnelle associée au répondeur.

Interrogé sur un mode déterminé, le répondeur IFF de bord (ou transpondeur en aviation civile) répond par une suite d'impulsions HF qui forment un code destiné à être décodé par l'équipement au sol délivrant ainsi l'information désirée [17].

Le SSR fournit la position, l'altitude barométrique, l'identification de l'aéronef et l'angle azimutal. Le SSR présente plusieurs avantages inhérents: il affiche uniquement les aéronefs équipés. Par contre les obstacles ou les oiseaux il ne sera pas affiché pour éviter la pollution visuelle. Un autre avantage est que les données peuvent être transmises au système radar. Les données dépendent du mode transpondeur utilisé par l'avion et de la fonction de l'antenne radar.

II.3 Comparaison entre radar secondaire et radar primaire :

Ces deux systèmes ont les avantages et les inconvénients des principes de fonctionnement qu'ils utilisent. Grâce au radar primaire, on obtiendra des informations fiables de direction, de hauteur et de distance de la cible, mais le radar secondaire pourra apporter des informations supplémentaires telles son identification ou encore son altitude.

Dans le cas des radars secondaires, la coopération nécessaire de la cible (utilisation d'un transpondeur) permet une très forte réduction de la puissance émise (par rapport à un radar primaire offrant une portée de détection identique). En effet, la puissance émise est un paramètre de l'équation du radar qui doit tenir compte du trajet de l'onde aller et retour dans le cas du radar primaire, mais uniquement d'un "aller simple" dans le cas du radar secondaire.

On peut considérer que la puissance nécessaire pour un radar secondaire sera en moyenne plus de 1000 fois inférieure à celle que devra rayonner un radar primaire ayant la même portée.

Il résulte de cela un émetteur sensiblement plus simple, plus petit, et moins cher. Le récepteur peut être moins sensible, la puissance du signal de réponse étant supérieure à celle de l'écho traditionnel réfléchi par une cible passive. Ceci a cependant une action néfaste sur les lobes secondaires qui doit alors être compensée par l'utilisation de dispositifs de suppression des lobes secondaires.

Comme les fréquences d'émission et de réception sont différentes, le problème des échos de sol n'existe pas [18].

II.4 Principe d'opération

L'antenne radar tourne (généralement à 5-12 tr / min) et transmet une impulsion qui est reçue par l'équipement embarqué (transpondeur). Le transpondeur renvoie une réponse contenant au moins un code (s'il fonctionne en mode A) mais le plus souvent celui-ci est combiné avec le niveau (mode C) ou d'autres informations, par exemple identification de l'aéronef, niveau sélectionné, etc. (mode S). Les informations reçues dépendent du mode d'interrogation (A, C ou S) et de la capacité du transpondeur. Par exemple, une interrogation en mode A recevra une réponse en mode A même si le transpondeur peut avoir une capacité en mode C ou en mode S et une interrogation en mode C ne déclenchera pas de réponse d'un transpondeur en mode A. En règle générale, deux interrogations de mode A sont suivies d'une interrogation de mode C [19].

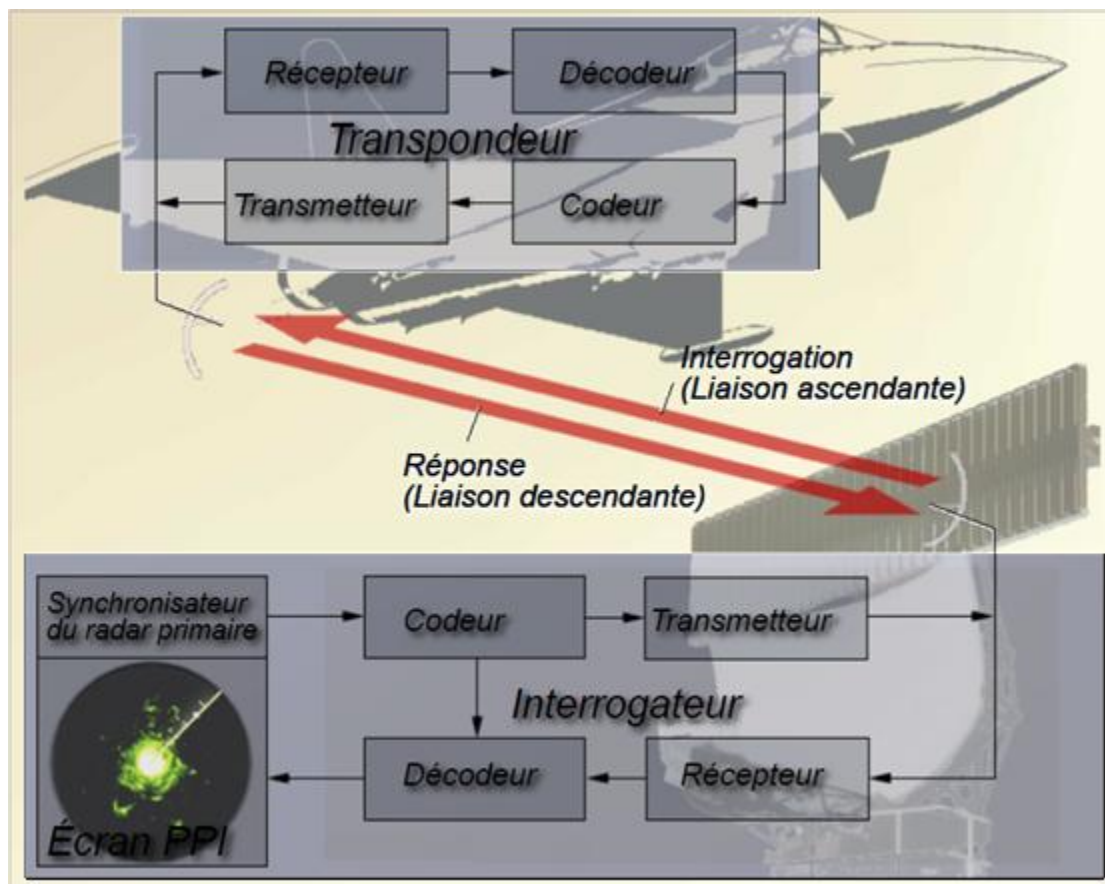


Figure II.1 : Schéma de fonctionnement d'un radar secondaire

II.4.1 Principe des traitements

Interrogation du sol:

Le radar secondaire doit agir en synchronisation avec les impulsions du radar primaire. Pour ce faire:

- Les impulsions du radar secondaire contiennent un signal provenant du **codeur** qui indique le mode d'interrogation choisi (le code envoyé correspond à une ou des questions auxquelles l'avion doit répondre);
- Le **transmetteur** module les impulsions à la radiofréquence d'émission. Celle-ci sera différente de celle de la réponse de l'avion, évitant l'électronique complexe d'un duplexeur;
- L'**antenne** du radar secondaire est habituellement montée au sommet du radar primaire et tourne en même temps que ce dernier permettant la synchronisation spatiale.

Transpondeur dans l'avion:

L'avion doit être muni d'une antenne de réception et d'un transpondeur. Leurs rôles sont :

- Le **récepteur** amplifie et démodule les impulsions d'interrogation ;
- Le **décodeur** interprète le code envoyé et le transforme en questions à répondre ;
- Le **codeur** prend différentes informations demandées à partir des instruments de l'avion et encode la réponse ;
- Le **transmetteur** amplifie, module et transmet la sortie du codeur à la radiofréquence de réponse.

Retour à l'interrogateur au sol:

- Le **récepteur** amplifie et démodule les impulsions de réponse. Le brouillage et les interférences sont filtrés en autant que possible.
- À partir du « mode » et du « code », le **décodeur** extrait la réponse de l'avion.
- La position des échos et leur intensité, tirées du radar primaire, sont ajoutées sur l'écran d'affichage à l'information synchrone obtenue par le radar secondaire [20].

Le radar secondaire pose deux questions

Quel est ton code ?

Chaque avion se voit affecter par la réglementation un code qui devra être positionné par le pilote sur le transpondeur.

Qu'est-ce qu'un code?

Pour les radars secondaires de surveillance (RSS) classiques, non ceux de Mode-S (Sélective), le choix de questions à poser à l'appareil en vol est simple: identification et altitude (car le radar primaire de surveillance ne donne que de l'azimut et la

distance). Ces questions déterminent le MODE opérationnel et le transpondeur répond selon le CODE approprié [21].

II.5 Formats d'interrogation

C'est le mode

L'interrogation, aussi appelé liaison ascendante, consiste en deux impulsions d'intensité standard (P1 et P3) et la durée qui sont entre ces deux impulsions représente le type de question [22].

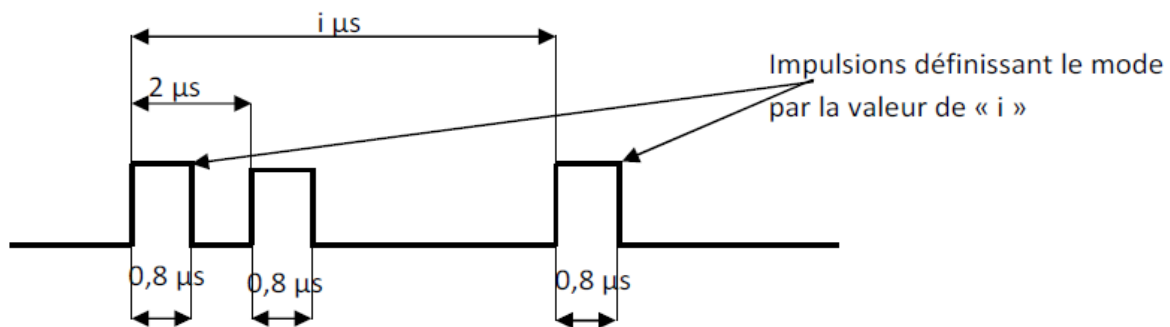


Figure II.2 : Structure de L'interrogation

Les interrogatoires sont réguliers, cette durée est fixée par l'exigence de distance: la réponse d'une cible à la limite de la portée radar doit atteindre le récepteur avant qu'une nouvelle interrogation puisse être effectuée. Pour la plage de 200 NM, la période de répétition est d'environ 2,5 millisecondes ou la fréquence de répétition est de 400 Hz.

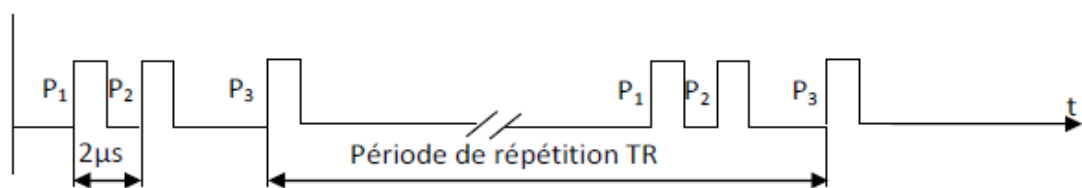


Figure II.3 : Fréquence de répétition

Afin de répondre aux exigences, d'une part pour l'identification, d'autre part pour l'altitude, le motif sera transmis en alternance, ce qui est un "entrelacement de motifs".

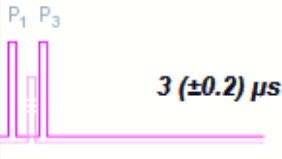
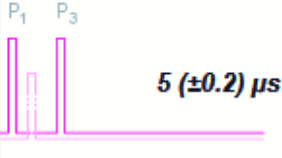
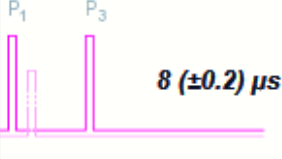


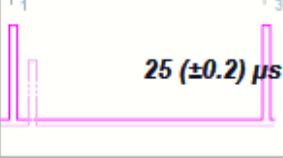
Mode		Intervalle entre P1 - P3	Description
militaire	civil		
1		 3 (± 0.2) μs	<u>Identification militaire</u> Le mode 1 militaire sert comme identifiant pour l'un des 32 codes de mission (type, rôle, etc.), bien que le mot ait 5 bits et puisse donc supporter 4096 codes. Il est peu utilisé en temps de paix.
2		 5 (± 0.2) μs	<u>Identification militaire</u> Le mode 2 militaire est similaire au code A civil et sert à demander l'identificateur de l'appareil en vol. Il comporte 4096 valeurs distinctes.
3	A	 8 (± 0.2) μs	<u>Identification civile / militaire</u> Sert à demander l'identificateur à l'appareil civil ou militaire en vol. Il comporte 4096 valeurs distinctes. C'est le mode le plus courant avant l'introduction du mode S.
	B	 17 (± 0.2) μs	Pas en usage
	C	 21 (± 0.2) μs	<u>Mode civil pour la pression-altitude</u> Le mode C est utilisé pour demander à l'appareil en vol le niveau de vol standard correspondant à la pression extérieure, ou l'altitude exacte si celle-ci est mesurée directement.
	D	 25 (± 0.2) μs	Jamais utilisé

Figure II.4: Modes d'interrogations standards

Exemple classique d'entrelacement:

A A C A A C A A C A A C

Lors d'un passage de faisceau d'antenne, le transpondeur sera interrogé 20 à 30 fois, chaque fois que l'antenne passe environ 16 demandes d'identification et 8 demandes de hauteur [21].

II.6 Message de réponse

C'est le code, la réponse du transpondeur consiste en une série d'impulsions. Nous distinguons:

- Deux impulsions dites de tramage appelées F 1-F, l'intervalle entre elles est de 20,3 us. Ces impulsions sont toujours là. Ce sont les éléments qui permettent la mesure de distance et d'azimut.

- 12 impulsions d'informations situées entre les impulsions F1-F2; chaque impulsion code les informations par la présence ou l'absence d'informations, de sorte que nous pouvons coder la réponse en 12 bits pour former 4096 combinaisons. La position de l'impulsion est la suivante [15] :

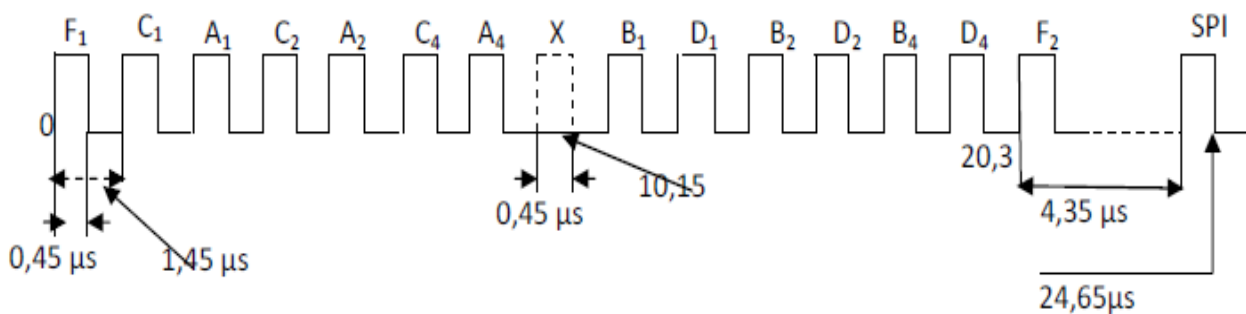


Figure II.5 : Message de réponse

L'impulsion «X» n'existera jamais.

Grâce à l'opération pilote sur le bouton, une impulsion spéciale de 4,35 µs après F2 peut apparaître. Il s'agit d'une impulsion SPI (reconnaissance d'impulsion spéciale), et la transmission de l'impulsion SPI est limitée dans le temps (de 15 à 30 secondes)

Le pilote affiche un code qui permettra d'identifier l'aéronef à l'avant du transpondeur. Utilisez quatre roues codeuses 8 bits (0 à 7) pour ce faire.

Certains codes sont réservés à des situations spécifiques:

7700: DISRESS

7600 : PANNE RADIO

7500 : DETOURNEMENT

Quant à l'altitude, elle sera automatiquement transmise grâce au codeur d'altitude de l'avion [22].

II.7 Les Modes

Le radar secondaire émet deux ou trois impulsions pour interroger les aéronefs volant dans le secteur de contrôle aérien. La séparation temporelle entre deux impulsions détermine le mode utilisé et la question posée. Le transpondeur des appareils répond

par une série d'impulsions codées. Les modes militaires et civils (A, C et S) sont couramment utilisés, alors que les modes B et D sont définis mais non utilisés [23] [24] [25].

II.7.1 Mode A (Alpha)

Le mode A est le plus simple des modes de transmission de données entre l'avion et le sol. La seule information transmise est un code SSR, de quatre chiffres inclus entre 0 et 7. Le code sera affiché sur la visualisation radar du contrôleur. Chaque avion se voit attribuer un code unique, donc ce code permet d'établir une relation entre un plot et un avion, d'identifier avec certitude que ce plot correspond à cet avion. On appelle cela l'identification radar. Avec le mode A, le contrôleur dispose donc de la position de l'avion, et d'un moyen d'identification radar.

II.7.2 Mode C (Charlie)

Le mode Charlie est encore le plus utilisé en 2012. Comme le mode A, il demande l'indicatif de l'appareil mais requiert une information d'altitude. Cette donnée est mesurée dans l'avion, transmise au radar, puis visualisée sur l'écran du contrôleur. Souvent désigné par « Alt » sur les transpondeurs actuels.

II.7.3 Mode S (Sierra)

Le mode S est encore une évolution du radar secondaire. Le nombre de codes disponibles en mode A et C est limité (4096 codes seulement) et devient insuffisant pour les besoins actuels. Le mode S permet donc une véritable liaison de données. En plus du code attribué par un contrôleur et de l'altitude donnée par un alticodeur, l'immatriculation ou l'indicatif de l'avion est transmis. N'importe quelle donnée peut être transmise, aussi bien de l'avion vers le sol que du sol vers l'avion. Les applications sont nombreuses.

II.7.4 Modes Militaires

L'IFF effectuée dans les avions militaires les mêmes fonctions que le transpondeur. Il ajoute une fonction militaire d'identification ami/hostile. Il existe différents modes militaires : 1, 2, 3, 3C, 4 et 5. Les modes 3 et 3C sont les équivalents militaires aux modes Alpha et Charlie. Les modes 1, 2, 4 et 5 sont exclusivement militaires. Les modes 4 et 5 sont chiffrés et le mode 5 permet un véritable dialogue informatique.

II.8 Codes

Les codes se retrouvent dans :

Domaine civil : L'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) annexe 10 est le document qui décrit tous les standards de communication de l'aviation civile et désignés par les lettres A, B, C, D.

Domaine militaire : est souvent le même constructeur qui a conçu le radar et le transpondeur et sont désignés par les chiffres 1, 2, 3 et 4 [20].

