



REPUBLIQUE ALGERIENNE
DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA-1
INSTITUT AERONAUTIQUE ET ETUDES
SPATIALES DE BLIDA-1-



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme Master en Aéronautique

Options : Opérations Aériennes

Optimisation du déploiement des stations de radionavigation VOR/DME par l'algorithme de distribution des vols de Lévy(LFD)

Réalisé par :

Mr. Bellabes M'hamed Aymen

Dirigé par :

Mr. MOGTIT Abdessamed

Mr. LAGHA Mohand

Promotion 2023

Remerciement

En préambule à ce mémoire, je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers Allah qui m'a soutenu, accordé patience et courage tout au long de mon parcours.

J'aimerais exprimer ma reconnaissance envers les membres du jury qui ont accepté de consacrer leur temps pour lire mon mémoire et assister à ma soutenance. Leur présence et leurs précieuses remarques ont été d'une importance capitale pour l'enrichissement de mon travail.

*Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur **Mohand LAGHA**, qui a accepté de superviser mon mémoire. Sa guidance, son expertise et son soutien ont été d'une valeur inestimable tout au long de ce processus.*

*Je tiens à exprimer une gratitude toute particulière à Monsieur **Abdessamed MOGTIT**, mon encadrant pendant la période de préparation de mon master. Sa bienveillance, son accompagnement, sa disponibilité et son efficacité ont été d'un apport précieux et ont grandement contribué à la réussite de ce travail.*

Je tiens également à remercier chaleureusement mes parents pour leur soutien moral et matériel inconditionnel, ainsi que pour avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour mener à bien ce projet.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers mon frère, ma sœur, qui m'ont encouragé à donner le meilleur de moi-même et ont été un soutien constant tout au long de cette aventure.

Aymen

Dédicaces

Je dédie ces mots avec une profonde affection :

- ✦ *À mon cher grand-père, qui nous a quittés pendant la période de la pandémie de coronavirus. Son encouragement et son soutien indéfectibles ont été une source d'inspiration pour moi. Je lui exprime un immense remerciement et je souhaite sincèrement qu'il soit parmi nous aujourd'hui pour partager ce moment de réussite.*
- ✦ *À mon très cher père, **BELLABES Mohammed**, qui a toujours été présent dans les moments les plus difficiles. Ton soutien inébranlable et tes encouragements m'ont toujours donné la force de persévérer dans mes études.*
- ✦ *À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur : maman **BELLABES Djamila**, que j'aime infiniment. Aucune phrase, aussi expressive soit-elle, ne saurait révéler pleinement l'amour et l'affection que j'ai pour toi.*
- ✦ *À mon cher frère, **Yasser**, et ma chère sœur, **Insaf**, qui ont été à mes côtés tout au long de mon parcours d'études supérieures. Ce travail est dédié à vous en premier lieu, car vous méritez une reconnaissance particulière pour vos conseils, votre aide et vos encouragements.*
- ✦ *À mes adorables amis, **Rabie, Hichem, Akrem et Farouk...** Merci pour tous les moments merveilleux que nous avons partagés ensemble.*
- ✦ *À tous ceux qui me poussent à aller de l'avant, je tiens à vous remercier. Votre soutien et vos encouragements me donnent la force de continuer à avancer sur mon chemin.*

Aymen

Résumé

Résumé

La couverture intégrale des stations de radionavigations (VOR/DME) est un élément essentiel d'un réseau de navigation aérienne sans faille, qui augmente la capacité et la sécurité des vols. Cependant, cette couverture complète peut être affectée par plusieurs paramètres tels que la présence de reliefs, multi-trajets et le niveau de vol de l'aéronef. Ce travail examine le déploiement des stations (VOR/DME) pour le réseau de navigation et formule un problème d'optimisation NP-difficile pour atteindre un déploiement optimal des stations. Le problème de positionnement des moyens radionavigations (PMRN) consiste à trouver un ensemble d'emplacements pour les stations (VOR/DME) à partir d'un ensemble randomisé de sites candidats, et pour chaque site sélectionné, à déterminer l'indice de visibilité de chaque station pour tout aéronef volant aux différents niveaux de vol (FL). Tous ces choix doivent satisfaire un ensemble de contraintes et optimiser un ensemble d'objectifs pour résoudre le problème PMRN (*nous nous limiterons dans ce travail à la couverture maximale, la proximité des aéroports ainsi que l'alignement seront un autre objet d'étude*).

Ce travail présente une approche méta-heuristique pour résoudre ce problème complexe et hautement combinatoire. L'approche proposée se compose de trois phases : une phase de prétraitement basée sur les contraintes pour filtrer les mauvaises configurations, une phase d'optimisation utilisant la recherche LFD, et une phase de post-optimisation pour améliorer les solutions données par la recherche LFD. Pour valider l'approche, des résultats de calcul sont fournis en utilisant de grands ensembles de données du monde réel, tels que le modèle numérique de terrain (MNT) qui couvrait la totalité de la FIR d'Alger.

Mots-clés : Optimisation combinatoire, couverture, moyens de radio navigation (VOR/DME), algorithme LFD.

Abstract

Full coverage of radio navigation stations (VOR/DME) is an essential element of a seamless air navigation network, increasing flight capacity and safety. However, this complete coverage can be affected by several parameters such as the presence of terrain, multipath and the aircraft's flight level. This work examines the deployment of stations

(VOR/DME) for the navigation network and formulates an NP-hard optimization problem to achieve optimal station deployment. The RadioNavigation equipment (PMRN) positioning problem consists of finding a set of locations for the stations (VOR/DME) from a randomized set of candidate sites, and for each selected site, determining the visibility index of each station for any aircraft flying at different flight levels (FL). All these choices must satisfy a set of constraints and optimize a set of objectives in order to solve the PMRN problem (in this work we will restrict ourselves to maximum coverage; proximity to airports and alignment will be another subject of study).

This work presents a meta-heuristic approach to solving this complex and highly combinatorial problem. The proposed approach consists of three phases: a pre-processing phase based on constraints to filter out bad configurations, an optimization phase using LFD search, and a post-optimization phase to improve the solutions given by LFD search. To validate the approach, computational results are provided using large real-world datasets, such as the digital terrain model (DTM) that covered the entire Algiers FIR.

keyword: Combinatorial optimization, coverage, radio navigation resources (VOR/DME), LFD algorithm.

ملخص

التغطية الكاملة لمحطات المالحة الالسلكية (VOR/DME) هي عنصر أساسي لشبكة مالحة جوية سلسلة تزيد من قدرة الطيران والسالمية. ومع ذلك، يمكن أن تتأثر هذه التغطية الكاملة بالعديد من المعايير مثل وجود التضاريس والمسارات المتعددة ومستوى تحليق الطائرة. ويفحص هذا العمل نشر المحطات (VOR/DME) لشبكة المالحة ويضع مشكلة صعبة تتعلق بتحقيق النشر الأمثل للمحطات. تتمثل مشكلة تحديد المواقع (PMRN) في العثور على مجموعة من المواقع للمحطات (VOR/DME) من مجموعة عشوائية من المواقع المرشحة، ولكل موقع مختار، تحديد مؤشر الرؤية لكل محطة ألي طائرة تحلق على مستويات طيران مختلفة (fl) يجب أن تلي جميع هذه الخيارات مجموعة من القيود وأن تحسن مجموعة من الأهداف لحل مشكلة) PMRN في هذا العمل سنقتصر على التغطية القصوى، وسيكون القرب من المطارات والمواءمة موضوعاً آخر للدراسة.

يقدم هذا العمل نهجاً تجميعياً لحل هذه المشكلة المعقدة وذات التوافقية العالية. يتكون النهج المقترح من ثالث مراحل: مرحلة ما قبل المعالجة القائمة على الجهاد لتصفية التكوينات السيئة، ومرحلة التحسين باستخدام أبحاث LFD ، والتجهيز التدريجي بعد المعالجة لتحسين الحلول التي توفرها أبحاث LFD. للتحقق من صحة النهج، يتم تقديم نتائج

الحساب باستخدام مجموعات بيانات كبيرة من العالم الحقيقي، مثل نموذج الحقل الرقمي (TAM) الذي غطى منطقة معلومات الطيران بالجزائر العاصمة بأكملها.

الكلمات المفتاحية: التحسين التجميعي، والتغطية، ووسائل المالحة الالسكرية (VOR/DME) ، وخوارزمية LFD.

Abréviation /Acronyms

Abréviation	Signification en ANGLAIS	Signification en FRANCAIS
ADS-C	Automatic Dependent Surveillance-Contract	La surveillance dépendante automatique
ATC	Air traffic control system	Système de contrôle de trafic aérien
ATM	Air Traffic Management	Gestion du trafic aérien
CDM	Conflict management system	Systeme de gestion de conflits
CNS	Communication Navigation Surveillance	Communication Navigation Surveillance
CPDLC	Controller pilot Data Link Communication	Communication par liaison de données du pilote du contrôleur
DME	Distance measuring Equipment	Équipement de mesure de la distance
ENNA	Algerian National Navigation Establishment	Etablissement Nationale Navigation Algerienne
FL	Flight Level	Niveau de vol
FIR	Flight Information Region	Une region d'information de vol
FPL	Filed Flight Pl	Systeme de planification de vol
GA	Genetic algorithm	Algorithme génétique
GD	Gaussian distribution	Distribution gaussienne
GLONNAS	Russian satellite navigation system	Système de positionnement par satellites d'origine russe
GNSS	Global Navigation Satellite System	Système global de navigation par satellite
GPS	Global Positioning System	Système de positionnement global
HF	High Frequency	Haute fréquence
IAP	Instrument Approach Procedures	Procédures d'approche aux instruments
ILS	Instrument Landing System	Système d'atterrissage aux instruments
LFD	Lévy Flight distribution	Distribution des vols de Lévy
METAR	METeorological Aerodrome Report	Rapport météorologique d'aérodrome
MLS	Microwave Landing System	Système d'atterrissage à micro-ondes
MNT	Digital Terrain Module	Module Numérique de Terrain
MOA	Meta-heuristiaue optimization Algorithm	Algorithme d'optimisation méta-heuristiaue
NDB	Non Directional Beacon	Balise Non Directionnelle

