REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Mécatronique

Thème

Etude d'un système de protection COV
Contre Objet Volent par les techniques de le Dôme de fer

Présenté par

- YOUSRI FOUAD
- ACHIR AHMED SALAH EDDINE

Proposé et Dirigé par

PROF. ABU DURA SALAM

Promotion Juin 2024

بِسْمِ

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu le tout puissant, seigneur de l'univers de nous avoir accordé la puissance et la volonté pour achever ce travail.

Ce travail a été effectué au département Génie mécanique de l'université de YAHIA FARES DE MEDEA.

Nous tenons à exprimer tout notre respect et notre gratitude à notre superviseur, ***Mr. Salam Abu dura****, pour avoir supervisé ce travail pendant cette période :*

Merci pour votre indéfectible disponibilité, votre rigueur scientifique et la confiance que vous nous avez accorder au cours de l'élaboration de ce mémoire ; merci pour l'acuité de vos critiques et vos conseils éclairés ; merci pour vos orientations et votre savoir dont nous avons pu bénéficier au cours de nombreuses discussions. Veuillez trouver dans ces pages une infimes partie de notre infinie reconnaissance.

Nos vifs remerciements vont aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons également à remercier tous nos enseignants de département Génie mécanique qui nous ont assurés une formation solide et qui nous ont permis d'acquérir des connaissances.

Nous tenons à saisir dans cette occasion et adresser nos profonds remerciements à nos familles et nos amis qui par leurs encouragements, nous avons pu surmonter tous les obstacles.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail

素材天下 sucaisucai.com 编号：05877365

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

À ma mère bien-aimée, Il n'existe aucune sincérité qui puisse exprimer l'amour, l'appréciation, la sincérité et le respect que j'ai toujours pour vous. , et à mon cher père, Bachir , qui je le respecte pour moi une source de tendresse et un exemple de dévouement qui n'a jamais cessé de m'encourager et de prier pour moi. Rien au monde ne vaut les efforts déployés jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Que Dieu vous protège et vous bénisse.

À ma chère sœur, et à mes chers petits frères mohamed et adel , pour leur soutien moral et matériel. Ce travail est un témoignage de ma gratitude et de mon amour sincère pour vous.

Et a toute la famille Achir et Mazighi

A mes grands-parents . mon grand pére mr. Youcef Mazighi

A tous mes oncles, tantes, cousins et cousines, Maternels.

Mon chére amis partenaire dans ce travail : yousri fouad

A tous mes chers amis, mes amis proche :hamza , zine eddine , zoubir ,mokhtar

Et bien sur le ❤️

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.

« Je tiens à vous exprimer mes profonds remerciements et ma gratitude pour toute l'aide que vous m'avez apportée dans la préparation de la thèse pour l'obtention du diplôme. »

ACHIR AHMED SALAH EDDINE .

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE---------- 1
CHAPITRE I :---------- 2
GENERALITE SUR LA DOME DE FER---------- 2
1-LA DOME DE FER ---------- 3
1-Introduction ---------- 3
2-Historique ---------- 5
3- Les couts---------- 5
4-FONCTIONEMENT ---------- 7
5-LES RADARS UTILISE ---------- 7
6-l'unite de commande de la dome de fer ---------- 9
7-LES BATTERIES UTLISE (lancer missile) ----------10
Chapitre II : ----------12
Les radars de la dome de fer----------12
EL/M-2084----------12
1-introduction ----------13
2-Les informations délivrées par le radar ----------14
3-Composition d'un système radar ----------20
4-Filtrage en réception radar----------23
5-Détection radar ----------24
6-Modèle Mathématique pour Ciblé un Objet ----------25
6-1 Description Matériel ----------28
6-2 Définition du module Arduino----------28
6-3 Capteur Ultrasons HC-SR04----------30
6-4 Module Afficheur LCD----------33
6-6 Tests et résultats ----------36
7-Conclusion ----------38
Chapitre III : ----------39
L'unité de commande et de contrôle (Battle Management Command) ----------39

1-L'unité de commande et de contrôle :(Battle Management Command) ----------40
1.1 Collecte et fusion des données ----------41
1.2 Identification des menaces ----------44
1.3 Allocation des ressources ----------48
1.4 Calcul des solutions d'interception ----------51
1.5 Ordres de conduite de tir----------54
2-Modèle mathématique et dérivation des coordonnées géographiques de la cible --------58
2-1 Coordonnées cartésiennes ----------58
2-2 Aperçu technique du GPS ----------58
2-3 Technologie de récepteur GPS ----------59
2-4 Système géodésique mondial (WGS-84)----------59
2-5 Formule de transformation du système de coordonnées géographiques ----------60
2-6 Méthodologie----------60
2-7 Résultats et discussions ----------61
3-Conclusion ----------64
Chapiter IV : ----------66
Unité de Lancement de Missiles ----------66
1-Les batteries (ou systèmes de tir) du système de défense anti-roquettes Dôme de Fer--67
2-L'unité de lancement de missiles du système ----------68
2-1 Les caractéristiques----------69
2-2 Les depense----------70
2-3Fonctionment----------71
2-4Les battrie utiliser ----------72
Chapitre V : ----------74
Etude de couverture ----------74
Radar du sud ----------74
1-Etude de Projet couverture Radar du sud----------75
1-1Couverture radar souhaitée ----------75
1-2Conditions environnementales ----------75
1-3Accessibilité et sécurité----------75
1-4Disponibilité des infrastructures ----------76

1-5 Impact environnemental ----------76
1-6 Facteurs supplémentaires ----------76
2-Les Radars du sud proposé théoriquement ----------76
2-1 Les Stations du sud proposé théoriquement ----------77
2-2 Couverture théorique du radar de secours ----------79
3-Conclusion ----------80
Conclusion générale----------82
Bibliographies: ----------83

LISTE DE FIGURE

Figure 1-1 : cov par les princpe de la dome fer 3

Figure 1-2: la dome de fer.....4

Figure 1-5:l'unite de commande.....9

Figure 1-6: Lanceur de missile.....10

Figure 2-1 le radare EL/M-2084 14

Figure 2-2: Scénario des impulsions radar 15

Figure 2-3:palier azimut.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-4:l'angle de site.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-5: Effet du mouvement de la cible sur les formes d'onde équiphases réfléchi .....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-6: La vitesse radiale est proportionnelle aux angles d'azimut et d'élévation .**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-7:Composition d'un système radar .....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-8 l'antenne de radar aireienne 21

Figure 2-9:Traitement du signal radar en réception.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-10 : L'énergie retournée dépend de la puissance transmise..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-11 : SER pour différents types de cibles. .....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-12: Schéma de montage pratique .....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-13: Carte Arduino.....29

Figure 2-14:Constitution de la carte Arduino UNO. .....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-15:Sources de l'Alimentation de la carte Arduino UNO. ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-16:Capteur Ultrasons HC-SR04 31

Figure 2-17:Le diagramme temporel..... 32

Figure 2-18:Montage HC-SR04 avec Arduino..... 32

Figure 2-19:distance supérieure de Cible. .....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-20:: Diagramme temporel de HC-SR04.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-21: Afficheurs LCD : (a) (16x2), (b) (20x4). 34

Figure 2-22:Servomoteur à rotation angulaire.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-23:Caractéristiques du servomoteur à rotation angulaire (Micro-Servo). .....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-24:montage servomoteur avec Arduino .....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-25: Simulation d'un système Radar avec logiciel Proteus..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2-26:Résultats de mesures de la distance et de l'angle d'une cible1..... 37

Figure 2-27:Résultats de mesures de la distance et de l'angle d'une cible2.... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 3-1 Battle Management Command 41

Figure 4-1:L'unité de lancement de missiles 68

Figure 4-2:les caractéristiques de missile tamir..... 70

Figure 4-3:Fonctionment de missile tamir 72

Figure 5-1: couverture Radar théorique Proposer..... 77

Figure 5-2:nouvelle Station Radar Proposer..... 78

Figure 5-3: Couverture théorique du radar de secours Bechar.....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 5-4: Couverture théorique du radar de secours d'Adrar. 80

ملخص:

تسعى هذه الدراسة إلى تطوير نظام حماية ضد الأجسام الطائرة (COV) باستخدام مبادئ نظام الدفاع الجوي "القبة الحديدية". يعتمد النظام المقترح على ثلاثة مكونات رئيسية: رادارات للكشف والتتبع، مراكز لإدارة المعركة، وقاذفات صواريخ. أظهرت النتائج فعالية النظام في الكشف عن التهديدات الجوية وتتبعها بدقة واعتراضها بسرعة، مما يعزز مستوى الحماية. بالرغم من ذلك، توجد حاجة لبعض التحسينات لزيادة الدقة في البيئات المعقدة. تقدم هذه الدراسة أساساً قوياً لتطوير أنظمة حماية متقدمة تلبي الاحتياجات الأمنية الحديثة.

الكلمات المفتاحية : نظام الحماية، الأجسام الطائرة (ض أ ط)، القبة الحديدية، رادارات الكشف، الاعتراض.

Summary:

This study aims to develop a protection system against flying objects (COV) using the principles of the Iron Dome defense system. The proposed system relies on three main components: detection and tracking radars, battle management centers, and missile launchers. The results demonstrated the system's effectiveness in detecting, accurately tracking, and swiftly intercepting aerial threats, thereby enhancing the level of protection. However, there is a need for some improvements to increase accuracy in complex environments. This study provides a strong foundation for developing advanced protection systems that meet modern security needs.

Keywords: Protection system, Flying objects (VOC), Iron dome, Detection radars, Interception.

Résumé :

Cette étude vise à développer un système de protection contre les objets volants (COV) en utilisant les principes du système de défense Dôme de fer. Le système proposé repose sur trois composants principaux : des radars de détection et de suivi, des centres de gestion de bataille et des lanceurs de missiles. Les résultats ont démontré l'efficacité du système à détecter, suivre avec précision et intercepter rapidement les menaces aériennes, améliorant ainsi le niveau de protection. Cependant, des améliorations sont nécessaires pour augmenter la précision dans des environnements complexes. Cette étude fournit une base solide pour le développement de systèmes de protection avancés répondant aux besoins de sécurité modernes.

Les mots clés : Système de protection, Objets volants (COV), Dôme de fer, Radars de détection, Interception.

INTRODUCTION GENERALE

Les menaces liées aux objets violents projetés, qu'il s'agisse de roquettes, obus d'artillerie ou autres projectiles, représentent un risque sérieux pour les populations civiles et les infrastructures stratégiques. Face à cette problématique, de nombreux efforts ont été déployés pour développer des systèmes de protection efficaces capables de détecter, suivre et intercepter ces menaces avant qu'elles n'atteignent leur cible.

Parmi les solutions les plus avancées, le système israélien "Dôme de Fer" s'est imposé comme une référence en matière de défense antimissile à courte portée. Déployé depuis 2011, il a démontré ses capacités à intercepter avec succès des roquettes et obus tirés depuis la bande de Gaza, protégeant ainsi les villes israéliennes.

Le présent mémoire se propose d'étudier les principes fondamentaux et les techniques clés qui sous-tendent le fonctionnement du Dôme de Fer, dans l'optique de concevoir un système de protection contre les objets violents (COV) adapté à d'autres contextes opérationnels.

Dans un premier temps, nous aborderons les différents types de menaces COV auxquels un tel système doit faire face, leurs caractéristiques balistiques et leurs signatures de détection. Nous étudierons ensuite les composants essentiels d'un système de protection COV, à savoir les radars de surveillance, les calculateurs de trajectographie, les lanceurs d'interception et les missiles intercepteurs.

Une attention particulière sera portée aux algorithmes de traitement du signal numérique employés par les radars pour détecter, discriminer et suivre avec précision les menaces. Nous analyserons également les techniques de reconnaissance de trajectoires balistiques et les stratégies d'interception optimale.

Au-delà des aspects purement techniques, nous aborderons les défis liés à l'intégration d'un tel système dans un environnement opérationnel réel, en prenant en compte les contraintes logistiques, les exigences de mobilité, la gestion des ressources et les considérations économiques.

Enfin, nous évaluerons les performances et les limites d'un système de protection COV, au regard des scénarios de menaces actuels et futurs, tout en identifiant les pistes d'amélioration et les évolutions technologiques prometteuses dans ce domaine stratégique.

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA DOME DE FER

1-LA DOME DE FER

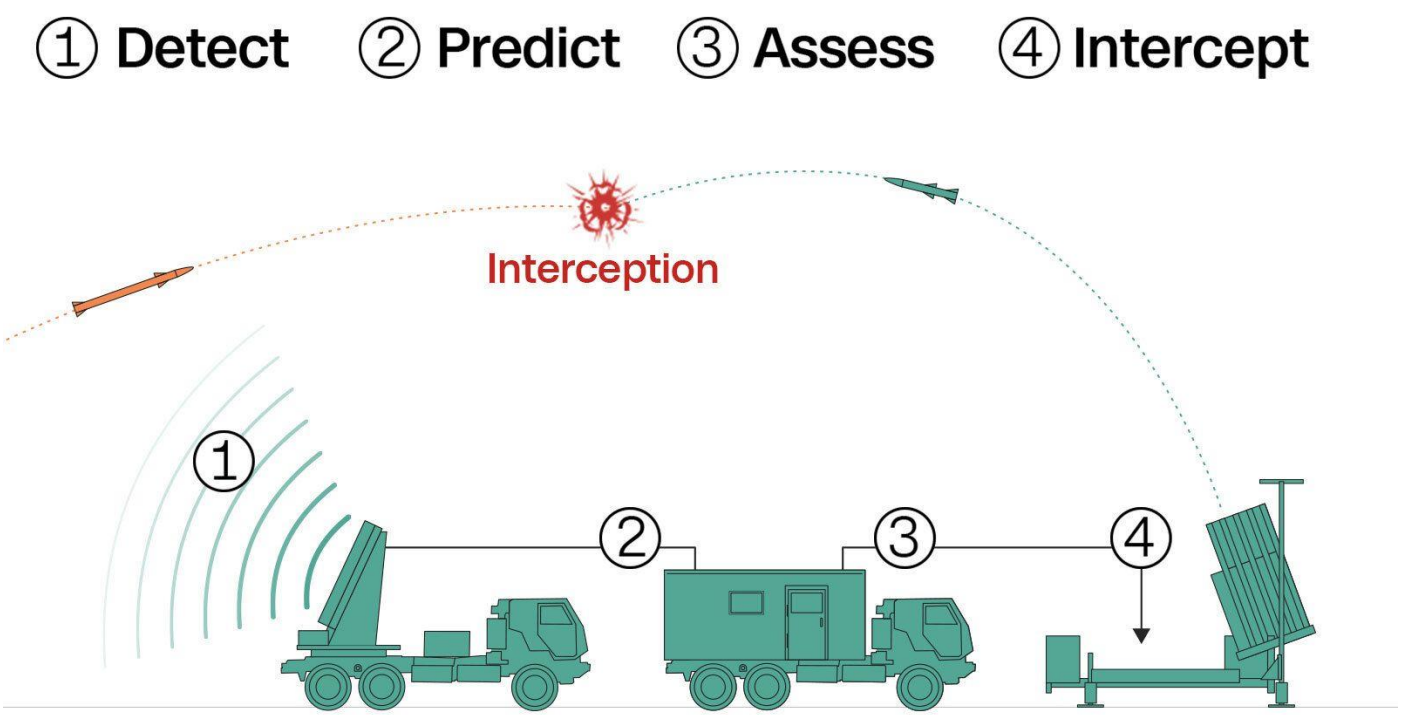


Figure 1-1 : cov par les princpe de la dome fer

1-Introduction

Le Dôme de Fer (en hébreu : כִּפַּת בַּרְזֶל, kipat barzel) est un système de défense anti-missile développé par Israël et conçu pour intercepter et détruire des roquettes à courte portée et des obus d'artillerie tirés dans sa direction.

❖ Voici quelques informations clés sur le Dôme de Fer :

- C'est un système entièrement mobile de défense anti-missile développé par Rafael Advanced Defense Systems et Israel Aerospace Industries.
- Il est conçu pour détecter, évaluer et intercepter une grande variété de roquettes et d'obus d'artillerie à courte portée menaçant des zones civiles.
- Il utilise un radar de détection et un système de poursuite pour identifier les menaces entrantes, calculer leur trajectoire et les intercepter grâce à un missile intercepteur.
- Le premier déploiement opérationnel a eu lieu en mars 2011 près de Beer-Sheva après des années de développement.
- Pendant l'opération Bordure Protectrice en 2014, le Dôme de Fer a intercepté 90% des roquettes visant des zones peuplées.
- Il est constamment amélioré avec de nouvelles versions plus performantes déployées régulièrement.

- D'autres pays comme les États-Unis, le Canada et la Roumanie ont acquis des batteries du Dôme de Fer auprès d'Israël.

C'est un système clé de défense anti-missile pour protéger la population civile israélienne contre les tirs de roquettes et d'obus depuis Gaza et le Liban.

❖ Voici une définition plus précise d'un dôme de fer :

C'est un système de défense antimissile mobile composé de trois éléments principaux :

1. Un système de détection et de poursuite radar
   - Utilise un radar multidirectionnel pour détecter les roquettes/obus entrants
   - Identifie le type de menace et calcule sa trajectoire en temps réel

2. Un système de contrôle de tir et de conduite de tir :
   - Analyse les données radar et détermine si la menace vise une zone à protéger
   - Calcule le point d'interception optimal
   - Sélectionne et active la batterie de missiles la mieux placée
3. Des batteries de missiles intercepteurs
   - Comprennent des lanceurs verticaux mobiles équipés de missiles intercepteurs
   - Les missiles ont une portée d'environ 70 km
   - Ils détruisent la menace par impact cinétique à très haute vélocité

Le système est entièrement automatisé et peut faire face à des salves simultanées de multiples roquettes/obus avec un temps de réaction très court (quelques secondes).

La mobilité des composants permet un déploiement rapide pour protéger différentes zones. L'objectif est d'intercepter les menaces avec une grande précision avant qu'elles n'atteignent leur cible au sol.

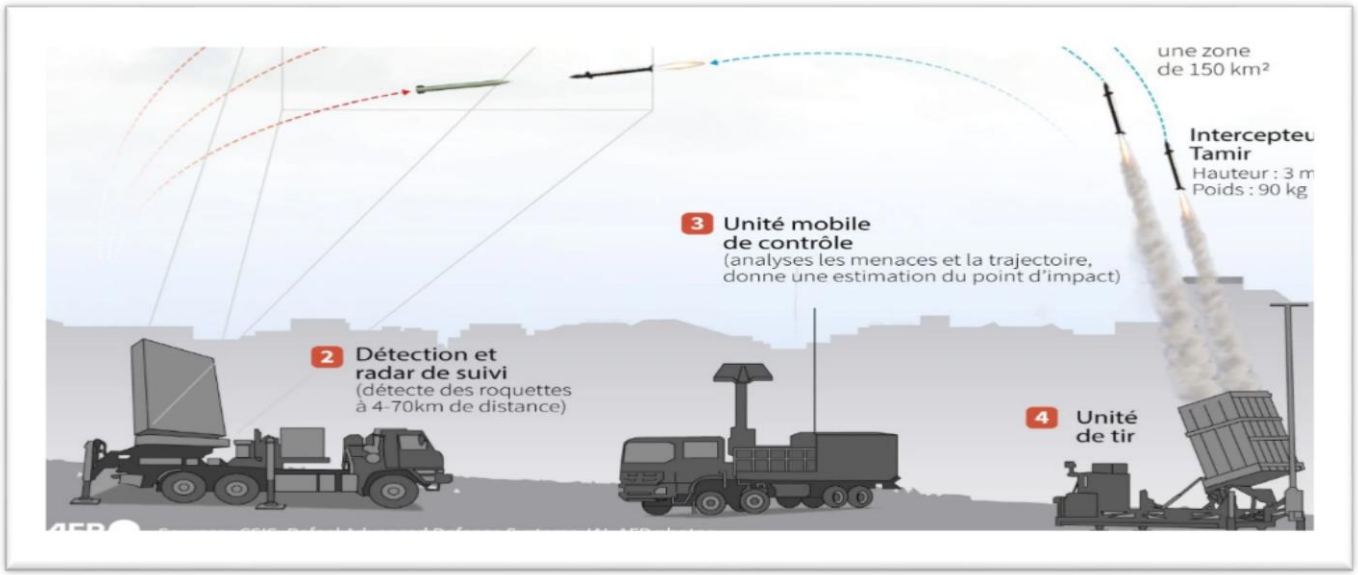


Figure 1-2: la dome de fer

2-Historique

❖ Voici un bref historique du développement du système de défense antimissile Dôme de Fer par Israël :

- Début des années 2000 : Après la Seconde Intifada et les tirs intensifs de roquettes depuis Gaza, Israël lance un programme pour développer une défense antimissile de courte portée.
- 2005 : Rafael Advanced Defense Systems commence à travailler sur le concept du Dôme de Fer, baptisé initialement "Frappe de Tonnerre".
- 2007 : Des tests de tirs réels du système débutent avec des premiers essais concluants.
- 2008 : Le développement s'accélère avec un financement supplémentaire du gouvernement israélien.
- 2009 : D'autres essais réussis sont réalisés, validant les performances du système.
- 2011 : Après plusieurs années de R&D, le Dôme de Fer est déclaré opérationnel et ses premières batteries sont déployées autour de Beer-Sheva.
- 2012 : Lors de l'opération "Pilier de Défense", le système est utilisé pour la première fois au combat, interceptant des roquettes tirées depuis Gaza.
- 2014 : Durant l'opération "Bordure Protectrice", le Dôme de Fer joue un rôle clé en interceptant 90% des roquettes visant des zones peuplées.
- 2015-aujourd'hui : Le système continue d'être amélioré et modernisé. De nouvelles batteries sont régulièrement ajoutées pour accroître les capacités de défense d'Israël.