Classiques :

- 2000 : IFR
- 7000 : VFR
- 7500 : détournement
- 7600 : panne radio
- 7700 : détresse

Moins connus :

- 7070 : parachuteur
- 7400 : ravitailleurs
- 1300 : VFR militaire
- 7066 : ballons sondes
- 7076 : Canadair
- 7077 : pêche au thon

II.9 Problèmes en RADAR secondaire

II.9.1 Réponse sur lobes secondaires

Le lobe secondaire généré par l'antenne perturbe fortement les performances du radar secondaire. Pour un seul avion, on peut avoir 3 détections [22].

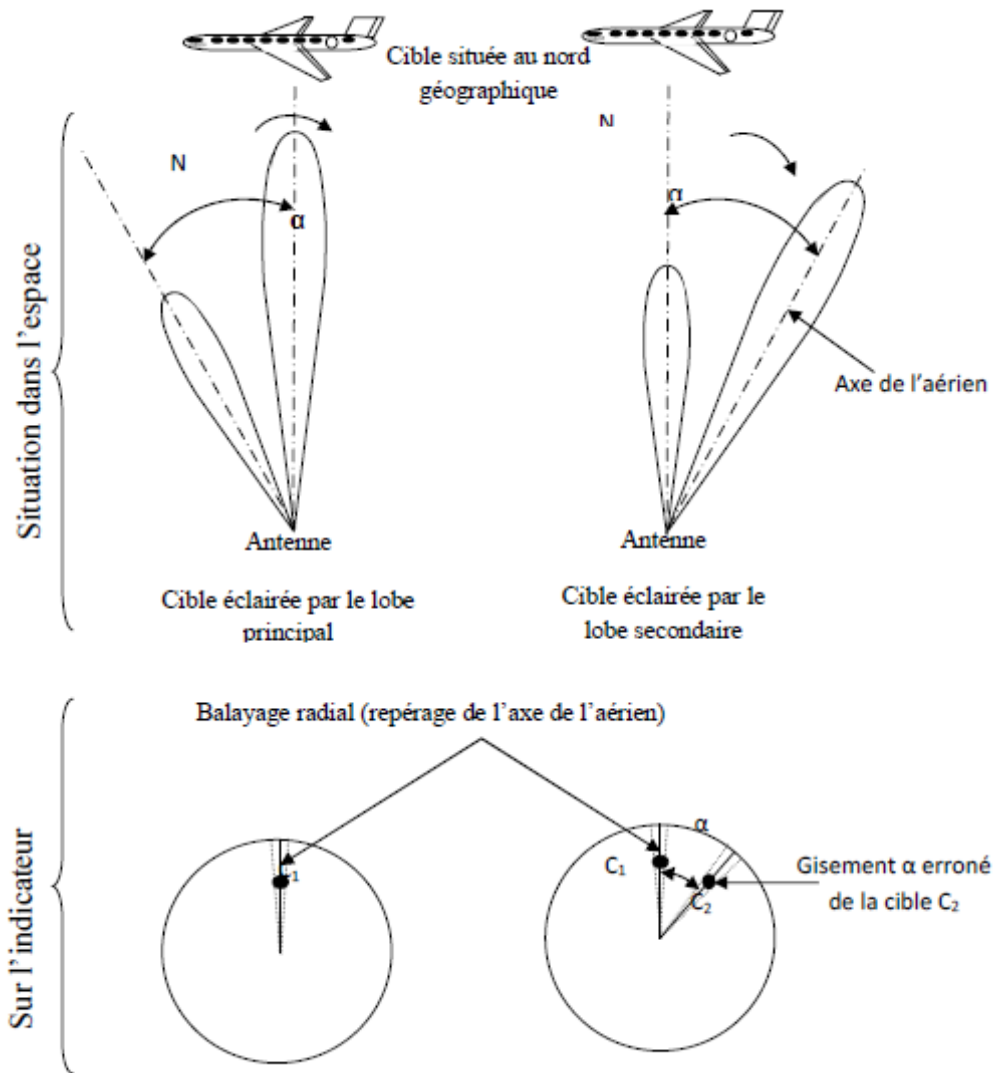


Figure II.6 : Réponse sur lobes secondaires

Il existe deux techniques simples de suppression des lobes secondaires assez similaires (Side Lobe Suppression en abrégé SLS) [20]:

- Suppression des lobes secondaires à l'interrogation (ISLS).
- Suppression des lobes secondaires à la réception (RSLS).

Il existe un autre moyen de réduire l'impact des fausses alarmes causées par plusieurs réflexions radar :

- Suppression améliorée des lobes secondaires à l'interrogation (IISLS).

Le radar envoie des impulsions P2 dans ce qu'on appelle la "carte de contrôle". Cela permet d'établir une référence de puissance, à partir de laquelle le transpondeur va localiser la requête [24] [20].

Par rapport à P1, quel que soit le mode, les impulsions P2 sera transmise avec un retard constant de $2 \mu\text{s}$. Par conséquent, le transpondeur peut localiser la requête et supprimer la réponse en mesurant relativement la puissance de P1 et P2, si la requête se produit sur le lobe secondaire.

II.9.2 Trajets multiples

La réflexion des ondes émise radar sur des obstacles peut parcourir et interroger des transpondeurs qui ne sont pas dans la direction du lobe principal de l'antenne. Cela peut provoquer l'apparition d'avions fantômes sur l'écran du contrôleur [20].

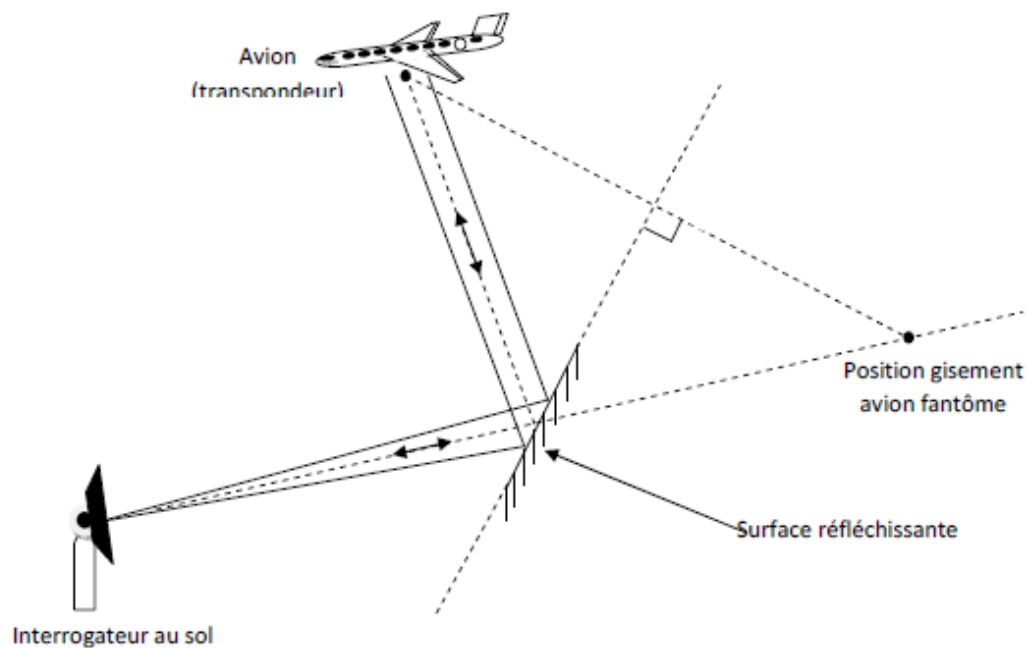


Figure II.7 : Phénomène de trajets multiples

Pour lutter contre ce phénomène, vous pouvez :

-Utilisez un récepteur numérique à gain variable dans le temps (GVT) pour réduire la sensibilité du récepteur dans certaines directions où il y a des obstacles de réflexion. Ensuite, la couverture radar est divisée en secteurs d'azimut, chaque secteur correspondant à sa propre sensibilité.

-Améliorer la qualité de l'antenne ; principalement vers les pâturages pour éviter les obstacles de réflexion [27].

II.9.3 Problèmes d'interférences pour le radar secondaire

Comme le récepteur du radar secondaire n'a pas à être aussi sensible que celui d'un radar primaire, le principal problème d'interférences est le brouillage. Il se divise en perturbations synchrones et asynchrones [20] [23].

Tous les radars secondaires transmettent 1030 MHz et le transpondeur répond de manière omnidirectionnelle à 1090 MHz [28]. Ces fréquences standard permettent aux aéronefs de se déplacer d'une zone de contrôle aérien à une autre sans avoir à modifier à chaque fois les paramètres de leur transpondeur. Cependant, cette réponse peut être détectée par n'importe quel récepteur radar secondaire ou station de contrôle au sol dans la zone couverte par l'émetteur aérien.

Deux types sont souvent désignés de façon mnémotechnique par [20] [27] [29]

« **Fruit** »: réponses asynchrones provenant du même appareil interrogé par deux radars secondaires différents. Ceci donne des lignes d'échos en forme d'hélices sur un affichage PPI ce qui ressemble aux quartiers d'une orange coupée en deux.

Pour remédier à cela, on peut :

- Utilisez un traitement de suppression des réponses sur lobes secondaires à la réception (RSLS : Reception Side Lobe Suppressed).
- Faire un Réglage de la période de répétition à des valeurs différentes pour des proches radars.

« **Enchevêtrement (GARBLING)** »: réponses synchrones qui s'enchevêtrent dans le temps. Ceci se produit quand les réponses des transpondeurs de deux avions très proches l'un de l'autre, en distance ou en azimut, arrivent au radar ensemble. Il est alors impossible de les décoder.

Il y'a plusieurs algorithmes pour séparer les réponses de plusieurs transpondeurs, parmi ces algorithmes on peut citer JADE, MSZCMA et MDA.

D'où la nécessité du radar MONIMPULSION et Radar mode S [17].

II.10 Le Monopulse (MSSR)

Le radar secondaire monopulse assure la mesure directe, à partir d'une seule réponse, de l'écart angulaire entre l'axe principal du faisceau et la position de l'avion dans ce dernier (écartométrie) [30]. la connaissance de la position de l'avion à l'intérieur du faisceau permet :

- L'amélioration considérable de la précision en azimut ($0,022^\circ$)
- Réduire le Garbling et le fruit [28].

II.10.1 Principe du monopulse

La technique monopulse exploite la réponse d'une cible sur deux diagrammes différents un diagramme directif Σ (somme) est adjoint un diagramme supplémentaire Δ (différence) dont la particularité est d'avoir un zéro de réception dans l'axe de l'antenne, et une pente raide de part et d'autre [31].

La mesure monopulse est donc une mesure d'écart angulaire entre l'axe de l'antenne et la direction de la réception peut être effectuée, déterminant avec précision l'azimut de l'avion [29].

II.10.2 La technique d'écartométrie

La technique monopulse calcule l'écart entre l'axe de l'antenne et la position réelle de l'avion.

L'information d'écart, notée θ , et appelée couramment information d'« écartométrie » est fonction du rapport des champs (en module et en phase) des signaux électromagnétiques des réponses reçues dans les voies Δ et Σ (figure II.8) [31] [32].

Cette information est dotée d'un signe algébrique par le fait que:

- Le signal reçu issu du lobe Δ^+ est en phase avec le signal reçu issu du lobe Σ
- Le signal reçu issu du lobe Δ^- est en opposition de phase avec le signal reçu issu du lobe Σ .

Les mesures d'écartométrie ne sont possibles qu'entre $\pm 1,2^\circ$ par rapport à l'axe d'antenne, les limites étant obtenues lorsque le module de Δ est égal au module de Σ .

Si le module de Δ devient supérieur au module de Σ , on dit que le système d'écartométrie est saturé; il n'est plus pris en compte pour la mesure (figure II.9).

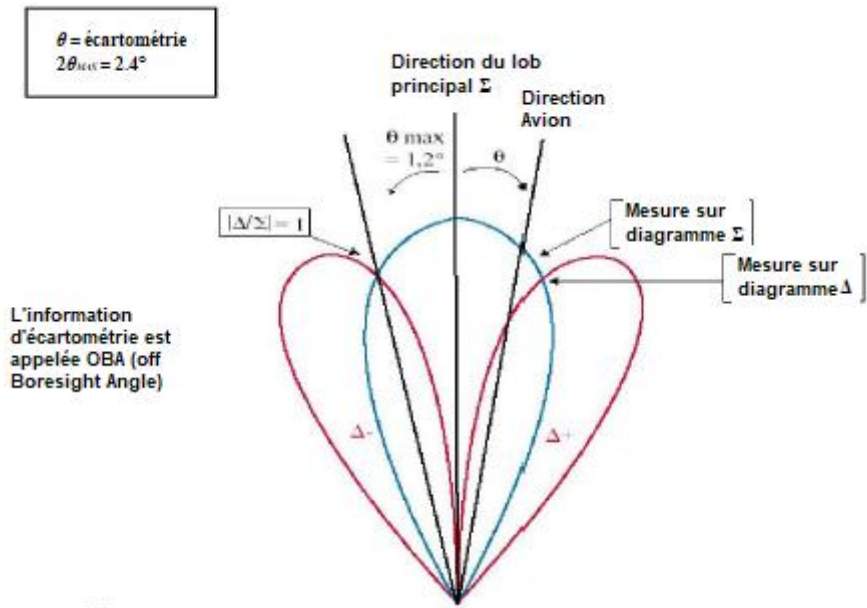


Figure II.8 : La technique d'écartométrie [32]

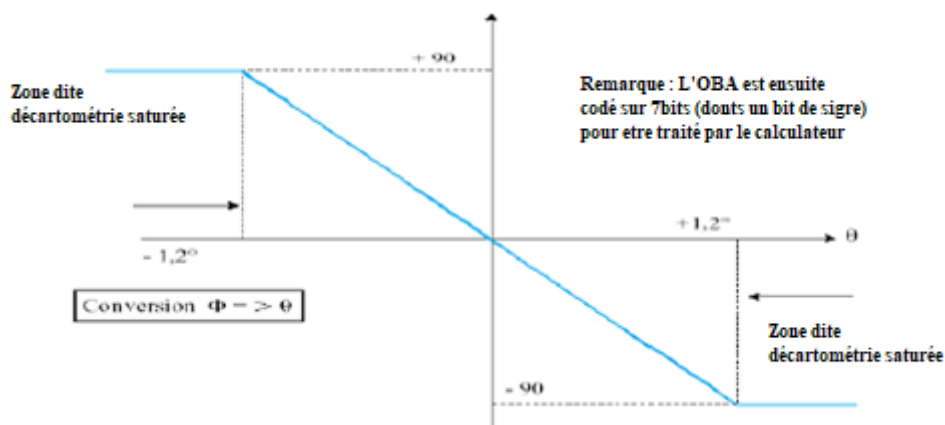


Figure II.9 : Courbe OBA (Off Boresight Angle)

II.11 Le mode sélectif (mode "S")

Une autre technique visant l'amélioration du radar secondaire, est aujourd'hui en cours de normalisation à l'OACI, il s'agit du radar mode "S" (SELECTIF).

Le mode S a été conçu pour être entièrement compatible avec le radar secondaire actuel et, de plus, il utilise la technique de mesure de l'azimut par mono impulsion.

Avec le mode S, chaque avion, équipé d'un transpondeur spécial "mode S", peut être interrogé séparément des autres avions qui sont également dans le faisceau de l'antenne. Ceci est réalisé en affectant à chaque avion une adresse unique [20]. Cette adresse est composée de 24 bits ; ainsi 16 million d'adresses sont disponibles dans le monde.

Chaque interrogation mode S contient l'adresse de l'aéronef auquel elle est destinée. Recevant une telle interrogation, un transpondeur mode S compare l'adresse reçue à sa propre adresse et répond à l'interrogation si les deux adresses correspondent ; sinon, il ignore l'interrogation [20] [29] [33].

II.11.1 CARACTERISTIQUE

Le Radar Mode S est un système de Surveillance enrichie qui possède les caractéristiques suivantes :

- La capacité d'utiliser un adressage sélectif pour chaque avion d'où la résolution des problèmes de chevauchements de réponses qui peuvent se produire dans les régions à forte densité de trafic.
- Le codage de données d'altitude à pas de 25 pieds améliore l'aptitude des systèmes au sol surveiller et à prévoir le mouvement des aéronefs dans le plan vertical.
- Le potentiel de liaison de données permet également au système au sol d'acquérir automatiquement certaines données à bord qui améliorent la poursuite des aéronefs.

Le Mode S a été développé de manière à permettre une transition "douce", et il existe donc une compatibilité entre les modes. C'est à dire qu'une station Mode S peut traiter les transpondeurs classiques, et une station classique peut interroger les transpondeurs Mode S (qui répondent alors en modes classiques).

II.11.2 interrogation Mode S

Il permet également une interrogation sélective des cibles grâce à l'utilisation des adresses uniques des aéronefs codées sur 24 bits. Ainsi qu'une liaison de données bidirectionnelle permettant l'échange des données Air/Sol et Sol/Air.

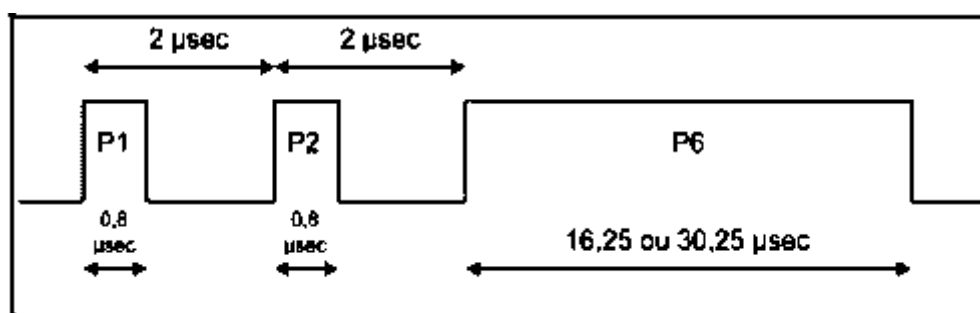


Figure II.10 : Structure de l'interrogation Mode S

II.12.3 Les réponses mode S

Le transpondeur mode S répond par un signal constitué d'un préambule de 8 us et d'un signal utile (Bloc de données) de 56 ou 112 us, selon l'interrogation [20] [30] :

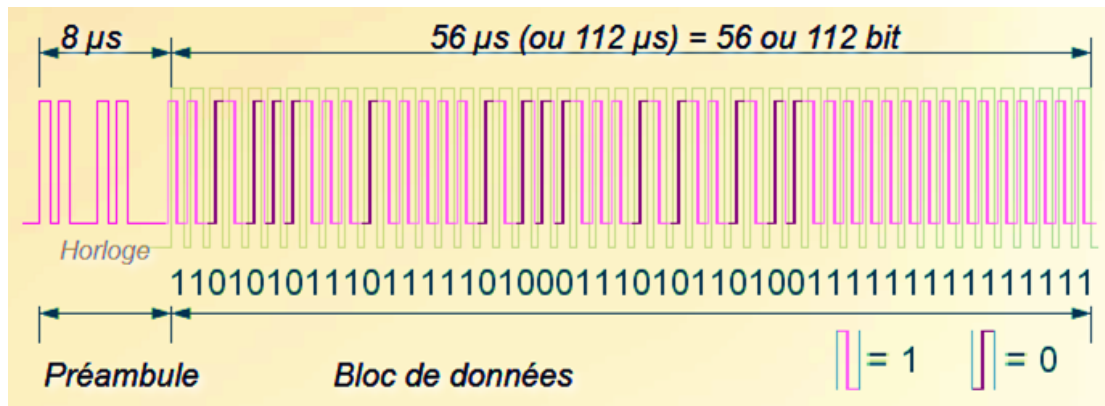


Figure II.11 : Format de la réponse Mode S

Le préambule : 4 impulsions de 0,5µs disposer comme le montre la (Figure II.11).