NOTAM	Notice To Airmen	Message aux navigateurs aériens
OACI	International Civil Aviation Organization	L'Organisation d'aviation Civil International
PMRN	The problem of positioning radio navigation means	Le problème de positionnement des moyens radionavigations
PSR	Primary surveillance Radar	Radar de surveillance primaire
RGS	A regular square grid	Une grille carrée régulière
RNAV	Area Navigation	Navigation de surface
RNP	Required Navigation Performance	Performances de navigation requises
SSR	Secondary Surveillance Radar	Radar de surveillance secondaire
SATCOM	Satellite Communication	Satellite de telecommunication
TMA	Terminal Manoeuvring Area	Région de contrôle terminal
UHF	Ultra high Frequency	Ultra haute fréquence
VHF	Very high Frequency	Très haute fréquence
VOR	VHF Omni directional Range	Systeme de positionnement radioélectrique
VSAT	Very Small Aperture Terminal	Terminal a très petite ouverture
WRN	Weather Radar Network	Réseau de radars météorologiques

Table des matieres

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Abréviations

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Planification des systemes des CNS/ATM en Algérie.....	3
1.1 Introduction	4
1.2 Communication	4
1.2.1 Couverture VHF/HF.....	4
1.2.2 C.P.D.L.C (Controller Pilot Data Link Communications).....	5
1.2.3 Réseau service fixe de télécommunication aéronautique (R.S.F.T.A).....	6
1.2.4 Infrastructures de communication.....	6
1.3 Navigation	7
1.3.1 Moyens de Radio Navigation en Algérie	7
1.3.2 Le couplage VOR/DME.....	8
1.3.3 Systèmes de navigation par satellite (GNSS).....	9
1.3.4 La RNAV et la RNP.....	10
1.4 Surveillance	11
1.4.1 Couverture radar.....	11
1.4.2 Le service Radar.....	12
1.4.3 ADS/C La surveillance dépendante automatique.....	13
1.5 Gestion du trafic aérien (ATM).....	13
1.5.1 Système de la gestion du trafic aérien en Algérie	14
1.5.2 Gestion de l'espace aérien (ASM).....	14
1.5.3 Air traffic flow Management (ATFM)	14
1.6 Conclusion.....	16

Chapitre 2	Resolution des problemes d'optimisation	17
2.1	Introduction	18
2.2	Revue de la littérature de localisation des sites par optimisation	18
2.3	Problèmes d'optimisation.....	23
2.3.1	Optimisation combinatoire	23
2.3.2	Optimisation continue	23
2.4	Quelques méthodes d'optimisation	24
2.4.1	Optimisation par algorithmes génétiques (AG).....	24
2.4.2	Optimisation par essais particuliers (PSO).....	24
2.4.3	Optimisation par algorithmes de colonies de fourmis (ACO).....	24
2.4.4	Algorithme de distribution des vols de Lévy (LFD)	25
2.5	Conclusion.....	26
Chapitre 3	Optimisation de la couverture VOR/DME par l'algorithme	
LFD	27
3.1	Introduction	28
3.2	Définition de l'optimisation.....	28
3.2.1	Exemple d'une optimisation d'une fonction	28
3.3	Processus d'optimisation	29
3.3.1	Variables de conception	30
3.3.2	Espace de recherche	30
3.3.3	Fonction objectif	30
3.4	Déroulement de l'algorithme LFD.....	30
3.4.1	Algorithme LFD (pseudo code)	31
3.5	Exemple d'application.....	34
3.6	Conclusion.....	41
Chapitre 4	Simulation et résultats	42
4.1	Introduction	43
4.2	Préliminaires.....	43
4.2.1	Notions de couverture	43
4.2.2	Fonction viewshed.....	43
4.3	Protocole expérimental	44
4.3.1	Données disponibles.....	44
4.3.2	La modélisation du terrain pour notre simulation	45

4.4	Méthodologie de résolution du problème	46
4.5	Calcul de couverture	46
4.6	Résultat de simulation de la couverture (VOR/DME).....	49
4.6.1	Analyse de performance de la couverture VOR/DME.....	49
4.7	Deuxième partie : Optimisation par l’algorithme LFD.	54
4.7.1	ALGORITHME-2	54
4.7.2	Qualité des résultats	56
4.7.3	Paramétrage de l'algorithme	57
4.7.4	Analyse des résultats	57
4.8	Conclusion.....	59
	CONCLUSION GENERALE	63
	Bibliographie.....	65

Liste des tableaux et des figures

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Moyens de Radio navigation en Algérie	7
Tableau 1.2 : Les élément de GNSS utilise en Algérie [12].....	10
Tableau 1.3: les types et l'emplacement des Radar en Algérie	13
Tableau4.1: Surface de chaque Service VOR à 10.000, 20.000 et 30.000Pieds msl en Km ² ≠ indice de visibilité ≠ la surface St en pourcentage %, Calculé par rapport à la zone de couverture maximale Vmax, pour une hauteur de station ho=20 m, MNT de résolution de trois (03) secondes d'arc (environ ≈ 90 m)	52
Tableau 4.2: Comparaison de volume de couverture de chaque Service VOR à 10.000, 20.000 et 30.000 Pieds msl en Km ² calculé par l'algorithme LFD	57
Tableau 4.3: les nouvelles coordonnées proposées par LFD et la distance par rapport au ancien site (km) pour les huit stations VOR/DME proposées par l'algorithme LFD	58

Liste des figures

Figure 1.1: Couverture VHF actuelle [11]	5
Figure 1.2: Communication par data Link	6
Figure1.3: fonctionnement du service de navigation	7
Figure 1.4: Exemple d'un équipement de navigation VOR/DME.....	9
Figure 1.5: Couverture des Stations VOR [11]	9
.	10
Figure 1.6: La couverture des radars en Algérie [11].	12
Figure1.7: système de gestion de trafic aérien	16
Figure2.1: principe d'un algorithme génétique	19
Figure2.2: les étapes de résolution d'un problème d'optimisation	24
Figure 2.3: optimisation par algorithme de colonies de fourmis.....	25
Figure 3.1: Exemple d'une fonction à optimiser[4]	29
Figure 3.2: Processus d'optimisation selon Asimow.	29
Figure 3.3: évolution de la courbe de convergence dans le cas de search agent petit.....	35

Figure 3.4: évolution de la courbe de convergence dans le cas de search agent moyen	36
Figure 3.5: évolution de la courbe de convergence dans le cas de search agent grand.....	36
Figure 3.6: évolution de la courbe de convergence dans le cas de seuil petit	38
Figure 3.7: évolution de la courbe de convergence dans le cas de seuil moyen.	39
Figure 3.8: évolution de la courbe de convergence dans le cas de seuil grand	40
Figure 4.1: Viewshed de deux antennes (tower 1 et 2, la couleur verte est la zone visible et le reste est la zone invisible.....	44
Figure 4.2: Mosaïque des données fournies de la FIR d'Alger.....	45
Figure 4.3: Format d'un exemple réduit d'une image type « Tiff », les coordonnées géographiques (xp, yp) sont implicitement présentées dans la grille des altitudes zp.	46
Figure 4.4: Résultats de simulation de la couverture du VOR/DME à FL 100.	50
Figure 4.5: Résultats de simulation de la couverture du VOR/DME à FL 200.	51
Figure 4.6: Résultats de simulation de la couverture du VOR/DME à FL 300	51
Figure 4.7: l'évolution de la couverture maximale théorique du réseau VOR/DME dans les trois niveaux de vol (ha=10000 pi-20000 pi ha =30000 pi) dans l'ordre où ils ont été sélectionnés par notre l'algorithme	54
Figure 4.8: Résultats de simulation de la nouvelle couverture du VOR/DME à FL 200.....	59

Introduction
Générale

Introduction générale

L'Algérie est un pays situé dans le nord de l'Afrique, avec une position géographique stratégique qui en fait un point de transit important pour le trafic aérien régional et international. En effet, l'Algérie est un hub important pour l'Europe et l'Afrique, avec des liaisons aériennes directes vers plusieurs destinations clés dans ces deux régions. Cependant, la situation actuelle de l'espace aérien algérien est un sujet important qui mérite une attention particulière. Le trafic aérien en Algérie a connu une croissance significative au cours des dernières années, avec une augmentation constante du nombre de passagers et de vols. Cette croissance est due en partie à la forte demande pour les voyages d'affaires et de loisirs, ainsi qu'à la position géographique stratégique de l'Algérie. Cependant, cette croissance rapide du trafic aérien pose également des défis majeurs pour la gestion et le contrôle efficaces de l'espace aérien algérien.

L'espace aérien algérien est un élément clé du secteur aérien national et international. La situation actuelle de l'espace aérien algérien nécessite une modernisation et une amélioration significative de la gestion de la circulation aérienne. En effet, la capacité de l'espace aérien algérien est limitée, ce qui entraîne des retards et des congestions dans les aéroports. De plus, les systèmes de navigation utilisés ne sont plus adaptés aux exigences de l'aviation moderne. Il est important de noter que la gestion et le contrôle de l'espace aérien algérien sont assurés par l'Établissement Nationale de Navigation Aérienne (ENNA). L'ENNA est responsable de la sécurité et de l'efficacité des opérations aériennes dans l'espace aérien algérien.

Dans ce contexte, l'ENNA a entrepris un projet ambitieux visant à moderniser et à améliorer la gestion de l'espace aérien algérien. Ce projet comprend la mise en place du système CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance / Air Traffic Management) en Algérie. Le volet Navigation (VOR/DME) est un élément clé du système CNS/ATM. Il permet aux avions de naviguer avec précision dans l'espace aérien en utilisant des signaux radio émis par des stations au sol. L'ENNA travaille activement à la mise en place d'un réseau VOR/DME moderne et efficace en Algérie afin d'améliorer la sécurité et l'efficacité des opérations aériennes. Ce projet ambitieux comprend la modernisation des équipements de navigation existants, ainsi que la construction de nouvelles stations radionavigations VOR/DME dans des zones clés de l'espace aérien algérien. L'objectif est de fournir une

Introduction générale

couverture VOR/DME complète et homogène dans tout l'espace aérien algérien, ce qui permettra aux avions de naviguer en toute sécurité et efficacité dans cet espace.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les performances du système de navigation VOR/DME actuel en Algérie et de proposer des améliorations pour répondre aux exigences de l'aviation moderne. Les résultats de cette recherche permettront d'améliorer la sécurité des vols, de réduire les retards et d'augmenter la capacité de l'espace aérien algérien.

L'étude est divisée en quatre (04) chapitres :

Le premier chapitre traite de la planification des systèmes de communication, de navigation, de surveillance et de gestion du trafic aérien (CNS/ATM) en Algérie. Le deuxième chapitre aborde les différentes méthodes d'optimisation pour résoudre les problèmes de localisation des sites des stations de radionavigation VOR/DME. Le troisième chapitre présente l'algorithme LFD qui utilise la distribution de Lévy pour générer des déplacements aléatoires d'agents de recherche afin d'optimiser le déploiement des stations de radionavigation VOR/DME. Le quatrième chapitre présente les résultats de la simulation. Une conclusion générale résume les principaux aspects de notre travail.