Le Dôme de Fer a démontré son efficacité contre les menaces roquettes et représente un pivot central de la stratégie défensive israélienne.

3- Les couts

Le système de défense antimissile Dôme de Fer représente un investissement conséquent pour Israël en termes de coûts de développement, d'acquisition et d'exploitation.

❖ Voici quelques chiffres clés sur sa valeur et ses dépenses :

3-1Coûts de développement :

- Le programme a coûté environ 1 milliard de dollars en recherche et développement entre 2005 et 2011 avant sa mise en service opérationnelle.
- Les principaux financements provenaient du ministère israélien de la Défense et des États-Unis.

3-2Coûts des radars **:**

- Chaque batterie du Dôme de Fer est équipée d'un radar multidirectionnel EL/M-2084 développé par l'entreprise israélienne ELTA.
- Le coût d'un seul radar EL/M-2084 est estimé entre 10 et 17 millions de dollars.
- Les radars représentent environ un tiers du coût total d'une batterie du Dôme de Fer.
- C'est un composant extrêmement complexe et coûteux, essentiel pour détecter et suivre les menaces entrantes.

3-3Coûts des missiles intercepteurs :

- Les missiles intercepteurs Tamir utilisés par le Dôme de Fer coûtent entre 50,000 et 100,000 dollars l'unité selon les estimations.
- C'est un coût relativement modeste comparé au prix des radars et des autres composants de la batterie.
- Mais le coût des missiles tirés devient significatif lors d'opérations de grande envergure comme en 2014 où 600 ont été utilisés.

Donc même si le remplacement des missiles consommés engendre des dépenses régulières, ce sont les systèmes de détection radar extrêmement sophistiqués qui constituent l'investissement initial et récurrent le plus onéreux du Dôme de Fer.

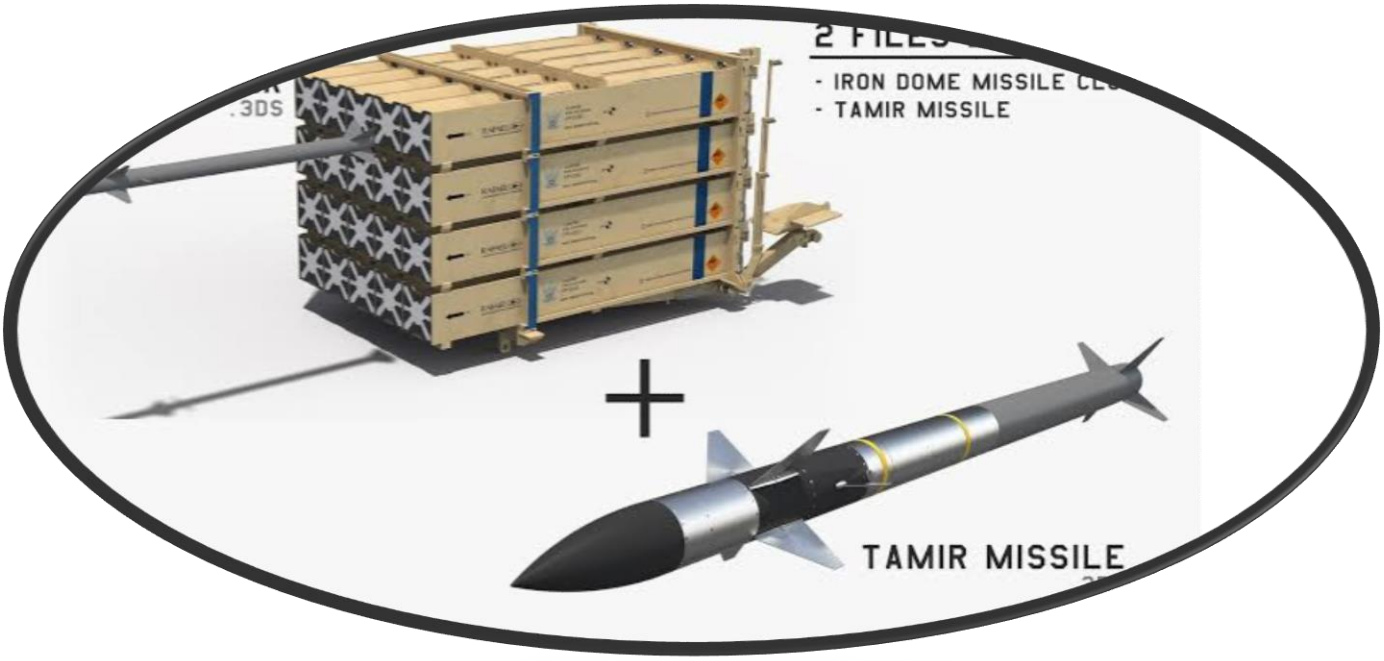


Figure 1-3 : l'unite de lancement

4-FONCTIONEMENT

❖ Voici comment fonctionne le système de défense antimissile Dôme de Fer :

4-1 Détection des menaces entrantes **:**

- Des radars multidirectionnels EL/M-2084 détectent et suivent en temps réel les roquettes et obus d'artillerie tirés en direction des zones à protéger.
- Le système calcule la trajectoire, la vitesse et l'impact potentiel de chaque menace.

4-2 Analyse de la menace :

- Un système de contrôle "Rouge Vert" analyse si la menace détectée va effectivement frapper une zone peuplée ou sensible.
- Si ce n'est pas le cas, il l'ignore pour économiser les munitions.

4-3 Conduite de tir **:**

- Pour les menaces jugées dangereuses, le système sélectionne la batterie Dôme de Fer la mieux placée.
- Il calcule le point d'interception optimal et transmet les données à cette batterie.

4-4 Lancement des intercepteurs **:**

- La batterie sélectionnée fait feu avec un ou plusieurs missiles intercepteurs Tamir dotés d'une charge explosive pour détruire la menace par impact cinétique.
- Les Tamir sont propulsés par un moteur-fusée à deux étages pour atteindre leur cible.

4-5Interception de la menace **:**

- Grâce à sa charge explosive et sa vélocité supersonique, le Tamir pulvérise la roquette/l'obus lors de l'impact.
- Le système peut gérer simultanément plusieurs menaces venant de différentes directions.

Tout ce processus, de la détection à l'interception, ne prend qu'une quinzaine de secondes grâce à l'automatisation complète. C'est cette capacité de réaction ultra-rapide qui permet au Dôme de Fer d'intercepter efficacement les menaces à courte portée.

5-LES RADARS UTILISE

Le système de défense antimissile Dôme de Fer utilise un radar de détection et de poursuite extrêmement avancé appelé EL/M-2084, développé par l'entreprise israélienne ELTA Systems Ltd.



Figure 1-4 : radar EL/M-2084

❖ Voici les principales caractéristiques de ce radar :

5-1 Type de radar **:**

Radar multidirectionnel actif à balayage électronique (AESA)

- Utilise une antenne réseau à commande de phase pour balayer électroniquement sans pièce mobile

5-2 Bande de fréquences **:**

Bande UHF (ultra haute fréquence)

- Permet de détecter efficacement les petites cibles comme les roquettes et obus d'artillerie

5-3 Portée **:**

- Environ 70-100 km pour la détection
- 60 km environ pour la poursuite de cible

5-4 Capacités **:**

- Peut détecter et suivre simultanément des centaines de cibles
- Identification ami/ennemi
- Calculs balistiques intégrés des trajectoires de cibles

L'antenne AESA confère une très grande agilité électronique avec des capacités de balayage rapide sur 360°. Le fonctionnement en bande UHF améliore la détection des petites menaces.

Le radar EL/M-2084 est un composant absolument central du Dôme de Fer. Ses performances en termes de portée, de précision et de traitement sont essentielles pour la détection rapide des cibles à intercepter.

6-l’unite de commande de la dome de fer



Figure 1-3:l'unite de commande

L'unité de commande du "Dôme de fer" est un élément crucial du système de défense aérienne mobile . développé par Rafael Advanced Defense Systems. Ce système est conçu pour intercepter des roquettes et obus de courte portée

L'unité de commande du "Dôme de fer" fonctionne en trois étapes principales [2]:

-Détection: Un radar détecte et suit les roquettes en approche.

-Calcul de trajectoire: Un centre de commande et de contrôle, agissant comme un ordinateur, analyse les données du radar pour déterminer la localisation du futur point d'impact des roquettes.

-Interception: Si l'impact potentiel se produit dans un lieu peuplé, un lanceur est activé, déclenchant un missile intercepteur, "Tamir", pour intercepter la roquette en vol.

6-1 La Détection :

La détection dans le système "Dôme de fer" est réalisée grâce à un radar spécifique, le EL/M-2084, construit par Elta ,

Une fois que le radar a détecté une roquette, les informations sont transmises au centre de gestion et de contrôle (BMC), construit par mPrest Systems pour Rafael, Le BMC utilise les données reçues pour calculer le point d'impact prévu de la roquette. Sur la base de ces informations

6-2 Calcul de trajectoire :

Le calcul de trajectoire dans le système "Dôme de fer" est une étape cruciale qui permet d'identifier précisément où une roquette en vol va atterrir. Cette information est essentielle

pour déterminer si la roquette constitue une menace pour une zone désignée et, si c'est le cas, pour déclencher l'interception par un missile intercepteur, le "Tamir".

Cette capacité à calculer rapidement et précisément la trajectoire des roquettes est essentielle pour maximiser le taux de réussite des interceptions, comme en témoigne le taux de réussite proche de 90% observé lors de certaines confrontations

6-3 Interception:

L'interception dans le système "Dôme de fer" est effectuée par le missile intercepteur "Tamir", équipé de capteurs électro-optiques et de plusieurs ailerons de gouvernail pour une manœuvrabilité élevée. Le "Tamir" est conçu pour intercepter les menaces venues de distances comprises entre 4 et 70 kilomètres, y compris les roquettes, les obus d'artillerie et les mortiers [3].

Le processus d'interception commence lorsque le radar EL/M-2084 détecte le lancement d'une roquette et suit sa trajectoire. Les données recueillies sont ensuite transmises au centre de gestion et de contrôle (BMC), qui calcule le point d'impact potentiel de la roquette. Si la roquette est jugée menaçante pour une zone désignée, le BMC donne l'ordre de lancer un missile "Tamir" pour l'intercepter avant qu'il n'atteigne l'aire de prédiction

7-LES BATTERIES UTLISE (lancer missile)

Le système de défense antimissile Dôme de Fer utilise des batteries mobiles composées de plusieurs éléments clés :



Figure 1-4: Lanceur de missile

7-1 Lanceurs de missiles **:**

- Lanceurs verticaux dédiés pour les missiles intercepteurs Tamir
- Chaque lanceur contient typiquement 12 à 20 missiles Tamir prêts à être tirés
- Les lanceurs sont montés sur des véhicules blindés à chenilles permettant une grande mobilité

- Missile intercepteur Tamir:
- Missile à deux étages avec un rayon d'interception d'environ 70 km
- Ogive avec charge explosive pour détruire la cible par impact cinétique
- Propulsé par un moteur-fusée à très haute vélocité (Mach 2,8)

7-2 Caractéristiques des lanceurs **:**

- Lanceurs verticaux montés sur des véhicules blindés chenillés hautement mobiles
- Chaque lanceur contient généralement entre 12 et 20 missiles intercepteurs Tamir
- Les lanceurs permettent un tir rapide en séquence des missiles
- Ils sont alimentés par des générateurs électriques intégrés

7-3 Fonctionnement **:**

- Les missiles sont stockés à la verticale dans les tubes du lanceur
- Lors d'un tir, le missile sélectionné est extrait du tube par un vérin
- Il est transféré à la rampe de lancement inclinée
- Le missile est alors allumé et projeté vers sa cible grâce à son moteur-fusée

Les lanceurs fournissent un système de mise à feu complètement automatisé et intégré au système de contrôle de tir du Dôme de Fer.

Dimensions **:**

- Longueur : 3 mètres
- Diamètre : 160 mm
- Envergure : 63 cm

Propulsion :

- Moteur-fusée à carburant solide à deux étages
- Poussée initiale de 27 kN
- Vitesse maximale de Mach 2,8 (3400 km/h)
- Environ 70 km selon les conditions

Performances :

- Portée maximale d'environ 70 km selon l'altitude d'engagement.
- Vitesse maximale de Mach 2,8 (environ 3400 km/h).
- Hauteur d'interception jusqu'à 10 km selon les scénarios.
- Excellente maniabilité grâce à sa conception aérodynamique et ses petites dimensions.

Chapitre II : Les radars de la dome de fer EL/M-2084

1-introduction

Le radar EL/M-2084 est une famille de radars mobiles basés sur le sol, produite par ELTA, une filiale des Industries Aérospatiales. Il s'agit d'un radar 3D AESA (Active Electronically Scanned Array) polyvalent, capable de détecter et de suivre à la fois des cibles aériennes et balistiques, et de fournir une assistance au contrôle de feu pour l'interception de missiles ou la défense antiaérienne d'artillerie

Ce radar est caractérisé par sa capacité à surveiller l'espace aérien, à localiser les armes hostiles et à guider le feu pour une portée moyenne. Il existe deux sous-variantes du radar EL/M-2084, distinguées par la taille de l'antenne et les capacités de portée : le MMR (Multi-Mission Radar)

Le radar EL/M-2084 opère dans le band S et, en mode de surveillance de l'espace aérien, peut évaluer jusqu'à 1100 cibles. Il est capable de détecter des cibles à une distance allant jusqu'à 250 km. De plus, il offre une couverture azimutale de 120° lorsqu'il est positionné de manière stationnaire pour la défense contre les missiles et les roquettes, tandis que lorsqu'il est utilisé pour surveiller les avions, il tourne autour de son axe à une vitesse de 30 tours par minute, offrant ainsi une visibilité complète de 360°

Ce radar a été officiellement opérationnel en 2010 et est exploité comme composant principal de mise à feu du bataillon de repérage de l'artillerie israélienne. Il est essentiel dans l'architecture de localisation d'armes hostiles, de surveillance aérienne et d'avertissement précoce d'Israël, fournissant une couverture constante des frontières israéliennes tant en temps de paix qu'en cas de conflit

Ce radar est utilisé par plusieurs armées, y compris les forces de défense, l'Armée canadienne, l'Aéronavale de Singapour, l'Armée de terre de la République tchèque et les Forces armées slovaques, illustrant sa polyvalence et sa fiabilité dans divers scénarios de mission



Figure 2-1: le radare EL/M-2084

2-Les informations délivrées par le radar

2-1 La distance

la mesure de la distance est l'une des fonctions les plus importantes du radar. la forme d'onde radar la plus couramment utilisee dans la mesure de distance est un train d'impulsions rectangulaires avec une largeur d'impulsion etroite.

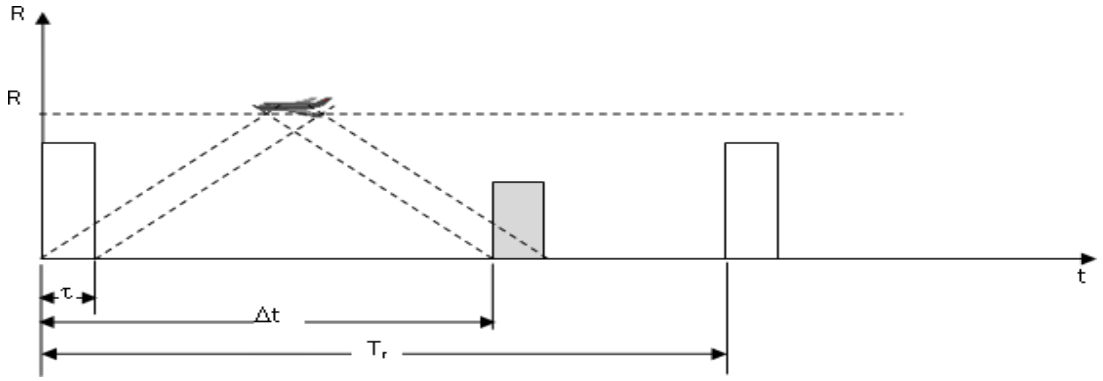
la distance, ou la portee, ou meme la distance oblique, notee generalement R est la distance de ligne de visee entre le radar et la cible. cette distance est determinee en mesurant le temps (δt) mis par l'impulsion pour se deplacer du radar vers la cible et revenir.

$$R = \frac{c.\Delta t}{2}$$

Avec $c = 3.10^8$

m/s qui est la vitesse de la lumière, et le facteur apparaît dans le

dénominateur en raison de la propagation bidirectionnelle du radar. La distance est exprimée en kilomètres ou miles nautiques (1 NM = 1.852 Km).



:

Figure 2-2: Scénario des impulsions radar

T_r : Période de Répétition des Impulsions PRI

L'inverse de cette période donne la Fréquence de Répétition des Impulsions FRI : $f_r = \frac{1}{T_r}$

τ : Durée des impulsions.

Pendant chaque PRI, le radar émet de l'énergie pendant τ secondes et écoute le retour de cible pour le reste de la PRI. Le facteur de transmission du radar (Duty cycle) d_t est donné par le

rapport $d_t = {}^{\tau}/_{T}$. La puissance moyenne émise du radar est $P_{av} = P_t . d_t$ 1.2

Avec P_t : Puissance d'émission maximale du radar.

L'énergie d'impulsion est : $E_p = P_t . \tau = P_{av} . T = \frac{P_{av}}{f_r}$

2-2La direction

L'angle entre la direction du nord et celle de la cible est déterminé grâce à la directivité de l'antenne. La directivité, gain direct : est la capacité de l'antenne à concentrer l'énergie transmise dans une direction particulière.

En mesurant la direction dans laquelle est pointée l'antenne à l'instant où elle reçoit un écho, on peut déterminer non seulement l'azimut mais aussi le site de la cible (donc son altitude). La précision de la mesure de ces angles dépend de la directivité de l'antenne. Pour une fréquence émise donnée (ou une longueur d'onde définie), la directivité d'une l'antenne est fonction de ses dimensions propres.

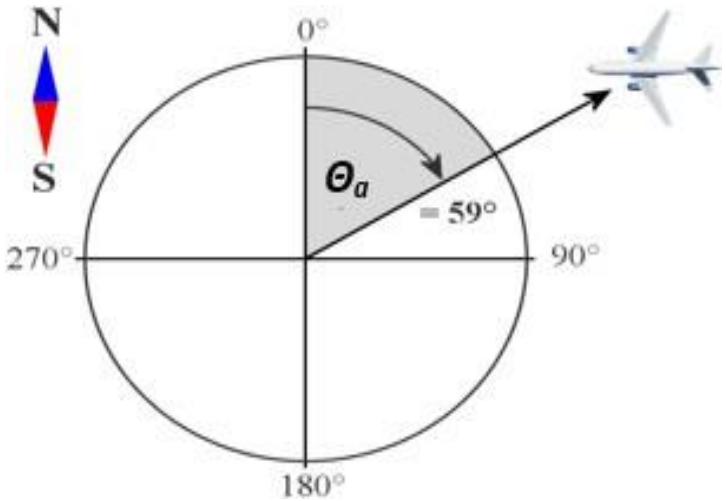


Figure 2-3:palier azimut

. 2-3Mesure de l'angle de site :

L'Angle de site est l'angle que forme, avec sa projection sur le plan horizontal, l'axe

« antenne radar – cible », mesuré dans le plan vertical. La lettre grecque tetha (Θ_e) désigne l'angle de site (ou d'élévation). L'angle de site est positif lorsqu'il est au-dessus de l'horizon (site 0°), et négatif en dessous.