Bloc de données : le bloc de données est modulé en PPM (Pulse Position Modulation) à la fréquence de 1 MHz. Une impulsion transmise dans la première moitié de l'intervalle représentera un bit UN, tandis qu'une impulsion transmise dans la seconde moitié représentera un bit ZERO.

II.12 Le transpondeur

II.12.1 Définition

Le transpondeur d'avion est un dispositif aéroporté qui permet au radar secondaire de la station de contrôle de la circulation aérienne au sol de déterminer la position ou l'emplacement géographique de l'avion dans l'espace contrôlé [34]. Il fournit également des informations de localisation à d'autres. Il comprend essentiellement trois éléments [30]:

- > Une antenne omnidirectionnelle.
- > Un récepteur calé sur 1030 MHz relié à un décodeur du mode d'interrogation.
- > Un émetteur calé sur 1090 MHz modulé par un train d'impulsion provenant soit du codeur d'identification ou bien de l'alticodéur.

II.12.2 Rôle et fonctionnement du transpondeur

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 identifiée du transpondeur envoie un code particulier qui fait apparaître en gras l'écho associé sur l'écran radar du contrôleur [24].

Le fonctionnement du radar secondaire dépend de la présence ou non d'un transpondeur (compression du transpondeur) sur l'avion, qui peut répondre aux demandes de la station de contrôle au sol. Les informations à son sujet vous permettent d'identifier l'avion en vol et d'apprendre d'autres données. Hauteur et autres informations [18].

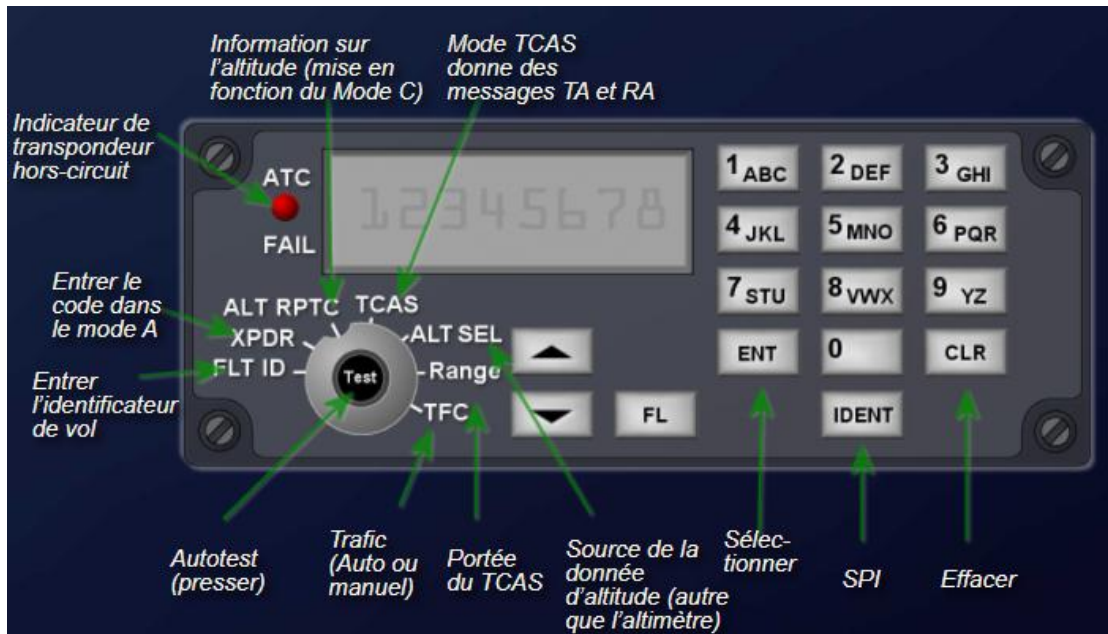


Figure II.12 : Exemple de panneau de contrôle d'un transpondeur de mode S

II.13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le fonctionnement opérationnel et technique du « radar secondaire de surveillance », et on a vu l'avantage du radar secondaire par rapport à celui du radar primaire. Ensuite, nous avons expliqué les différents modes d'interrogation et les réponses du transpondeur. Finalement, on a présenté les phénomènes parasites rencontrés sur le radar secondaire comme les réponses sur lobes secondaires.

Chapitre III : Techniques de poursuite d'objets mobiles

III.1 Introduction

Ces dernières années, la recherche sur la poursuite des cibles mobiles a été un sujet brûlant dans le domaine du radar. La clé de l'algorithme de poursuite de cible radar est la capacité à suivre la cible avec précision, c'est-à-dire à assurer la précision de l'algorithme.

Le but de la fonction pistage, 'tracking function', d'un système de surveillance aérien, 'Air Trac Control (ATC)', est de mettre à jour les éléments de la piste (position, vitesse,...) de chaque avion en utilisant les informations issues d'une station radar. Ces informations consistent en plusieurs données : la position relative de l'avion (portée et azimute), le niveau de vol, le numéro d'identification, et ainsi de suite. Un prétraitement est effectué au sein de la station radar pour faire le lien entre les mesures et les pistes.

Les aspects les plus importants de la fonction pistage sont [35] :

- Une estimation précise des éléments de la cinématique de l'avion pendant le vol à vitesse constante, cette phase est la plus fréquente.
- Une détection rapide des manœuvres. Un indicateur de manœuvre doit être mis en place, tout en évitant les fausses alarmes.
- La charge de calcul doit être compatible avec les performances de l'ordinateur mis en place.

La poursuite d'un véhicule aérien par un système radar est obtenue par l'estimation de la vitesse et de la position du véhicule à partir d'un signal radar. La problématique qui se pose alors est de savoir au regard de l'observation et d'hypothèses sur le système, comment estimer au mieux le signal utile.

Wiener fut le premier à proposer en 1949 une solution dans le cas où les signaux mis en jeu sont stationnaires. Il développa un estimateur linéaire minimisant l'erreur quadratique moyenne obtenue en résolvant l'équation de Wiener-Hopf.

Kalman proposa, en 1960, une alternative au filtre de Wiener qui s'affranchit de la stationnarité du processus observé et de celui caché. Le filtre de Kalman [36] est basé sur un modèle d'état linéaire qui met en équation l'évolution du signal utile, et sa relation au signal mesuré ainsi que sur un critère d'optimisation qui exploite toutes les observations, de l'instant initial à l'instant courant.

En général, lorsqu'une cible est détectée, il est utile de corrélérer des détections de cible consécutives et de fusionner les mesures d'acquisition à acquisition, c'est-à-dire de suivre la cible. Ce suivi peut être assez élaboré, du simple suivi au suivi tout en scannant (TWS) ou au suivi d'une cible unique (STT), dans lequel le radar surveille continuellement une cible unique.

III 2. Processus de suivi (Tracking Process)

Selon le taux de rotation de l'antenne et celui de répétition des impulsions du radar, les cibles seront illuminées plus ou moins souvent. À chaque cellule de résolution pour chaque impulsion, le traitement du signal détermine la présence ou non d'une cible et produit un ensemble de données préliminaires pour le balayage complet. Le but du processus de poursuite [37] est d'associer plusieurs rapports voisins de la même cible en une seule donnée.

III 2.1 Fusion de plusieurs détections

Souvent, les échos revenant de cellules de résolution voisines et associées à la même cible vont dépasser le seuil d'intensité prédéterminé pour le traitement radar. La série de seuils dépassés, et leur amplitude, sont alors utilisées pour l'interpolation de la position réelle de la cible. Les méthodes utilisées peuvent être :

- Fenêtre mobile (Interpolation)
- Corrélation du centre de masse (Moyenne pondérée) ;
- Comparaison avec une base de données : Ajuster les données à la dispersion angulaire probable d'une cible connue à une distance donnée selon l'angle d'ouverture du faisceau, la résolution en distance de l'impulsion ou la forme du filtre de vitesse Doppler.

III 2.2 Zone adaptable du taux constant de fausses alertes (TCFA)

Parce que la distribution de la surface équivalente radar des avions recoupe celle des oiseaux, et certaines cibles du fouillis radar, un nombre significatif de ces deux dernières vont passer le filtre moyen de détection des fausses alertes (FA) dans certaines cellules de résolution des données Doppler. L'utilisation d'une zone adaptable du taux constant de fausses alertes (TCFA) peut réduire ce problème.

III.2.3 Initialisation de trajectoire

Le début de poursuite de la trajectoire d'une cible se fait après trois balayages ou plus du radar afin de limiter les faux départs. Ces détections sont vérifiées pour leur

correspondance avec une trajectoire estimée raisonnable de la direction et de la vitesse des cibles d'intérêt.

III.2.4 Lissage des trajectoires et extrapolation

La série temporelle de détections d'une cible donne souvent une trajectoire variant en direction et vitesse à cause du bruit ou aux erreurs de mesure. Le programme de traitement effectue un lissage pour en tirer des données plus constantes de déplacement et effectue ensuite une extrapolation de la position prévue au balayage suivant. Cette prévision peut être effectuée en utilisant un algorithme de traque de type $(\alpha-\beta)$ ou un filtre récursif de Kalman.

III.2.5 Vecteurs de trajectoire et mise à jour de celles-ci

Tous les vecteurs représentant les trajectoires de chaque cible sont conservés dans une matrice de données. Un vecteur contient généralement pour chaque détection de la cible :

- Position et amplitude du signal, vitesse radiale Doppler et temps de détection ;
- Trajectoire lissée et information sur la vitesse de déplacement de la cible ;
- Position et vitesse prévue pour le balayage suivant ;
- Indice de confiance sur l'analyse de trajectoire.

Au balayage suivant, les cibles détectées sont associées avec les trajectoires prévues et la matrice est mise à jour.

III.2.6 Fin d'une trajectoire

S'il est impossible de retrouver une cible après un balayage, sa trajectoire peut être gardée et une nouvelle prédiction sera faite pour le balayage suivant. Lorsque la cible manque à l'appel sur plusieurs balayages, sa trajectoire est terminée. Le critère pour mettre fin à une trajectoire dépend du type de radar [37].

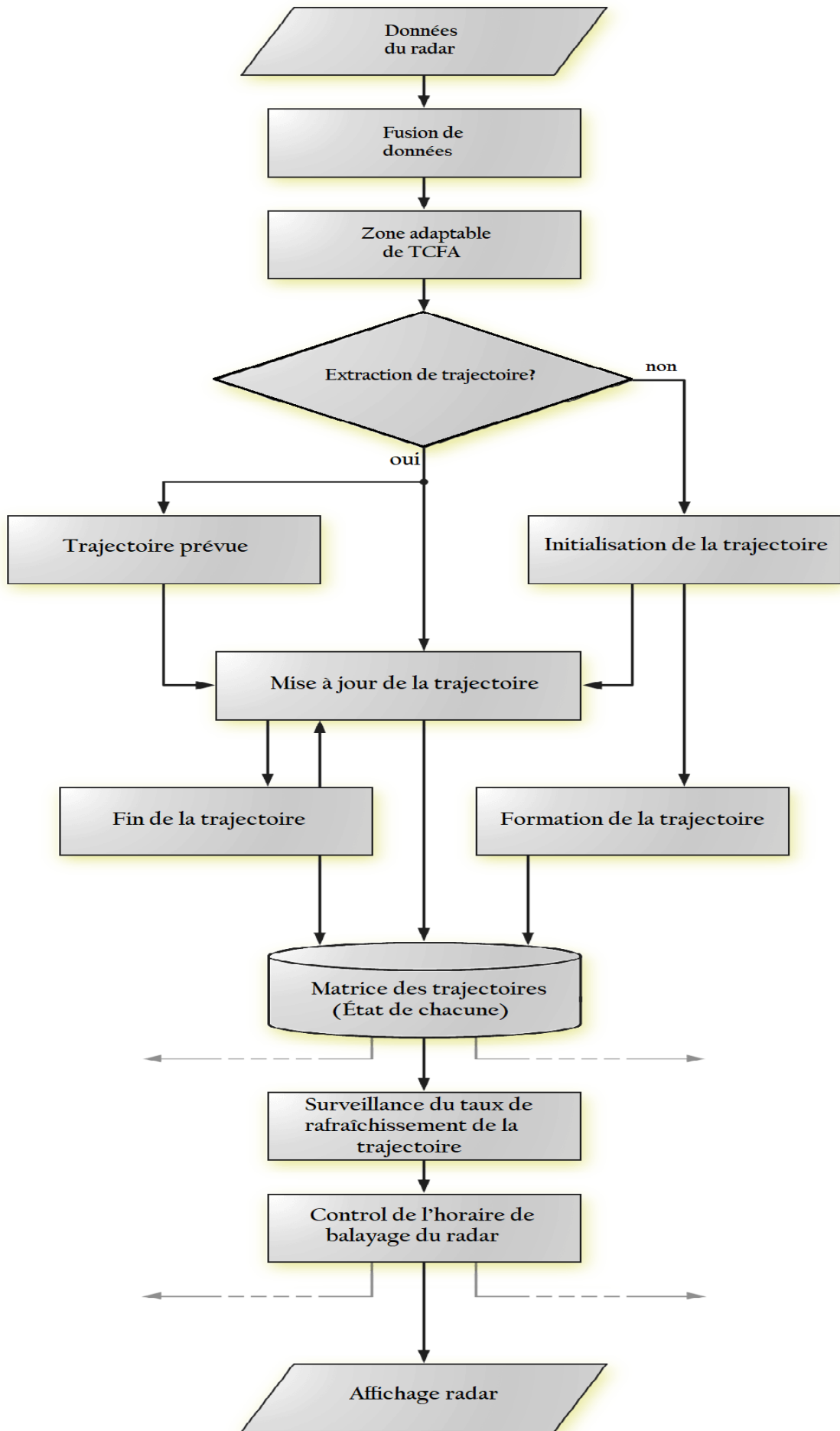


Figure III.1 : Processus de suivi des cibles

III.3. Systèmes de coordonnées

Pour déterminer la trajectoire de la cible indépendamment de l'assiette et du mouvement de la plateforme, vous devez effectuer des calculs à l'aide d'un système absolu de coordonnées.

Comme les mesures sont effectuées à l'aide d'un système de coordonnées radar (et donc à l'aide d'un système lié à la plateforme), les systèmes de coordonnées doivent être modifiés. En outre, l'emplacement de la cible est donné par le radar sous la forme de deux directions et portée, tandis que les calculs doivent être effectués à l'aide d'un système de coordonnées cartésiennes.

Les principaux systèmes de coordonnées [38] utilisés sont :

le système de coordonnées terrestres porté par l'aéronef x_0, y_0, z_0 (figure III.2) : ce système est centré sur le centre de gravité O , et défini par le plan horizontal contenant x_0 (c'est-à-dire pointant vers le nord) et y_0 (pointant vers l'est). L'axe z_0 est vertical et dirigé vers le bas. Dans ce système de coordonnées, une direction (ligne de visée) est définie par l'angle d'azimut θ_E , et l'angle de dépression θ_D (également appelé angle d'élévation θ_E).

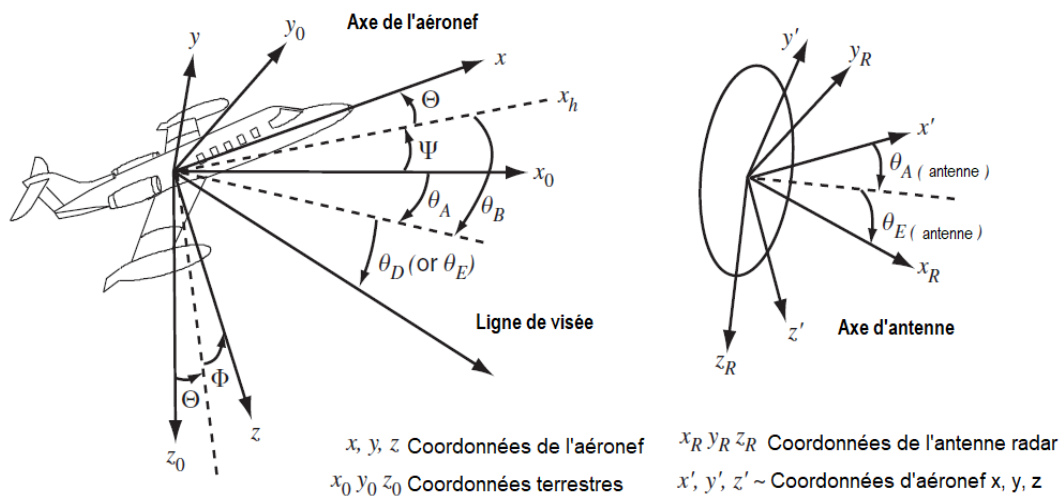


Figure III.2 Systèmes de coordonnées utilisés dans les radars aéroportés

Le système de coordonnées terrestres x_0, y_0, z_0 lié à l'avion (figure III.2) : L'axe x_0 est dans le plan vertical contenant l'axe de la plate-forme. Dans ce système de coordonnées, une direction est déterminée par l'angle de relèvement θ_B et l'angle de dépression θ_D , qui sont généralement appelés angle d'azimut θ_A et angle d'élévation θ_E .

Le système de coordonnées de l'aéronef x, y, z (figure III.2) : il est centré sur O . L'axe des x représente l'axe longitudinal de l'aéronef, l'axe des y est dans le plan de l'aile (à droite), et l'axe z est perpendiculaire à ce plan, pointant vers le bas. Ce système de coordonnées est déduit du système de coordonnées x_0, y_0, z_0 par des rotations successives :

- le lacet Ψ , qui transpose le système de coordonnées x_0, y_0, z_0 dans le système de coordonnées x_0, y_0, z_0 .

- le tangage, qui transpose l'axe x_h à l'axe x de l'avion

- le roulis Φ , qui place y dans le plan de l'aile Le système de coordonnées radar x', y', z' ne diffère de ce système de coordonnées avion que par l'alignement radar.

Le système de coordonnées des axes de l'antenne radar XR, YR, ZR : dans le cas d'une antenne à balayage mécanique, ce système de coordonnées est lié à l'antenne.