Chapitre 1

Planification des systèmes de communication, de navigation, de surveillance et d'organisation du trafic aérien (CNS/ATM) en Algérie

1.1 Introduction

La mise en œuvre du CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance et Organisation du Trafic Aérien) en Algérie a pour but d'améliorer la sécurité, la capacité, l'efficacité et la durabilité des opérations aériennes. La modernisation des systèmes de CNS/ATM est essentielle pour s'adapter aux évolutions technologiques et aux normes internationales, ainsi que pour répondre aux besoins des acteurs de l'aviation civile en Algérie.

1.2 Communication

La communication est une composante essentielle du système CNS/ATM. Elle permet aux pilotes et aux contrôleurs aériens de communiquer efficacement, en temps réel, pour coordonner les opérations de vol et assurer la sécurité aérienne. Les technologies modernes de communication incluent la communication vocale, les données de communication et la messagerie de contrôle aérien. Les systèmes de communication CNS/ATM en Algérie comprennent des équipements de communication VHF/UHF, HF et SATCOM.

1.2.1 Couverture VHF/HF

En Algérie, la communication aérienne est assurée à l'aide de liaisons VHF, qui permettent de couvrir une grande partie de l'espace aérien algérien jusqu'à une altitude de FL240. Il existe actuellement 23 sites radio VHF répartis dans la FIR Alger, avec une double couverture dans le Nord. Cependant, il n'y a pas de couverture radio VHF dans la zone extrême sud, ce qui nécessite l'utilisation de la couverture HF. La couverture VHF actuelle ne couvre pas encore plus de 90% de la FIR, mais de nouvelles antennes VHF sont en cours d'installation pour améliorer cette couverture et assurer le contrôle dans l'espace aérien supérieur.

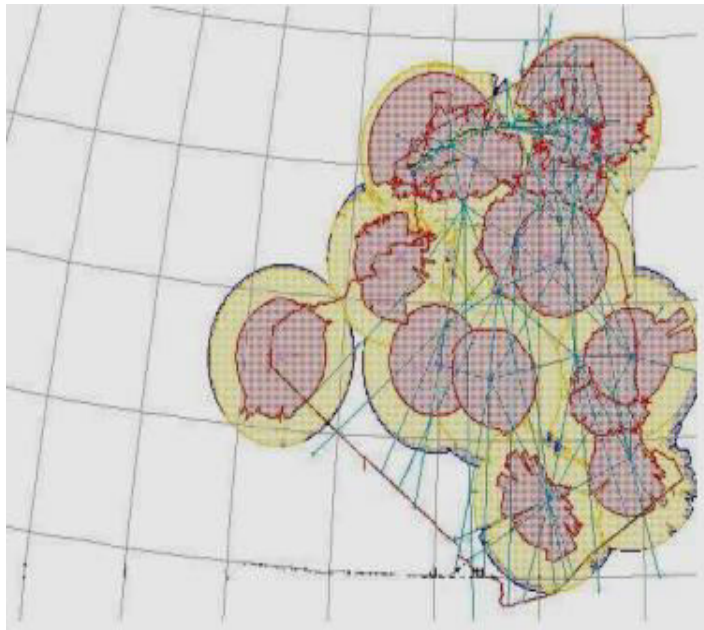


Figure 1.1 : Couverture VHF actuelle [11].

1.2.2 C.P.D.L.C (Controller Pilot Data Link Communications)

Le CPDLC (Controller-Pilot Data Link Communications) est une application de transmission de données qui facilite l'échange direct de messages entre les contrôleurs et les pilotes, plutôt que de passer par une communication vocale. Le CPDLC améliore les capacités de communication dans les zones désertiques où l'utilisation de la communication vocale n'est pas efficace, en particulier lorsque les contrôleurs et les pilotes doivent faire appel à un relais HF tiers.

La présente circulaire a pour objet de notifier la mise en œuvre du CPDLC (communications contrôleur pilote par liaison de données) comme moyen supplétif de communication dans l'Espace Aérien de la FIR Alger Notamment dans les cas suivants :

- une mauvaise qualité et/ou propagation des communications vocales (VHF/HF) ;

- une mauvaise interprétation des messages radiophoniques (VHF/HF)

- une urgence à bord

➤ **La mise en œuvre** : Le CPDLC a été mis en œuvre dans l'Espace Aérien de la FIR Alger à partir du 30 juin 2011 [13].

➤ **Connection. Log on** : Les aéronefs devront se loguer (se connecter) en utilisant les quatre (04) caractères OACI du CCR d'Alger « DAAA » entre quinze (15) et trente (30) minutes

avant d'entrer en FIR Alger. Pour éviter tout rejet de connexion (log-on), l'identification du vol et l'immatriculation de l'aéronef doivent correspondre à celles mentionnées dans le plan de vol [13].

- **Déconnexion. Log off** : La déconnexion devra avoir lieu au plus tard cinq (05) minutes après avoir quitté la FIR Alger, sauf accord entre le contrôleur et le pilote [13].
- **Service ATS** : Centre de contrôle régional (CCR) d'Alger. [13].

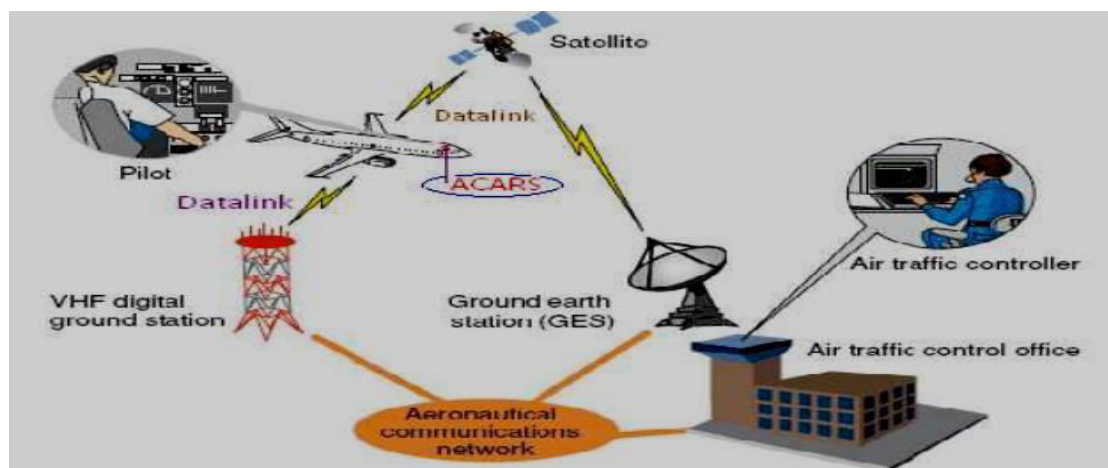


Figure 1.2: communication par data Link.

1.2.3 Réseau service fixe de télécommunication aéronautique (R.S.F.T.A)

Le réseau de service fixe de télécommunication aéronautique (RSFTA) est responsable de l'échange de divers messages tels que les NOTAMs, les plans de vol, les METARs, etc. L'Algérie dispose d'un système de commutation de messages RSFTA qui est géré par le Bureau Central de Télécommunications (BCT) à Alger, situé au siège de l'École Nationale de Navigation Aérienne (ENNA) à Oued Samar. Les infrastructures de télécommunication en Algérie font partie du réseau national géré par Algérie Télécom, tandis que le réseau VSAT est géré par l'ENNA.

1.2.4 Infrastructures de communication

- Station radio VHF (dont 20 antennes avancées) ;
- 05 stations HF ;
- 21 stations VHF sur les aérodromes ;

- Des liaisons RSTFA;
- Des liaisons spécialisées téléphoniques et télégraphiques ;
- Communications par CPDLC (air-sol) ;
- Communication OLDI FIR Aix en Provence (sol-sol) ;
- Le support de télécommunication utilisé et celui d'Algérie télécom et le réseau VSAT bande KU ENNA.

1.3 Navigation

La navigation est une autre composante essentielle du système CNS/ATM. Elle permet aux aéronefs de voler en toute sécurité et de suivre des trajectoires précises pour atteindre leur destination. Les technologies modernes de navigation incluent le système de navigation par satellite (GNSS), les aides à la navigation (VOR, DME, NDB) et les systèmes d'atterrissage instrumentaux (ILS, MLS). Les systèmes de navigation CNS/ATM en Algérie comprennent des équipements de navigation GNSS, VOR, DME et ILS.

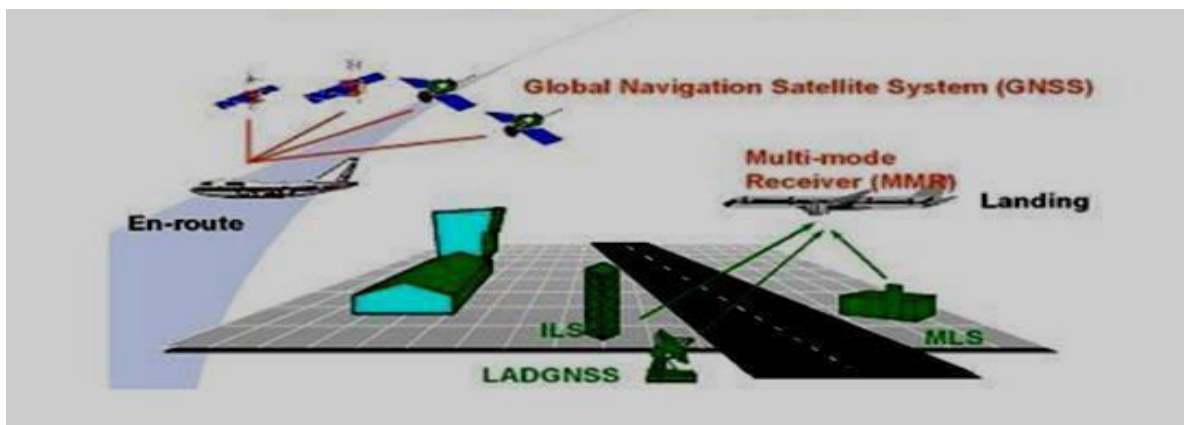


Figure 1.3 : fonctionnement du service de navigation.

1.3.1 Moyens de Radio Navigation en Algérie

La navigation aérienne dans l'espace aérien algérien est soutenue par un réseau de 36 stations VOR/DME. La majorité de ces stations VOR/DME sont installées près des aéroports, alignés avec les axes des pistes, tandis que le reste est situé sur des sites plus éloignés.