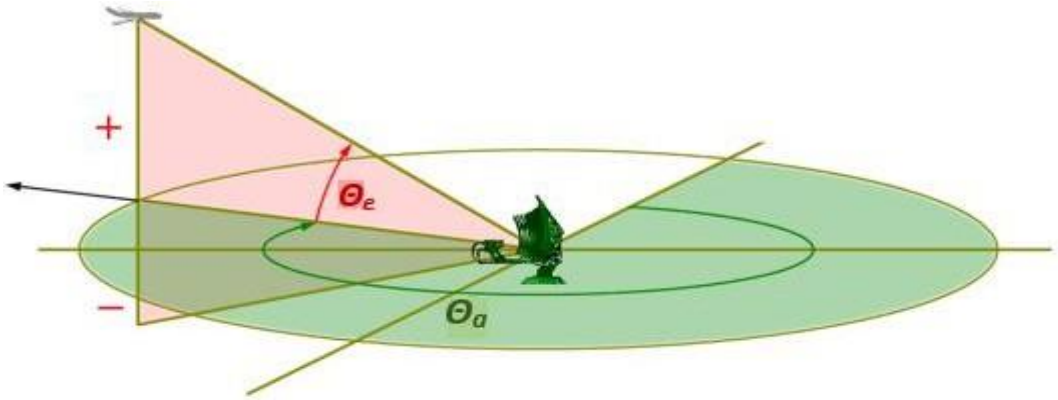


Figure 2-4:l'angle de site

2-4La vitesse radiale :

Les radars utilisent la fréquence Doppler pour extraire la vitesse radiale de la cible (fréquence de portée), ainsi que pour faire la distinction entre les cibles mobiles et stationnaires ou des objets tels que le fouillis. Le phénomène Doppler décrit le décalage de la fréquence centrale d'une forme d'onde incidente en raison du mouvement de la cible par rapport à la source de rayonnement. Selon la direction du mouvement de la cible, ce décalage de fréquence peut être positif ou négatif. Une forme d'onde incidente sur une cible a des fronts d'onde en équiphase séparés par la longueur d'onde. Une cible de fermeture fera se rapprocher les fronts d'onde en équiphase réfléchis (longueur d'onde plus petite). En variante, une cible qui s'ouvre ou qui recule (s'éloignant du radar) provoquera l'expansion des fronts

d'onde en équiphase réfléchis (longueur d'onde plus grande), comme illustré sur la figure ci-dessous



Figure 2-5: Effet du mouvement de la cible sur les formes d'onde équiphases réfléchi

est proportionnelle aux angles d'azimut et d'élévation. L'écart de fréquence entre la fréquence émise et la fréquence réfléchie est appelé fréquence doppler f_d. Elle est reliée à la vitesse radiale V_r par la relation :

La vitesse radiale cible par rapport au radar est égale à V_r mais ce n'est pas toujours le cas. En fait, la quantité de fréquence Doppler dépend de la composante de vitesse cible dans la direction du radar (vitesse radiale). Ainsi, une expression plus générale pour f_d qui tient compte de l'angle total entre le radar et la cible est :

$$f_d = \frac{2V_r}{\lambda} cos\theta \quad 1.9$$

Et pour une cible qui s'éloigne du radar on a :

$$f_d = \frac{-2V_r}{\lambda} cos\theta \quad 1.10$$

Où

$cos\theta$

$s\theta = cos\theta_e cos\theta_a$. Les angles θ_e et θ_a sont respectivement les angles d'élévation

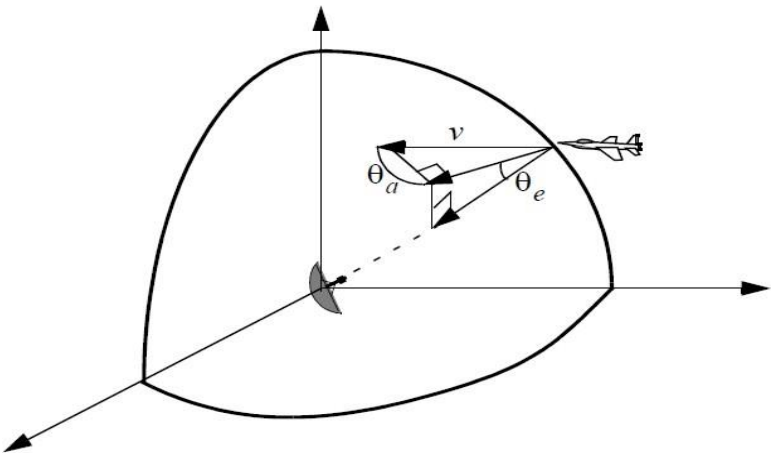


Figure 2-6: La vitesse radiale est proportionnelle aux angles d'azimut et d'élévation

3-Composition d'un système radar

De tout ce qui précède, nous pouvons dire que le radar peut fournir à l'utilisateur les informations suivantes :

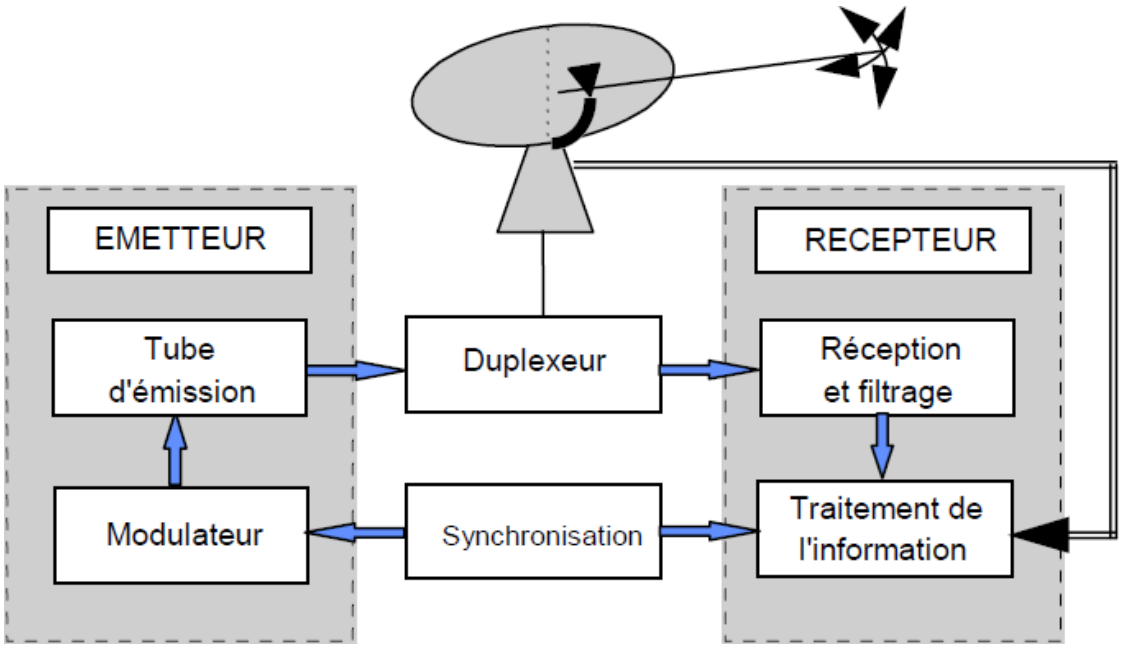


Figure 2-7:Composition d'un système radar

3-1 L’antenne :



Figure 2-8 l'antenne de radar aireienne

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. Cet angle solide est défini par la nature de l'antenne utilisée. La direction vers laquelle il est dirigé est également liée à l'antenne, une action (mécanique ou électronique) sur cette antenne permettra de modifier cette direction et donc de provoquer une exploration du domaine entourant le radar. L'antenne peut être double afin de permettre indépendamment les fonctions d'émission et de réception. Dans ce cas, il est nécessaire que les deux aériens (antennes) élémentaires soient orientés à chaque instant dans la même direction. Ils doivent donc être solidaires entre eux ou synchronisés.

3-2Le duplexeur :

C'est un aiguilleur électronique qui permet, d'une part au signal émis d'être dirigé vers l'antenne avec une perte minimale tout en isolant convenablement le récepteur, d'autre part au signal reçu d'être dirigé en totalité vers le récepteur, sans

dérivation vers l'émetteur et toujours avec une perte minimale.

La complexité du duplexeur dépend du niveau de puissance du signal émis (de quelques kilowatts à 20 MW dans les radars de moyenne et grande portée). Elle est liée à la limitation des fuites vers le récepteur, (qui ne peut supporter sans détérioration des signaux supérieurs à 100 mW environ)

3-3L'émetteur :

L'émetteur se compose de deux parties principales :

- ❖ L'étage de puissance dans lequel est engendré ou amplifié le signal émis ;
- ❖ Le modulateur qui fournit à l'étage de puissance l'énergie électrique et les signaux de commande.

Les paramètres caractéristiques de l'émetteur sont les suivants :

- Puissance crête et puissance moyenne émise
- Largeur de bande de travail
- Fréquence de travail
- Stabilité à court et à long terme (bruit de phase)
- Spectre du signal émis
- Forme des impulsions

3-4Le Modulateur :

Le modulateur fournit la puissance nécessaire à la partie active de l'émetteur. 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.

Les puissances crête délivrées par le modulateur sont très importantes (3 MW

3-5Le récepteur :

C'est l'élément le plus délicat, et souvent le plus complexe du radar. Il assure l'amplification, le filtrage et le traitement du signal radar.

Sa sensibilité doit être très grande (jusqu'à 10^{-15} Watts). Il amplifie les signaux dans de très grandes proportions (10^{10} à 10^{14}). Il doit en outre effectuer le filtrage du signal et tous autres traitements adaptés à l'information à obtenir (par exemple vitesse, position angulaire...), sa réalisation doit être particulièrement soignée pour réduire au minimum toute distorsion involontaire du signal traité et réduire les perturbations dues au bruit qui accompagne le signal radar

4-Filtrage en réception radar

Le traitement ou le filtrage du signal lors de la réception a pour but d'assurer la meilleure visibilité du signal sans le bruit et les autres signaux parasites. Il doit aussi contribuer à assurer au radar ses meilleures performances de pouvoir de séparateur et de précision. Les étapes de la détection peuvent être résumées par la figure ci-dessous

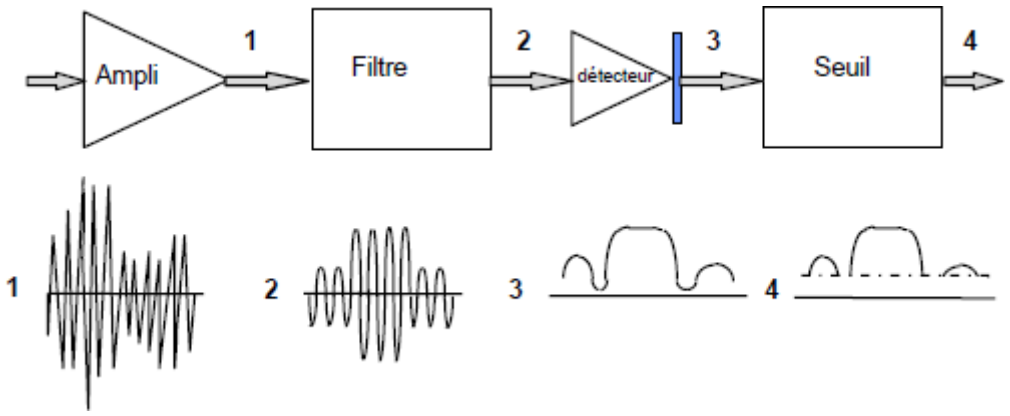


Figure 2-9:Traitement du signal radar en réception

- L'amplificateur amène le signal à un niveau convenable ;
- Le filtrage a pour but d'atténuer au maximum le bruit tout en préservant le signal ;

- Le détecteur prend (à un coefficient près) le carré de l'amplitude du signal ;
- Le traitement final, se ramène à placer un seuil plus ou moins complexe sur le mélange signal plus bruit après détection, pour ne laisser passer que les signaux d'amplitude suffisante, entrainant ainsi :
  - Une limitation de la visibilité des échos utiles, les échos faibles pouvant ne pas être sélectionnés ;
  - Un risque de « fausse alarme », lorsque le bruit seul forme un écho parasite dépassant le seuil de détection.

5-Détection radar

La qualité de détection de cibles inhérente au radar est limitée par la qualité de l'information délivrée par les dispositifs émetteur-récepteur d'une part et d'autre part celle-ci est sujette aux influences de l'environnement ou de l'espace couvert par le radar. Ces influences peuvent être les conséquences de sources naturelles et/ou artificielles.

Dans le domaine du radar, deux problèmes se posent à l'opérateur :

Le premier problème est la détection d'une cible dans l'espace à surveiller. Pour cela, il existe deux hypothèses possibles à considérer :

- Hypothèse H_0 : pas de cible,
- Hypothèse H_1 : présence d'une cible

Cette première opération consiste donc à décider si H_0 ou H_1 est vrai pour une observation.

En second lieu l'opération sera marquée par la localisation en angles, en distance, et en vitesse de la cible à détecter. La présence du bruit perturbe la mesure, qui ne peut donc être exacte. Il n'est possible que d'estimer chaque paramètre : valeur de l'amplitude ou de la phase pour les fonctions déterministes et valeur moyenne et variance pour les fonctions aléatoires. On définit alors les termes suivants :

- détection correcte : décider H_1 alors que H_1 émis
- Fausse alarme : décider H_1 alors que H_0 émis
- Manque de détection : décider H_0 alors que H_1 émis
- Rejet correct : décider H_0 alors que H_0 émis

En général, la forme du signal émis est connue ainsi que la densité de probabilité des paramètres de ce signal. Il en est de même pour la forme d'action du bruit et ses caractéristiques.

6-Modèle Mathématique pour Ciblé un Objet

L'équation du radar consiste à faire le bilan de puissance sur le trajet aller/retour du signal émis.

La puissance reçue par l'antenne réceptrice d'un radar est donnée par

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \quad (18)$$

Pr : Puissance reçue (watts)

Pt : Puissance transmise (watts)Gt : gain de l'antenne émettrice Gr : gain de l'antenne réceptrice

λ : longueur d'onde du radar (mètres)

σ : section efficace ou surface équivalente radar (coefficient de réflexion de la cible, mètrescarrés)

Rt : distance cible-radar émetteur (mètres) Rr : distance cible-radar récepteur (mètres)

Dans la plupart des cas :

L'émetteur et le récepteur constituent le même dispositif (on parle alors de radar monostatique) et Rt = Rr = R (19)

L'antenne d'émission est utilisée comme antenne de réception et Gt = Gr = G (20)

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}. \quad (21)$$

la portée utile maximale, la distance pour laquelle le bilan de puissance fera apparaître le signalminimum, noté $Smin$

$$R_{max}^4 = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{min}}. \quad (22)$$

V = Volume sondé = longueur impulsion x largeur faisceau

$$\left[\frac{c\tau}{2}\right]\left[\frac{\pi R^2 \theta^2}{4}\right] \quad \begin{cases} c = vitesse\ de\ la\ lumière \\ \tau = longueur\ temporelle\ de\ l'impulsion \\ \theta = ouverture\ du\ faisceau\ en\ degré\ radian \end{cases}.$$

(23)

La surface équivalente radar (SER ou RCS pour radar cross section en anglais), ou section efficace radar, est une propriété physique inhérente des objets indiquant l'importance relative dela surface de réflexion d'un faisceau électromagnétique qu'ils provoquent.

La SER d'un objet se mesure de manière typique à l'aide de radars. Cela peut s'effectuer enplein air ou dans une chambre anéchoïque absorbant dans leur totalité les ondes électromagnétiques de la fréquence émise.

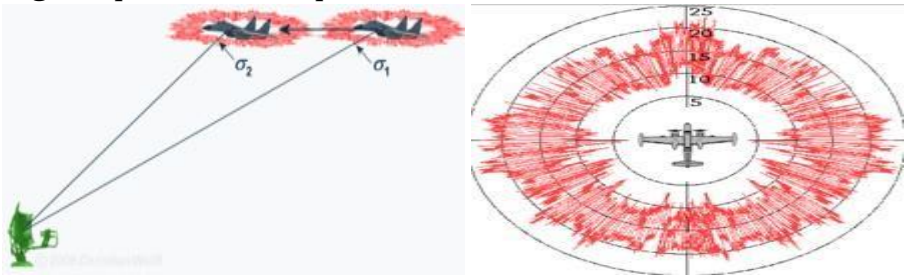


Figure 2-10 : L'énergie retournée dépend de la puissance transmise10

Valeurs typiques mesurées à l'aide d'un radar à ondes centimétriques :

avions furtifs : 0,01 à 0,02 m2

missiles anti-aériens : environ 0,1 m2

avions de chasse : 0,1 à 1 m2

bombardiers : 1 à 2 m2

avions de transport lourds et avions commerciaux civils : jusqu'à 50 m2. En trois dimensions la SER σest définie comme égale à :

$$\sigma = \frac{P_s}{P_i} .$$

(24)

Où Piest la densité de puissance par unité de surface, au niveau de la cible illuminée par le radaret Psla puissance diffusée par la cible par unité d'angle solide.

Cela peut s'écrire aussi de la manière suivante :

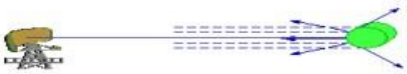
$$\sigma = \lim_{R\to\infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} ,$$

*E*i représente l'amplitude du champ émis et Es l'amplitude du champ renvoyé à la distance



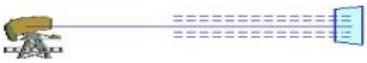
$$\sigma max = \pi r2 \quad (26)$$

Signal rétrodiffusé par une sphère



$$\sigma max = \frac{2\pi r\, h2}{\lambda} \quad (27)$$

Signal rétrodiffusé par une cylindre



$$\sigma max = \frac{4\pi b2\, h2}{\lambda 2} \quad (28)$$

Signal rétrodiffusé par un une plaque perpendiculaire au faisceau



Signal rétrodiffusé par un une plaque faisant un angle avec le faisceau

Figure 2-11 : SER pour différents types de cibles.1

6-1 Description Matériel

Pour réaliser le Radar de détection nous avons besoin :

D’une carte Arduino Uno.

D’un capteur ultrasons HC-SR04.

D’un servomoteur.

D’un afficheur LCD.

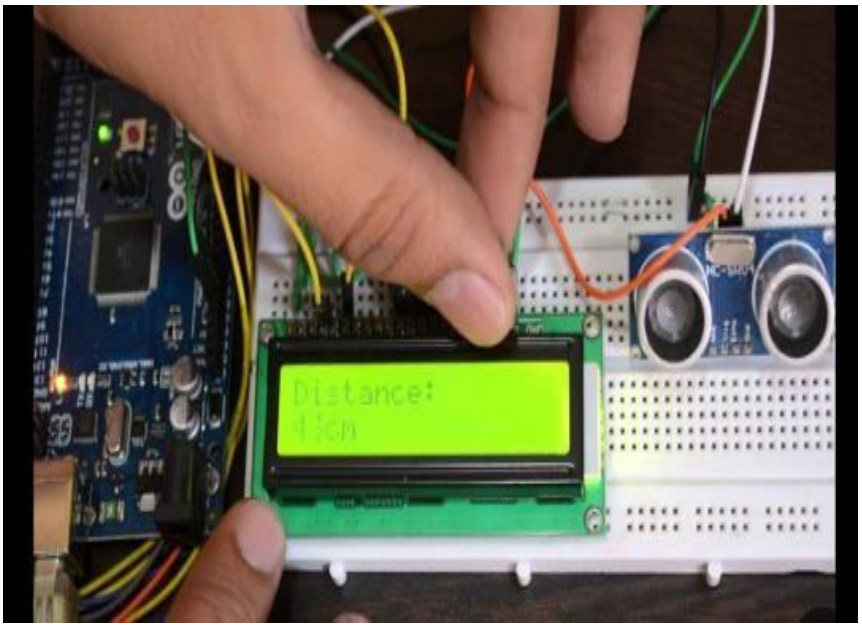


Figure 2-12: Schéma de montage pratique12

6-2 Définition du module Arduino

Arduino, et son récent synonyme Genuino, est une marque qui couvre des cartes matériellement libres sur lesquelles se trouve un microcontrôleur (D'architecture Atmel comme l'Atmega328p, et d'architecture ARM comme le Cortex-M3 pour l'Arduino Due).

Les schémas de ces cartes sont publiés en licence libre. Cependant, certains composants, comme le microcontrôleur par exemple, ne sont pas sous licence libre.

Une carte Arduino est une interface programmable capable de piloter des capteurs et des actionneurs afin de simuler ou créer des systèmes automatisés. Elle peut stocker un programmeet le faire fonctionner. La carte reçoit des informations analogiques ou numériques sur ces entrées.

Le modèle UNO de la société ARDUINO est une carte électronique dont le cœur est un microcontrôleur ATMEL de référence ATMega328. Le microcontrôleur ATMega328 est un microcontrôleur 8bits de la famille AVR dont la programmation peut être réalisée en langage C.

L'intérêt principal des cartes ARDUINO (d'autres modèles existent) est leur facilité de mise en œuvre. ARDUINO fournit un environnement de développement s'appuyant sur

des outilsopen- source. Le chargement du programme dans la mémoire du microcontrôleur se fait de façontrès simple par port USB.

6-2-1 La Carte Arduino :

Uno Les unités de traitement existent sous différentes formes. Les microcontrôleurs en font partie. Leurs couts et les fonctionnalités qu'ils proposent dépendent du cahier de charge du système à concevoir. Nous utiliserons la carte Arduino Uno.

La carte Arduino Uno fondée sur un microcontrôleur ATMega328 de 8bits cadencé à 16 MHz qui peut être programmée pour analyser et produire des signaux électriques. Aux niveaux de programmation on peut contrôlée l'Arduino en langage C ou C++. Et contient un boot loader qui permet de modifier le programme sans passer par un programmateur



Figure 2-13: Carte Arduino.

6-2-2 Composantes de la carte Arduino Uno :

La carte Arduino Uno est basée sur un Microcontrôleur ATMega328 cadencé à 16 MHz.