L'axe XR est perpendiculaire à la surface de l'antenne, et les axes YR et ZR sont les axes principaux de l'antenne. Dans le cas d'une antenne à balayage électronique, le système de coordonnées dépend de la direction de pointage XR . Il est relié au système de coordonnées du radar (sans stabilisation du roulis) par l'angle d'azimut θ_A et l'angle d'élévation θ_E de l'antenne. La direction de la cible est mesurée dans ce système de coordonnées ; elle est définie par la différence angulaire de l'antenne en azimut ΔA et en élévation ΔE [39].

III.4 Suivi d'une cible unique (STT : Single-Target Tracking)

III.4.1 Définition

Ce type de suivi (mono-Target [39] [40]) est caractérisé par un verrouillage sur une seule cible.

L'antenne est continuellement asservie à la direction de la cible, et seul le domaine distance-vitesse contenant la cible. Cependant, la détection ou l'acquisition automatique de la cible est effectuée, généralement avant la phase de poursuite proprement dite, dans une zone limitée centrée autour d'un marqueur qui donne l'emplacement approximatif de la cible. Ce marqueur est positionné soit manuellement par l'opérateur, soit automatiquement à partir des données fournies par le suivi ou par un radar de recherche.

Les différentes phases de la poursuite sont :

- l'acquisition
- le verrouillage des boucles de distance puis de vitesse
- le verrouillage des boucles angulaires

Nous allons examiner successivement ces trois aspects.

III.4.2 Acquisition-Présence

Cette phase d'initialisation du suivi consiste à déterminer la cellule de distance-élévation-azimut contenant la cible désignée dans laquelle les mesures doivent être effectuées. Cette porte de distance est recherchée dans un domaine limité (fenêtre de corrélation) dont la dimension dépend de la précision de la désignation (manuelle ou automatique).

Cette porte de distance est recherchée dans un domaine limité (fenêtre de corrélation) dont la dimension dépend de la précision de la désignation (manuelle ou automatique).

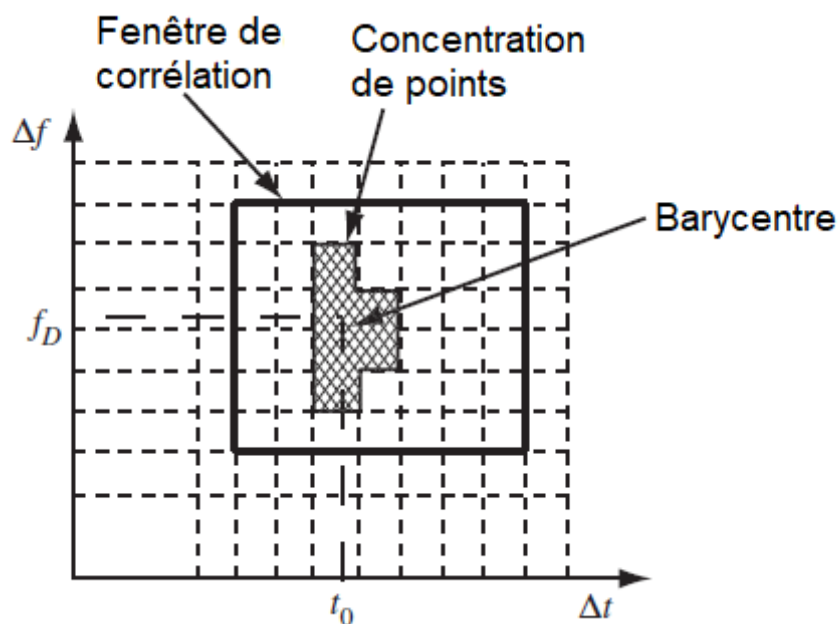


Figure III.3 Fenêtre de corrélation

III.4.3 Structure générale des boucles de poursuite

Supposons que x soit l'élément qui définit la cible à suivre (distance, vitesse, angles d'élévation ou d'azimut). Son estimation \hat{x} , est obtenue par une boucle de suivi dont la structure générale est illustrée à (la figure III.4). Cette estimation se compose

- un discriminateur qui mesure la différence, Δx , entre la valeur et son estimation

- un filtre qui détermine la fonction de transfert de la boucle.

Ce filtre est composé de deux intégrateurs de telle sorte que l'erreur d'estimation soit nulle pour une valeur variant à vitesse constante. L'entrée du premier intégrateur est proportionnelle à la dérivée seconde \ddot{x} (accélération). La sortie de cet intégrateur (la deuxième entrée de l'intégrateur) est proportionnelle à la dérivée \dot{x} (vitesse). La vitesse de la plate-forme \dot{x}_p est injectée à ce point. Lorsque la première entrée de l'intégrateur passe par zéro, la mémoire de vitesse est introduite (\hat{x}) ; elle évolue ensuite à vitesse constante sur la base des dernières données validées

- un marqueur de distance qui, à partir de la valeur estimée, positionne le dispositif permettant la mesure de Δx (portes de distance, filtres de fréquence ou positions d'antenne) [39].

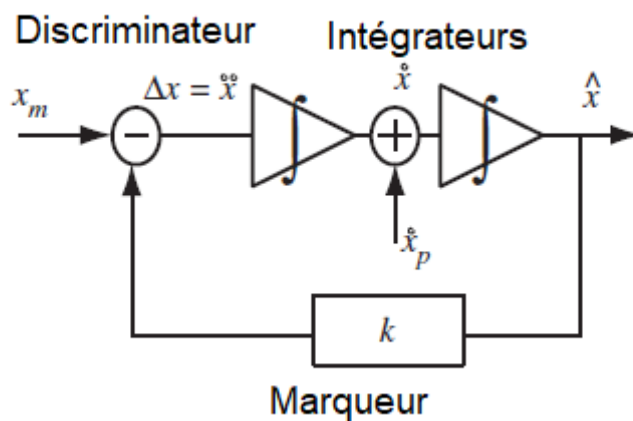


Figure III.4 Boucle de suivi

III.4.4 Suivi de la distance

Le traitement de la distance (filtre adapté et échantillonnage de la distance) est effectué avant le traitement de la vitesse et que, de plus, la distance et la vitesse doivent être connues afin de valider les données angulaires de la cible.

La boucle de suivi de distance comprend :

- le discriminateur
- la fonction de transfert de la boucle
- le marqueur de distance

III.4.4.1 Le discriminateur

Le discriminateur permet la mesure de la différence entre la portée de l'écho, mesurée par le délai t_0 , et la position de la porte centrale, mesurée par Δt_0 .

Ce délai est déterminé au moyen d'une mesure différentielle entre deux portes de distance consécutives (figure III.5).

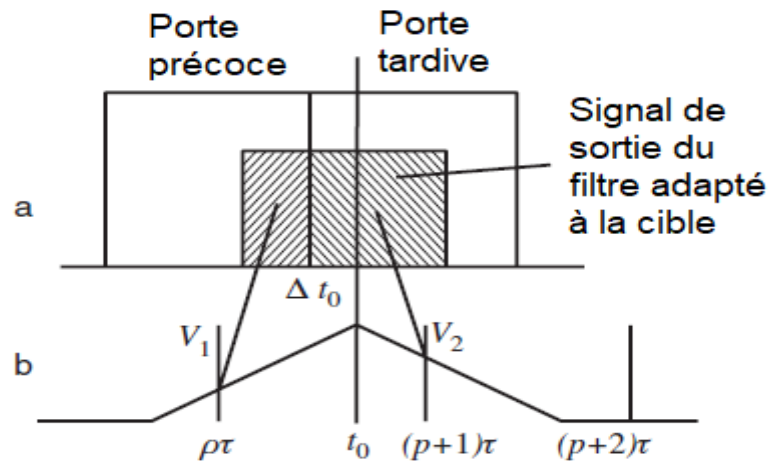


Figure III.5 Mesure de la portée

Le terme :

$$\Delta_D = \frac{(V_1) - (V_2)}{(V_1) + (V_2)} \quad (3.1)$$

Donne une mesure de $t_0 - \Delta t$ indépendamment de la puissance de l'écho.

III.4.4.2 La fonction de transfert de la boucle

La boucle est composée de deux intégrateurs qui assurent une erreur à retard nul pour une cible de vitesse radiale constante.

La deuxième entrée de l'intégrateur est proportionnelle à la vitesse radiale ; si la plate-forme radar est en mouvement, l'injection de la vitesse de la plate-forme à ce point limite la charge de travail de la boucle.

La première entrée de l'intégrateur est proportionnelle à l'accélération de la cible (qui est nulle dans le cas d'une cible à vitesse uniforme).

La bande passante de la boucle doit répondre à deux exigences :

- elle doit permettre une accélération rapide lors de l'acquisition.

- elle doit filtrer la mesure de la différence de position

Ces deux objectifs étant incompatibles, deux bandes passantes sont souvent nécessaires : une large bande passante pendant l'acquisition et une bande plus étroite (de l'ordre de 1 Hz) après la confirmation.

III.4.4.3 Le marqueur de distance

Le but de ce dispositif est de traduire le terme de portée calculé par la boucle en un retard, Δt , pour les portes d'échantillonnage (ou portes d'échantillonnage précédant et suivant l'impulsion reçue).

Il fournit un marqueur de distance qui libère les impulsions d'échantillonnage ou de sélection de plage.

III.5 Suivi d'angle

Dans ce type de poursuite, le faisceau de l'antenne reste pointé vers la cible. Comme la direction de pointage de l'antenne est définie par deux paramètres indépendants (angles d'élévation et d'azimut), le suivi est généralement composé de deux boucles indépendantes et identiques.

La structure de chaque boucle est similaire à la configuration générale (Figure III.3).

Il s'agit d'un servo-système classique avec deux intégrateurs contrôlant la position de l'antenne au moyen d'un servomécanisme (bande passante ≈ 1 Hz).

Dans les radars modernes, la différence de position angulaire est obtenue en utilisant la mesure monopulse.

Le signal $\vec{\Sigma}$ est utilisé pour la détection ; $\vec{\Sigma} = x(t)$.

Dans le cas d'une source ponctuelle sans bruit,

$$\vec{\Delta} \approx \vec{\Sigma} \tan \alpha, \quad (3.2)$$

Où α est l'écart angulaire par rapport à l'angle de gain maximal de l'antenne. Les signaux $\vec{\Sigma}$ et $\vec{\Delta}$ sont de même nature ; ils sont traités de la même manière dans des canaux parallèles identiques.

Les signaux $\vec{\Sigma}_{p,q}$ et $\vec{\Delta}_{p,q}$ échantillonnés en sortie du filtre Doppler q et de la cellule de distance p, qui sont exempts d'échos parasites, sont utilisés pour calculer la différence angulaire :

$$\Delta = \frac{\vec{\Sigma}_{pq} \cdot \vec{\Delta}_{pq}}{|\vec{\Sigma}_{pq}|^2} \quad (3.3)$$

III.6 Suivi des tracés

III.6.1 Définition

Ce mode de suivi permet la corrélation scan à scan des tracés dans les radars de recherche. Cette opération, qui était manuelle dans les premiers radars, est réalisée automatiquement par l'unité de traitement du radar qui présente à l'opérateur (ou au système) les seules informations utiles (tracé confirmé, configuration de la trajectoire, vecteur vitesse). La charge de travail de l'opérateur (dans les radars de recherche) est allégée.

La poursuite du tracé implique deux types d'opérations :

- l'estimation de la trajectoire
- la création et le maintien de la trace.

III.6.2 Estimation de la trajectoire

Considérons le cas simple du suivi dans lequel la position et la vitesse de la cible sont estimées par le filtre α, β à chaque fois que le faisceau de l'antenne illumine la cible. A titre d'exemple, nous considérerons l'un des systèmes de coordonnées, x (figure III.6), avec les définitions suivantes :

- x_i est la position réelle de x pendant l'illumination i
- \hat{x}_i est la position prédite avant l'illumination i
- x_{im} est la position mesurée pendant l'illumination i
- \bar{x}_i est la position corrigée après l'illumination i
- v_i est la vitesse corrigée après l'illumination i

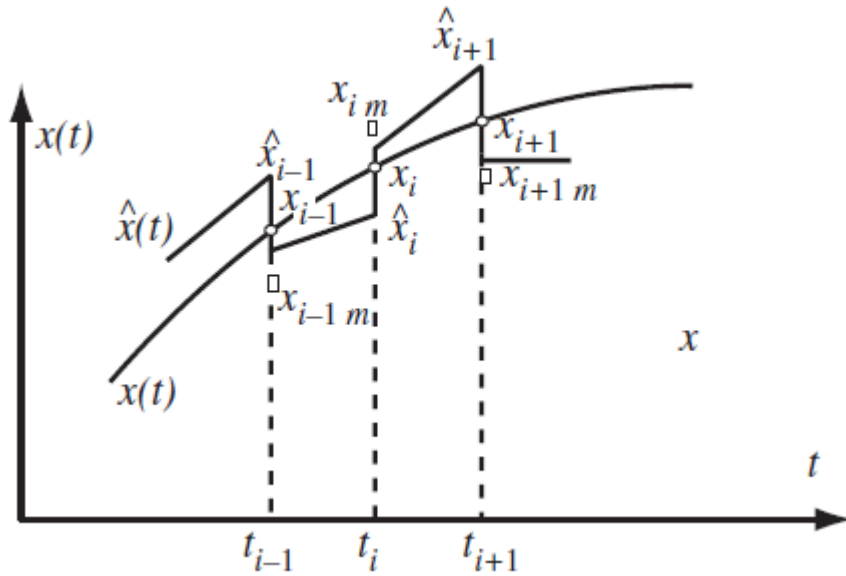


Figure III.6 Suivi

Juste avant l'illumination i , la valeur prédite de x est \hat{x}_i .

La position mesurée lors de l'illumination i est $x_{i m}$; la différence $(x_{i m} - x_i)$ est l'erreur de mesure réelle (bruit thermique, par exemple). En fait, $x_{i m}$ est mesurée en fonction de la valeur prédite \hat{x}_i , et les circuits de traitement du signal donnent la différence

$$\Delta x_i = x_{i m} - x_i \quad (3.4)$$

Après l'illumination i , les corrections suivantes sont effectuées :

- position de \hat{x}_i , avec $\bar{x}_i = x_i + \alpha(x_{i m} - x_i) = x_i + \alpha \Delta x_i$ (3.5)

- vitesse v_{i-1} , avec $v_i = v_{i-1} + \beta \frac{\Delta x_i}{T_p}$ (3.6)

Où T_p est le temps entre deux éclairages consécutifs.

Entre l'illumination i et $i + 1$, V_i est supposé constant et la position estimée est

$$x = \bar{x}_i + v_i t \quad (3.7)$$

Les coefficients α et β sont des coefficients correcteurs dont la fonction est de lisser la trajectoire. Si α et β sont petits, les valeurs de \bar{x}_i et v_i dépendent essentiellement des mesures effectuées avant i (de l'historique de la trajectoire) ; la nouvelle mesure ne sera pas très importante, et le bruit sera filtré.

Cependant, si la cible tente une manœuvre d'évitement (comme une accélération), le poids des mesures récentes devra être augmenté, et α et β devront être plus élevés. Ces coefficients ont donc une valeur importante et sont souvent adaptés en fonction des circonstances :

- α et β sont élevés au début du suivi (lorsque v est inconnu) ou bien lors d'une manœuvre d'évitement

- α et β sont faibles pour un suivi bien établi d'une cible au mouvement uniforme ou lorsqu'il y a un bruit mesuré important (faible SNR)

Les filtres à coefficient fixe (trackers α - β) ont l'avantage d'une mise en œuvre simple mais ils ne sont efficaces que si la cible est essentiellement sur une trajectoire rectiligne avec $PD = 1$. Une séquence à gain variable par filtrage de Kalman est préférable dans les situations complexes où une grande précision est requise.

III.6.3 Gestion et mise à jour du suivi

Considérons une piste qui a été initialisée. Avant le balayage, la localisation estimée (pour le paramètre x) est \hat{x}_i . A l'illumination i , une parcelle située à (proche de \hat{x}_i) est détectée. Cette trace appartient-elle à cette piste ou à une autre ? Ou bien s'agit-il d'un nouvel écho qui va initialiser une nouvelle piste ?

Pour répondre à ces questions, une fenêtre de prédiction est créée (figure III.3). Ses dimensions dépendent de

- la qualité des mesures
- l'historique de la piste
- Manœuvres d'évitement possibles

Si l'écho se trouve dans cette fenêtre (et est le seul dans la fenêtre), il est associé à cette trace. S'il y a plusieurs échos, ou si l'écho appartient à plusieurs fenêtres de prédiction (résultat de plusieurs trajectoires convergentes), la trajectoire la plus probable sera choisie pour chaque écho.

Si l'écho n'appartient à aucune fenêtre de prédiction, il s'agit d'une nouvelle cible (ou d'une fausse alarme), et nous devons attendre la prochaine série d'illuminations pour la confirmer et créer la piste correspondante.

Si une piste n'est pas mise à jour pendant plusieurs illuminations consécutives, elle est interrompue [39] [41].

III.7 Représentation de la variable d'état d'un système LTI

Un système linéaire invariant dans le temps (continu ou discret) peut être décrit mathématiquement à l'aide de trois variables. Ce sont les variables d'entrée, de sortie et d'état. Tout système LTI [41] [42] possède des objets observables ou mesurables (abstrait)

Dans le cas d'un système radar, la portée peut être un objet mesuré ou observé par le filtre de poursuite du radar. Les états peuvent être dérivés de nombreuses manières différentes. Dans le cadre de cet ouvrage, les états d'un objet ou d'un abstrait sont les composantes du vecteur qui contient l'objet et ses dérivées temporelles. Par exemple, un vecteur d'état unidimensionnel d'ordre 3 (dans ce cas, la distance) représentant la distance peut être donné par la formule suivante

$$x = \begin{bmatrix} R \\ \dot{R} \\ \ddot{R} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

où R , \dot{R} , et \ddot{R} sont, respectivement, la mesure de la portée, le taux de portée (vitesse), et l'accélération. Le vecteur d'état défini dans l'équation (III.8) peut être représentatif d'états continus ou discrets. Dans cet ouvrage, l'accent est mis sur la représentation en temps discret, puisque la plupart des traitements de signaux radar sont exécutés à l'aide d'ordinateurs numériques. A cet effet, un vecteur d'état à n dimensions a la forme suivante :

$$x = [x_1 \dot{x}_1 \dots x_2 \dot{x}_2 \dots x_n \dot{x}_n]^t \quad (3.9)$$

Le système LTI qui nous intéresse peut être représenté à l'aide des équations d'état suivantes :

$$\dot{x}(t) = A x(t) + Bw(t) \quad (3.10)$$

$$y(t) = C x(t) + Dw(t) \quad (3.11)$$

où : \dot{x} est la valeur du vecteur d'état $n \times 1$; y est la valeur du vecteur de sortie $p \times 1$; w est la valeur du vecteur d'entrée $m \times 1$; A, B, C, D est des matrices $n \times n$; $n \times m$; $p \times n$; $p \times m$.