Voici dans ce tableau les moyens radios navigation dans l'espace aérien algérien

Tableau 1.1: Moyens de Radio navigation en Algérie.

N°	Moyens radio navigation	Nombres	Désignation
01	VOR	40	Guidage omnidirectionnel
02	DME	47	Équipement de mesure de distance
03	NDB	34	Balisede navigation
04	ILS	14	Système d'atterrissage aux instruments), dont 1 de catégorie 3

1.3.2 Le couplage VOR/DME

Le couplage VOR/DME est une technique de navigation aérienne qui combine les informations fournies par les stations VOR (VHF Omnidirectionnel Range) et les stations DME (Distance Measuring Equipment).

Le VOR est une station terrestre qui émet des signaux radio à 360 degrés. Ces signaux permettent aux équipements de navigation de l'avion de déterminer la direction vers ou depuis la station VOR. Les pilotes utilisent ces indications de direction pour suivre une route précise ou pour s'orienter par rapport à des points de référence au sol.

Le DME, quant à lui, est un système qui mesure la distance entre l'avion et une station DME située au sol. Il utilise des signaux radio pour mesurer le temps nécessaire à un signal aller-retour entre l'avion et la station DME, ce qui permet de calculer la distance. Les pilotes utilisent ces informations de distance pour estimer leur position et leur progression le long d'une route donnée.

En couplant les informations du VOR et du DME, les pilotes peuvent obtenir des indications précises sur leur position en termes de direction et de distance par rapport aux stations VOR et aux points de référence au sol. Cela leur permet de naviguer plus précisément le long d'une route prédéterminée, de s'approcher et de quitter les aéroports de manière précise, et d'effectuer des procédures d'approche plus précises lors des atterrissages.

Le couplage VOR/DME est largement utilisé dans l'aviation pour une navigation précise, notamment dans les procédures d'approche instrumentale (IAP) et les routes aériennes définies. Il offre une combinaison de direction et de distance fiables, ce qui permet aux pilotes

Planification des systèmes de CNS/ATM en Algérie

de naviguer en toute confiance, même dans des conditions météorologiques défavorables ou dans des zones où les repères visuels au sol sont limités.



Figure 1.4 : Exemple d'un équipement de navigation VOR/DME.

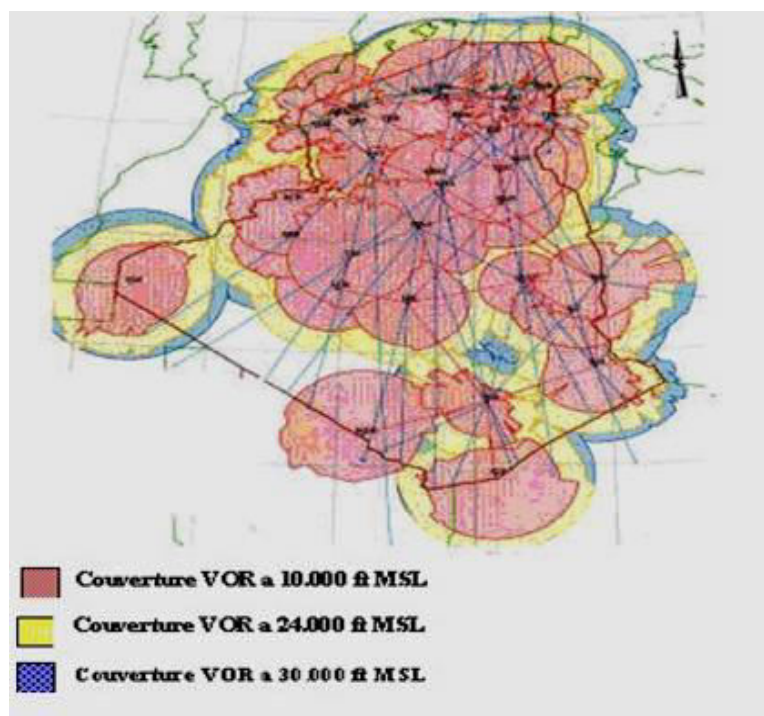


Figure 1.5 : Couverture des Stations VOR [11].

Systèmes de navigation par satellite (GNSS) : 3.1.1

Le GNSS est un système mondial utilisé pour déterminer la position et l'heure. Il est composé de constellations de satellites, de récepteurs embarqués et d'un système de contrôle d'intégrité renforcé pour soutenir la RNP pendant les opérations.

1.3.3.1 Utilisation du GPS et du GLONASS dans la Navigation Algérienne :

L'ENNA (Établissement National de la Navigation Aérienne) en Algérie a officiellement intégré les systèmes de positionnement par satellite, notamment le GPS (Global Positioning System) et le GLONASS (Global Navigation Satellite System), dans son infrastructure de navigation. Cette adoption du GNSS (Global Navigation Satellite System) vise à renforcer la précision et la fiabilité des opérations de navigation aérienne et terrestre. Ces systèmes offrent des données de positionnement essentielles, contribuant ainsi à la sécurité et à l'efficacité des déplacements dans l'espace aérien et sur le territoire algérien

Tableau 1.2 : Les éléments de GNSS utilisés en Algérie[12].

Nom de l'élément GNSS	Fréquence	Zone de couverture	Remarques
GPS	L1 : 1575.42 Mhz	ALGER DIR	En-route, approches terminales et approches non de précision
GLONASS	L1 : 1559 – 1610 Mhz	ALGER DIR	Aucun NOTAM publié concernant le GPS et le GLONASS.

1.3.4 La RNAV et la RNP

Les avions modernes utilisent la RNAV et la RNP pour créer un réseau de routes flexible sans avoir à choisir entre des réseaux concurrents. Il est essentiel d'harmoniser les techniques de navigation à l'échelle internationale. La RNP mesure la précision de navigation

en tenant compte de diverses erreurs. Différents types de RNP sont utilisés pour les opérations en vol, d'approche, d'atterrissage et de départ, avec des spécifications de précision et d'autres critères.

En Algérie, ces concepts sont intégrés dans les opérations aériennes pour améliorer l'efficacité, la sécurité et la précision de la navigation. Voici une brève explication des termes :

RNV (Navigation par Voie Radiogoniométrique) : La RNV est une méthode de navigation aérienne qui utilise des radiophares au sol pour permettre aux avions de suivre des itinéraires spécifiques. Ces radiophares émettent des signaux radio, et les avions équipés de récepteurs RNV peuvent déterminer leur position en fonction de ces signaux. La RNV est utilisée pour définir des routes aériennes précises et des procédures d'approche.

RNP (Navigation Requisite en Fonction des Performances) : Le RNP est un concept plus moderne qui utilise les capacités des systèmes de navigation à bord de l'aéronef pour définir des exigences de performance spécifiques. Le RNP spécifie la précision nécessaire pour la navigation dans une zone particulière ou le long d'une trajectoire spécifique. Les procédures basées sur le RNP permettent une navigation plus précise et des trajectoires optimisées.

1.4 Surveillance

La surveillance est une autre composante essentielle du système CNS/ATM. Elle permet aux contrôleurs aériens de suivre les mouvements des aéronefs, de prévoir les conflits et de coordonner les opérations de vol. Les technologies modernes de surveillance incluent le radar primaire, le radar secondaire, l'ADS-C et les systèmes de surveillance multilatéraux (MLAT). Les systèmes de surveillance CNS/ATM en Algérie comprennent des équipements de radar primaire, de radar secondaire et d'ADS-C.

1.4.1 Couverture radar

En Algérie, la couverture radar est assurée dans la partie nord du pays, ainsi que dans les Hauts Plateaux de la région d'information de vol d'Alger. Dans le cadre du projet TRAFCA, cinq stations radars secondaires (SSR) d'une portée de 450 km ont été installées à Alger, Oran, Annaba, El Bayadh et El Oued. Il est important de souligner que la station

d'Alger comprend à la fois un radar primaire (PSR) et un radar secondaire (SSR) implantés [Université Blida1 2019].

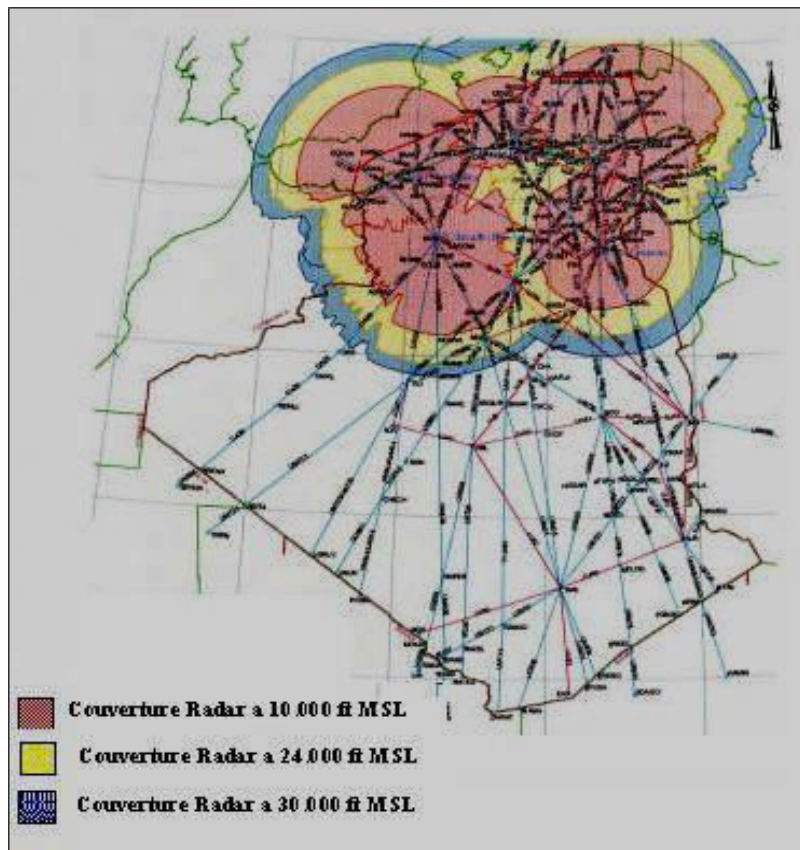


Figure 1.6 : la couverture des radars en Algérie [11].

1.4.2 Le service Radar

Le système radar mentionné précédemment a pour objectif de fournir les services de contrôle, de surveillance et d'information radar pour les trois secteurs du nord de la région d'information de vol d'Alger (TMA Centre Alger, TMA Nord Est et TMA ORAN), ainsi que le service radar d'approche dans la zone terminale de l'aéroport d'Alger.

Tableau 1.3 : les types et l'emplacement des Radar en Algérie.