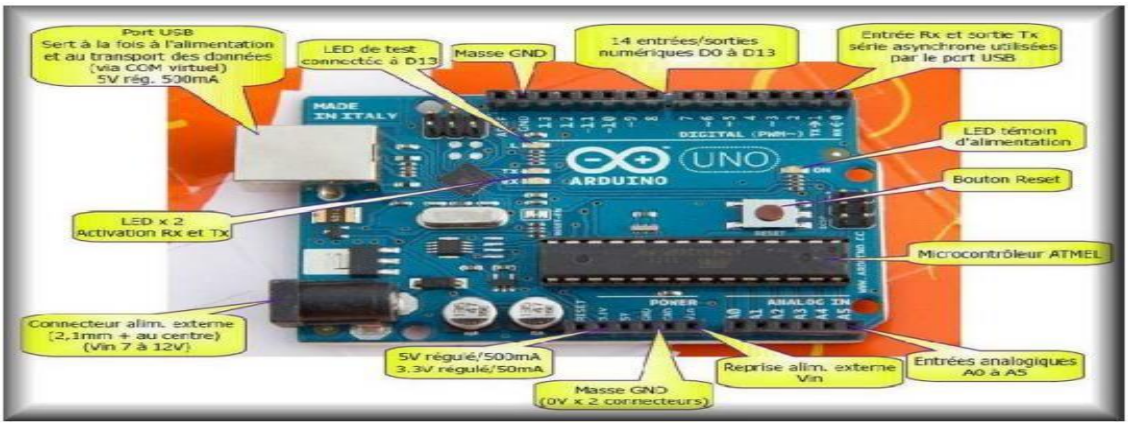


Figure 2-14:Constitution de la carte Arduino UNO.

.

6-2-3 Interrupteur de réinitialisation :

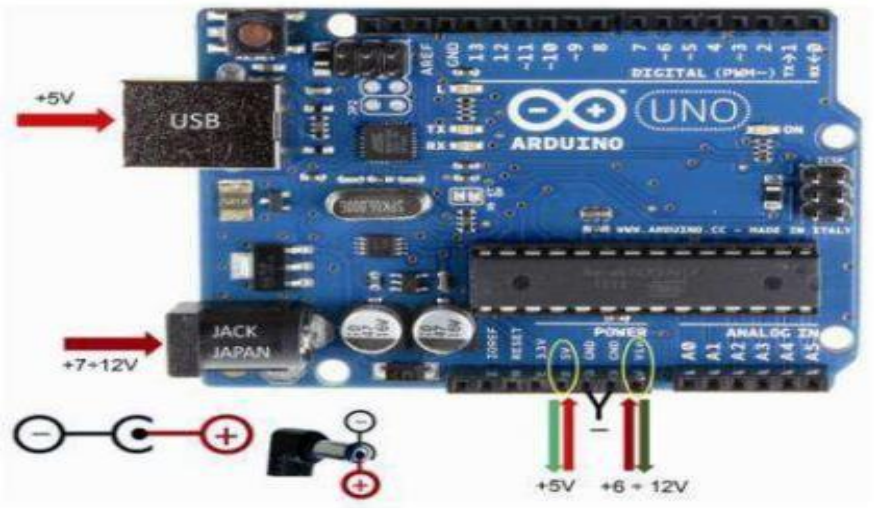


Figure 2-15:Sources de l'Alimentation de la carte Arduino UNO.15

6-2-4 Ports de communications :

La carte Arduino Uno dispose de toute une série de facilités pour communiquer avec un ordinateur, une autre carte Arduino, ou avec d'autres microcontrôleurs. L'ATmega328 dispose d'une UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter ou émetteur-récepteur asynchrone universel) pour la communication série de niveau TTL (5V) et qui est disponible sur les broches0 (RX) et 1 (TX). Un circuit intégré ATmega8U2 sur la carte assure la connexion entre cette communication série vers le port USB de l'ordinateur et apparaît comme un port COM virtuel pour les logiciels de l'ordinateur. Le code utilisé pour programmer l'ATmega8U2 utilise le driver standard USB COM, et aucun autre driver externe n'est nécessaire. Cependant, sous Windows,un fichier inf est requis.[6]

Le logiciel Arduino inclut une fenêtre terminal série (ou moniteur série) sur l'ordinateur qui permet d'envoyer des textes simples depuis et vers la carte Arduino. Les LEDs RX et TX sur la carte clignote lorsque les données sont transmises via le circuit intégré USBvers-série et la connexion USB vers l'ordinateur. Une librairie Série Logicielle permet également la communication série sur n'importe quelle broche numérique de la carte UNO.

L'ATmega 328 supporte également la communication par protocole I2C (ou interfaceTWI, TwoWire Interface - Interface "2 fils") et SPI :

Le logiciel Arduino inclut la librairie Wire qui simplifie l'utilisation du bus I2C.

Pour utiliser la communication SPI (Interface Série Périphérique).

communication SPI est disponible [9].

6-3 Capteur Ultrasons HC-SR04

Un capteur est une interface entre un processus physique et une information manipulable.

ne mesure rien, mais fournit une information en fonction de la sollicitation à laquelle il estsoumis.

6-3-1 Le HC-SR04 :

Est un capteur de distance utilise les ultrasons, Il offre une excellente plage de détection avec des mesures stables. Son fonctionnement n'est pas influencé par la lumière du soleil ou des matériaux sombres, bien que des matériaux comme les vêtements puissent être difficiles àdétecter. Ce capteur fonctionne avec une tension d'alimentation de 5 volts, dispose d'un angle de mesure de 15° environ et permet de faire des mesures de distance entre 2 centimètres et 3 mètres avec une précision de 3mm.



Figure 2-16:Capteur Ultrasons HC-SR04

6-3-2 Fonctionnement du capteur Ultrasons HC-SR04 :

Le principe de fonctionnement consiste à :

Envoyer un signal numérique à l'état haut sur l'émetteur pendant 10 µs.

Le capteur envoie automatiquement 8 impulsions d'ultrasons à 40 kHz et détecte les signauxqui reviennent.

Si le signal revient, la durée de l'état haut du signal reçu correspond au temps entre l'émissiondes ultrasons et leur réception.

6-3-3 Calcul de la distance :

Distance = (temps à l'état haut signal reçu * vitesse du son) / 2 (vitesse du son dans l'air : 340m/s).

6-3-4- Le diagramme temporel :

Le diagramme temporel est affiché ci-dessous. Il faut fournir un signal à l'état haut pendant 10µs à l'entrée de l'émetteur pour déclencher la salve d'ultrasons. Le module envoie ensuite 8 cycles d'ultrasons à 40 kHz et attend le signal reçu. Le récepteur reçoit un signal à l'état haut dont la durée est proportionnelle à la distance de l'objet perçu. Le calcul de la distancepeut se faire grâce au temps mesuré entre le signal émis et le signal reçu.[6]

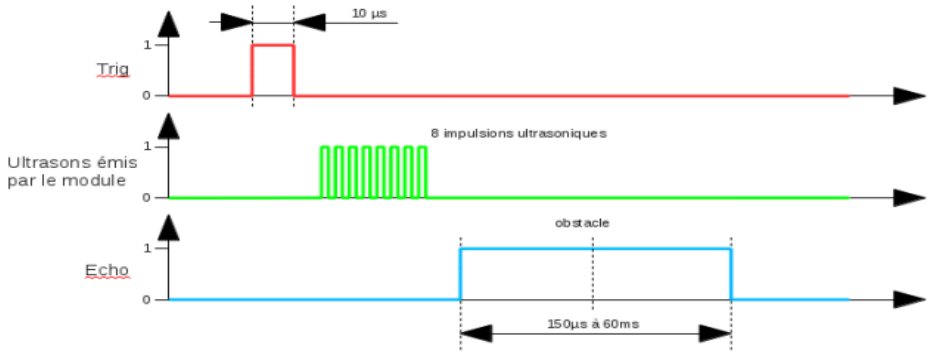


Figure 2-17:Le diagramme temporel

6-3-5Montage capteur HC-SR04 avec Arduino :

Le module HC-SR04 possède 4 broches :

Vcc : Alimentation +5 V DC sert à alimenter le circuit du HC-SR04.

Trig : est l'entrée qui nous permet de déclencher l'émission d'un ultrason.

Echo : est la sortie qui se met à 5 V pendant une durée égale à l'aller-retour de l'ultrason, (Echo output).

GND : Masse de l'alimentation.

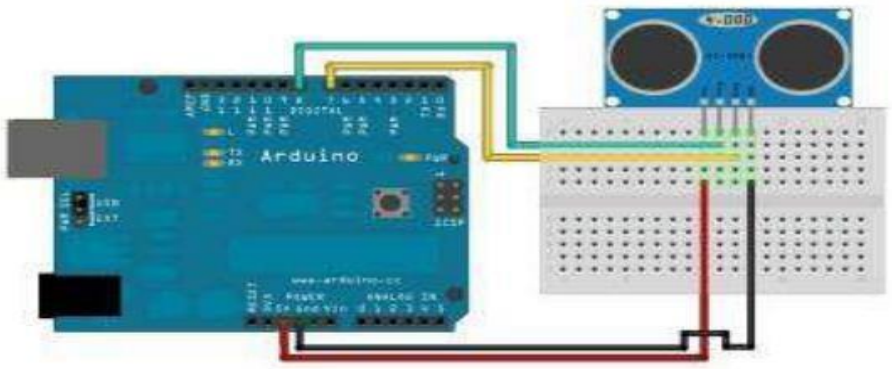


Figure 2-18:Montage HC-SR04 avec Arduino

Considérations pratiques pour l'utilisation de ce capteur

Le Capteur ne peut pas mesurer avec précision

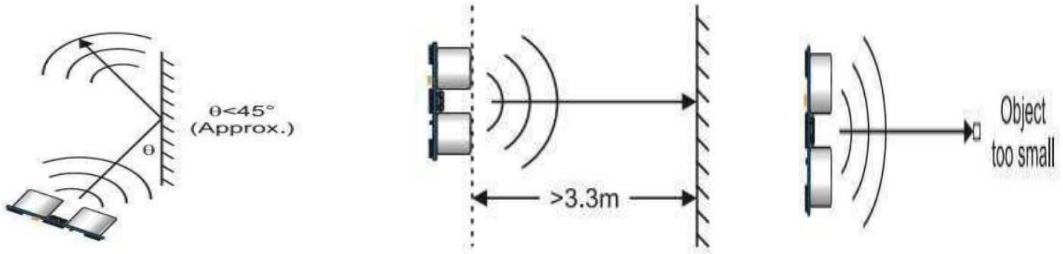


Figure 2-19:distance supérieure de Cible.

la distance d'un objet :

calcule la distance et l'envoie par la liaison parallèle à l'ordinateur. Le servomoteur commandé par la carte ARDUINO, effectue un balayage de gauche à droite couvrant le champ exploré de 180 degrés, puis le balayage inverse, et ainsi de suite.

IIII.6.8- L'opération qui permet de calculer la distance :

$d = (v .t)/2$ (17)

Avec :

d : la distance en cm

v : la vitesse du son dans l'aire (v=340 m/s).

t : temps écoulé entre l'émission du l'onde et la réception de l'écho

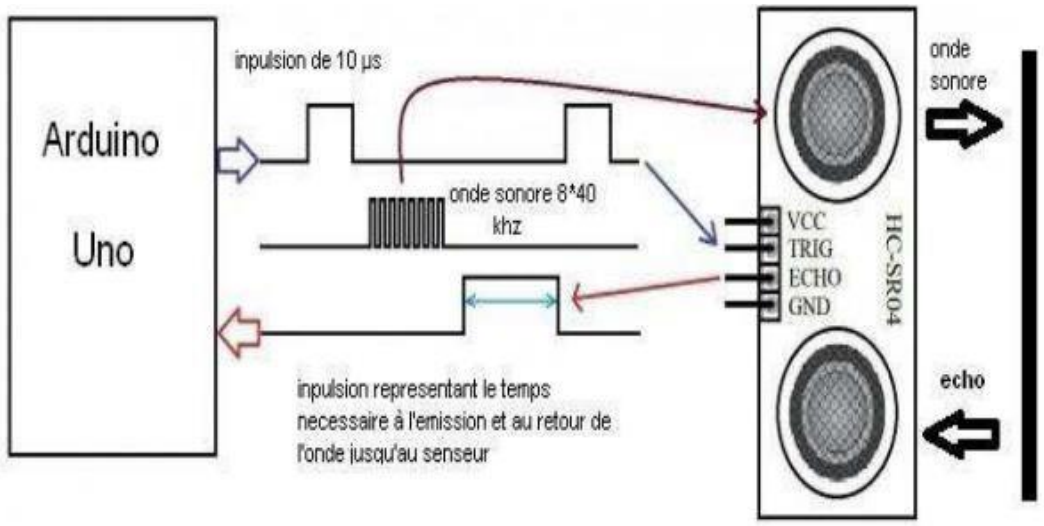


Figure 2-20:: Diagramme temporel de HC-SR04.

6-4 Module Afficheur LCD

Les afficheurs LCD sont devenus indispensables dans les systèmes techniques qui nécessitent l'affichage des paramètres de fonctionnement. Ces Afficheurs permettent d'afficher des lettres, des chiffres et quelques caractères spéciaux. Vu de l'extérieur, les écrans LCD alphanumériques sont essentiellement caractérisés par leur taille [12].

Deux modèles se rencontrent très fréquemment et sont les meilleurs marchés, celui ayant 2 lignes et16 colonnes d'affichage et celui ayant 4 lignes et 20 colonnes d'affichage.[6]



Figure 2-21: Afficheurs LCD : (a) (16x2), (b) (20x4).

Ces deux écrans ont exactement la même nomenclature des broches, un connecteur 1

6-5 Servomoteur

Un servomoteur (souvent abrégé en « servo », provenant du latin servus qui signifie « esclave »)est un moteur capable de maintenir une opposition à un effort statique et dont la position estvérifiée en continu et corrigée en fonction de la mesure. C'est donc un système asservi. Leservomoteur intègre dans un même boitier, la mécanique (moteur et engrenage), etl'électronique, pour la commande et l'asservissement du moteur. La position est définie avec unelimite de débattement d'angle de 180 degrés, mais également disponible en rotation continue.[6] Un servomoteur est composé :

D'un moteur à courant continu.

D'un axe de rotation et potentiomètre.

D'une carte électronique pour le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur.

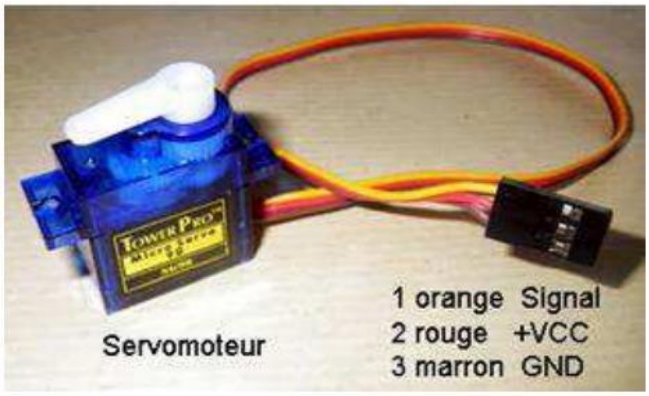


Figure 2-22:Servomoteur à rotation angulaire

6-5-1 Commander le servomoteur :

Le principe du moteur et assez simple, il suffit d'envoyer une impulsion, le temps que dureracette impulsion déterminera l'angle du servomoteur. Ce temps d'impulsion est de quelques millisecondes et doit être répété à un intervalle régulier.

Le servomoteur est commandé par l'intermédiaire d'un câble électrique à 3 fils qui permettent d'alimenter le moteur et de lui transmettre des ordres de positions sous forme d'un signal codé en largeur d'impulsion plus communément appelés PWM (Pulse Width

Modulation ou Modulation de Largeur d'Impulsion) ou RCO (Rapport Cyclique d'Ouverture).

Cela signifie que c'est la durée des impulsions qui détermine l'angle absolu de l'axe de sortie et donc la position du bras de commande du servomoteur. Le signal est répété périodiquement, en général toutes les 20 millisecondes, ce qui permet de contrôler et de corriger continuellement la position angulaire de l'axe de sortie, cette dernière étant mesurée par le potentiomètre.[9]

6-5-2 Caractéristiques du servomoteur :

Sont présentées dans la figure ci-dessous.



Figure 2-23:Caractéristiques du servomoteur à rotation angulaire (Micro-Servo).

. 6-5-3 Montage du servomoteur avec Arduino :

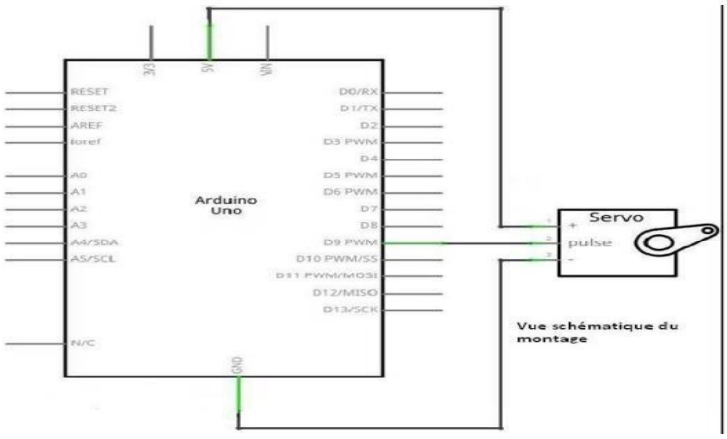


Figure 2-24:montage servomoteur avec Arduino

6-6 Tests et résultats

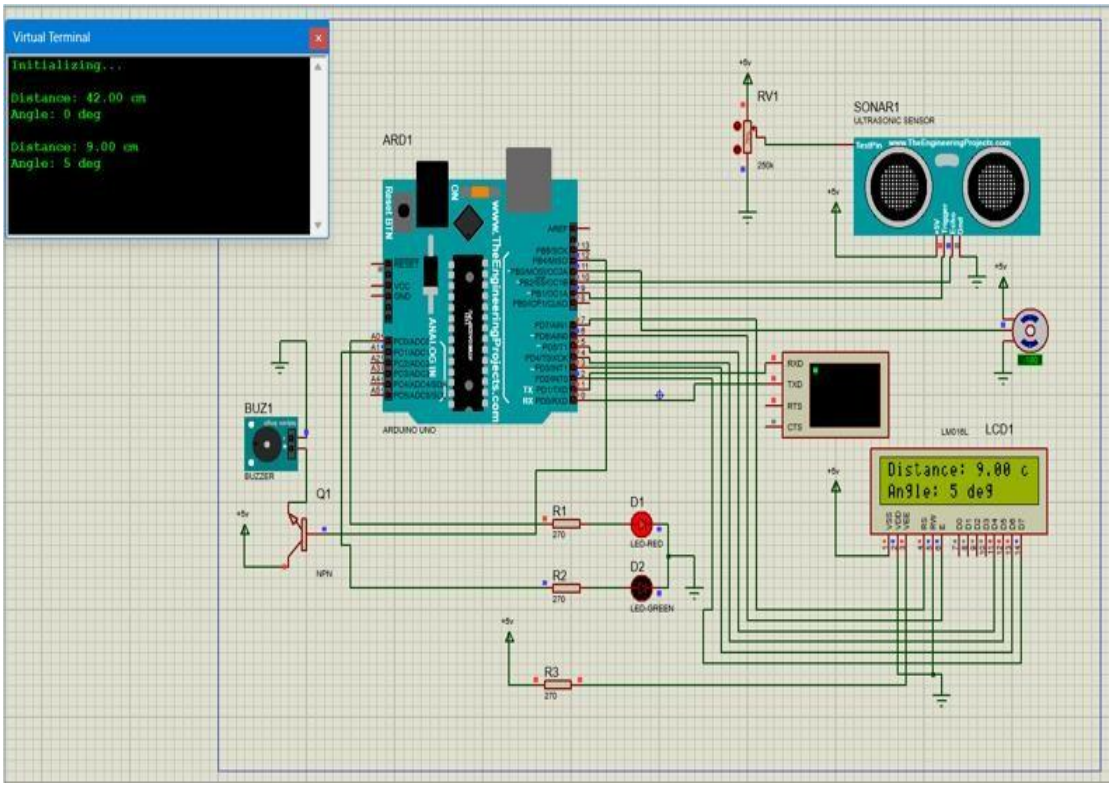


Figure 2-25: Simulation d'un système Radar avec logiciel Proteus

Lorsque le servo moteur fait un balayage le capteur ultrason émet des impulsions par L'émetteur, en absence de cible le buzzer et les LEDs sont éteints.

En présence de cible la distance sera affichée à l'afficheur LCD et les LEDvont prendre les états suivant en fonction de la distance :

Si la distance de cible a indiqué par l'ultrason supérieur de la distanceSec 50 cm alors :La LED Vert ON, LED Rouge OFF et le Bipeur ON.

Si la distance de cible a indiqué par l'ultrason inferieur de la distanceSec 50 cm alorsLa LED Vert OFF, LED Rouge ON et la Bipeur ON.

Il y a toujours un silence de durée fixe après l'émission des ultrasons pour éviter de recevoir prématurément un écho en provenance directement du capteur, Pour obtenir différentes mesures nous avons réalisé plusieurs tests avec plusieurs distances.