La solution homogène (c'est-à-dire $w=0$) de ce système linéaire, en supposant une condition initiale connue $x(0)$ au temps t_0 , a la forme suivante

$$x(t) = \Phi(t - t_0)x(t_0) \quad (3.12)$$

La matrice Φ est connue comme la matrice de transition d'état, ou matrice fondamentale, et est égale à

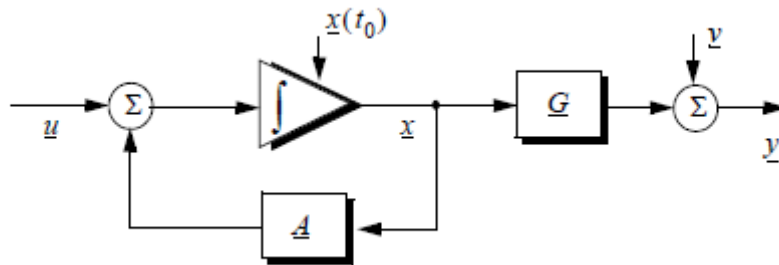


Figure III.7 Système LTI

Le système LTI illustré à la (Fig. III.6). Ce système peut être décrit par les équations vectorielles différentielles du premier ordre suivantes

$$\dot{x}(t) = A x(t) + U(t) \quad (3.13)$$

$$y(t) = G x(t) + V(t) \quad (3.14)$$

Où y est la partie observable du système (c'est-à-dire la sortie), U est une force motrice et V est le bruit de mesure.

Les matrices A et G varient en fonction du système. Le bruit d'observation V est supposé être non corrélé.

III.8 Suivi pendant le balayage (TWS)

Ce type de poursuite permet une mesure relativement précise des paramètres de la cible (distance, vitesse et angles d'azimut et d'élévation) pendant que la fonction de recherche continue de fonctionner [49].

L'antenne continue donc de fonctionner en mode de balayage (comme pour un suivi de tracé) et les informations de suivi (mesures monopulse) sont mises à jour pendant que le faisceau de l'antenne est dirigé vers la cible. La différence entre le suivi du tracé et le TWS réside dans les mesures de différence (en distance, vitesse, angles d'azimut et d'élévation) qui sont calculées de la même manière que pour le STT. Par

rapport au suivi de parcelle, la précision est meilleure et le suivi en élévation est possible (ce qui n'est généralement pas le cas avec le suivi de parcelle).

L'acquisition, la mise à jour de la trajectoire et l'estimation de la trajectoire sont effectuées de la même manière que pour le suivi du tracé [40] [41].

III.9 Filtres de poursuite

L'un des principaux objectifs d'un filtre de poursuite est de diminuer l'effet de l'observation du bruit sur la mesure.

Les algorithmes de poursuite $\alpha\beta$, $\alpha\beta\gamma$ et Kalman sont utilisés pour déterminer les estimées de la position et de la vitesse d'une cible mobile. En plus, ils ont aussi la capacité de prédiction qui peut être utilisé pour éviter les collisions dans les applications de contrôle de trafic civil et militaire [45].

III.9.1 Filtre à gain fixe

Cette classe de filtres [47] (ou estimateurs) est également connue sous le nom de filtres à "coefficient fixe". Les exemples les plus courants de cette classe de filtres sont les filtres $\alpha\beta$ et $\alpha\beta\gamma$ et leurs variantes. Les traqueurs $\alpha\beta$ et $\alpha\beta\gamma$ sont des filtres unidimensionnels de second et troisième ordre, respectivement. Ils sont équivalents à des cas particuliers du filtre de Kalman unidimensionnel [43]. La structure générale de cette classe d'estimateurs est similaire à celle du filtre de Kalman.

III.9.2 Le filtre $\alpha\beta$

Le filtre $\alpha\beta$ est un cas particulier du filtre de Kalman, il est utilisé dans plusieurs applications de poursuite de cible. Etant donné que, le filtre est défini pour chaque axe, on va se contenter de donner les équations du filtre pour l'axe générique x.

Considérons un objet qui se déplace à une vitesse constante suivant l'axe x (modèle de deuxième ordre), les composantes du vecteur d'état sont dans ce cas la position x et la vitesse v_x .

L'estimation de l'état à l'instant k en appliquant le filtre $\alpha\beta$ est donnée par :

$$\hat{x}(k+1 | k+1) = \hat{x}(k+1 | k) + \alpha (z(k+1) - z(k+1 | k)) \quad (3.15)$$

$$v_x(k+1 | k+1) = v_x(k+1 | k) + \frac{\beta}{T} (z(k+1) - z(k+1 | k)) \quad (3.16)$$

Où α et β sont les coefficients du gain d'adaptation et $z(k+1 | k)$ est la mesure prédite.

Les mêmes équations (3.15) et (3.16) sont donc appliquées aux autres dimensions suivant les axes y et z .

Le gain du filtre $\alpha\beta$ est donné par :

$$W = \left[\alpha \quad \frac{\beta}{T} \right]^T \quad (3.17)$$

III.9.3 Filtre $\alpha\beta\gamma$

Ce filtre est appliqué pour poursuivre une cible qui se déplace à accélération constante (filtre d'ordre supérieur). Les composantes du vecteur d'état, dans ce cas, sont la position la vitesse et l'accélération.

Les estimées de la position et la vitesse sont calculées par les mêmes équations (3.15) et (3.16) du filtre $\alpha\beta$ et l'estimée de l'accélération est donnée par l'équation (3.17) :

$$a_x(k+1 | k+1) = a_x(k+1 | k) + \frac{\gamma}{T^2} (z(k+1) - z(k+1 | k)) \quad (3.17)$$

Le gain du *filtre* $\alpha\beta\gamma$ est donné par :

$$W = \left[\alpha \quad \frac{\beta}{T} \quad \frac{\gamma}{T^2} \right]^q \quad (3.18)$$

III.9.4 Le filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est un outil mathématique qui peut être employé pour résoudre des problèmes stochastiques d'estimations à partir des mesures bruitées issues des capteurs [54] [52].

Ce filtre est essentiellement un ensemble d'équations mathématiques qui réalisent à chaque itération deux phases (la prédiction et la correction). Pour chaque pas de calcul, le vecteur d'état est calculé selon un modèle d'évolution (étape de prédiction), et il est corrigé en fonction des mesures du système (étape de correction) [53].

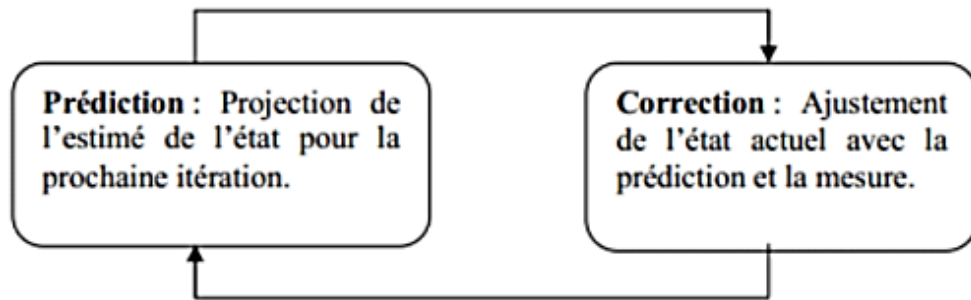


Figure III.9 : Le cycle du filtre de Kalman

Présentation du filtre de Kalman :

2.5.1- Formulation linéaire :

Les équations de base du filtre de Kalman sont alors les suivantes [50] :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + W_k W_k \rightarrow N(0, Q_k) \\ y_k = H_k x_k + v_k v_k \rightarrow B(0, R_k) \end{array} \right\} \quad (3.19)$$

Avec :

x_k : Vecteur d'état à l'instant k qui inclut les quantités à estimer, de taille $n \times 1$

A_k : Matrice de transition. Elle décrit l'évolution du vecteur d'état de l'instant $k - 1$ à l'instant k , de taille $n \times n$.

B_k : Matrice de commande à l'instant k , dépend de la modélisation du système ;

H_k : Matrice d'observation (mesure). Elle est en fait le lien entre les paramètres du système et les mesures. De taille $m \times n$;

u_k : Vecteur représentant les commandes appliquées au système à l'instant k

W_k : Bruit de modélisation lié à l'incertitude que l'on a sur le modèle de processus

Q_k : Matrice de variances-covariances du bruit de processus à l'instant k .

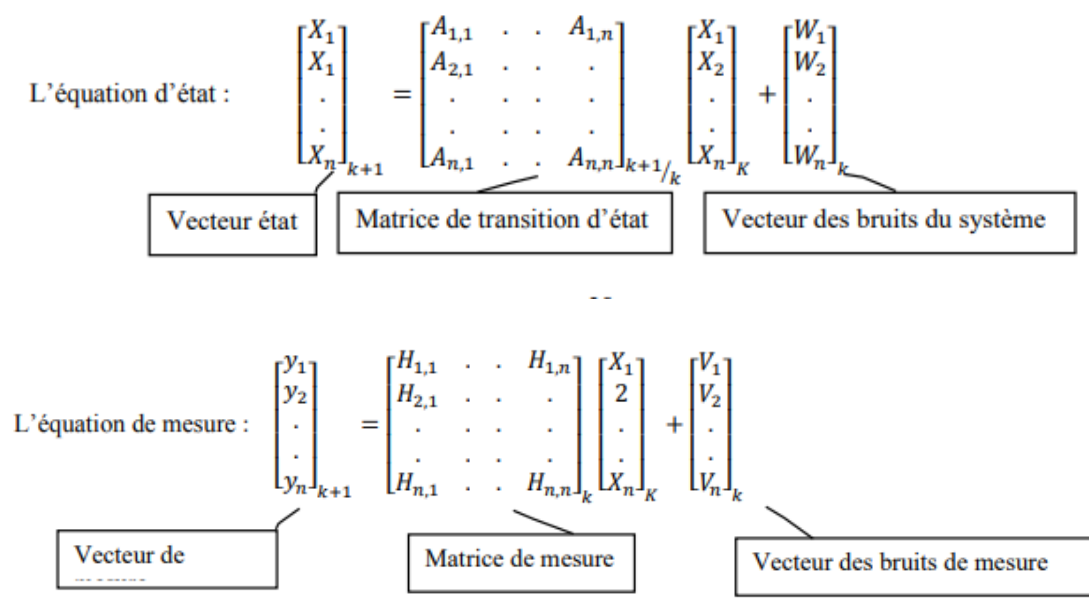
y_k : Vecteur de mesure à l'instant k , de taille $m \times 1$

v_k : Bruit de mesure, de taille $m \times 1$.

R_k : Matrice de variances-covariances du bruit de mesure à l'instant k .

Formulation matricielle :

Les équations de base du filtre de Kalman sont traduites sous forme des matrices réduites[45] :



Fonctionnement du filtre de Kalman :

Le filtrage de Kalman comporte deux phases distinctes : Prédiction et mise à jour (correction). La phase de prédiction utilise l'état estimé de l'instant précédent pour produire une estimation courante. Dans l'étape de mise à jour, les observations de l'instant courant sont utilisées pour corriger l'état prédit dans le but d'obtenir une estimation plus précise [50] [51].

La phase de prédiction :

On se place à l'instant k. A cet instant, on dispose d'une estimation initiale fondée sur la connaissance du processus et des mesures jusqu'à l'instant précédent, c'est-à-dire k- 1. Cette estimation est appelée estimation à priori.

Si on notera $\hat{x}_{k/(k-1)}$ l'estimation d'état à priori, donc l'erreur à priori est donnée par:

$$e_{k/(k-1)} = x_k - \hat{x}_{k/(k-1)} \tag{3.20}$$

Les équations de la correction sont

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}_{k/(k-1)} = A_{k-1}\hat{x}_{k-1/(k-1)} + B_{k-1}u_{k-1} \\ P_{k/(k-1)} = A_{k-1}P_{k-1/(k-1)}A_{k-1}^T + Q_{k-1} \end{array} \right\} \quad (3.21)$$

La phase de mise à jour (correction) :

Pour corriger l'estimation à priori $\hat{x}_{k/(k-1)}$ et obtenir l'estimation à posteriori

$\hat{x}_{k/(k)}$ on utilise la mesure y_k .

L'erreur à posteriori est :

$$e_{k/k} = x_k - \hat{x}_{k/k} \quad (3.22)$$

Les équations de la phase de correction sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}_{k/(k)} = \hat{x}_{k/(k-1)} + K_k(y_k - H_k\hat{x}_{k/(k-1)}) \\ P_{k/k} = (1 - H_kK_k)P_{k/(k-1)} \end{array} \right\} \quad (3.23)$$

I : est la matrice identité de même taille que $P_{k/(k-1)}$

Gain de Kalman optimal :

$$K_k = P_{k/(k-1)}H_k^T(H_kP_{k/(k-1)}H_k^T + R_k)^{-1} \quad (3.24)$$

Algorithme du filtre de Kalman :

On base sur les cinq équations fondamentales de filtre, Les différentes étapes du calcul sont les suivantes :

1) Initialisation (conditions initiales):

Lors de l'exécution de l'algorithme il est nécessaire d'initialiser les grandeurs suivantes :

- ✓ Le Vecteur d'état initial,
- ✓ La Matrice de covariance d'erreur associée au vecteur d'état initial,
- ✓ La Matrice de covariance des bruits du système,
- ✓ La Matrice de covariance des bruits de mesures,
- ✓ La Matrice de transition d'état,

✓ La Matrice de mesure.

2) Calcul de l'estimé $\hat{x}_{k/(k-1)}$ et de la matrice de covariance $P_{k/(k-1)}$ à partir des mesures disponibles à l'instant $k-1$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}_{k/(k-1)} = A_{k-1}\hat{x}_{k-1/(k-1)} + B_{k-1}u_{k-1} \\ P_{k/(k-1)} = A_{k-1}P_{k-1}A_{k-1}^T + A_{k-1}Q_{k-1} \end{array} \right\} \quad (3.25)$$

3) Calcul du gain de Kalman :

$$K_k = P_{k/(k-1)}H_k^T(H_kP_{k/(k-1)}H_k^T + R_k)^{-1} \quad (3.26)$$

4) Mise à jour de l'estimation :

$$\hat{x}_{k/(k)} = \hat{x}_{k/(k-1)} + K_k(y_k - H_k\hat{x}_{k/(k-1)}) \quad (3.27)$$

5) Calcul de la matrice de covariance de l'erreur :

$$P_{k/k} = (1 - H_kK_k)P_{k/(k-1)} \quad (3.28)$$

6) Préparation du pas suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{x}_{(k+1)/(k)} = A_k\hat{x}_{k/(k)} + B_ku_k \\ P_{(k+1)/(k)} = A_kP_{k/(k)}A_k^T + Q_k \end{array} \right\} \quad (3.29)$$

III.10 Conclusion

Ce chapitre a passé en revue les principales techniques permettant de suivre un ou plusieurs objets dans l'espace. Le but était de donner un bref aperçu des types de méthodes existants et non de faire une liste exhaustive de toute la littérature sur le sujet. Il ressort de ce chapitre des points importants permettant de définir la qualité d'un algorithme de suivi.

Les caractéristiques d'un bon algorithme de suivi sont les suivantes. Tout d'abord la méthode doit être capable d'initialiser automatiquement les cibles. Elle doit de plus être robuste aux changements. Enfin, la méthode doit permettre de continuer à suivre la cible même en cas d'occultations partielles ou totales par un autre objet.

CHAPITRE IV : Simulation

Pour ce dernier chapitre, après avoir vu les différentes techniques de suivi de la cible radar, et les filtres de poursuite aussi on va le simuler maintenant en créant des modèles. L'objectif est donc :

IV.1 Outils de développement Matlab R2014a

La simulation se fait avec le logiciel MATLAB ; Ce logiciel, qui est connu par sa performance en termes de calcul matriciel à syntaxe simple, fournit des outils remarquables dans plusieurs domaines comme en électronique, en informatique, en télécommunication, en mécanique, etc.

Avec ses fonctions spécialisées, MATLAB peut être aussi considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques. MATLAB est un interpréteur: les instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne. MATLAB fonctionne dans plusieurs environnements tels que Xwindows, Windows, Macintosh.

GUIDE ou (graphical user interface development environment) ou encore l'environnement du développement de l'interface graphique de l'utilisateur, fournit un ensemble d'outils pour créer des interfaces graphiques de l'utilisateur (GUIs). Ces outils simplifient le processus de présenter et programmer GUIs.

IV.2 Pourquoi utiliser Matlab

Matlab est un langage de haut niveau qui permet l'exécution de tâches nécessitant une grande puissance de calcul et dont la mise en œuvre sera bien simple et rapide. Ce langage possède des avantages très intéressants tels que:

- Il est facile d'accéder et visualiser nos données sur Matlab.
- Facilité de manipulation des matrices ce qui est un point fort et important dans le cas de notre application.
- Un large choix de bibliothèques qui prennent en charge tous les outils mathématiques.
- Utile au traitement et à l'analyse.
- Il existe beaucoup d'algorithmes pour l'extraction des caractéristiques et l'apprentissage automatique.

- Il propose un ensemble d'algorithmes et d'outils graphiques de référence pour le traitement, l'analyse, la visualisation et le développement d'algorithmes.
- Nous pouvons accéder aux contributions des utilisateurs sur site de la communauté d'utilisateurs de Matlab central [42].

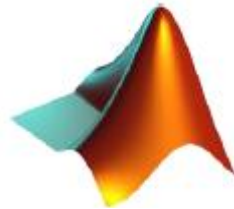


Figure IV : *Extension MATLAB*

IV.3 Fonction MATLAB "kalman_filter.m"

Donc tout d'abord pour implémenter le filtre de kalman on a 5 étapes :

1. Déclaration des variables globales et variables communes

La cible se déplace maintenant le long de l'axe x avec une vitesse de 20m/s. La position de départ de la cible est de 10 m le long de l'axe x avec une vitesse de 20m/s. temps d'échantillonnage $T=0,01$ seconde, temps total=5 secondes. Le bruit de la mesure a une moyenne nulle et un écart type de 1,2.