Type	Station radar	Site	Date d'installation
PSR/SSR	Oued Smar	Alger	Février2001
SSR	Seraïdi	Annaba	Décembre2001
SSR	Murdjadjo	Oran	Janvier2001
SSR	Guemmar	El Oued	Avril2002
SSR	Bouderga	El Bayadh	Mai2003

1.4.3 ADS/C La surveillance dépendante automatique

La technique de surveillance dépendante automatique ADS/C (Automatic Dependent Surveillance/Contract) est utilisée pour transmettre des paramètres tels que la position et l'identification des aéronefs. Elle a été mise en œuvre dans l'espace aérien algérien le 6 février 2008 à 00h01 UTC

Les rapports ADS/C fournissent des informations précieuses pour une meilleure gestion du trafic aérien. Son objectif est le suivant :

- Augmenter le niveau de sécurité ;
- Assurer une efficacité et une capacité élevées.

1.5 Gestion du trafic aérien (ATM)

La gestion du trafic aérien (ATM) est une composante essentielle du système CNS/ATM. Elle permet aux contrôleurs aériens de gérer efficacement le trafic aérien,

d'optimiser les trajectoires de vol, de réduire les temps d'attente et d'assurer la sécurité et la fluidité des opérations aériennes. Les technologies modernes de gestion du trafic aérien incluent la gestion de flux de trafic (ATFM), les systèmes de planification de vol (FPL), les systèmes de gestion des conflits (CDM) et les systèmes de contrôle de trafic aérien (ATC). Les systèmes de gestion du trafic aérien CNS/ATM en Algérie comprennent des équipements de ATFM, de FPL et d'ATC.

1.5.1 Système de la gestion du trafic aérien en Algérie

L'établissement national de la navigation aérienne (ENNA) en Algérie est responsable de la gestion du trafic aérien. Il fournit des services de contrôle de la circulation aérienne et partage des informations avec les aéronefs en vol à travers l'espace aérien national. Cet espace s'étend de la Méditerranée (FIR Marseille, FIR Barcelone, FIR Séville) au nord, à la partie ouest avec le FIR Alger adjacent au FIR Casablanca, à l'est avec le FIR Tunis et Tripoli, et au sud avec le FIR Niamey et Dakar.

1.5.2 Gestion de l'espace aérien (ASM)

L'objectif principal est de maximiser l'utilisation de l'espace aérien disponible au sein d'une structure donnée. Dans la conception future, il est essentiel de concevoir la structure de l'espace aérien, ses frontières et ses divisions de manière à ne pas entraver l'utilisation efficace des systèmes automatisés de détection et de résolution des conflits, ainsi que l'utilisation d'équipements avioniques avancés. La division de l'espace aérien en secteurs vise à créer une configuration optimale, combinée à d'autres méthodes appropriées, pour renforcer les capacités de contrôle du trafic aérien. Lors de l'utilisation de l'espace aérien, une coordination étroite et une supervision adéquate sont indispensables pour répondre aux différents besoins et exigences légitimes de tous les utilisateurs, tout en réduisant les restrictions sur les opérations.

1.5.3 Air traffic flow Management (ATFM)

Bien que le système de gestion du trafic aérien (ATM) soit conçu pour répondre à la demande maximale de trafic et puisse être étendu pour faire face à la croissance prévue, il est important de noter qu'il n'est pas possible de répondre immédiatement à une demande accrue. C'est pourquoi un sous-système appelé ATFM (Air Traffic Flow Management) a été coordonné par l'ATM.

La fonction de l'ATFM consiste à trouver un équilibre entre la demande de trafic et la capacité de contrôle du trafic aérien (ATC). L'ATFM se concentre sur la gestion globale du trafic et la planification stratégique nécessaire pour assurer une utilisation efficace des

aéroports et prévenir les éventuels "goulets d'étranglement" dans certains espaces aériens. Les unités de services de contrôle du trafic aérien (ATS) doivent fournir à l'ATFM des informations sur leur capacité de gestion du trafic. L'ATFM doit également avoir accès aux bases de données de vol des compagnies aériennes pour obtenir des informations

La mise en place de bases de données communes est essentielle pour assurer une prestation de service ATFM cohérente. Enfin, les unités ATFM doivent prévoir l'introduction et le déploiement de systèmes automatisés.

1.5.4 Les services de la circulation aérienne

Les services de la circulation aérienne, souvent désignés par l'acronyme ATS (Air Traffic Services), englobent un ensemble de fonctions et de services fournis pour assurer la gestion sûre et efficace du trafic aérien dans l'espace aérien et aux aéroports. Ces services sont essentiels pour garantir la sécurité des vols et la coordination des mouvements des aéronefs. Les principaux services de la circulation aérienne comprennent :

- **Contrôle de la Circulation Aérienne (ATC - Air Traffic Control)** : Il s'agit du service central qui fournit des instructions et des conseils aux pilotes pour assurer un espacement adéquat entre les aéronefs, évitant ainsi les collisions. Les contrôleurs de la circulation aérienne travaillent dans des centres de contrôle en route, des centres de contrôle d'approche et des tours de contrôle d'aéroport.
- **Service d'Information de Vol (FIS - Flight Information Service)** : Ce service fournit des informations essentielles aux pilotes avant et pendant le vol, notamment des informations météorologiques, des avis importants, des informations sur la navigation aérienne, etc. Cela contribue à la planification et à la sécurité des vols.
- **Service d'Alerte** : En cas d'urgence ou de situation critique, les services de la circulation aérienne fournissent une assistance rapide et coordonnée pour gérer la situation. Cela peut inclure des services de recherche et de sauvetage en cas de besoin.
- **Services d'Information Aéronautique** : La fourniture d'informations actualisées sur la navigation aérienne, y compris les cartes, les procédures de vol, et d'autres données pertinentes, pour soutenir la navigation sûre des aéronefs.

Dans l'ensemble, les services de la circulation aérienne jouent un rôle crucial dans la sécurité et l'efficacité des déplacements aériens en fournissant des conseils, des informations et des services d'urgence aux pilotes tout au long de leur vol.

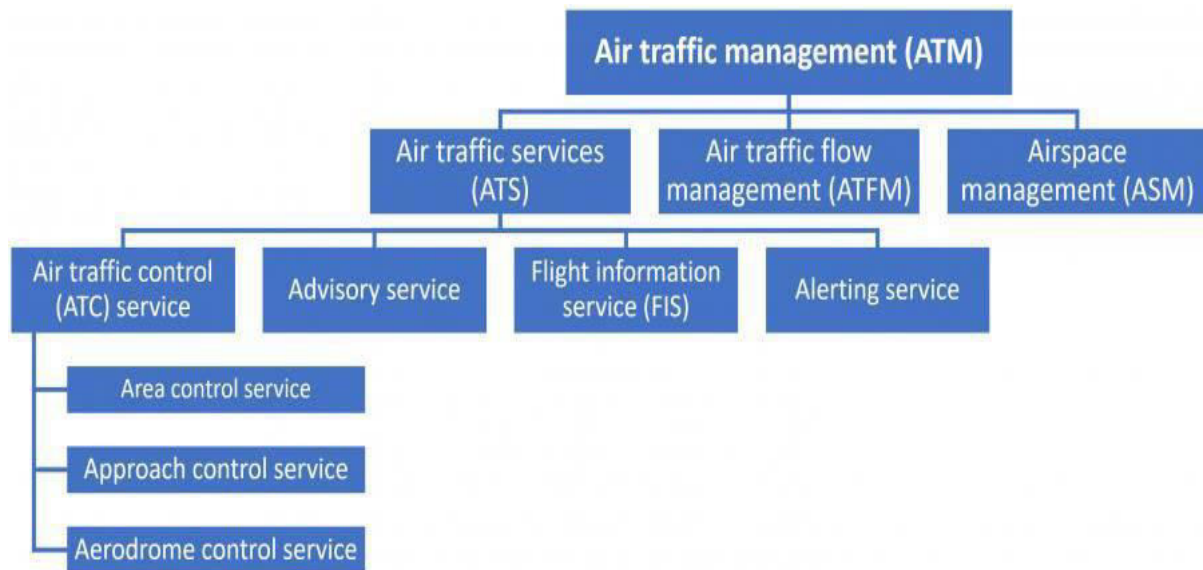


Figure 1.7 : système de gestion de trafic aérien.

1.6 Conclusion

La mise en œuvre du système CNS/ATM en Algérie est une étape importante pour améliorer les opérations aériennes. Cependant, il est important de revoir la couverture VOR/DME en Algérie, car cette technologie est obsolète et peut causer des erreurs de navigation. La modernisation de la couverture VOR/DME en Algérie permettra d'améliorer la précision et la fiabilité de la navigation aérienne, et contribuera à renforcer la sécurité et l'efficacité des opérations aériennes dans le pays.

Chapitre 2

Résolution des problèmes d'optimisation

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la résolution des problèmes d'optimisation liés à la localisation des sites pour les antennes radar, les antennes VHF ou toute autre forme de localisation. Nous allons d'abord présenter une revue de la littérature sur le sujet, avant d'aborder les différentes méthodes d'optimisation qui peuvent être utilisées pour résoudre ces problèmes.

2.2 Revue de la littérature de localisation des sites par optimisation

Pour localiser des sites, différentes méthodes d'optimisation ont été utilisées. Dans la littérature, on trouve des travaux qui utilisent des méthodes classiques telles que la programmation linéaire, mais aussi des méthodes plus sophistiquées telles que les algorithmes génétiques, les essaims particulaires, les colonies de fourmis et l'algorithme de distribution des vols de Lévy. Parmi les travaux récents, on peut citer celui de :

. X. Li, Y. Zhang, X. Wang, et al. (2018). Optimization of radar antenna placement using genetic algorithm. [5].

Cette étude présente l'utilisation d'un algorithme génétique pour optimiser la localisation des antennes radar. L'algorithme génétique est une technique d'optimisation bio-inspirée basée sur la théorie de l'évolution. L'objectif de l'étude était de trouver la meilleure disposition des antennes radar afin d'améliorer la couverture et la qualité du signal.

L'algorithme génétique a été utilisé pour générer une population initiale d'emplacements potentiels pour les antennes. Ensuite, des opérations de sélection, de croisement et de mutation ont été appliquées pour améliorer progressivement les solutions au fil des générations. Ce processus itératif a été répété jusqu'à ce qu'une solution optimale soit trouvée, c'est-à-dire la meilleure disposition des antennes qui optimise la couverture et la qualité du signal. L'algorithme génétique permet d'explorer efficacement l'espace des solutions et de converger vers une solution optimale.