La distance ciblée sur des angles variant de1°à180°et inferieur de la distanceSec. Les Résultats obtenus pour la détection d'une cible fixe sont présentés sur le tableau suivant :

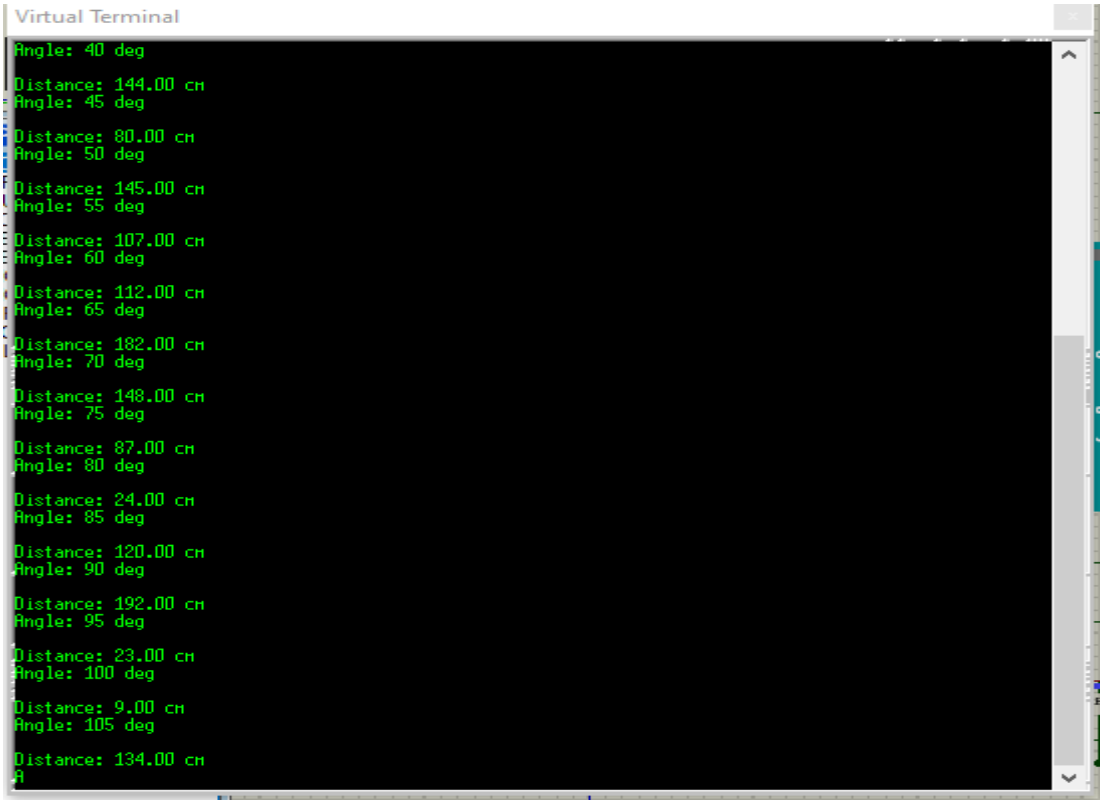


Figure 2-26:Résultats de mesures de la distance et de l'angle d'une cible1.

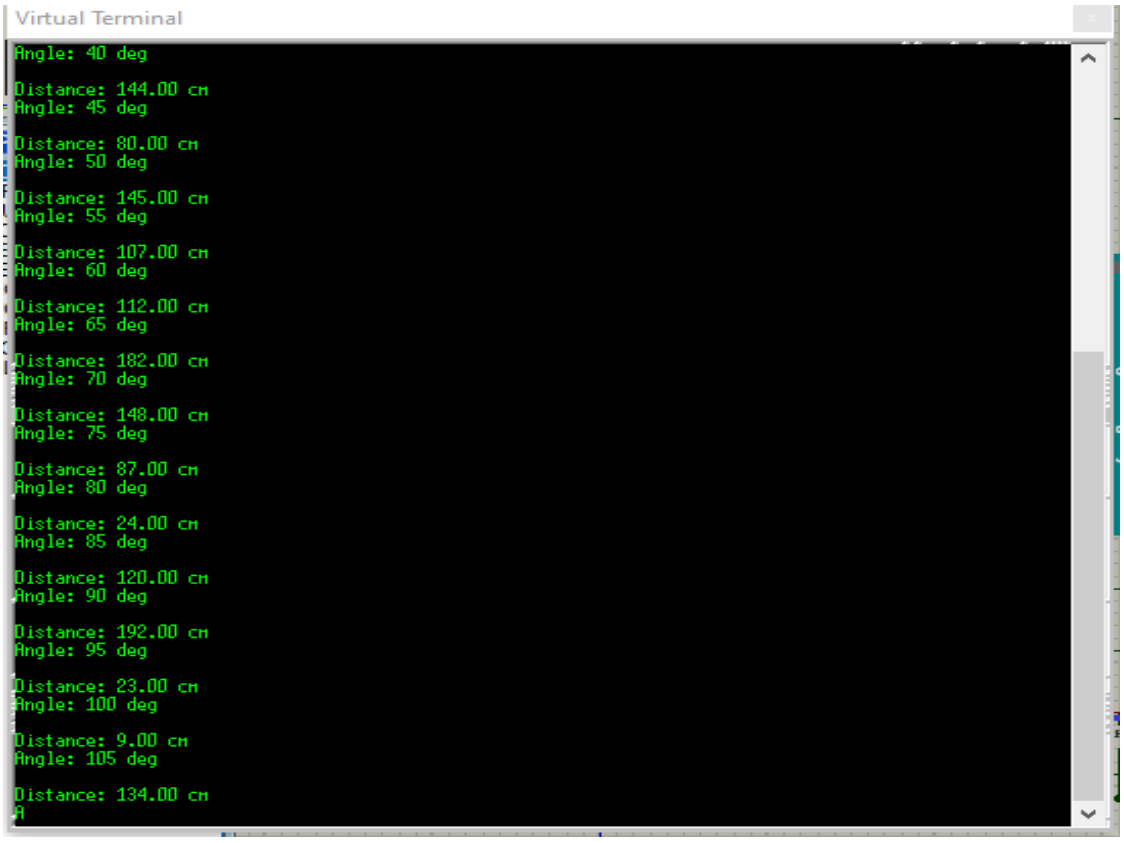


Figure 2-27:Résultats de mesures de la distance et de l'angle d'une cible

7-Conclusion

En conclusion, le radar EL/M-2084 est un système de radar multifonctions avancé qui joue un rôle crucial dans la défense aérienne et la localisation d'armes hostiles. Sa technologie AESA, sa polyvalence et son expérience opérationnelle font du radar EL/M-2084 un choix essentiel pour les forces de défense modernes.

Chapitre III : L'unité de commande et de contrôle (Battle Management Command)

1-L'unité de commande et de contrôle :(Battle Management Command)

joue un rôle central dans le système de défense antimissile Iron Dome. Voici ses principales fonctions:

Collecte et fusion des données:

- Reçoit les données de détection et poursuite des différents radars
- Fusionne ces données pour obtenir une image aérienne unifiée de la situation

Identification des menaces:

- Analyse les trajectoires et caractéristiques des cibles détectées
- Identifie et classe les menaces réelles (roquettes, obus, etc.) parmi les cibles

Allocation des ressources:

- Détermine les cibles à engager en priorité en fonction de leur menace
- Affecte de façon optimale les lanceurs et missiles d'interception disponibles

Calcul des solutions d'interception:

- Estime les points d'impact probables des menaces
- Calcule les solutions de tir (vecteurs, fenêtres de tir) pour l'interception

Ordres de conduite de tir:

- Transmet les ordres de tir aux lanceurs avec les solutions calculées
- Coordonne l'engagement des missiles d'interception sur leurs cibles

L'unité de commande centralise ainsi le traitement des données, la gestion des ressources, et l'orchestration globale des différents sous-systèmes impliqués dans la défense antimissile.



Figure 3-1 Battle Management Command

1.1 Collecte et fusion des données

Voici comment s'effectue la collecte et la fusion des données dans le système de défense antimissile Iron Dome:

1. Collecte des données radars:

- Les différents radars (surveillance 3D, poursuite, etc.) détectent et traquent les cibles aériennes potentielles.
- Chaque radar fournit un flux de données contenant les positions, vitesses, caractéristiques des cibles qu'il suit.

2. Transmission des données:

- Les données radar brutes sont transmises en temps réel par des liens de données sécurisés (fibre optique, liaisons radio, etc.).
- Elles convergent vers le centre de conduite de tir et l'unité de fusion de données.

3. Alignement des données:

- Les données provenant de radars différents doivent être mises en correspondance temporelle précise.
- Des techniques d'horodatage, de synchronisation d'horloge et de recalage sont utilisées.

4. Association des pistes:

- Des algorithmes d'association de pistes identifient les différentes observations d'une même cible provenant de radars multiples.
- Cela permet de constituer une piste de cible unique et cohérente à partir des données fusionnées.

5. Fusion des données:

- Les données alignées et associées sont fusionnées par des techniques de filtrage statistique (filtres de Kalman, etc.).
- La fusion pondère les données en fonction de leur précision pour obtenir une piste optimale de la cible.

6. Gestion des pistes:

- Le système suit et met à jour en continu les pistes des différentes cibles dans sa zone d'intérêt.
- Il initie, maintient ou termine les pistes selon les menaces détectées.

Cette fusion précise des données multisenseurs permet au système de disposer d'un historique de pistes de cibles complet et fiable pour effectuer l'identification des menaces et la planification des interceptions.

1.1.1 Collecte des données radars :

Voici les principales étapes de la collecte des données radars dans le système Iron Dome:

1. Emission des impulsions radars:

- Les différents radars (surveillance 3D, poursuite, etc.) émettent des impulsions électromagnétiques codées dans les bandes de fréquences adaptées.
- Ces impulsions balayent les secteurs surveillés selon les modes de fonctionnement des radars.

2. Réception des échos:

- Quand une impulsion radar rencontre une cible (roquette, avion, etc.), une partie de l'énergie est réfléchie vers le radar sous forme d'écho.
- L'antenne du radar reçoit et amplifie ces échos généralement très faibles.

3. Conversion analogique-numérique:

- Les échos analogiques sont convertis en données numériques par un convertisseur analogique-numérique très rapide.

- On obtient ainsi un flux numérique échantillonné des échos.

4. Traitement du signal numérique:

- Le signal numérique des échos subit différents traitements: filtrage, compression d'impulsion, intégration cohérente/non-cohérente.
- Cela permet d'extraire les informations de distance, direction, vitesse doppler des cibles détectées.

5. Formation des données radar:

- Les cibles détectées sont converties en plots contenant leurs paramètres cinématiques (position, vitesse, etc.).
- On forme ainsi un flux continu de données organisées pour chaque cible suivie par le radar.

6. Transmission des données:

- Les données radar formatées sont transmises via une liaison de données vers le centre de fusion.
- La transmission utilise généralement des réseaux de communication dédiés sécurisés.

1.1.2 Alignement des données :

Voici comment s'effectue l'alignement des données provenant des différents radars dans le système Iron Dome:

1. Synchronisation temporelle:

- Tous les radars et systèmes sont synchronisés sur une référence de temps commune très précise (horloge atomique ou GPS).
- Chaque trame de données est horodatée avec un temps de référence absolu commun.

2. Corrections géométriques:

- La position et l'orientation précises de chaque radar sont connues et entrées dans le système.
- On applique des corrections géométriques pour rapporter les données dans un référentiel commun.

3. Recalage des données:

- Malgré la synchronisation, il peut subsister de légers décalages temporels entre les données radars dues aux latences.

- Des techniques de recalage fin sont utilisées pour aligner parfaitement les données dans le temps.

4. Association de pistes:

- Pour une même cible, on associe et fusionne les observations provenant des différents radars.
- Des algorithmes de poursuite de pistes accomplissent cette corrélation des données.

5. Conversion de coordonnées:

- Les données peuvent être rapportées dans différents systèmes de coordonnées (cartésien, sphérique, etc.)
- Des conversions sont réalisées pour représenter les cibles dans un système de référence commun.

6. Gestion des incohérences:

- En cas de données aberrantes ou incohérentes d'un capteur, des techniques de validation et de lissage sont appliquées.
- Cela permet de détecter et corriger les erreurs ponctuelles.

L'alignement précis des données est essentiel pour combiner de manière cohérente les informations hétérogènes des différents capteurs radars

1.2 Identification des menaces

Voici comment s'effectue l'identification des menaces dans le système de défense antimissile Iron Dome :

1. Pistage des pistes de cibles :

- Le système maintient en permanence la poursuite des pistes de tous les objets aériens détectés dans sa zone de couverture.
- Il met continuellement à jour leurs paramètres cinématiques (position, vitesse, accélération, etc.)

2. Analyse des trajectoires :

- Des algorithmes analysent la trajectoire 4D (position + temps) de chaque piste.
- Ils cherchent à caractériser les trajectoires balistiques potentiellement menaçantes.

3. Discrimination des cibles :

- Le système applique des critères prédéfinis pour discriminer les cibles menaçantes des autres.
- Par exemple, des seuils sur la vitesse, l'altitude, le vecteur de déplacement.

4. Estimation des points d'impact :

- Pour les trajectoires jugées menaçantes, le système extrapole le point d'impact au sol.
- Il détermine si ce point se trouve dans une zone à défendre en priorité.

5. Classement par niveau de menace :

- Un niveau de menace est affecté à chaque trajectoire selon une grille prédéfinie.
- Les cibles sont alors classées par ordre de priorité en fonction des menaces potentielles.

6. Validation humaine (optionnelle) :

- Dans certains cas, une validation finale par un opérateur humain peut être requise avant engagement.

Cette identification des menaces repose sur des critères et règles prédéfinis, mais aussi sur des capacités de calcul en temps réel de trajectoires complexes

1.2.1 S'effectue le pistage des pistes de cibles :

Voici comment s'effectue le pistage des pistes de cibles dans le système de défense antimissile Iron Dome:

1. Initialisation des pistes:

- Lorsqu'un nouveau plot cible est détecté par les radars, une piste de cible est initialisée.
- Une piste contient l'historique des états estimés de la cible (position, vitesse, etc.).

2. Filtrage des états:

- À chaque rafale radar, les nouveaux plots sont associés aux pistes existantes.
- Un filtre de Kalman (ou variante) est utilisé pour intégrer les nouvelles mesures et mettre à jour l'estimation de l'état de la cible.
- Le filtre pondère et lisse les mesures bruitées pour obtenir une estimation optimale.

3. Prédiction de la trajectoire:

- Entre les rafales radar, un modèle dynamique de la cible est utilisé pour prédire sa trajectoire.
- Cette prédiction est corrigée dès que de nouvelles mesures sont disponibles.

4. Gestion de la fenêtre de données:

- Seules les données les plus récentes sont conservées pour chaque piste.
- Les données trop anciennes sont régulièrement supprimées de la fenêtre temporelle.

5. Gestion des pistes:

- La qualité des pistes est évaluée en continu (cohérence des données, précision, etc.).
- Les pistes sont confirmées, mises à jour, fusionnées ou supprimées selon les critères définis.

6. Maintien de la poursuite:

- Tant que les mesures radar le permettent, le système maintient la poursuite des pistes établies.
- En cas de perte, des techniques de réacquisition assistée par le dernier état prédit sont utilisées.

Ce pistage en continu des cibles permet au système de toujours disposer d'un référentiel précis et à jour des menaces aériennes

1.2.2 Analyse des trajectoires :

Voici les principales étapes de l'analyse des trajectoires de cibles effectuée par le système de défense antimissile Iron Dome:

1. Lissage des trajectoires:

- Les trajectoires estimées des cibles subissent un lissage pour réduire les effets du bruit de mesure.
- Des techniques comme le filtrage par splines cubiques ou splines pondérées sont utilisées.

2. Extraction des caractéristiques:

- On extrait différents paramètres caractéristiques des trajectoires lissées, comme:
  - Vecteurs vitesse, accélération
  - Altitudes minimale et maximale
  - Courbure de la trajectoire

3. Reconnaissance de la dynamique:

- À partir des caractéristiques extraites, des algorithmes tentent de reconnaître le type de dynamique:
  - Balistique (roquette, obus)
  - Aérodynamique (avion, drone)
  - Manœuvrante, etc.

4. Classification et catégorisation:

- Les trajectoires sont classées en différentes catégories selon leur dynamique identifiée :
  - Trajectoire balistique endo/exo-atmosphérique
  - Vol aérodynamique, croisière, manœuvrant, etc.

5. Calcul des zones d'impact:

- Pour les trajectoires jugées menaçantes (ex: balistique), on calcule les zones d'impact probables au sol.
- En fonction de la vitesse, de l'angle d'attaque, etc.

6. Discrimination menace/non-menace:

- En croisant la catégorie, la dynamique et les zones d'impact calculées, le système détermine si la trajectoire représente une menace réelle à traiter ou non.

1.2.3 Effectue la discrimination des cibles :

Voici comment s'effectue la discrimination des cibles menaçantes dans le système de défense antimissile Iron Dome:

1. Définition de critères de menace

- Un ensemble de critères et seuils prédéfinis permettent d'identifier les trajectoires représentant une menace.
- Ces critères portent sur des paramètres comme la vitesse, l'altitude, le vecteur de déplacement, etc.

2. Catégorisation des trajectoires

- Après l'analyse de leurs caractéristiques, les trajectoires sont classées en différentes catégories typiques:
  - Balistique endo/exo-atmosphérique
  - Vol aérodynamique
  - Croisière
  - Manœuvrante
  - Etc.

3. Application des critères de menace

- Pour chaque catégorie, des règles de décision spécifiques sont appliquées.
- Par exemple, pour une trajectoire balistique:
    - Vitesse > X m/s
    - Vecteur vers zone sensible
    - Point d'impact dans rayon Y km

4. Calcul du niveau de menace

- Un niveau de menace (élevé, moyen, faible) est attribué à chaque trajectoire selon les règles.
- Ce niveau prend aussi en compte des facteurs comme la zone d'impact prévue.

5. Définition des priorités d'engagement

- Les trajectoires sont alors classées par ordre de priorité décroissante en fonction de leur niveau de menace calculé.

6. Validation humaine (optionnelle)

- Dans certains cas critiques, une validation finale de l'opérateur peut être requise avant engagement contre une menace identifiée.

1.3 Allocation des ressources

Voici comment s'effectue l'allocation optimisée des ressources de défense dans le système antimissile Iron Dome:

1. Inventaire des ressources disponibles

- Le système maintient en temps réel l'inventaire des ressources de tir disponibles:
    - Nombre et position des lanceurs opérationnels
    - Nombre et types de missiles d'interception restants
    - Cadence de tir supportée par les lanceurs

2. Calcul des solutions d'interception

- Pour chaque menace identifiée, on calcule les solutions d'interception possibles:
    - Secteur et fenêtre de tir
    - Type de missile requis
    - Nombre de missiles nécessaires (tir simple/salve)

3. Affectation des ressources

- Un algorithme d'optimisation sous contraintes affecte alors les lanceurs et missiles:
  - En visant à atteindre un niveau de protection maximal
  - Tout en respectant les contraintes de couverture, cadence, etc.

4. Définition des priorités d'engagement

- Les ressources sont allouées en priorité sur les menaces les plus critiques
- Selon la grille de niveaux de menace et l'ordre de priorité calculé

5. Gestion de la saturation

- En cas de saturation momentanée (trop de menaces simultanées), le système applique des règles:
  - Priorisation stricte des ressources sur les menaces les plus graves
  - Possibilité de réallouer si de nouvelles ressources se libèrent

6. Adaptation dynamique

- L'allocation est continuellement réévaluée, les ressources pouvant être réaffectées
  - En fonction de l'évolution des trajectoires et du contexte tactique

1.3.1 Inventaire des ressources disponibles :

Voici un inventaire des principales ressources disponibles pour le système de défense antimissile Dôme de Fer :

Ressources matérielles :

- 10 batteries de lanceurs comprenant chacune 3 lanceurs mobiles de 20 intercepteurs
- 15 radars multi-missions de détection et de poursuite
- 3 unités de contrôle et de commandement mobiles principale
- 5 unités de contrôle et de commandement mobiles secondaires
- Réseaux de communication terrestres et par satellite dédiés
- Générateurs et équipements logistiques de soutien

Ressources financières :

- Budget annuel d'exploitation d'environ 350 millions de dollars US
- Fonds supplémentaires pour l'achat de nouvelles batteries/intercepteurs
- Environ 1 milliard de dollars US d'aide militaire américaine sur 10 ans

Ressources humaines :

- Environ 600 militaires israéliens opérateurs du système
- Équipes d'ingénieurs chez Rafael et autres industriels impliqués

- Analystes renseignement dédiés au sein des forces armées israéliennes
- Commandement opérationnel au niveau interarmées

1-3-2 Définition des priorités d'engagement :

Voici quelques éléments clés pour définir les priorités d'engagement du système de défense antimissile Dôme de Fer :

1. Zones à protéger en priorité :

- Grands centres urbains et zones très peuplées
- Infrastructures critiques (centrales, aéroports, etc.)
- Sites stratégiques militaires et gouvernementaux

2. Types de menaces priorisées :

- Roquettes et obus les plus menaçants (portée, charge, précision)
- Projectiles visant des cibles à haute valeur (voir ci-dessus)
- Salves massives ou saturantes de missiles

3. Règles d'engagement :

- Seuils de risque acceptables pour différentes zones
- Autorisations d'engagement selon les sources de tir
- Minimisation des dommages collatéraux

4. Fenêtres temporelles critiques :

- Périodes de tensions accrues ou de conflit
- Évènements publics majeurs
- Cycles jour/nuit

5. Optimisation des ressources :

- Répartition géographique des batteries
- Gestion de la réserve de munitions
- Maintenance et ravitaillement

Cette définition des priorités permet d'exploiter au mieux les capacités du Dôme de Fer,

1.3.4 Adaptation dynamique :

Voici quelques éléments clés sur l'adaptation dynamique du système de défense antimissile Dôme de Fer :

Réallocation des ressources:

- Redéploiement rapide des batteries de lanceurs et des radars vers les zones les plus menacées
- Transfert de munitions (intercepteurs) entre les différents sites pour ajuster les stocks
- Renfort par des équipes de maintenance et d'opérateurs supplémentaires

Recalibration des priorités:

- Réévaluation en temps réel des zones à risque et des menaces les plus critiques
- Ajustement des règles d'engagement et des seuils de déclenchement
- Coordination renforcée avec les services de renseignement

Gestion de l'endurance:

- Rotations des équipes et des équipements pour assurer un cycle opérationnel continu
- Plans de ravitaillement et de maintenance préétablis
- Disponibilité de ressources de secours (pièces détachées, générateurs, etc.)