2.1. La partie prédiction

2.2. La partie estimation

3. Calcul de la moyenne des résultats pour éliminer l'incertitude.

4. Statistiques (erreur quadratique moyenne)

5. Tracé du graphique

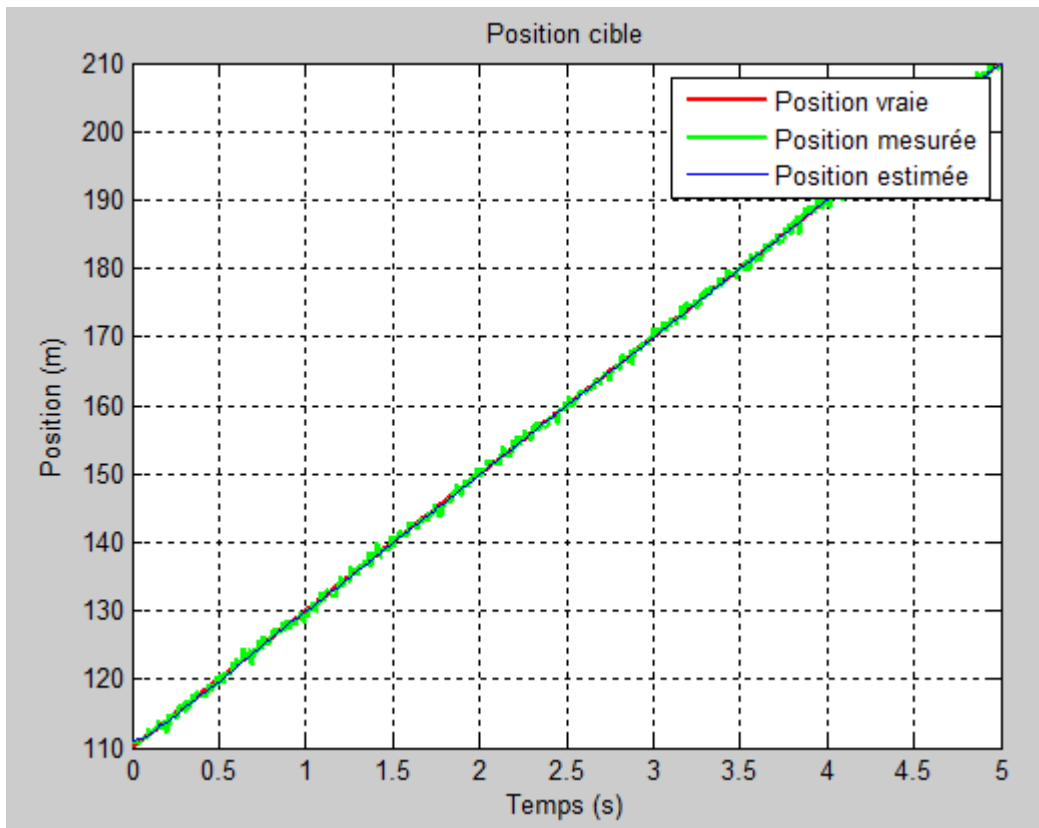


Figure IV.1: Position de la cible par rapport au temps

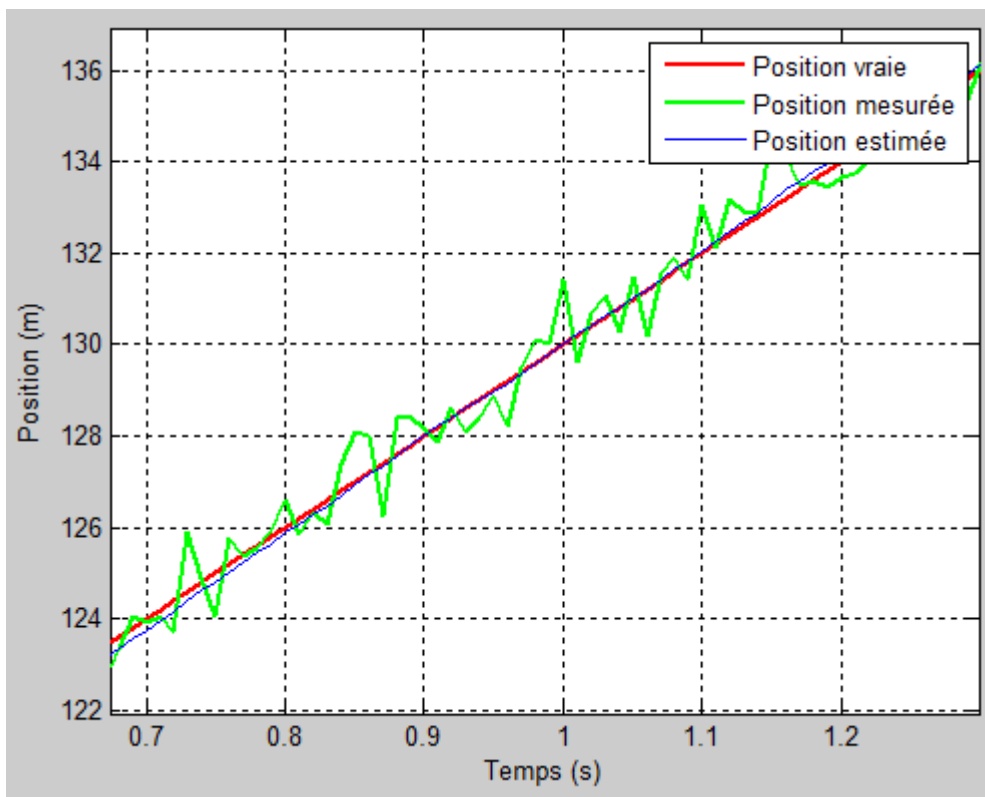


Figure IV.1.a: fait un Zoom de Position (vraie, mesurée, estimée)

Commentaire :

Les valeurs de la position estimée et mesurée (couleur bleue pour la position estimée et le vert pour position mesuré) sont très proches de la valeur réelle (couleur rouge). Ceci montre l'efficacité de l'estimation de l'état du système.

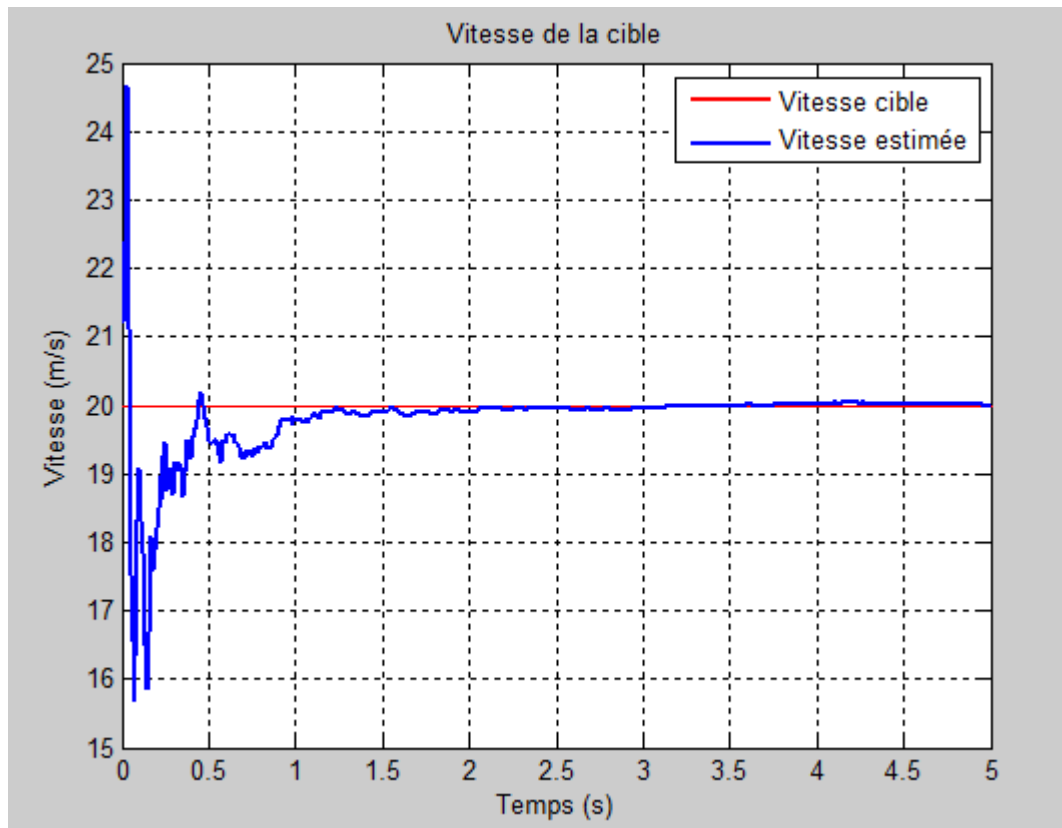


Figure IV.2 : la vitesse de la cible par rapport à la valeur de vitesse estimée

On remarque que la vitesse estimée de la cible prend 1 seconde pour devenir parfait et proche de la vitesse cible

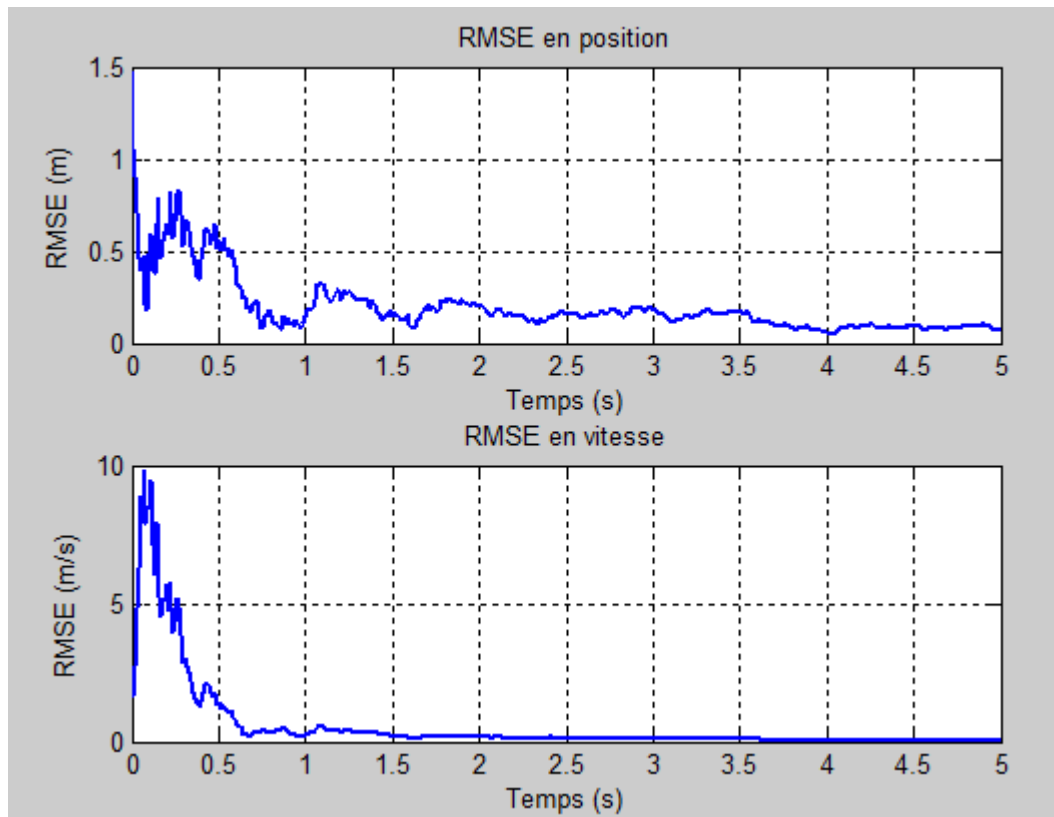


Figure IV.3 : l'erreur quadratique moyenne de la vitesse et la position de cible.

La valeur RMSE se calcule par la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne entre la grandeur réelle et sa estimée (Les figures 4.2 et 4.3)

On regard que RMSE est a été réduit à la valeur zéro. L'erreur a été minimisée par rapport à temps et est proche à zéro en 5 secondes, ce signifie que le filtre de kalman est minimise l'erreur quadratique moyenne de la position et la vitesse efficacement.

IV.4 Présentation de l'application

A cette fin, l'espace de travail de l'interface graphique de MATLAB intitulé "kalman_gui.m" a été développé. Il est illustré à la (Figure IV.2). Dans cette conception, les entrées peuvent être initialisées pour correspondre à l'un ou l'autre type de cible (avion). Par exemple, lorsque vous cliquez sur le bouton "réinitialisation de l'avion", les coordonnées initiales de détection x , y et z du avion sont chargées dans le champ "Lieu de départ". La vitesse correspondante de la cible est également chargée dans le champ "Vitesse dans la direction x ". Enfin, tous les autres champs associés au filtre de Kalman sont également chargés à l'aide de valeurs par défaut qui sont appropriées pour cette étude de cas de conception. Notez que l'utilisateur peut modifier ces entrées si nécessaire.

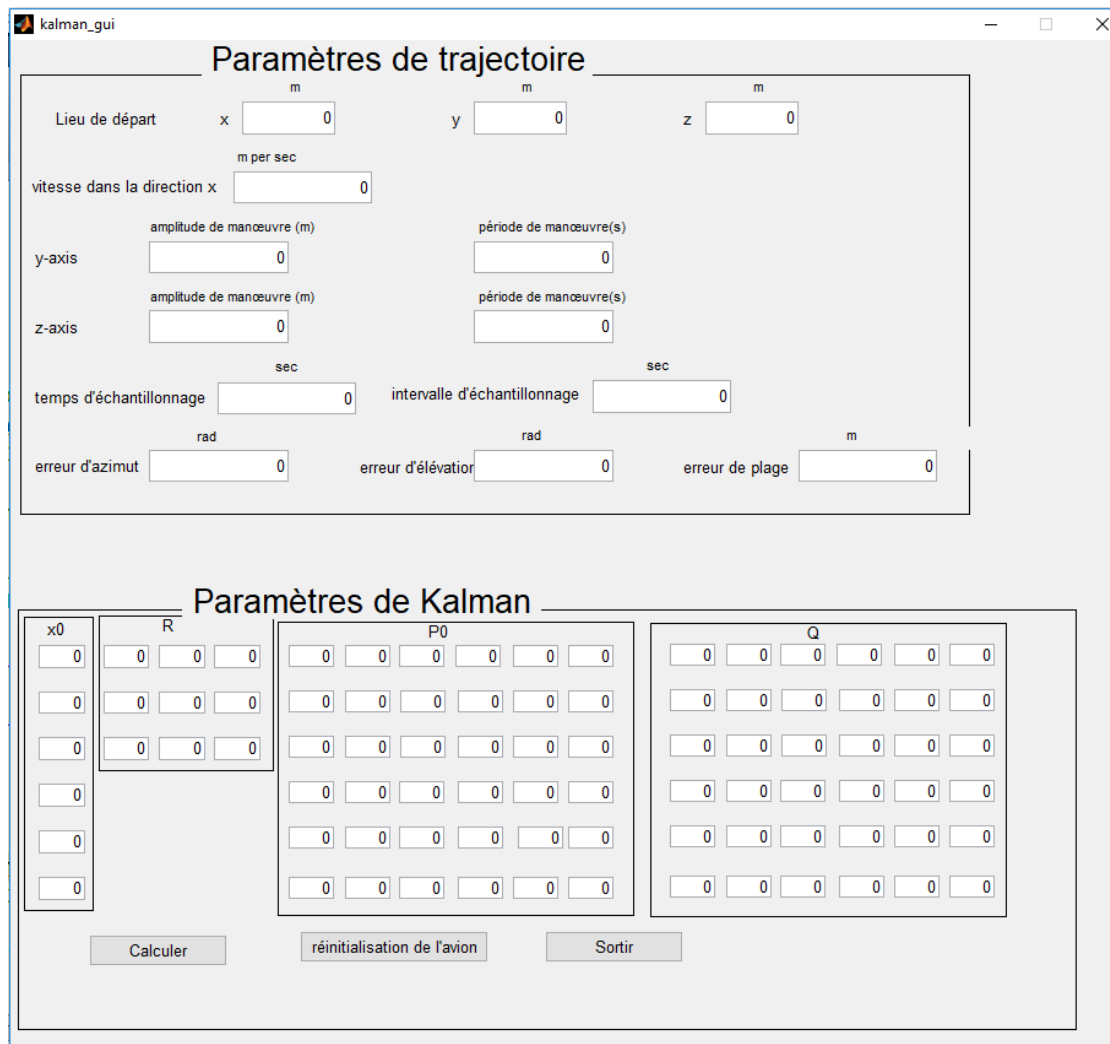


Figure IV.4. Espace de travail MATLAB GUI associé à la conception "MyRadar".

Ce programme génère une trajectoire fictive pour le type de cible sélectionné.

Ensuite, le programme corrompt la trajectoire en y ajoutant du bruit blanc de Guassien. Ceci est réalisé par la fonction "*addnoise.m*"

Un filtre de Kalman à six états nommé "*kalfilt.m*" est ensuite utilisé pour effectuer la tâche de suivi.

Les erreurs d'azimut, d'élévation et de distance sont entrées dans le programme à l'aide de leurs champs correspondants sur l'interface graphique. Dans cet exemple, ces entrées sont supposées constantes tout au long de la simulation.

Dans cet exemple, le radar est situé à $(x, y, z) = (0, 0, 0)$. Cette simulation calcule et trace les sorties suivantes :

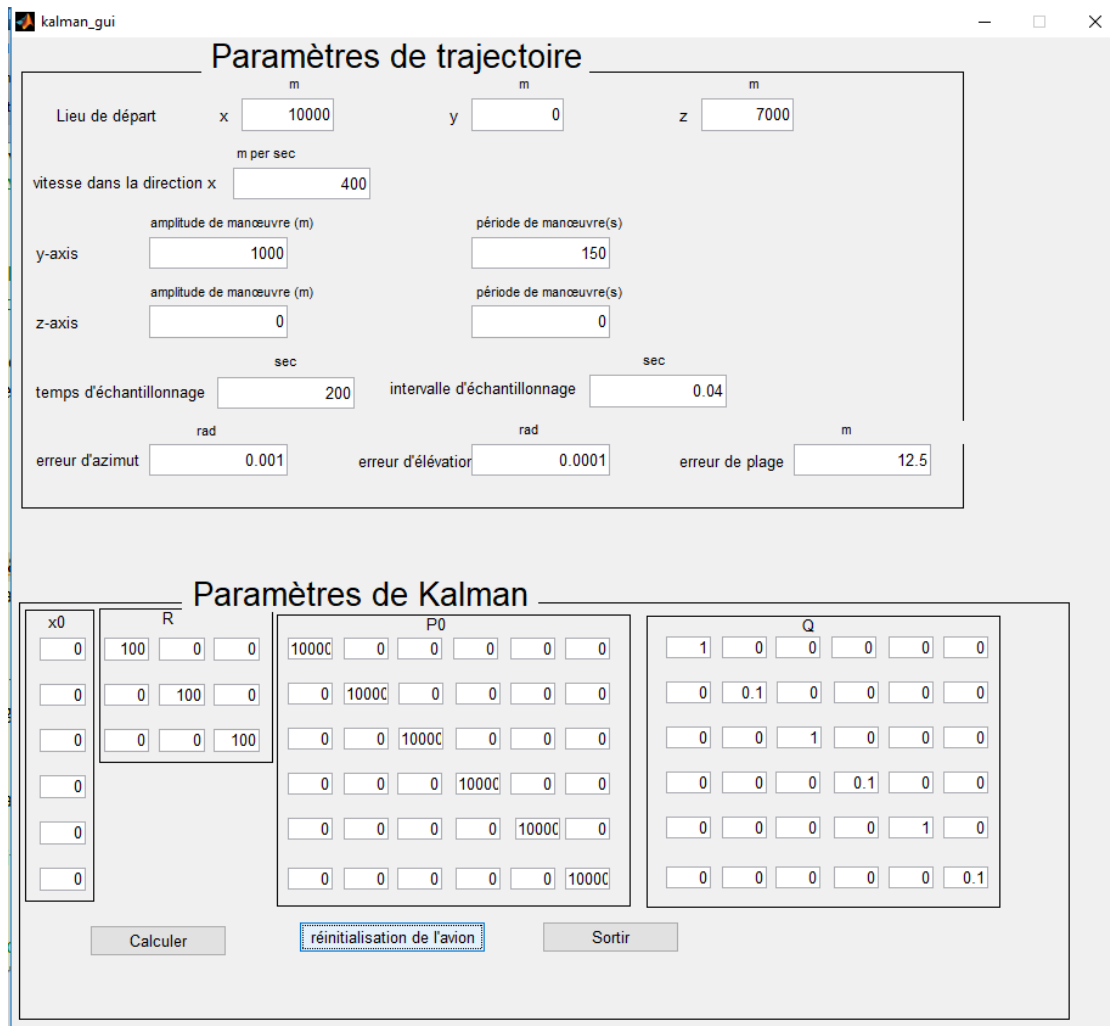


Figure IV.4.a Espace de travail MATLAB GUI

Tableau IV.1. Liste des sorties générées par la simulation "*kalman_gui.m*".