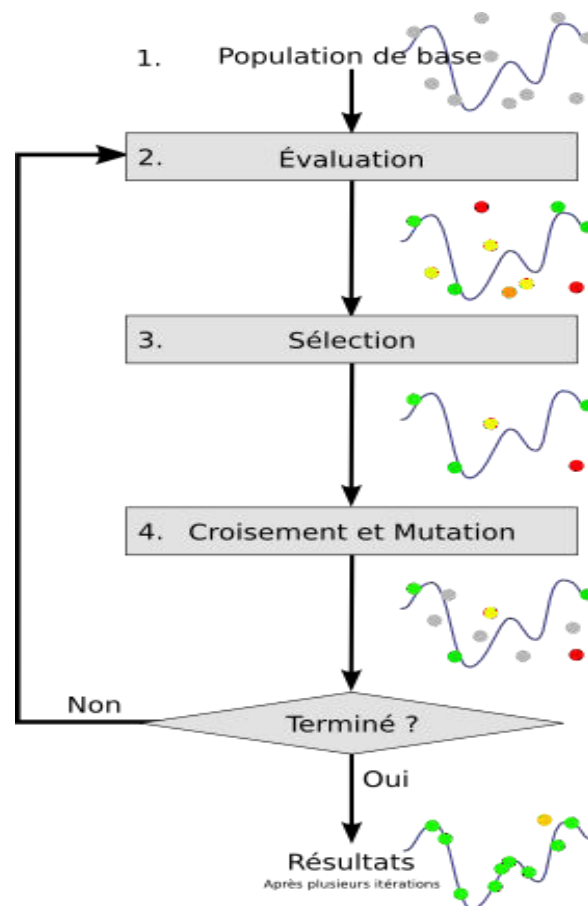


Figure 2.1 : principe d'un algorithme génétique.

S. Yang, Y. Zhang, L. Wang, et al. (2019). Ant Colony Algorithm for VHF Antenna Location Problem. [6].

Dans cette étude menée par S. Yang et ses collègues, l'algorithme de colonie de fourmis a été utilisé pour résoudre un problème de localisation d'antennes VHF (Very High Frequency). L'algorithme de colonie de fourmis est une méthode d'optimisation inspirée par le comportement des colonies de fourmis dans leur recherche de sources de nourriture.

L'objectif de cette étude était de trouver les meilleurs emplacements pour les antennes VHF afin de maximiser la couverture du signal. Pour ce faire, l'algorithme de colonie de fourmis a été adapté et appliqué au problème de localisation des antennes.

Dans cet algorithme, des fourmis virtuelles sont utilisées pour explorer l'espace des solutions, représenté par différents emplacements possibles pour les antennes. Chaque fourmi

Résolution des problèmes d'optimisation

suit une trajectoire de recherche en choisissant un emplacement à la fois, en se basant sur des probabilités définies en fonction de la qualité des emplacements précédemment visités.

J.M. Garibaldi, A.J. Giarola (2019). Optimization of the site location of radar sensors for air traffic control. [7].

Dans cet article de J.M. Garibaldi et A.J. Giarola, intitulé "Optimization of the site location of radar sensors for air traffic control", les auteurs proposent une méthode d'optimisation basée sur l'algorithme de recuit simulé pour déterminer la position optimale des radars dans un système de contrôle du trafic aérien.

L'objectif principal de l'étude était d'optimiser la localisation des capteurs radar dans le but d'améliorer la couverture du système de contrôle du trafic aérien. Pour cela, les auteurs ont utilisé l'algorithme de recuit simulé, une technique d'optimisation qui s'inspire du processus de recuit utilisé en métallurgie.

Dans cette approche, l'algorithme de recuit simulé explore l'espace des solutions en effectuant des mouvements aléatoires à partir d'une solution initiale. Au fur et à mesure de l'exploration, l'algorithme accepte ou rejette les mouvements en fonction d'une fonction d'énergie, qui représente la qualité de chaque solution. Cette fonction d'énergie est basée sur des critères spécifiques liés à la couverture du système de contrôle du trafic aérien, tels que la distance entre les radars, la portée des radars et d'autres considérations opérationnelles.

L'algorithme de recuit simulé permet d'explorer l'espace des solutions de manière probabiliste, ce qui permet d'éviter de rester coincé dans des optima locaux. Il peut donc converger vers une solution proche de l'optimum global.

En utilisant cette méthode d'optimisation, les auteurs ont pu déterminer la position optimale des radars dans un système de contrôle du trafic aérien, en maximisant la couverture du système tout en tenant compte des contraintes opérationnelles.

Aguado, M. Sánchez-Matamoros, R. López-Ramos, et al. (2017). Optimal Deployment of VHF Omnidirectional Range Systems. [8].

Dans cette étude menée par A. Aguado et ses collègues, intitulée "Optimal Deployment of VHF Omnidirectional Range Systems", les auteurs proposent une méthode

Résolution des problèmes d'optimisation

d'optimisation basée sur l'algorithme génétique pour déterminer la position optimale des antennes VHF dans un système de navigation aérienne.

L'objectif principal de cette étude était d'optimiser le déploiement des systèmes VHF omnidirectionnels (VOR) utilisés dans la navigation aérienne. Les VOR sont des systèmes de radio-navigation qui fournissent des informations directionnelles aux aéronefs. L'emplacement optimal des antennes VHF est crucial pour assurer une couverture appropriée et une précision élevée dans la navigation aérienne.

Les auteurs ont utilisé l'algorithme génétique, une technique d'optimisation basée sur la théorie de l'évolution, pour résoudre ce problème. L'algorithme génétique génère une population initiale de solutions représentant différents emplacements potentiels pour les antennes VHF. Ces solutions sont ensuite évaluées en utilisant des critères de performance spécifiques tels que la couverture, la précision de la navigation et la qualité du signal.

J. Zhang, Y. Yuan (2016). Optimal deployment of air traffic control surveillance systems using hybrid genetic algorithms.. [9].

Dans cet article de J. Zhang et Y. Yuan, intitulé "Optimal deployment of air traffic control surveillance systems using hybrid genetic algorithms", les auteurs proposent une méthode d'optimisation basée sur l'algorithme génétique hybride pour déterminer la position optimale des équipements de surveillance dans un système de contrôle du trafic aérien.

L'objectif principal de cette étude était d'optimiser le déploiement des systèmes de surveillance du trafic aérien afin d'améliorer l'efficacité et la sécurité des opérations aériennes. Les équipements de surveillance tels que les radars et les systèmes de détection sont essentiels pour suivre et surveiller les aéronefs en temps réel.

Les auteurs ont proposé une approche hybride qui combine les avantages de l'algorithme génétique avec d'autres techniques d'optimisation. L'algorithme génétique est utilisé pour explorer l'espace des solutions en générant une population initiale de configurations possibles pour le déploiement des équipements de surveillance.

Ensuite, une technique d'optimisation supplémentaire est appliquée pour améliorer la convergence de l'algorithme génétique et obtenir des résultats plus précis. Les détails spécifiques de cette technique d'optimisation supplémentaire ne sont pas précisés dans la référence fournie.

Résolution des problèmes d'optimisation

Les critères d'évaluation utilisés dans cette étude incluent des considérations telles que la couverture de surveillance, la capacité de détection, la résistance aux pannes et les contraintes opérationnelles spécifiques au système de contrôle du trafic aérien.

En utilisant cette méthode d'optimisation basée sur l'algorithme génétique hybride, les auteurs ont pu déterminer la position optimale des équipements de surveillance dans le système de contrôle du trafic aérien, en optimisant les performances du système tout en respectant les contraintes opérationnelles.

"Optimization of Radar Station Locations" de E.A. Smirnov et al. qui propose une méthode d'optimisation combinatoire pour la localisation des stations radar ;L'optimisation combinatoire est une branche des mathématiques et de l'informatique qui étudie les problèmes d'optimisation impliquant des ensembles finis de solutions possibles. Dans cette étude, une approche basée sur l'optimisation combinatoire est utilisée pour trouver les meilleures positions pour les stations radar. L'étude propose des modèles mathématiques et des algorithmes spécifiques pour résoudre ce problème en prenant en compte des contraintes telles que la couverture de la zone, la distance entre les stations et les obstacles éventuels.

"Multi-objective Optimization for VHF Omnidirectional Range Ground Station Placement" de M. A. Shirazi et al. qui utilise l'optimisation continue pour la localisation des stations VHF ; L'optimisation continue est une méthode d'optimisation qui cherche à trouver les meilleures solutions dans un espace de solutions continues. Dans cette étude, l'optimisation continue est utilisée pour résoudre le problème de localisation des stations VHF en tenant compte de plusieurs objectifs, tels que la maximisation de la couverture, la minimisation des coûts et la réduction des interférences. Des techniques d'optimisation multi-objective sont appliquées pour trouver un ensemble de solutions optimales qui représentent un compromis entre ces différents objectifs.

Dans le travail de MOGTIT et al.2022 on présente une approche hybride pour le déploiement optimal d'un réseau de radars météorologiques (WRN) dans l'espace aérien de la région d'information de vol (FIR) d'Alger afin d'atteindre une couverture radar maximale. Le modèle proposé, appelé CM-NNGA, est basé sur un algorithme génétique (GA) pour explorer des espaces complexes et de grande taille de solutions possibles et sur une méthode de réseau neuronal modifié (M-NN) pour échapper aux optimums locaux. Le modèle numérique d'élévation (MTN) qui représente les solutions spatiales est discrétisé en un système de grille, où chaque cellule représente une solution réalisable. La maximisation de la couverture d'un

réseau de radars météorologiques est obtenue par la minimisation du blocage partiel du faisceau (PBB) compte tenu de plusieurs contraintes, à savoir l'élévation du sol, l'élévation du faisceau radar et la distance entre deux paires de radars. Pour réduire le temps de calcul, des schémas de saut sont utilisés. Les résultats ont montré que la méthode proposée est qualitativement supérieure aux algorithmes de pointe sélectionnés, avec une consommation de temps de calcul légèrement supérieure, en particulier pour les grandes régions. Ces travaux ont permis de développer des méthodes d'optimisation efficaces pour résoudre les problèmes de localisation des sites.

2.3 Problèmes d'optimisation

Les problèmes d'optimisation peuvent être classés en deux grandes catégories : l'optimisation combinatoire et l'optimisation continue.

2.3.1 Optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire est un type d'optimisation qui consiste à trouver la meilleure combinaison possible de variables discrètes. Elle est souvent utilisée pour résoudre des problèmes de localisation de sites. Les algorithmes d'optimisation combinatoire les plus connus sont l'algorithme du recuit simulé, la recherche taboue, la méthode de la branche et de la coupe et la méthode des colonnes.