Flexibilité du commandement:

- Délégation contrôlée de l'autorité de décision aux niveaux tactiques appropriés
- Procédures d'escalade vers les niveaux supérieurs pour arbitrer les cas complexes
- Canaux de communication sécurisés et redondants

Cette capacité d'adaptation dynamique

1.4 Calcul des solutions d'interception

Voici les principales étapes du calcul des solutions d'interception dans le système de défense antimissile Iron Dome:

1. Calcul du point d'interception souhaité

- À partir de la trajectoire estimée de la menace, on détermine un point idéal d'interception.
- Ce point tient compte de facteurs comme l'altitude désirée, la zone de danger à protéger, etc.

2. Détermination des fenêtres d'engagement

- Autour du point d'interception souhaité, on définit un volume spatial appelé "fenêtre d'engagement".

- Cette fenêtre représente la zone temps/position où l'interception doit avoir lieu pour être efficace.

3. Calcul des vecteurs de tir

- Pour atteindre cette fenêtre d'engagement, différents vecteurs de tir sont calculés.
- Ils prennent en compte la position des lanceurs, les capacités des missiles, les contraintes d'angles de tir, etc.

4. Prédiction du point d'impact résiduel

- Pour chaque solution, on prédit le point d'impact restant de l'éventuelle menace résiduelle non interceptée.
- Cela permet d'évaluer les zones de risque résiduelles au sol.

5. Optimisation de la solution

- Les différentes solutions sont comparées et optimisées, par exemple pour :
  - Maximiser la zone protégée de tout impact
  - Minimiser le nombre de missiles requis

6. Sélection de la solution finale

- La meilleure solution d'interception est finalement sélectionnée en prenant en compte :
  - L'optimisation des critères
  - La disponibilité des ressources (lanceurs, missiles)
  - Les priorités d'engagement définies

1.4.1 Calcul du point d'interception souhaité :

Voici les principales étapes pour le calcul du point d'interception souhaité par le système Dôme de Fer:

1. Acquisition des données de la menace

- Trajectoire, vitesse et altitude du projectile hostile
- Type estimé du projectile (roquette, obus, etc.)

2. Modélisation de la trajectoire

- Projection de la trajectoire future du projectile
- Prise en compte des effets atmosphériques, de la gravité, etc.

3. Identification des zones menacées

- Projection des zones d'impact possibles
- Recoupement avec les zones peuplées et infrastructures prioritaires

4. Contraintes opérationnelles

- Portée et enveloppe de tir des intercepteurs disponibles
- Respect des règles d'évitement de dommages collatéraux

5. Calcul balistique optimisé

- Détermination de la trajectoire d'interception idéale
- Minimisation du temps d'engagement et de la distance de tir
- Maximisation de la probabilité d'interception

6. Estimation du point idéal

- Point de rencontre cible/intercepteur calculé
- En visant ce point, l'intercepteur maximise ses chances d'impact

7. Ajustements en temps réel

- Suivi continuel des trajectoires réelles
- Recalcul du point idéal si nécessaire pour compenser toute déviation

Ce processus combinant des données variées

1.4.2 Sélection de la solution finale :

Voici les étapes clés pour la sélection de la solution finale d'interception par le système Dôme de Fer:

1. Génération des solutions candidates

- Calcul de plusieurs trajectoires d'interception possibles
- Pour chaque solution : estimation du point idéal de rencontre, portée, temps d'engagement

2. Analyse multi-critères

- Evaluation des avantages et inconvénients de chaque solution selon différents paramètres:
  - Probabilité estimée d'interception réussie
  - Respect des règles d'évitement de dommages collatéraux
  - Compatibilité avec les contraintes de vol des intercepteurs
  - Temps d'engagement disponible

- Nombre d'intercepteurs requis

3. Matrice de décision

- Attribution de scores et pondérations aux différents critères
- Classement des solutions selon leurs scores globaux

4. Choix de la solution optimale

- Sélection de la solution ayant le meilleur score global
- Constituant le meilleur compromis au regard des priorités fixées

5. Vérification de la faisabilité

- Simulation finale de la trajectoire d'interception retenue
- Confirmation de l'absence de violation des contraintes critiques

6. Désignation de la batterie

- Identification de la batterie de lanceurs la mieux positionnée
- Transmission des données de tir à cette batterie

7. Initiation de l'engagement

- L'ordre de tir avec la solution retenue est envoyé
- Ouverture de la fenêtre de tir autorisée pour cette batterie

Ce processus structuré et multidimensionnel permet de sélectionner

1.5 Ordres de conduite de tir

Voici comment sont transmis les ordres de conduite de tir dans le système de défense antimissile Iron Dome:

1. Préparation des données de tir

- Une fois la solution d'interception calculée, ses paramètres sont formatés dans des trames de données adaptées:
  - Vecteur d'engagement (site, azimut, élévation)
  - Fenêtre de tir temps/position
  - Type de missile d'interception requis
  - Cibles à engager (données de pistage)

2. Transmission des ordres de tir

- Ces trames de données sont transmises via un lien de données sécurisé:
  - Du centre de calcul vers le lanceur affecté
  - En temps réel et avec une faible latence de transmission

3. Réception et traitement des ordres

- Le lanceur reçoit et valide l'intégrité des ordres de tir.
- Il configure sa plateforme de tir en conséquence (azimut, élévation, etc.)
- Il active les procédures de mise à feu du missile adéquat.

4. Lancement du missile

- Durant la fenêtre de tir, le lanceur effectue la séquence de lancement.
- Le missile est propulsé vers la fenêtre d'engagement calculée.

5. Transfert de poursuite

- La poursuite de la cible est transférée du radar de surveillance au radar de conduite de tir.
- Les données de pistage très précises sont transmises au missile après lancement.

6. Guidage terminal

- Le radar de conduite de tir continue à guider le missile jusqu'à l'interception en rafraîchissant régulièrement sa trajectoire.
- Des contre-mesures peuvent être appliquées si la cible effectue des manœuvres d'évitement.

1.5.1 Préparation des données de tir :

Voici les étapes clés pour la préparation des données de tir par l'unité de commandement et de contrôle du système Dôme de Fer:

1. Consolidation des données sur la cible

- Trajectoire précise et vecteurs de vitesse de la menace entrante
- Informations sur le type de projectile (roquette, obus, etc.)
- Coordonnées de la zone d'impact prévue

2. Identification de la batterie de tir

- Sélection de la batterie la mieux positionnée pour l'interception
- Prise en compte de la portée des intercepteurs et des contraintes géographiques

3. Calcul de la solution d'interception optimale

- Point idéal de rencontre cible/intercepteur calculé par l'algorithme
- Trajectoire de tir correspondante pour les intercepteurs

4. Fenêtre de tir théorique

- Estimation de la fenêtre temporelle disponible pour le tir
- Basée sur les dynamiques de vol de la cible et de l'intercepteur

5. Paramètres d'armement de l'intercepteur

- Mode de guidage (IR, radar, etc.)
- Séquence d'acquisition et de poursuite de la cible

6. Règles d'ouverture du feu

- Validations nécessaires avant autorisation (civils, dommages, etc.)
- Définition des critères de "go" ou "no go"

7. Prévisions de dommages collatéraux

- Modélisation des zones d'exclusion autour du point d'impact prévu
- Respect des règles d'engagement définies

1.5.2 Transmission des ordres de tir :

Voici les étapes détaillées pour la transmission des ordres de tir depuis l'unité de contrôle et de commandement vers la batterie de lanceurs désignée pour l'interception:

1. Message d'alerte initiale

- Envoi d'un message à la batterie pour la prévenir d'un ordre de tir imminent
- La batterie passe alors en état d'alerte maximum

2. Transmission des données d'engagement

- Trajectoire précise de la cible
- Point d'interception calculé
- Paramètres de tir (mode de guidage, fenêtre de tir, etc.)
- Estimation des dommages collatéraux potentiels

3. Validation croisée des données

- La batterie confirme avoir bien reçu et interprété les données
- Résolution de toute ambiguïté avant engagement

4. Autorisation d'ouverture du feu

- Message final du centre de contrôle autorisant le tir
- Incluant un compte à rebours jusqu'à la fenêtre de tir

5. Systèmes armés

- La batterie effectue les dernières procédures d'armement
- Alignement fin des calculateurs de conduite de tir

6. Tirs des intercepteurs

- Pendant la fenêtre de tir, salves d'un ou plusieurs intercepteurs
- Acquisition immédiate de la cible par les radars de la batterie

7. Comptes-rendus de tir

- La batterie transmet des rapports en temps réel sur le déroulé de l'engagement
- Pour ajustements éventuels ou réengagements

1.5.3 Réception et traitement des ordres :

Voici les étapes clés pour la réception et le traitement des ordres de tir au niveau de la batterie de lanceurs du système Dôme de Fer:

1. Réception du message d'alerte initiale

- La batterie est mise en état d'alerte maximale
- Préparation des systèmes d'armes et calculateurs de tir

2. Réception des données d'engagement

- Trajectoire précise de la menace
- Point d'interception calculé
- Paramètres de tir (guidage, fenêtre temporelle, etc.)
- Vérification de l'intégrité des données transmises

3. Validation croisée des ordres

- Confirmation explicite de la compréhension des ordres
- Résolution de toute ambiguïté avec le centre de commandement

4. Alimentation des calculateurs

- Entrée manuelle ou automatique des données de tir

- Alignement fin des systèmes d'armes

5. Autorisation finale de lancement

- Réception du message "Feu autorisé" et compte à rebours
- Dernières vérifications de sécurité avant mise à feu

6. Conduite de tir

- Tir des intercepteurs durant la fenêtre autorisée
- Acquisition radar et guidage terminal

7. Comptes rendus en temps réel

- Transmission des données de tir (trajectoires, impacts, etc.)
- Préparation pour un réengagement si nécessaire

2-Modèle mathématique et dérivation des coordonnées géographiques de la cible

2-1Coordonnées cartésiennes

La terre étant supposée rigide, le référentiel doit être fixé en son centre. L'axe Z est pris parallèle à l'axe moyen de rotation. L'axe X est parallèle à l'équateur correspondant, dans le méridien de Greenwich, et l'axe Y leur est perpendiculaire, vers (90º)est. Ces axes sont parallèles à ceux classiquement adoptés pour les sphéroïdes géodésiques de référence. L'origine peut être prise au centre de n'importe quel sphéroïde de référence pratique sur lequel l'une des stations d'astrotriangulation peut être localisée. [26].

2-2Aperçu technique du GPS

Les caractéristiques techniques et opérationnelles du GPS sont organisées en trois segments :

1. Le segment spatial.

2. Le segment du contrôle opérationnel.

3. Le segment des équipements utilisateur.

Les signaux GPS, qui sont diffusés par chaque satellite et transportent des données vers les deux équipements des utilisateurs et les installations de contrôle au sol relient les segments entre eux en un seul système. [30].

2-3Technologie de récepteur GPS

La technologie GPS est basée sur des informations exactes sur l'heure et la localisation. Pour calculer la position de l'utilisateur sur Terre, un récepteur GPS reçoit les signaux de trois satellites ou plus en même temps [28].

Les récepteurs GPS ne peuvent pas fonctionner dans les bâtiments qui bloquent les signaux satellite haute fréquence. Avant d'allumer le récepteur GPS, l'utilisateur doit d'abord choisir un emplacement approprié pour se tenir, de préférence sur une surface plane avec un horizon dégagé [31].

Ensuite, il acquiert les signaux satellite et affiche la force du signal pour indiquer une connexion réussie. Lorsque les signaux de trois satellites sont reçus, le système peut effectuer un calcul préliminaire de la position géographique et fournir des informations.[29].

2-4Système géodésique mondial (WGS-84)

Le modèle physique standard de la Terre utilisé pour les applications GPS est le Système géodésique mondial-1984 (WGS-84)[32].

Une partie du WGS-84 est un modèle détaillé des irrégularités gravitationnelles de la Terre.

De telles informations sont nécessaires pour obtenir des informations précises sur les éphémérides satellite ; cependant, l'estimation de la latitude, de la longitude et de la hauteur d'un récepteur GPS est concernée. À cette fin, le WGS-84 fournit un modèle ellipsoïdal de la forme de la Terre,

Dans ce modèle, les sections transversales de la Terre parallèles au plan équatorial sont circulaires. La section transversale équatoriale de la Terre a un rayon de (6378,137 km), qui est le rayon équatorial moyen de la Terre. Dans le modèle terrestre WGS-84, les sections transversales de la Terre normales au plan équatorial sont ellipsoïdales. Dans une coupe ellipsoïdale contenant l'axe Z, le grand axe coïncide avec le diamètre équatorial de la Terre. Le demi-grand axe (a) a donc la même valeur que le rayon équatorial moyen donné ci-dessus. Le petit axe de la section ellipsoïdale . correspond au diamètre polaire de la terre ; le demi-petit axe (b) dans WGS-84 est considéré comme étant (6356,752 km.) Ainsi, l'excentricité de l'ellipsoïde terrestre (e) est

$$e = \sqrt{\frac{\left(a^2 - b^2\right)}{a^2}} \quad \text{---------- (1)}$$

2-5Formule de transformation du système de coordonnées géographiques

La latitude (φ) est l'angle mesuré entre le plan équatorial et la ligne normale de l'ellipsoïde et la longitude (λ) est l'angle mesuré à partir du méridien de Greenwich[34].

La latitude (φ) et la longitude (λ), en termes de système de coordonnées géographiques, peuvent être exprimées en termes d'un système de coordonnées cartésiennes géocentriques (centré sur la Terre) (X, Y, Z) avec l'axe Z correspondant à l'axe polaire positif. vers le nord, l'axe X passant par l'intersection du méridien de Greenwich et de l'équateur, et l'axe Y passant par l'intersection de l'équateur avec la longitude (90º) E. Les systèmes de coordonnées géocentriques sont classiquement considérés comme étant définis avec l'axe X par l'intersection du méridien de Greenwich et de l'équateur. Cela nécessite que le système de coordonnées géographiques équivalent soit basé sur le méridien de Greenwich. En application des formules ci-dessous, le système de coordonnées géographiques basé sur un méridien non Greenwich doit d'abord être transformé en son équivalent Greenwich. Si le demi-grand axe du sphéroïde de la Terre est (a) égal à (6 378,137 km) et que le demi-petit axe est (b) égal à (6 356,852 km), les équations du système de coordonnées cartésiennes (X, Y, Z) sont [35] .

Où N est le premier rayon de courbure vertical à la latitude φ et est égal à :

$$X = (N+h).\cos\varphi.\cos\lambda \text{.....(2)}$$
$$Y = (N+h).\cos\varphi.\sin\lambda \text{.....(3)}$$
$$Z = \left(\frac{b^2}{a^2}.N + h\right).\sin\varphi \text{.....(4)}$$

φ et λ sont respectivement la latitude et la longitude (liées au méridien d'origine) du point, h est la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde [36].

2-6Méthodologie

Le récepteur GPS a été installé sur le WGS-84 et les coordonnées géographiques (latitude, longitude et hauteur) du site ont été déterminées également les unités des coordonnées (deg., mètre) ont été déterminés. Les étapes suivantes sont alors effectuées :

$$N = \frac{a}{\sqrt{(1 - e^2.\sin^2\varphi)}} \text{ ---------- (5)}$$

1. Après avoir sélectionné la position appropriée de l'observateur en fonction du site inconnu.

Quatre satellites ont été considérés pour déterminer les coordonnées géographiques du position d'observateur.

2. Une valeur approximative des distances entre la position de l'observateur et l'inconnu la position du site (c'est-à-dire la distance (R)) a été mesurée à l'aide du télémètre laser.

3. En utilisant l'équation (2, 3 et 4), les coordonnées géographiques (φi, λi, hi) de l'observateur étaient transformé en coordonnées cartésiennes (Xi, Yi, Zi), où (i=1, 2, 3, 4…).

4. Dérivation des équations mathématiques pour calculer les coordonnées cartésiennes du position inconnue en trois dimensions (X unk. Y unk., Z unk.).

5. Ces coordonnées cartésiennes de la position inconnue se transforment en coordonnées géographiques coordonnées en utilisant les équations (6 et 7) :

$$\varphi_{unk.} = \tan^{-1}\left(\frac{Z_{unk.} + N_i.e^2.\sin\varphi_l}{\sqrt{X_{unk.}^2 + Y_{unk.}^2}}\right) \text{ --------- (6)}$$

$$\lambda_{unk.} = \tan^{-1}\left(\frac{Y_{unk.}}{X_{unk.}}\right) \text{ ---------- (7)}$$

2-7Résultats et discussions

L'importance de cette recherche est de résoudre le problème de la détermination des coordonnées de position inconnues d'un point ou d'un site à longue distance. Pour calculer ces équations afin de trouver la position inconnue, quatre positions de mesure de l'observateur à distance de la position inconnue à l'aide du récepteur GPS ont été nécessaires. Ensuite, les distances entre les positions de l'observateur et la position inconnue sont mesurées à l'aide du télémètre laser (LRF).

Grâce à cette dérivation, la forme finale des trois équations nécessaires pour déterminer les coordonnées cartésiennes de la position inconnue a été trouvée. La dérivation d'équations athématiques pour mesurer les coordonnées cartésiennes de la position inconnue en trois dimensions (X unk, Y unk.,Z unk.) situé à distance de la position de l'observateur. En utilisant quatre positions d'observateur (Xi, Yi, Zi) et la plage (Ri)

entre l'observateur et les positions inconnues, les équations résultantes étaient les fondations : L'axe X des coordonnées cartésiennes :

$$X_{unk.} = \frac{D_3 D_4 - D_1 D_6}{D_2 D_6 - D_3 D_5}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad \ldots\ldots\ldots \quad ..(8)$$

Où :

$$D_1 = \frac{C_1}{(Z_2 - Z_1)} - \frac{C_2}{(Z_3 - Z_2)}$$

$$C_1 = \frac{A_1 - A_2 + B_2 - B_1}{2},$$

$$A_1 = R_1^2, A_2 = R_2^2,$$

$$B_1 = X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2, B_2 = X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2, \text{and}$$

$$C_2 = \frac{A_2 - A_3 + B_3 - B_2}{2}, A_3 = R_3^2, B_3 = X_3^2 + Y_3^2 + Z_3^2,$$

$$D_2 = \frac{X_1 - X_2}{Z_2 - Z_1} - \frac{X_2 - X_3}{Z_3 - Z_2},$$

$$D_3 = \frac{Y_1 - Y_2}{Z_2 - Z_1} - \frac{Y_2 - Y_3}{Z_3 - Z_2},$$

$$D_4 = \frac{C_2}{Z_3 - Z_2} - \frac{C_3}{Z_4 - Z_3}, C_3 = \frac{A_3 - A_4 + B_4 - B_3}{2},$$

$$A_4 = R_4^2,$$

$$B_4 = X_4^2 + Y_4^2 + Z_4^2,$$

$$D_5 = \frac{X_2 - X_3}{Z_3 - Z_2} - \frac{X_3 - X_4}{Z_4 - Z_3},$$

$$D_6 = \frac{Y_2 - Y_3}{Z_3 - Z_2} - \frac{Y_3 - Y_4}{Z_4 - Z_3},$$

L'axe Y des coordonnées cartésiennes :

$$Y_{unk.} = -\frac{1}{D_6}[D_4 + D_5 X_{unk.}] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(9)$$

L'axe Z des coordonnées cartésiennes :

$$Z_{unk.} = \frac{1}{(Z_2 - Z_1)}\left[C_1 + (X_1 - X_2)\left(\frac{D_3D_4 - D_1D_6}{D_2D_6 - D_3D_5}\right) + \frac{D_2}{D_3}(Y_1 - Y_2)\left(\frac{D_1D_6 - D_3D_4}{D_2D_6 - D_3D_5}\right) - \frac{D_1}{D_3}(Y_1 - Y_2)\right] \text{.....(10)}$$

Après cela, le calcul de la position inconnue en trois dimensions (X unk, Y unk.,Z unk) par les équations déviées pourrait être effectué. Ensuite, cette recherche pourrait effectuer une autre transformation à partir des coordonnées cartésiennes de position inconnue (X unk., Y unk.,Z unk .) aux coordonnées géographiques (φunk.,λunk.).