Figure #	Description
IV.5	trajectoire d'entrée non corrompue
IV.6	trajectoire d'entrée corrompue
IV.7	position x corrompue et non corrompue
IV.8	position y corrompue et non corrompue
IV.9	position z corrompue et non corrompue
IV.10	La trajectoire de la cible sur x, y et z
IV.11	Vitesse vrai et estimé de la cible sur X Y Z
IV.12	la position de la cible sur X Y Z
IV.13	Gains du filtre de Kalman en fonction du temps

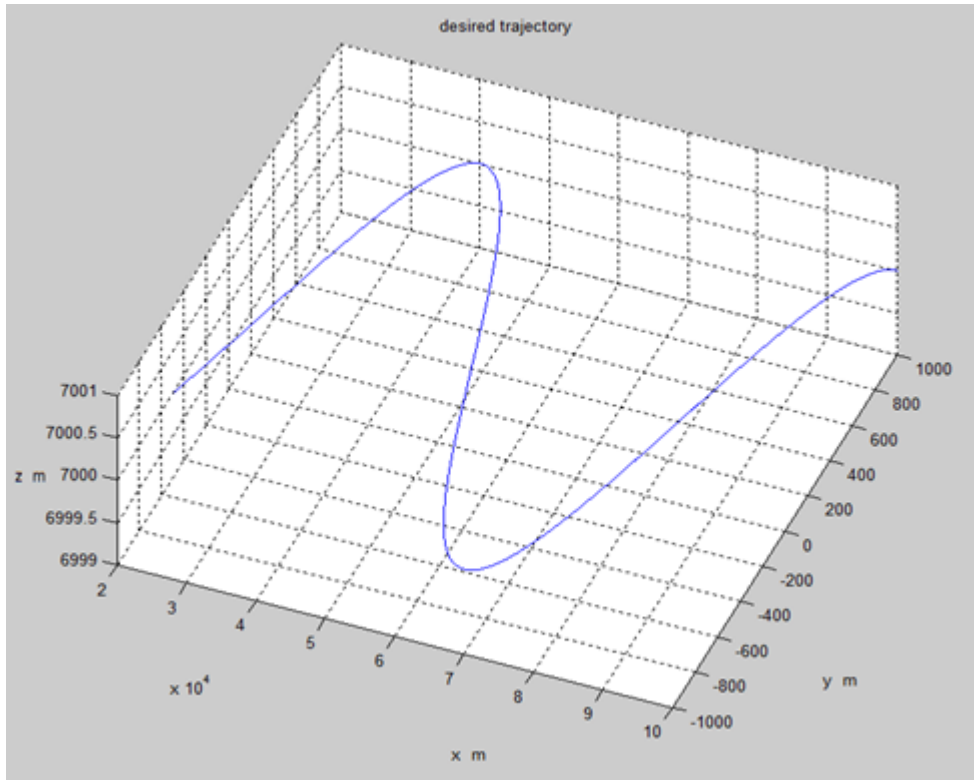


Figure IV.5. Trajectoire non corrompue de la cible

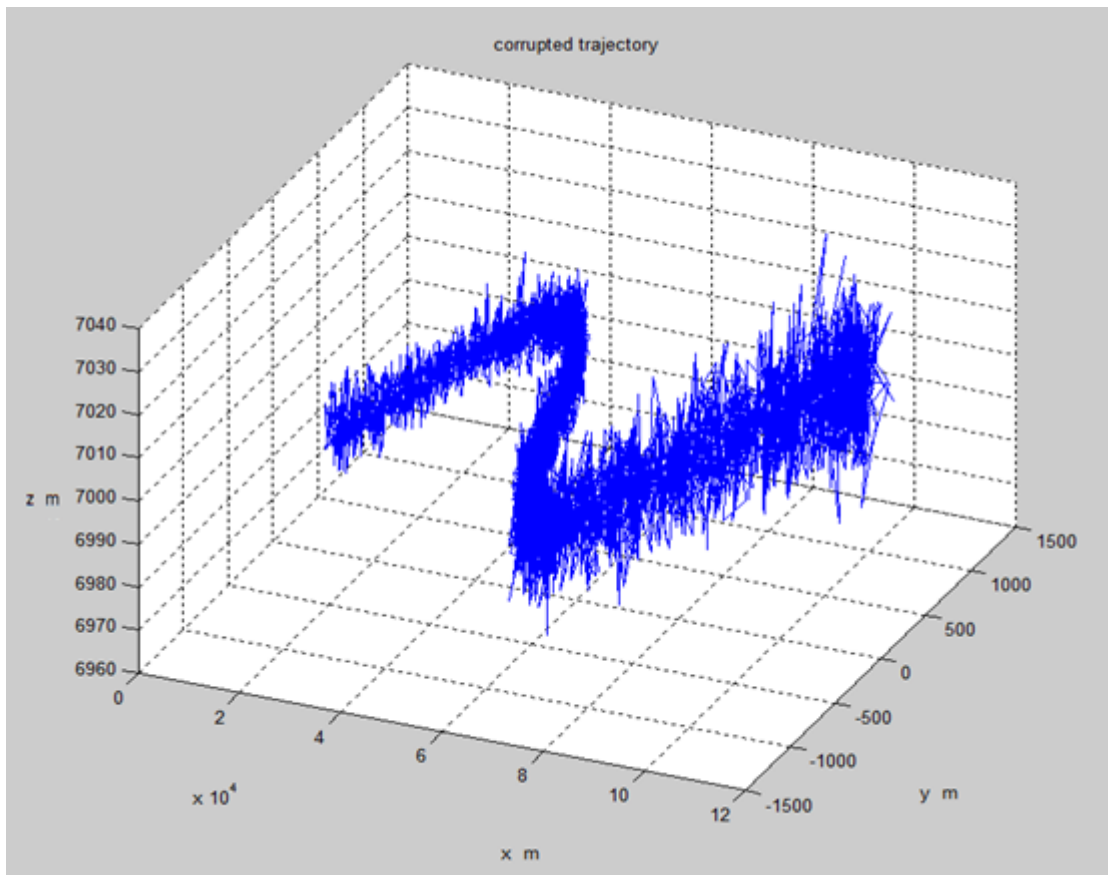


Figure IV.6. Trajectoire corrompue d'une cible.

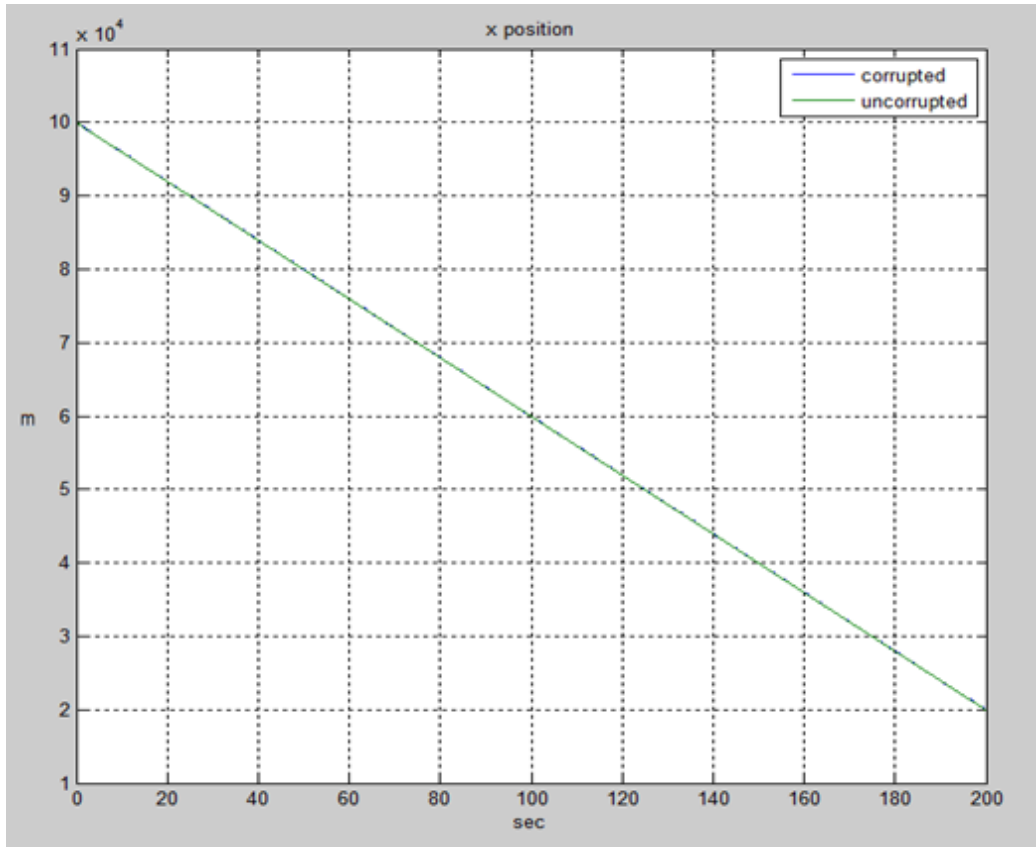


Figure IV.7. Position x de la cible corrompue et non corrompue

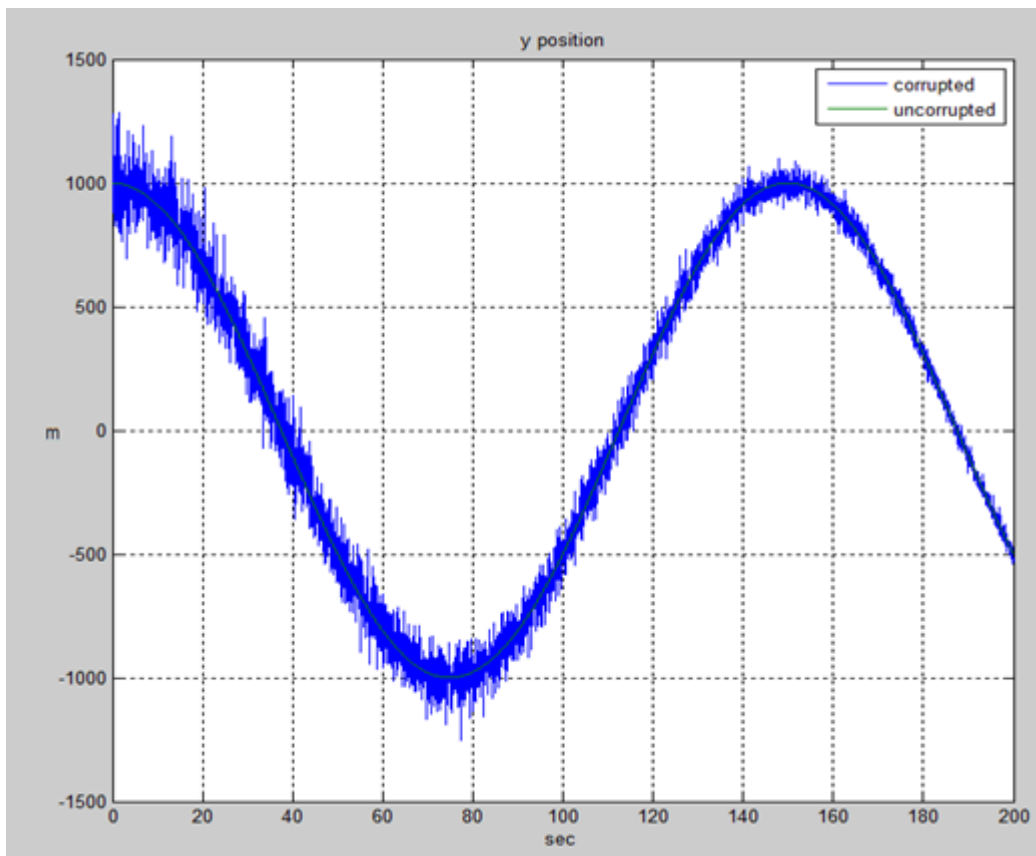


Figure IV.8. Position y de la cible corrompue et non corrompue

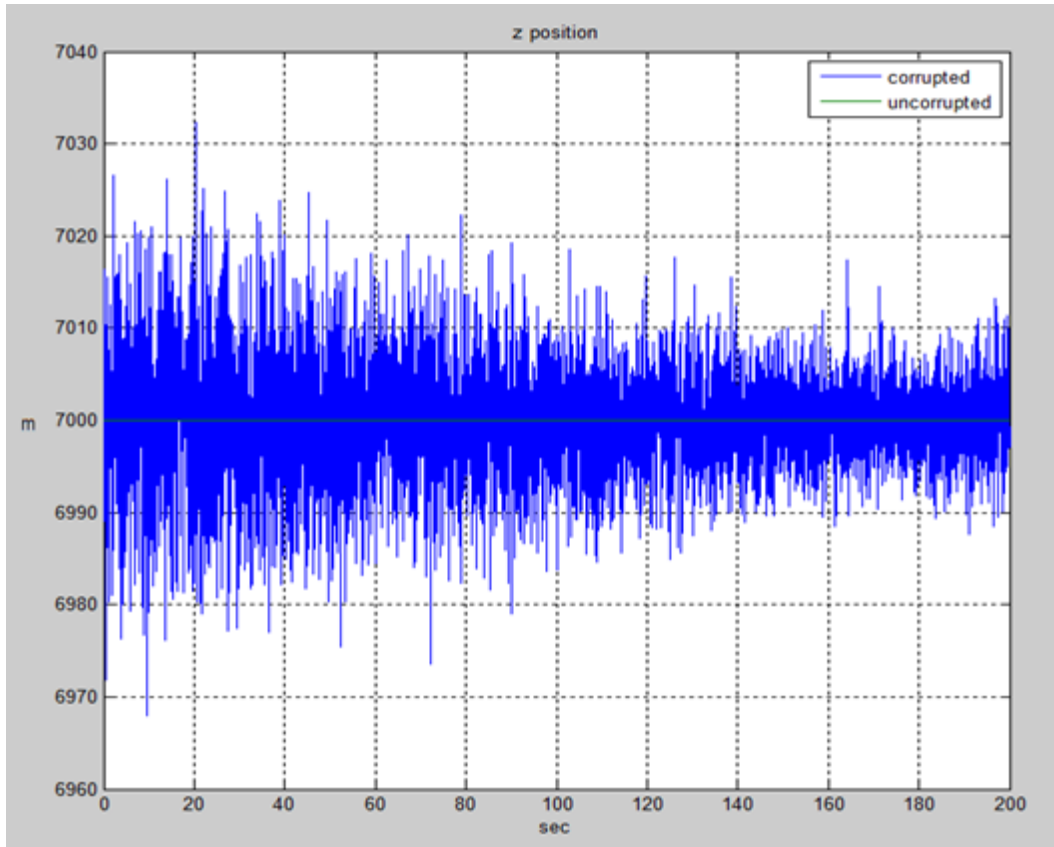


Figure IV.9. Position z de la cible corrompue et non corrompue

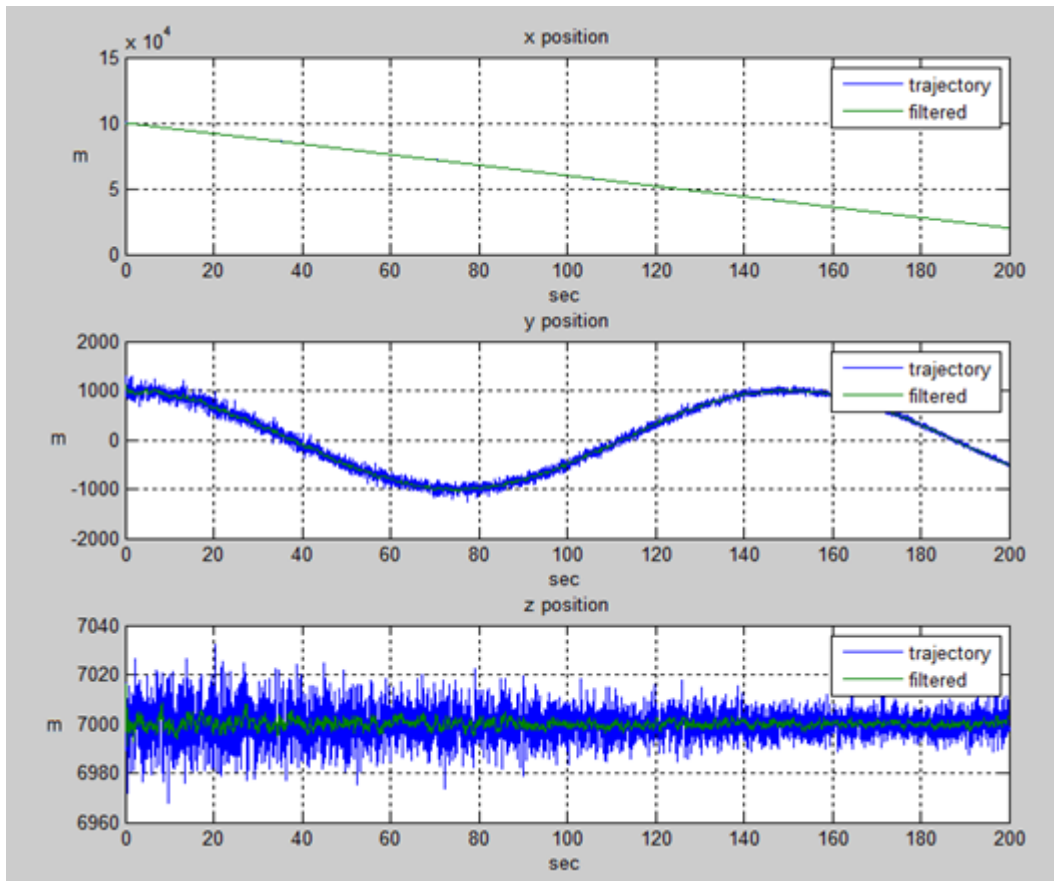


Figure IV.10 Trajectoire de la cible sur X Y et Z.