2.3.2 Optimisation continue

L'optimisation continue est un type d'optimisation qui consiste à trouver la meilleure valeur possible d'une variable continue dans un domaine donné. Elle est souvent utilisée pour résoudre des problèmes de localisation de sites. Les algorithmes d'optimisation continue les plus connus sont l'algorithme du gradient, la méthode de Newton, la méthode de quasi-Newton et la méthode de descente de gradient stochastique.

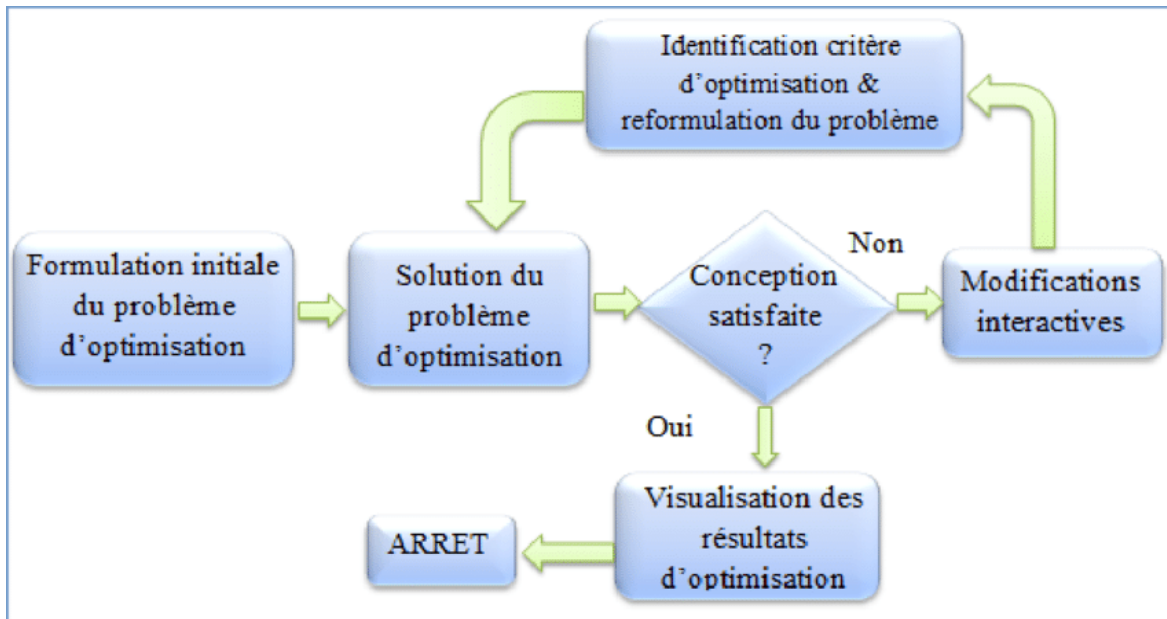


Figure 2.2 : les étapes de résolution d'un problème d'optimisation.

2.4 Quelques méthodes d'optimisation

Dans cette partie, nous allons brièvement décrire quelques algorithmes d'optimisation qui peuvent être utilisés pour résoudre les problèmes de localisation de sites.

2.4.1 Optimisation par algorithmes génétiques (AG)

Les algorithmes génétiques sont une méthode d'optimisation qui imite le processus de sélection naturelle. Ils sont souvent utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire. Les algorithmes génétiques sont particulièrement adaptés aux problèmes où les solutions sont complexes et où il y a plusieurs solutions possibles.

2.4.2 Optimisation par essais particuliers (PSO)

L'optimisation par essais particuliers est une méthode d'optimisation inspirée du comportement social des oiseaux ou des poissons. Dans cette méthode, un groupe d'individus, appelé essaim, est créé. Chaque individu, appelé particule, représente une solution possible au problème d'optimisation. Les particules se déplacent dans l'espace de recherche et communiquent entre elles pour chercher une solution optimale. Cette méthode est utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation continue.

2.4.3 Optimisation par algorithmes de colonies de fourmis (ACO)

Les algorithmes de colonies de fourmis sont inspirés par le comportement des fourmis qui cherchent de la nourriture dans la nature. Dans cette méthode, une colonie de fourmis artificielles est créée pour chercher une solution optimale. Chaque fourmi construit une

Résolution des problèmes d'optimisation

solution partielle en suivant des règles simples. Les fourmis communiquent entre elles en laissant des traces de phéromones pour chercher des solutions de meilleure qualité. Cette méthode est utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire.

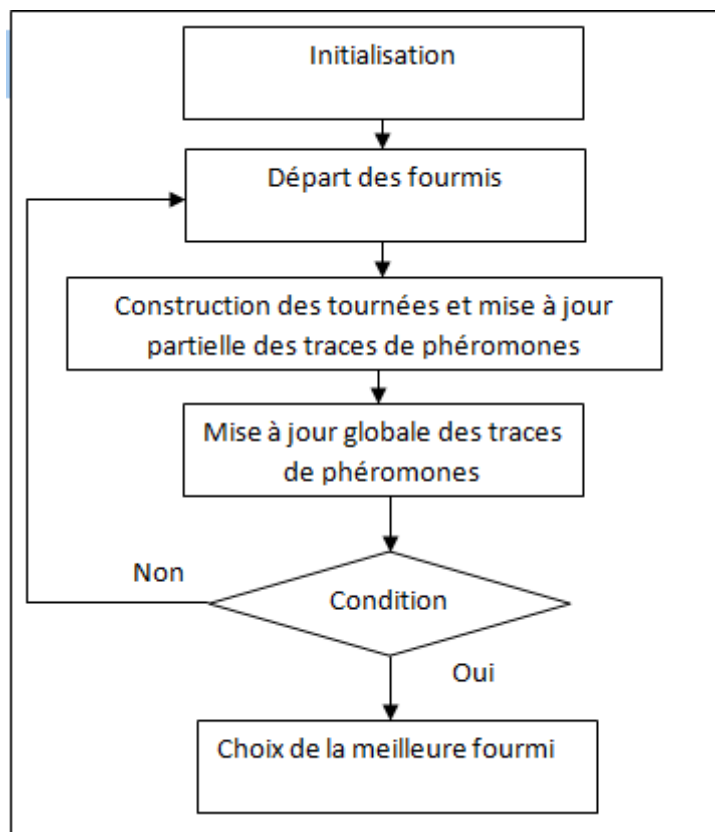


Figure2.3 : optimisation par algorithme de colonies de fourmis.

2.4.4 Algorithme de distribution des vols de Lévy (LFD)

L'algorithme de distribution des vols de Lévy (LFD) est une méthode d'optimisation relativement nouvelle qui s'inspire des vols erratiques des oiseaux. Il s'agit d'un algorithme de recherche aléatoire qui peut être utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes tels que la localisation des sites.

L'algorithme LFD utilise une distribution de probabilité de Lévy pour diriger la recherche de solutions optimales. Cette distribution de probabilité est caractérisée par un taux d'échelle et un paramètre d'exposant qui sont ajustés en fonction du problème à résoudre. La distribution de probabilité de Lévy permet à l'algorithme de sauter rapidement vers de nouvelles régions de l'espace de recherche, ce qui peut aider à éviter les minima locaux.

L'algorithme LFD a été appliqué avec succès à des problèmes d'optimisation dans divers domaines, y compris la robotique, la finance, la logistique et la localisation de sites. Dans le contexte de la localisation de sites, l'algorithme LFD peut être utilisé pour trouver des emplacements optimaux pour les antennes radar ou les stations de base des réseaux de communication.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les différentes méthodes d'optimisation pour résoudre les problèmes liés à la localisation de sites tels que les antennes radar et VHF, et nous avons choisi d'utiliser l'algorithme de distribution des vols de Lévy en raison de sa performance supérieure par rapport aux autres algorithmes présentés. Ce choix sera utilisé dans la suite de notre étude pour la résolution de notre problème d'optimisation.

Chapitre 3

*Optimisation de la
couverture VOR/DME
par l'algorithme de
Lévy flight
distribution(LFD)*

3.1 Introduction

Ces dernières années, le vol de Lévy (LF) est de plus en plus utilisé comme mécanisme de recherche dans les algorithmes d'optimisation méta heuristique (MOA) pour résoudre des problèmes complexes du monde réel. Les algorithmes basés sur LF ont montré des résultats supérieurs ou équivalents à leurs homologues non basés sur LF et sont censés être avantageux dans des situations où aucune information préalable n'est accessible, où les cibles sont difficiles à déterminer et où la distribution des cibles est rare. Il est apparu comme une alternative à la distribution gaussienne (GD) pour obtenir une randomisation dans les multi-objective optimisation algorithme (MOA) et a des applications dans divers phénomènes biologiques, chimiques et physiques.

3.2 Définition de l'optimisation

L'optimisation est une discipline mathématique qui se consacre à l'analyse et à la résolution de problèmes visant à trouver le meilleur élément d'un ensemble en fonction d'un critère quantitatif donné. Le terme dérive du mot latin "optimum", qui signifie "meilleur". Cette discipline trouve des applications dans les mathématiques appliquées, notamment dans l'industrie et l'ingénierie, l'analyse numérique et la statistique, où elle est utilisée pour rechercher des stratégies dans le cadre de la théorie des jeux et jouer un rôle important en recherche opérationnelle.

De nos jours, tous les systèmes pouvant être décrits par un modèle mathématique sont soumis à l'optimisation. La qualité des résultats et des prédictions dépend de la pertinence du modèle utilisé, de l'efficacité de l'algorithme et des outils de traitement numérique.

3.2.1 Exemple d'une optimisation d'une fonction

Certaines techniques d'optimisation commencent avec une solution initiale et l'améliorent en explorant les solutions voisines. Cependant, elles ont l'inconvénient de s'arrêter dès qu'un minimum local est trouvé, ce qui peut être problématique. Nous verrons plus tard que les méta-heuristiques incluent souvent une méthode ou une astuce pour éviter de rester piégé dans ces minimums locaux. Elles explorent l'ensemble de l'espace des solutions afin d'augmenter la probabilité de trouver le minimum global.

La figure 3.1 nous montre un exemple d'une fonction à optimiser, ou elle présente des minimums locaux (y_2 , y_3 , ..., etc.) et un minimum global (y_1) qui représente la meilleure solution.