III. 10 .8 Conclusions et suggestions :

Du résultat obtenu, les conclusions et suggestions suivantes peuvent être dérivées :

1. 1. À partir des équations déviées finales (8, 9 et 10) qui sont utilisées pour mesurer le une position inconnue située à distance de la position de l'observateur doit être trouvé quatre observateurs pour tenir le récepteur GPS.

2. LRF doit être trouvé pour donner la valeur de la distance entre l'observateur et l'inconnu position.

3. Ces équations mathématiques réussissent dans les applications pratiques.

Exemple pratique

Supposons que nous ayons le point géographique suivant

Latitude :Ø :52.52^0

Longitude :λ :13.42^0

Hauteur :h :34 m

Pas

Convertir la latitude et la longitude en radians

Ørad = π/180*52.52=0.9163 rad

λ rad = π/180*13.52=0.2339 rad

Calculer le rayon horizontal N : e^2= (b/a)^2-1

a = 6356752.3142 ; b = 6378137 En remplaçant dans l'équation 5

nous trouvons N ≈6390278.661

En substituant un nombre (2) (3) (4) dans l'équation, on trouve les coordonnées cartésiennes suivantes:

X= 3771793.97m.

Y = 884593.67m.

Z= 5038470.79m.

En comparant les résultats obtenus avec les résultats obtenus depuis le drone et en suivant les mêmes étapes, on retrouve une convergence quasi nulle, ce qui indique que les deux coordonnées géographiques sont identiques.

3-Conclusion

En conclusion, le processus de calcul des solutions d'interception et de conduite de tir du système de défense antimissile Dôme de Fer fait intervenir de nombreuses étapes complexes et critiques :

Tout commence par l'acquisition précise des données sur la menace entrante - sa trajectoire, sa vitesse, son type. L'unité de contrôle central calcule alors la solution

d'interception idéale en termes de point de rencontre, trajectoires des intercepteurs, fenêtres de tir, etc. Elle sélectionne la batterie de lanceurs la mieux positionnée et lui transmet les ordres de tir détaillés.

Au niveau de la batterie, ces ordres sont validés, les systèmes d'armes sont armés avec les données de la cible. Après les dernières vérifications de sécurité, les intercepteurs sont lancés avec une précision maximale pendant la fenêtre temporelle autorisée. Leur guidage terminal vise à les amener à l'impact optimal sur la cible.

Ce processus fait intervenir des algorithmes avancés de calculs balistiques, de nombreux systèmes automatisés mais aussi des procédures de vérification et de validation humaines à chaque étape cruciale. Une synchronisation parfaite entre l'unité centrale et les batteries est nécessaire.

Chapiter IV :
Unité de Lancement de Missiles

1-les batteries (ou systèmes de tir) du système de défense anti-roquettes Dôme de Fer

Les batteries du Dôme de Fer (ou "Iron Dome" en anglais) sont des unités mobiles de défense aérienne composées de plusieurs éléments principaux.

1) Radar de détection et de suivi :

Chaque batterie est équipée d'un radar avancé (comme le radar EL/M-2084 de l'Israel Aerospace Industries) qui détecte les roquettes et projectiles entrants. Ce radar suit la trajectoire des menaces et fournit des informations en temps réel sur leur position.

2) Centre de gestion de bataille :

Il s'agit du cerveau du système. Le centre de gestion analyse les données fournies par le radar et calcule la trajectoire des projectiles pour déterminer s'ils menacent des zones peuplées ou des infrastructures critiques. Il décide ensuite si une interception est nécessaire.

3) Lanceurs de missiles :

Chaque batterie est équipée de plusieurs lanceurs de missiles Tamir. Ces missiles sont conçus pour intercepter et détruire les roquettes et projectiles en vol, avant qu'ils n'atteignent leur cible.

4) Système de communication :

Les batteries du Dôme de Fer sont intégrées à un réseau de communication sophistiqué qui leur permet de fonctionner de manière coordonnée avec d'autres systèmes de défense aérienne et les forces armées israéliennes.

En résumé, les batteries du Dôme de Fer sont des unités mobiles et autonomes de défense aérienne, conçues pour intercepter et détruire les menaces aériennes à courte portée, protégeant ainsi les populations et les infrastructures critiques.



Figure 4-1:L'unité de lancement de missiles

2-L'unité de lancement de missiles du système

L'unité de lancement de missiles du système Iron Dome joue un rôle crucial dans la défense antimissile d'Israël contre les menaces de roquettes de courte portée et d'obus d'artillerie. Conçu pour intercepter et détruire ces projectiles tirés depuis des distances allant de 4 à 70 kilomètres, le système Iron Dome est capable d'opérer en toutes conditions météorologiques et peut répondre simultanément à plusieurs menaces [2].

Chaque unité de lancement de missiles, appelée batterie, comprend 3 à 4 lanceurs, chacun capable de lancer 20 missiles intercepteurs Tamir. Ces missiles, équipés de capteurs electro-optiques et de plusieurs ailerons de direction pour une manœuvrabilité élevée, sont conçus pour intercepter les roquettes entrantes avant qu'elles n'atteignent leurs zones cibles [2].

Le système Iron Dome, développé par Rafael Advanced Defense Systems et Israel Aerospace Industries, a été déclaré opérationnel en 2011 et a commencé à être déployé près de Beersheba. Depuis son déploiement, il a réussi à intercepter un pourcentage élevé des roquettes tirées depuis Gaza, offrant une protection essentielle aux populations civiles et aux infrastructures critiques [2].

Les batteries Iron Dome sont situées à travers Israël, comprenant des versions fixes et mobiles du système. Elles sont capables de différencier les roquettes susceptibles d'atteindre des zones peuplées de celles qui ne le feront pas, et ne tirent des missiles intercepteurs que contre les roquettes prévues pour frapper des zones habitées [3].

En somme, l'unité de lancement de missiles du système Iron Dome est un élément clé de la défense antimissile d'Israël, offrant une protection efficace contre les menaces de roquettes de courte portée et d'artillerie grâce à sa capacité à intercepter rapidement et précisément les projectiles entrants.

2-1 les caractéristiques

L'unité de lancement de missiles du système Iron Dome est un élément clé de la défense antimissile d'Israël, conçu pour intercepter et détruire des roquettes de courte portée et des obus d'artillerie de 155 mm avec une portée allant jusqu'à 70 kilomètres. Voici les caractéristiques principales de cet élément :

- Capacité de Détection et de Suivi Radar : Le radar de détection et de suivi, développé par Elta et l'IDF, permet de détecter le lancement des roquettes et de suivre leur trajectoire. Il est capable d'opérer en toutes conditions météorologiques et peut répondre à plusieurs menaces simultanément [1].

- Centre de Gestion des Combats et de Contrôle des Armes (BMC) : Construit pour Rafael par mPrest Systems, le BMC calcule le point d'impact en fonction des données reçues et utilise ces informations pour déterminer si la cible constitue une menace pour une zone désignée. Seules les menaces validées sont interceptées [1].

- Unité de Lancement de Missiles (ULM) : Chaque ULM contient 3 à 4 lanceurs, chacun capable de lancer 20 missiles intercepteurs Tamir. Ces missiles, équipés de capteurs electro-optiques et de plusieurs ailerons de direction pour une manœuvrabilité élevée, sont conçus pour intercepter les roquettes entrantes avant qu'elles n'atteignent leurs zones cibles [1].

- Intercepteur Tamir : Le missile intercepteur Tamir, construit par Rafael, est équipé de capteurs electro-optiques et de plusieurs ailerons de direction pour une manœuvrabilité élevée. Il est capable de neutraliser une variété de menaces, y compris les roquettes de courte portée et les obus d'artillerie [1].

- Mobilité et Polyvalence : Le système Iron Dome comprend des versions fixes et mobiles, permettant une adaptation rapide aux menaces changeantes. Il peut également fonctionner en tant que système autonome ou comme une couche dans un système de défense aérienne multi-couches [3].

- Taux de Succès : Au cours d'une décennie, le système Iron Dome a intercepté plus de 2 500 cibles entrantes avec un taux de réussite de 90%. Il est actuellement le système de défense antimissile multi-missions le plus utilisé au monde, développé par Rafael Advanced Defence Systems [3].

En résumé, l'unité de lancement de missiles du système Iron Dome joue un rôle crucial dans la défense antimissile d'Israël, offrant une protection efficace contre les menaces de roquettes de courte portée et d'artillerie grâce à sa capacité à intercepter rapidement et précisément les projectiles entrants

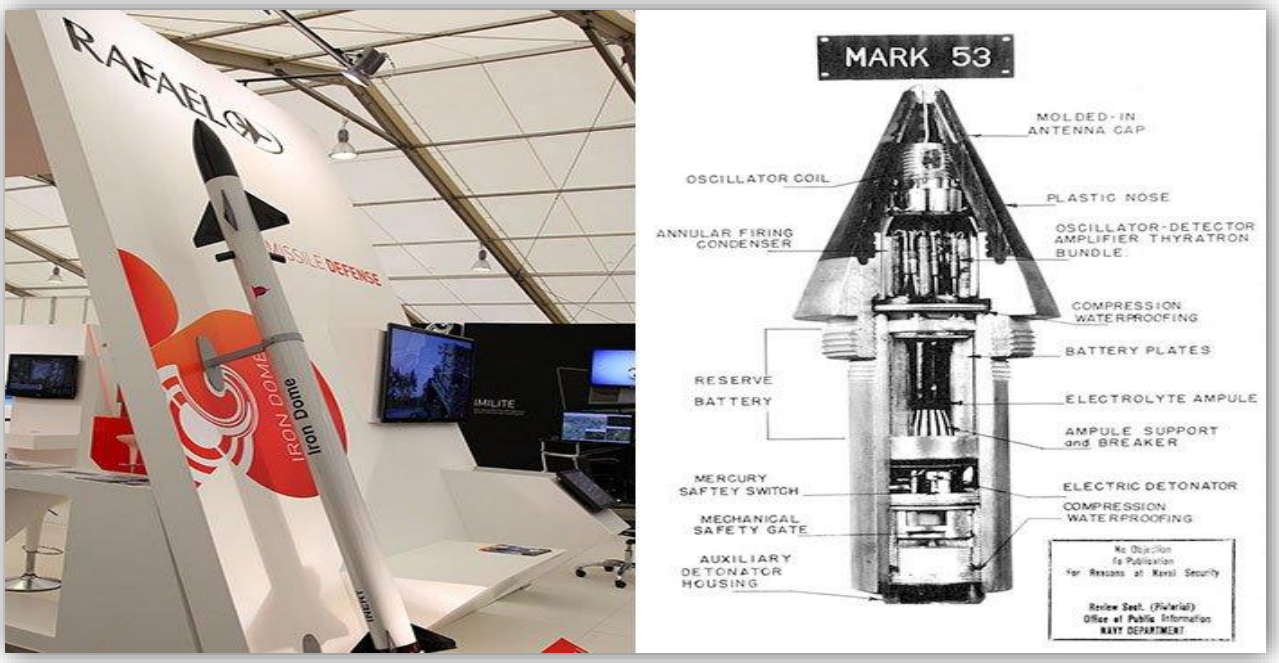


Figure 4-2:les caractéristiques de missile tamir

2-2 les depense

Les dépenses associées au système Iron Dome, qui est conçu pour intercepter et détruire des roquettes de courte portée et des obus d'artillerie, sont importantes et ont suscité des débats sur leur justification par rapport à d'autres investissements en matière de défense. Voici un résumé des coûts et des implications financières liés à ce système :

- Coût Par Intercepteur : En 2014, le coût estimé de chaque missile intercepteur Tamir était cité entre 20 000 et 50 000 dollars américains. Une analyse de 2020 a estimé un coût total de 100 000 à 150 000 dollars pour chaque interception. En comparaison, une roquette Qassam rudimentaire coûte environ 800 dollars, et la roquette Grad de Hamas ne coûte que quelques milliers de dollars [1].

- Coût Total Du Système : Le coût total estimé du système Iron Dome était de 210 millions de dollars, développé conjointement par Rafael Advanced Defense Systems et l'armée de l'air israélienne. Ce coût englobe le développement, la production, et le déploiement initial du système [1].

- Implications Financières : Les dépenses liées au système Iron Dome soulèvent des questions sur la distribution des fonds de défense. Par exemple, en 2012, Jamie Levin, dans un article publié dans Haaretz, suggérait que le succès du système Iron Dome pourrait augmenter la demande de déploiement de systèmes similaires à travers Israël, mettant en lumière le besoin de peser les dépenses en matière de défense contre d'autres dépenses, notamment celles destinées à aider les secteurs vulnérables de la société, tels que les prestations sociales [1].

- Exportations Et Co-développement : Certains systèmes Iron Dome ont été exportés, bien que leur efficacité soit limitée à une petite zone, ce qui limite leur marché potentiel. Néanmoins, des discussions ont commencé sur le co-développement de l'Iron Dome avec d'autres pays, comme l'Inde, indiquant un potentiel de croissance des revenus à partir de la vente et du partage des technologies [1].

En résumé, les dépenses associées au système Iron Dome sont significatives, reflétant à la fois le coût de développement et d'opération du système lui-même et les implications financières plus larges de son déploiement et de son utilisation. Ces coûts soulèvent des questions sur la gestion des ressources de défense et la priorisation des investissements dans la sécurité nationale.

2-3Fonctionment

Le système Iron Dome, développé par la compagnie de défense israélienne Rafael, est conçu pour intercepter et détruire des roquettes de courte portée et des obus d'artillerie. Il a prouvé son efficacité au fil des ans, avec des autorités israéliennes affirmant qu'il a une taux de réussite de 90% à l'interception des roquettes ennemies. Voici comment le système fonctionne :

- Radar de Détection : Le premier composant du système Iron Dome est un radar qui détecte les roquettes entrantes. Ce radar est capable de fonctionner en toutes conditions météorologiques et peut différencier les roquettes susceptibles d'atterrir dans des zones peuplées de celles qui ne le seront pas [12].

- Missile Intercepteur Tamir : Après la détection par le radar, le missile intercepteur Tamir est lancé pour intercepter la roquette entrante en plein vol. Le Tamir est équipé de capteurs electro-optiques et de multiples ailerons de direction pour une manœuvrabilité élevée, lui permettant de se diriger vers la cible avec précision [1].

- Centre de Commande et de Contrôle : Le troisième composant du système est un centre de commande et de contrôle qui contient le logiciel nécessaire pour envoyer le message du radar au missile intercepteur. Ce centre calcule rapidement si la roquette entrante constitue une menace ou est susceptible d'atterrir dans une zone non peuplée. Si la roquette constitue une menace, le système Iron Dome lance des missiles depuis le sol pour la détruire en plein vol [12].

Le système Iron Dome est hautement portable et nécessite seulement quelques heures pour être mis en place. Les missiles intercepteurs eux-mêmes sont hautement manœuvrables, avec une longueur de 3 mètres, un diamètre d'environ 15 cm, et un poids de 90 kg au lancement [5].

Depuis son déploiement en 2011, le système Iron Dome a été mis à niveau plusieurs fois et a joué un rôle crucial dans la protection des civils israéliens pendant divers conflits au cours de la dernière décennie. Il a été particulièrement efficace lors d'un barrage de roquettes tiré par Jihad Islamique en mai, avec un taux de réussite de 95,6%

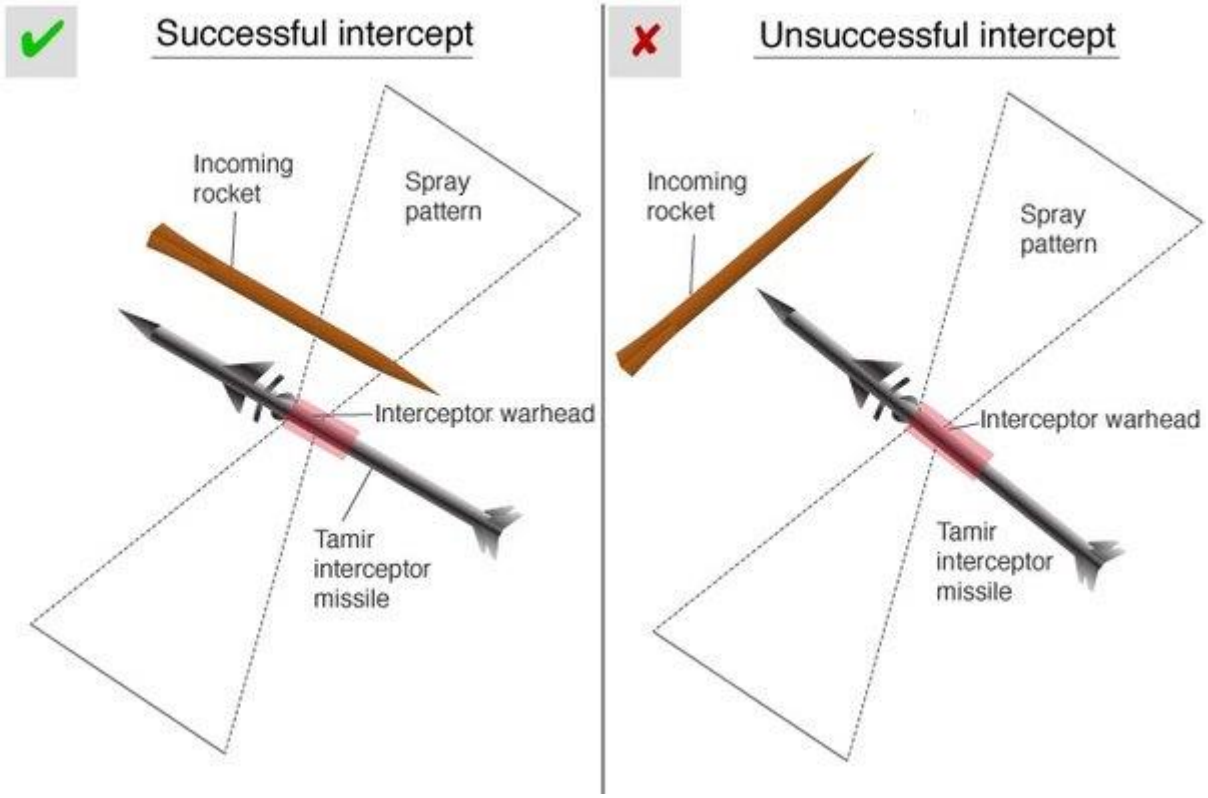


Figure 4-3:Fonctionment de missile tamir

2-4les battrie utiliser

Les batteries utilisées par le système Iron Dome sont conçues pour intercepter et détruire des roquettes de courte portée et des obus d'artillerie. Chaque batterie Iron Dome comprend trois à quatre lanceurs, chacun capable de lancer jusqu'à 20 missiles intercepteurs Tamir. Voici les caractéristiques et le fonctionnement de ces batteries :

- Composition de la Batterie : Une batterie Iron Dome typique est constituée d'un radar de détection et de suivi, d'un centre de gestion des combats et de contrôle des armes (BMC), et de trois à quatre lanceurs. Le radar, construit par Elta et l'IDF, est capable de détecter le lancement des roquettes et de suivre leur trajectoire. Le BMC, construit pour Rafael par mPrest Systems, calcule le point d'impact et détermine si la cible constitue une menace pour une zone désignée [3].

- Déploiement Mobile : Contrairement à d'autres systèmes de défense antimissile traditionnels, le Iron Dome est conçu pour être déployé de manière dispersée. Chaque lanceur, contenant 20 intercepteurs, est déployé et opéré indépendamment via une connexion sans fil sécurisée. Cette architecture permet une flexibilité et une rapidité dans le déploiement et l'opération du système [3].

- Protection d'Zone Urbaine : Chaque batterie Iron Dome est capable de protéger une zone urbaine d'environ 150 kilomètres carrés. Cette capacité fait du système un outil essentiel pour la défense des zones peuplées contre les menaces de roquettes de courte portée et d'artillerie [3].

- Opérations en Toutes Conditions Météorologiques : Le système Iron Dome est conçu pour fonctionner en toutes conditions météorologiques, ce qui lui permet de maintenir une vigilance constante et une capacité de réponse efficace face aux menaces potentielles [2].

- Utilisation et Succès : Depuis son déploiement en 2011, le système Iron Dome a été utilisé avec succès dans plusieurs conflits, notamment lors du conflit Gaza–Israel en 2011, 2012, 2021, et d'autres opérations militaires. Il a démontré une très haute capacité à intercepter les roquettes ciblant Israël, avec un taux de réussite de 90%

Versions et Applications

- I-DOME : Version mobile du système, déployable sur une seule remorque, conçue pour une protection anti-aérienne très courte portée (V-SHORAD) et C-RAM. Elle comprend un lanceur sur châssis 6x6 motorisé avec dix intercepteurs Iron Dome, un radar et une station de gestion des combats et de contrôle des armes (BMC) [2].