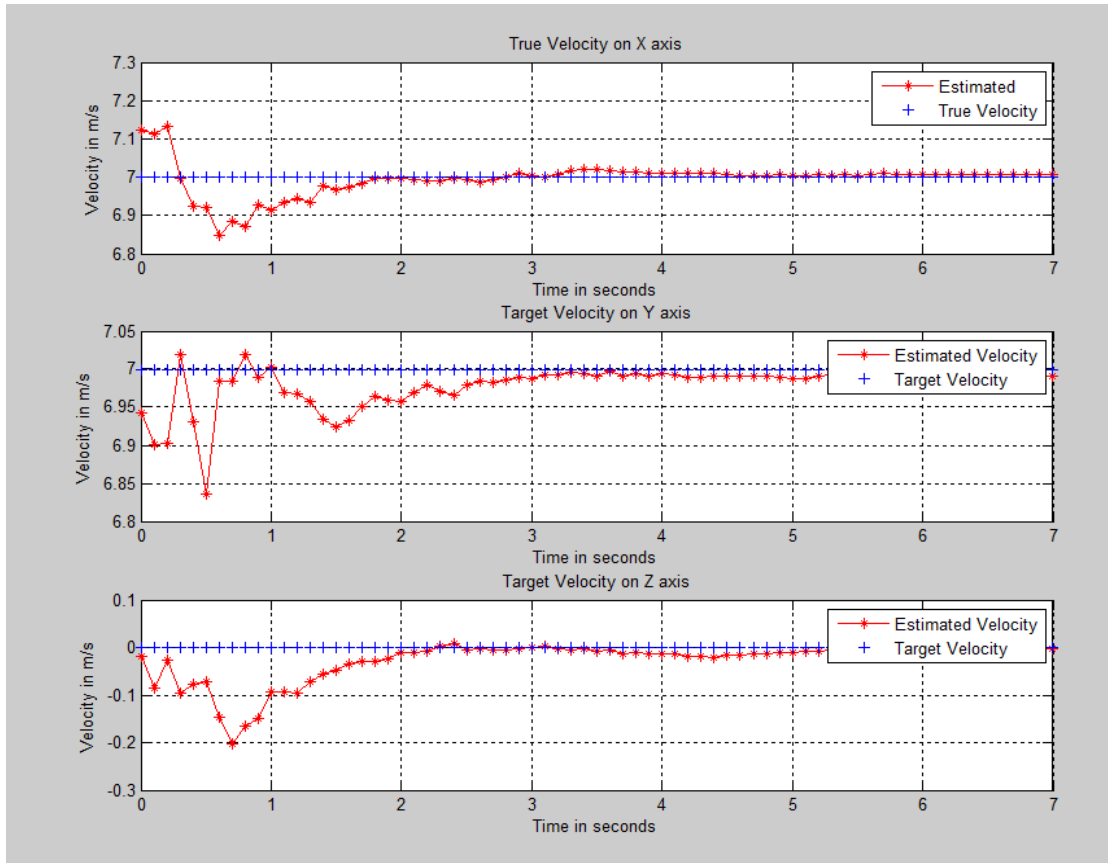


Figure IV.11 Vitesse vrai et estimé de la cible sur X Y et Z

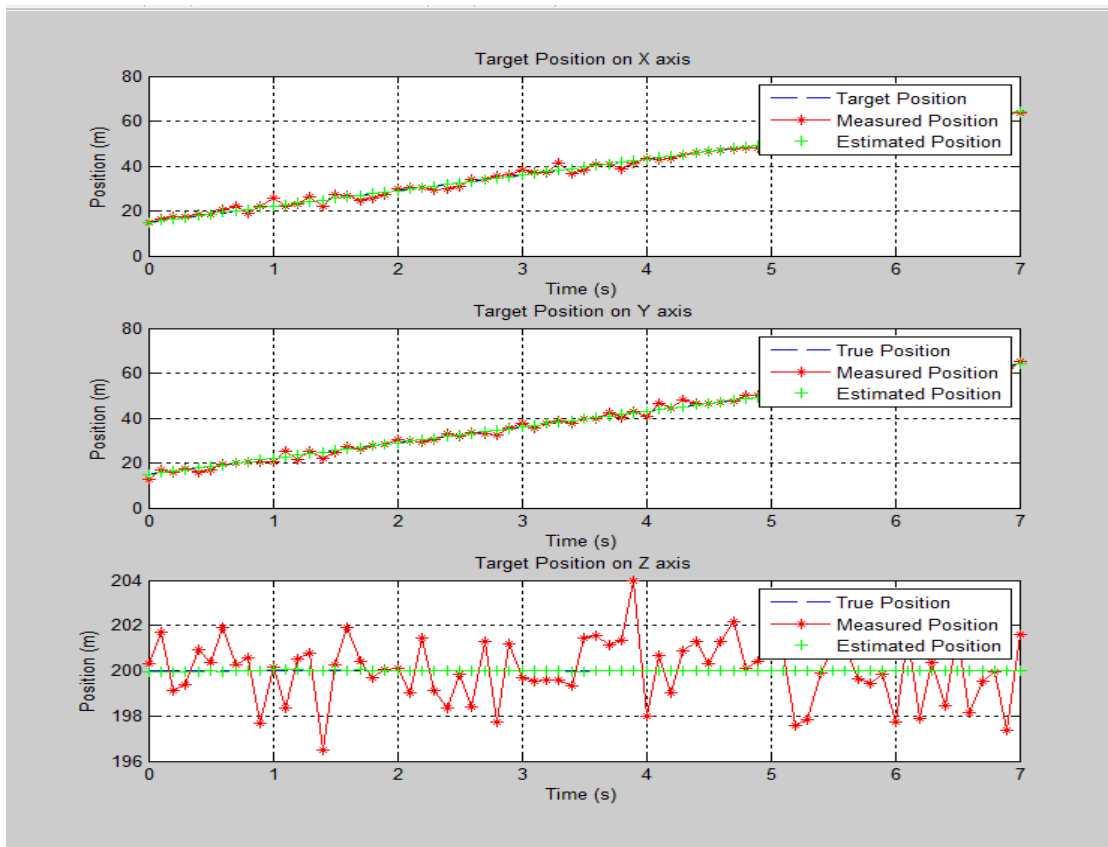


Figure IV.12 la position de la cible sur X Y et Z

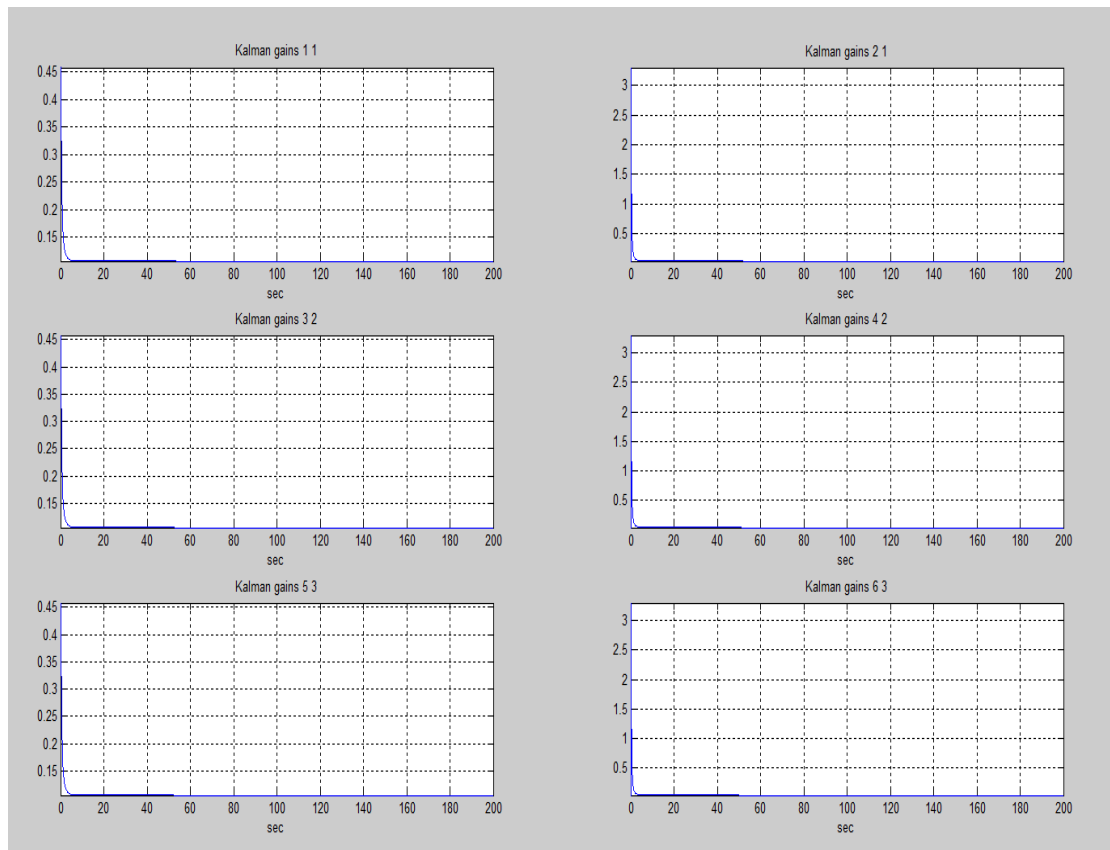


Figure IV.13 Gains du filtre de Kalman en fonction du temps

Le filtre de Kalman nécessite le bon choix des valeurs initiales du vecteur d'état $\hat{x}(0)$ et sa matrice de covariance $P(0)$

IV.5 Conclusion :

Le Filtre de Kalman est une approche statistique, d'assimilation de données, dont le principe est de corriger la trajectoire du modèle en combinant les observations avec l'information fournie par le modèle de façon à minimiser l'erreur entre l'état vrai et l'état estimé.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié l'observateur de Kalman et abordé le problème d'estimation d'état des systèmes linéaires et leurs applications pour le diagnostic de défauts.

L'algorithme du filtre est un processus en deux étapes : la première étape consiste à prédire l'état du système et la seconde étape utilise les mesures bruitées pour affiner l'estimation de l'état du système.

Il y a désormais plusieurs variantes du filtre Kalman d'origine. Ces filtres sont largement utilisés dans le cadre d'applications qui reposent sur l'estimation, parmi lesquelles la vision par ordinateur, les systèmes de guidage et de navigation, l'économétrie et le traitement du signal.

Les résultats de simulation de l'application de cette méthode sur un système linéaire ont montré qu'elle permet une bonne détection de défauts et cela, pour différents types de défauts.

Ces résultats obtenus montrent aussi que les méthodes de diagnostic à base d'observateurs sont très encourageantes, principalement en présence de bruits. L'observateur de KALMAN est devenu l'un des moyens les plus utilisés dans le domaine de la détection de défauts grâce à une bonne robustesse vis-à-vis des incertitudes, des bruits et des perturbations en plus d'une détection rapide des défauts et la génération de plusieurs résidus.

Ce travail peut être développé pour le cas des systèmes de nature non linéaire.

Objectifs (idéalement):

- Présenter les concepts de base, l'importance et les problèmes liés au suivi de trajectoires ou de déformation.
- Connaître les techniques de tracking par mise en correspondances de jetons et notamment le filtrage de Kalman avec prise en compte des incertitudes en détection.

Explorer les techniques adaptées au suivi de tracking multi-cibles.

Références bibliographiques

- [1] Laroussi, T., 'Détection adaptative CFAR de cibles chi-square corrélées à plusieurs degrés de liberté en présence de fouillis Rayleigh corrèle,' Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Constantine.
- [2] « The Early History of RADAR », Proceedings of the Institute of Radio Engineers, Institute of electrical and electronics engineers.
- [3] l'article de Wikipédia en anglais intitulé « Radar ».
- [4] C. Arnaud, "Etude et conception d'un système de caractérisation fonctionnelle d'amplificateur de puissance en mode CW pulse," 2001.
- [5] Thème MODELISATION D'UN RADAR SECONDAIRE POUR UN TRAFIC AERIEN Chapitre 01 : Généralités sur les radars; univ-batna2. inj ACHACHI ABDELALI.
- [6] Barkat, M., 'Signal Detection and Estimation', Boston: Artech House, 2005, Second Edition.
- [7] Rickard, J. T., et Dillard, G. M., 'Adaptive detection algorithms for multiple target situations,' IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 338-343.
- [8] Livre numérique Radar handbook 3e éd Auteur : Merrill I Skolnik; William W Shrader; chap. 1.4, p. 929.
- [9] J. Darricau, Physique et Théorie du Radar. 1993. Target and Clutter Scattering and their Effects on Military Radar Performance, NATO, chap 01 Radar
- [10] Radar tutorial ; Editeur: Christian Wolff, classification du système radar, Ondes et bandes de fréquences
- [11] Axelsson, S.R.J." Noise Radar for range/Doppler processing and digital beamforming using low-bit ADC" *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 41, Issue 12, Dec. 2003
- [12] fr.wikipedia.org/wiki/Radar
- [13] P. Vaillant et C. Paumier, "Types de radar et fréquences", Radartutorial Chapitre 2, Éditeur: Christian Wolff.
- [14] F.Chatelet le radar secondaire et ses évolutions école nationale de l'aviation civile département d'électronique pp 1-24.
- [15] Site de boowiki.info controle-du-traffic-aerien Transponder
- [16] A. Achachi, "Modelisation de radar secondaire pour un trafic aérien," Thèse de Magister, Université de Batna, 2010.
- [17] Détection adaptative CFAR appliquée au Radar Secondaire de Surveillance (SSR) pour l'élimination du Â« fruit Â» par Abdellah BOUIBA Université Saad Dahlab de Blida
- [18] Chapitre Radar secondaire; Editeur: Christian Wolff, traduction en langue française et révision: Pierre Vaillant
- [19] Systèmes de surveillance et anticollision - Aviation Civile
- [20] fr.linkfang.org/Radar_secondaire
- [21] DIVERS / TECHNIQUE Comprendre les transpondeurs et les modes A, C, S 31 décembre 2019 - by Dylan Agbagni
- [22] modélisation d'un radar secondaire pour un trafic aérien d'ACHACHI ABDELALI Chapitre 2
- [23] wikipedia Radar_secondaire (consulté le 13 juin 2021)
- [24] techno-science.net (consulté le 20 juin 2021)
- [25] Radar secondaire par honneur et patrie calameo.com book /000413241fb90d4c60b81
- [26] Tutorials point radar systems quick guide

- [27] Détection adaptative CFAR appliquée au Radar Secondaire de Surveillance (SSR) pour l'élimination du « fruit » par Abdellah BOUIBA Université Saad Dahlab de Blida - Magister en aéronautique 2012
- [28] Effet Doppler: Applications en télédétection (Radar - Sonar - Echographie) Chapitre 2. Radar et aéronautique consulté le 20 juin
- [29] F.Chatelet, le radar secondaire et ses évolutions, école nationale de l'aviation civile département d'électronique
- [30] Détection adaptative CFAR appliquée au Radar Secondaire de Surveillance (SSR) pour l'élimination du « fruit » par Abdellah BOUIBA Université Saad Dahlab de Blida - Magister en aéronautique 2012
- [31] Livre de Radar Monopulse et Traitement par Charbel Quenum site calameo.com
- [32] Écartométrie Antennes actives - Techniques de l'Ingénieur
- [33] P.LEFEVRE, Système de surveillance du contrôle de trafic aérien civil, Conférence arts et Métiers, Paris, 02 Février 2015.
- [34] Transpondeur - A/C -Mode S - ADS-B - Aero Hesbaye www.aero-hesbaye dossiers transpondeur_S
- [35] Maneuvering Target Tracking Overview and the Role of Imaging Sensors en anglais de M. MARITON Directeur des Etudes et Recherches de Laboratoire de Traitement des Images et du Signal pp 117-120
- [36] Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace thèse d'obtention doctorat de titre : Estimation de paramètres de vol avion et détection de pannes capteurs. Pp : 21 Avec filtre de kalman page 32
- [37] Radar tutorial processing sp21 Editeur: Christian Wolff
- [38] Modélisation et identification de comportements de l'avion en vol turbulent par modèles à retards chapitre 2. Ecole Centrale de Lille, 2006
- [39] Livre de: Air and Spaceborne Radar Systems: An Introduction chapter 9 (2001 by William Andrew Publishing, LLC)
- [40] Livre de: Radar and Inverse Scattering chapter tracking radar page 688 Department of Electrical Engineering, National Taiwan University, 2007.
- [41] MATLAB Simulations for Radar Systems Design Bassem R. Mahafza, Atef El sherbeni
- [42] RADAR SYSTEMS ANALYSIS AND DESIGN USING MATLAB THIRD EDITION chapter 17 International Standard Book Number-13: 978-1-4398-8496-6 (eBook - PDF)
- [43] Thème Les algorithmes adaptatifs de poursuite de cible Ecole nationale polytechnique Alger
- [44] National Defense Industry Press and Springer Science+Business Media Singapore 2017 Group-target Tracking
- [45] Suivi et calcul de la trajectoire d'une personne dans un environnement fermé Faculté des sciences Laboratoire de recherche en informatique
- [46] Livre de : Kalman Filtering Techniques for Radar Tracking K.V. Ramachandran.1 p.2
- [47] Livre de Simon, D. Optimal state estimation: Kalman, H-infinity, and nonlinear approaches. John Wiley & Sons
- [48] Thème de Poursuite de cible par le filtrage de kalman université Saad dahlab Blida
- [49] Livre de RADAR SYSTEMS ANALYSIS AND DESIGN USING MATLAB® THIRD EDITION BASSEM R. MAHAFZA
- [50] These de doctorat Application du filtre de Kalman linéaire et non linéaire et ses dérivées à la poursuite d'une cible manoeuvrante
- [51] Livre Introduction au filtre de Kalman (D.Alazard Octobre 2006 - version 0.2)
- [52] Mémoire en mastère Intitulé : Observateurs et détection de défauts

- [53] Thème Les algorithmes adaptatifs de poursuite de cible ; Ecole national polyethnique
[54] Introduction au filtre de Kalman. Notes de cours sessions Matlab, D.Alazard P 27.