- C-DOME : Version navale du système, déployée par la marine israélienne en 2017. Le système C-DOME peut protéger des actifs maritimes cruciaux et terrestres contre des menaces balistiques sophistiquées, aériennes et de surface à surface, même dans des scénarios impliquant des attaques saturées [2].

Le système Iron Dome a été déclaré opérationnel et initialement déployé le 27 mars 2011 près de Beersheba. Depuis son déploiement, il a intercepté plus de 5 000 roquettes avec un taux de réussite supérieur à 90%, sauvegardant ainsi des vies humaines depuis 2011. Il est capable de protéger simultanément contre une large gamme de menaces devenant de plus en plus diversifiées, y compris les menaces respirantes, SHORAD, C-RAM et PGM, dans des salves à haute densité, jour et nuit, et dans toutes les conditions météorologiques

Chapitre V :
Etude de couverture Radar du sud

1-Etude de Projet couverture Radar du sud

Le choix du terrain pour placer un radar est une décision cruciale qui affecte considérablement sa performance et son efficacité. Voici quelques facteurs clés à prendre en compte pour sélectionner le site optimal

1-1Couverture radar souhaitée

- Définir la zone géographique que le radar doit surveiller, en tenant compte de la portéesouhaitée et des angles de couverture.
- Identifier les obstacles potentiels, tels que les montagnes, les bâtiments ou les massifsforestiers, qui pourraient obstruer les signaux radar.
- Privilégier un terrain élevé et dégagé pour maximiser la portée et la couverture du radar.

1-2Conditions environnementales

- Considérer les conditions climatiques locales, telles que les précipitations, le vent et latempérature, qui peuvent affecter la propagation des ondes radar.
- Éviter les zones sujettes à des conditions météorologiques extrêmes, comme les oragesfréquents ou les fortes rafales de vent.
- Choisir un site stable et exempt de vibrations excessives, ce qui est important pour laprécision des mesures radar.[14]

1-3Accessibilité et sécurité

- Assurer un accès facile au site pour le transport, l'installation et la maintenance du radar.
- Sélectionner un emplacement sécurisé, éloigné des zones à forte densité de population oudes risques d'activités criminelles.
- Respecter les réglementations locales en matière d'utilisation des sols et d'obtention despermis nécessaires.

1-4Disponibilité des infrastructures

- Évaluer la disponibilité des infrastructures nécessaires, telles que l'alimentationélectrique, les liaisons de communication et les accès routiers.
- Privilégier un site proche des réseaux existants pour minimiser les coûts d'installation etde maintenance.
- Anticiper les besoins futurs en matière d'infrastructures en fonction de l'évolution destechnologies radar.

1-5 Impact environnemental

- Minimiser l'impact environnemental de l'installation du radar en choisissant un site àfaible valeur écologique.
- Respecter les réglementations locales en matière de protection de l'environnement et de lafaune.
- Considérer l'utilisation de techniques de construction durables pour réduire l'empreinteécologique du site.

1-6 Facteurs supplémentaires

- Coût du terrain et des travaux d'aménagement.
- Disponibilité de la main-d'œuvre qualifiée pour l'installation et la maintenance du radar.
- Conformité aux réglementations en matière de sécurité aérienne et de radiofréquences.

2-Les Radars du sud proposé théoriquement

En analysant soigneusement chacun de ces facteurs, les autorités compétentes peuvent sélectionner le terrain le plus approprié pour placer un radar, garantissant ainsi son efficacitéoptimale et sa contribution à la sécurité aérienne.

Après l'étude Le choix du terrain pour placer (10) Radars pour complet le reste qui ne sont pascouvert, donc la décision comme suit :

- Deux (01) stations PSR/SSR à Bechar.
- Deux (09) stations SSR à Adrar, Ghardaïa, Ouargla, Tindouf, In Salah, Illizi, Bordj BadjiMokhtar, Tamanrasset et In Guezzam.

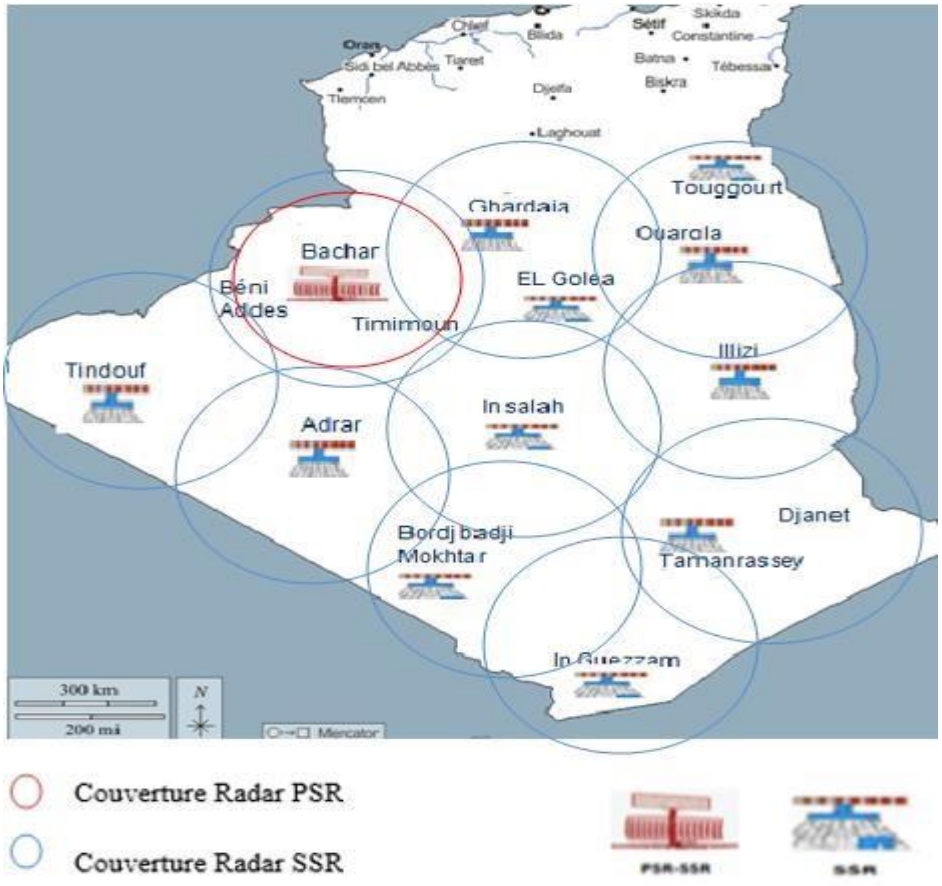


Figure 5-1: couverture Radar théorique Proposer.

2-1 Les Stations du sud proposé théoriquement

Le centre de contrôle régional de Bechar assure le service de contrôle radar régional dans lessecteurs du Sud (espace inférieur et supérieur),

Même peut installer de bureau de contrôle d'approche dans les aéroports qui a un grandmouvement de trafic pour assure le service de contrôle radar d'approche.

La stratégie de fonctionnement le CCR Alger et CCR Bechar indépendants a l'autres, chacuneavec les radars liés, mais transféré l'image radar et donné DATA via support Algérie télécom soit 4file ou bien satellitaire VSAT

L'équation que vous avez fournie est une estimation simplifiée de la portée radar en fonction desaltitudes du radar et de la cible. Cette formule est souvent utilisée comme une règle empirique pour estimer la portée dans des situations où les facteurs tels que la puissance du radar, la fréquence, le gain de l'antenne, etc., ne sont pas pris en compte.

$$\text{Portée (km)} \approx \sqrt{(\text{Altitude radar (m)} + \text{Altitude cible (m)})} \times 1,41$$

- "Portée" est en kilomètres. (17)
- "Altitude radar" est l'altitude à laquelle le radar est placé, en mètres.
- "Altitude cible" est l'altitude à laquelle se trouve la cible, en mètres.

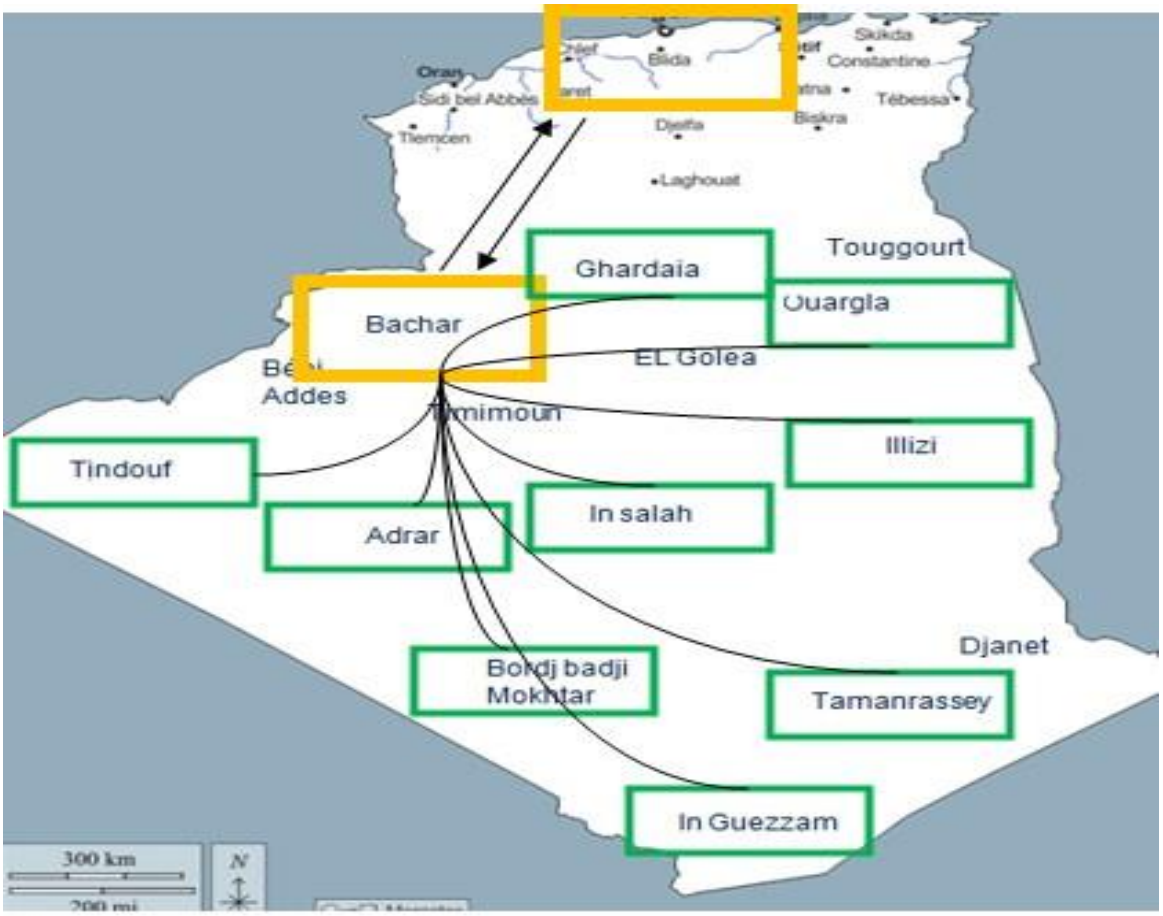


Figure 5-2 :nouvelle Station Radar Proposer.

2-2 Couverture théorique du radar de secours

Des mesures supplémentaires ont été prises pour assurer la continuité de la couverture radar dans certaines zones sensibles du pays, grâce à l'installation de radars à courte portée. Ces radars présentent une conception sophistiquée, avec une couverture azimuth complète à 360°,leur permettant de surveiller de manière exhaustive les zones environnantes. De plus, ces radars sont équipés de mécanismes techniques avancés qui leur permettent de transmettre les informations et données collectées via le réseau local de centres transmission avec 4 fils, ou VSAT, directement au principal centre radar de chaque wilaya. Tout cela pour éviter toute possibilité d'attaque et prévenir en premier lieu des dégâts, par exemple Couverture théorique duradar de secours de station radar Bechar et station radar Adrar.

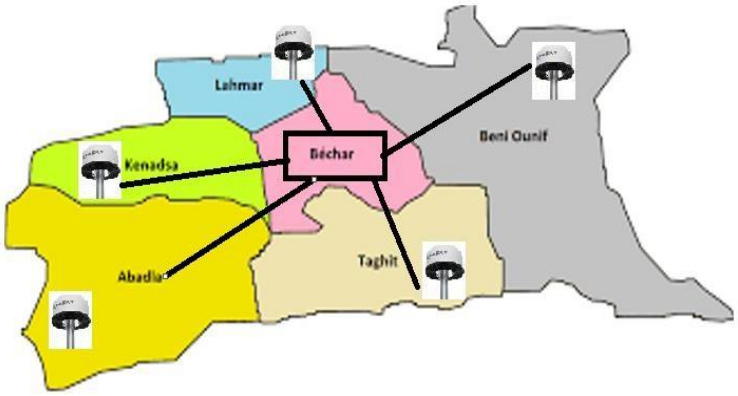


Figure 5-3: Couverture théorique du radar de secours Bechar.

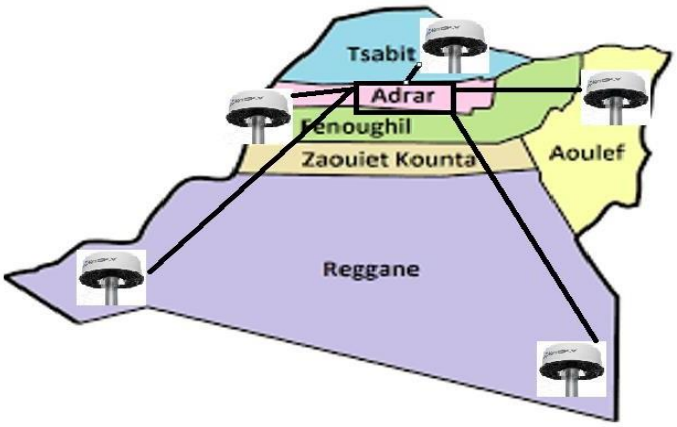


Figure 5-4: Couverture théorique du radar de secours d'Adrar.

J'ai utilisé le tableau trouvé dans... pour calculer les distances entre les états, et cela consiste à placer les radars à l'endroit approprié pour une couverture bonne et efficace, à mesure que les radars commencent à être utilisés, si des faiblesses dans la couverture apparaissent, les données peuvent être analysées pour déterminer où la couverture doit être étendue. Des radars supplémentaires peuvent être ajoutés ou des radars existants déplacés pour améliorer la couverture.

Ce processus peut nécessiter l'utilisation de techniques avancées d'analyse de données telles que la modélisation géographique spécifique à un lieu et les données biogéographiques. Les outils d'analyse géographique des systèmes d'information géographique (SIG) peuvent également être utilisés pour mieux analyser et visualiser les données.

3-Conclusion

Ce travail consistera a assuré le bon contrôle et le suivit des

appareils en vol par l'envoi desdonnées entre l'ALGERIE et les pays adjacents en garantissant la sécurité et souveraineté de ses données.

La couverture radar d'une station dans un espace aérien dégagé de tout obstacle est normalement un cercle de rayon D, ce rayon doit être supérieur à 250 Nm, et ce conformément à l'annexe 10 volume 5 de l'organisation de l'aviation Civile Internationale (OACI). En réalité, cette couverture est affectée par les reliefs de terrain. La portée limitée des radars donne lieu àdes zones non couvertes où le trafic n'est détecté par aucun radar, ce qui nécessite un choix de site qui favorise une couverture plus au moins complète de l'espace souhaité.

Le travail de ce chapitre le choix des sites pour Couvrons le reste du pays dix radars de même marque des cinq radars en service à n'importe quelle altitude et de la présenter sur la carte afin d'analyser cette couverture radar et prendre des décisions de de ce couverture Radar théorique proposer.

Conclusion générale

Du fait de sa vocation de défense contre les objets violents assortis de techniques du Dôme de Fer comme le lancement de roquettes et obus, la puissance de calcul accrue du système a été appelée pour permettre une bonne performance optimale.

Le projet est en effet un intéressant cas d'école de mes compétences de synthèse et de conduite des travaux. Les impératifs de capacités de calcul, de signalisation militaire, de vecteurs d'attaque, toutes ces contraintes ont permis de mêler de véritables échanges dans un dialogue sans cesse reconstruit.

En conclusion de notre entretien, je voudrais encore insister sur l'importance que j'accorde à chaque intervention de votre part afin de nourrir utilement et de façon concrète mes réflexions sur ce type de sujet. Votre rôle d'interlocuteur est en effet primordial pour moi.

Au terme de ce travail, je reste à votre entière disposition pour discuter de tout ce qui précède, ainsi que pour réitérer mes remerciements plus en détail à vos nombreuses sollicitations. À mes prochaines paroles vos remarques, vos questions seront les bienvenues.

Le sujet sensible inhérent à mon rôle d'interlocuteur impose une approche particulière, comme nous sommes maintenant, je l'espère, parvenus à trouver ensemble une synthèse, qui deviendra à ce stade la nôtre, cette synthèse est celle du dialogue, celle des échanges, celle de la poursuite sereine des entretiens

Bibliographies:

[1]./www.radartutorial.eu/04.history/hi04.fr.html(08/02/2024)

[2].http://www.iniversalis.fr/encyclopedie/radar (08/02/2024)

[3]. Philippe Goy, «Détection d'obstacles et de cibles de collision par un radar FMCW aéroporté». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, France. 18 décembre 2012.

[4]. M. Skolnik , « Introduction to radar systems». Mc-Graw-Hill, New-York, 1981.

[5]. DJEDOUI Nacéra & BOUKERN Dounya, « Étude et réalisation d'un RADAR de détection », mémoire de master 2 en télécommunications, Université Aboubakr Belkaïd,Tlemcen. Algérie. 19/06/ 2017.

[6]. B.MAHAFZA, Matlab simulations for radar systems design, 2004, CRC Press/Chapman& Hall

[7]. C.Wolff, « Classification des systèmes radars » https://www.radartutorial.eu/02.basics/Classification%20des%20syst%C3%A8mes%20radars%20%281%29.fr.html , 2024

[8]. Wikipedia, « radar primaire ».2024

[9]. KRATTOU Mohamed Riad, « Étude De La Détection Radar Dans Un Milieu Homogène », mémoire de master 2 en télécommunications, l'université de Tlemcen, Algérie. Promtion2012/2013.

[10]. B.MAHAFZA, Matlab simulations for radar systems design, 2004, CRC Press/Chapman& Hall.

[11]. https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/leradar. 03/2024

[12]. Wikipedia, « Signal sur bruit » https://fr.wikipedia.org/wiki/Rapport_signal_sur_bruit 2024

[13]. Wikipedia, « facteur de bruit » https://fr.wikipedia.org/wiki/Facteur_de_bruit, 2024

[14]. Habibur Rahman, fundamental principles of radar, 2019, CRC Press, ISBN-139780429279478

[15]. https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/leradar.05/2024

[16]. https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/leradar.05/2024

[17]. DJAFRI Menad& CHELOUCHE Djalal, « Étude et réalisation d'une Carte Arduino»,mémoire de master 2 en Electronique, Université A.MIRA de Bejaia. Algérie. 20/06/2016.

[18]. B.Cottenceau, « Carte ARDUINO Uno Microcontrôleur ATMega328 ». Microcontrôleurs EI3 Option AGI.

[19]. Mohanad Mahdi Abdulkareem, Qusay Adil Mohammed Muhanned Mahmood Shakir, « A Short Range Radar System», Electric and Electronic Engineering Department, University of Turkish Aeronautical AssociationAnkara, Turkey ,2016.

[20]. BENRABAH Youcef Islam & BOUHINI Mouhammed Yacine, « Étude et réalisation d'un Radar électronique « Radar à ultrason», mémoire de master 2 en Télécommunications, Université Djilali Bounaama Khemis Miliana. Algérie. Promotion 2016/2017.

[21]. Frank Ervin, « Arduino-based Object Detection System », Project Final Report, April 27, 2010.

[22]. LAKRID DJAHID, « Emulation de Système SCADA pour le Contrôle et Distribution d'eau », mémoire de master 2 en automatique industriel, Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. Promotion 2017.

[23]. Kadam D.B, Patil YuvrJ B,Chougale Krishnat V,Perdeshi Swagat , « Arduino BasedMoving Radar System »,www.ijisset.org, ISSN 2455-4863 (Online), Volume: 3 Issue: 4 | April 2017.

[24]. KRAMA Abdelbasset, GOUGUI Abdelmoumen. « Etude et réalisation d'une 76 carte de contrôle par Arduino via le système Androïde ». Mémoire de Master Académique 2 enElectrotechnique Industrielle. Université Kasdi Merbah Ourgla. Algérie. Le 08/06/2015.

[25]. Reas and Ben Fry, «Processing: A Programming Handbook for Visual Designers and Artists (Second Edition) ». Publié, The MIT Press. December 2014. [26]. hc-sr04 « pj2-hc-sr04-utilisation-avec-picaxe-1343.pdf