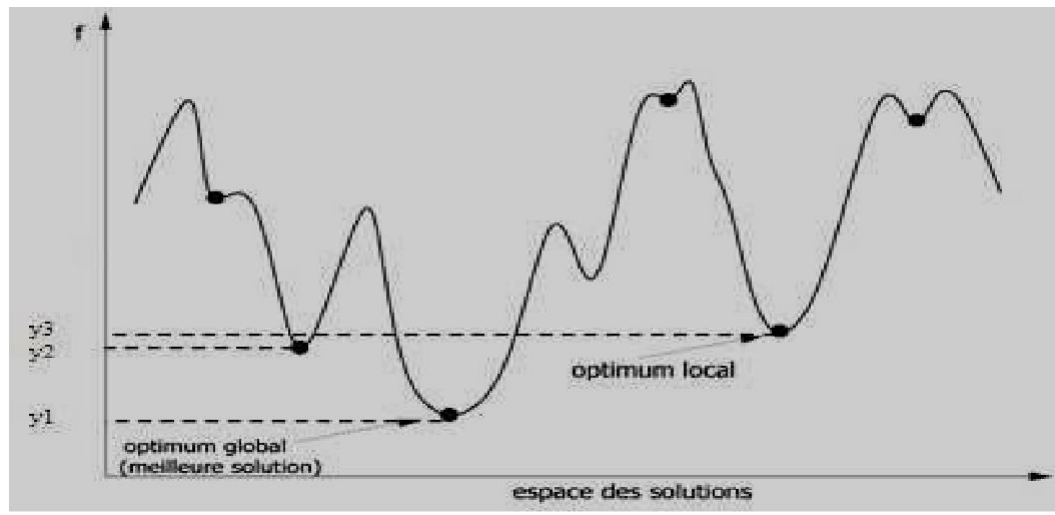


Figure 3.1 : Exemple d'une fonction à optimiser [4].

3.3 Processus d'optimisation

Dans la Figure 3.2, on observe les trois étapes du processus d'optimisation : analyse, synthèse et évaluation. La première étape consiste à analyser le problème et à effectuer des choix préliminaires.

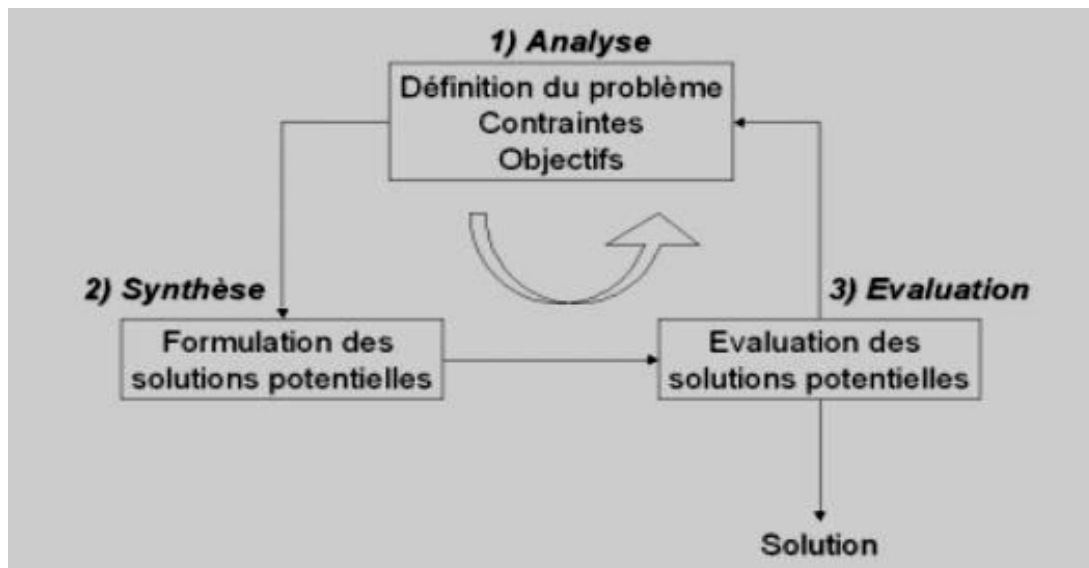


Figure 3.2 : Processus d'optimisation selon Asimow

- Variables du problème : quels sont les paramètres intéressants à faire varier ?
- Espace de recherche : dans quelles limites faire varier ces paramètres ?
- Fonction objectif : quels sont les objectifs à atteindre ?

- Méthode d'optimisation : quelle méthode choisir ?

Une fois effectués ces choix, la méthode choisie synthétise les solutions potentielles qui sont évaluées, puis éliminées jusqu'à obtention d'une solution acceptable.

3.3.1 Variables de conception

Les variables sur lesquelles se concentre l'optimisation de la fonction objective sont les variables de conception, qui peuvent être de différentes natures. Par exemple, dans le cas d'une couverture VOR/DME, ces variables peuvent inclure la position des antennes, l'altitude, et ainsi de suite. Il revient à l'utilisateur de définir ces variables du problème. Il peut être avantageux de faire varier un grand nombre de paramètres afin d'accroître les degrés de liberté de l'algorithme.

3.3.2 Espace de recherche

Dans certains algorithmes d'optimisation, comme les stratégies d'évolution, l'espace de recherche est infini, mais seule la population initiale est limitée à un espace fini. Cependant, dans le cas des algorithmes génétiques, il est généralement requis de définir un espace de recherche fini.

3.3.3 Fonction objectif

La fonction objectif ou d'évaluation (fitness) est utilisée pour mesurer l'efficacité d'une solution. La pertinence des solutions potentielles dépend principalement de la formulation de cette fonction. En effet, quelle que soit sa définition, l'algorithme convergera vers un optimum de cette fonction. Il est donc essentiel d'exprimer de manière mathématique aussi précise que possible l'objectif ou les objectifs à atteindre.

A titre exemple d'ingénierie, dans le contexte des problèmes de conception de réseaux d'antennes, la fonction "fitness" peut-être, par exemple, le niveau des lobes secondaires. Ainsi, le problème d'optimisation consistera à minimiser ce niveau.

3.4 Déroulement de l'algorithme LFD

L'algorithme LFD repose sur le concept de Lévy flight, qui est un modèle mathématique de déplacement aléatoire. Son principe de fonctionnement peut être décomposé en plusieurs étapes clés :

a. Initialisation : L'algorithme démarre en initialisant une population de solutions candidates. Chaque solution candidate représente une configuration potentielle de positions pour les

stations VOR/DME. Ces positions sont exprimées en termes de coordonnées géographiques (latitude, longitude) ou d'autres paramètres appropriés (altitude, hauteur de l'antenne).

b. Génération de déplacements : À chaque itération de l'algorithme, des déplacements aléatoires sont générés en utilisant la distribution de Lévy. Cette distribution permet des sauts occasionnels de grande amplitude, ce qui facilite l'exploration de régions éloignées de l'espace de recherche. Les déplacements sont appliqués aux solutions candidates, ce qui permet d'explorer différentes configurations de positions pour les stations de radionavigation VOR/DME.

c. Évaluation des solutions : Après chaque déplacement, les solutions candidates sont évaluées à l'aide d'une fonction d'évaluation spécifique. Cette fonction attribue un score à chaque solution en fonction de sa performance par rapport aux critères d'optimisation de la couverture VOR/DME. Ces critères peuvent inclure la couverture de signal, la précision des mesures de distance, la redondance des stations, les contraintes d'obstacles, etc.

d. Sélection des meilleures solutions : Les solutions candidates qui obtiennent les meilleurs scores sont sélectionnées pour les itérations suivantes. Cette sélection favorise la convergence vers des solutions de plus en plus optimales pour la couverture VOR/DME. Les meilleures solutions correspondent à des configurations de positions de stations qui répondent le mieux aux critères d'optimisation spécifiques.

e. Itérations : Les étapes de génération de déplacements, d'évaluation et de sélection des meilleures solutions sont répétées pendant un certain nombre d'itérations. Cela permet à l'algorithme de continuer à explorer l'espace de recherche et d'améliorer progressivement la qualité de la couverture VOR/DME. Le nombre d'itérations peut être défini en fonction des caractéristiques du problème et des ressources disponibles.

3.4.1 Algorithme LFD (pseudo code)

```
1 : Initialiser la population comme  $s_i$  ,  $i = 1,2,3,\dots,n$   
2 : Initialiser les paramètres de bornes inférieures et  
supérieures comme  $LB, UB, r, T_{max}$  .  
  
// $r$  est le seuil,  $T_{max}$  : nombre maximal d'itérations  
3 : Calculer la fonction objectif pour chaque solution  
candidates  $s_i$  ,  $i = 1,2,\dots,n$ 
```

Optimisation de la couverture VOR/DME par l'algorithme LFD

4 : Choisir la meilleure solution S_{best}
5 : Sélectionner la position et la valeur de la cible

6 : **tant que** $t \leq T_{max}$ **faire**
7 : **pour** chacune des deux solutions (principales et voisines)
faire
8 : Calculer ED à partir de l'équation(2)
9 : **si** $ED < r$ **alors**
10 : Mettre à jour de la solution voisine à partir les
équations(3) et (4)
11 : Mettre à jour la solution principale à partir(7)
12 : Réinitialiser les limites de la solution qui dépassent
les limites LB et UB
13 : **fin si**
14 : **fin pour**
15 : Mettre à jour S_{best}
16 : $t = t + 1$
17 : **fin tant que**
18 : retourner S_{best}

FIN de pseudo code.

Pour une distribution de Lévy symétrique et stable, LFD utilise l'algorithme de Mantegna [1] qui se déplace efficacement vers l'emplacement optimal en déterminant de manière appropriée la longueur de pas et la direction de recherche. L'algorithme de Mantegna détermine la longueur de pas (SL) comme (3.1) :

$$SL = \frac{U}{|V|^{1/\beta}} \quad (3.1)$$

Où $\beta = 0 < \beta \leq 2$

$$U \sim N(0, \sigma_u^2), \quad V \sim N(0, \sigma_v^2)$$

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1 + \beta) \times \sin \pi \beta / 2}{\Gamma[(1 + \beta) / 2] \times \beta \times 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta}$$

$\sigma_v = 1$, Et

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$$

Ici, β désigne l'indice de distribution de Lévy, σ_u et σ_v représentent les écarts-types, et Γ représente la fonction Gamma pour un entier z .

Pour calculer ED entre les deux solutions candidates, ou en d'autres termes, les agents de recherche, ou en termes de LFD, les nœuds de capteurs et. Capteurs s_k et s_l , le LFD utilise (3.2) :

$$ED(s_k, s_l) = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (3.2)$$

Où (x_i, y_i) et (x_j, y_j) représentent respectivement les coordonnées de position de s_k et de s_l . ED est ensuite comparée à une valeur seuil r jusqu'à un nombre spécifique d'itérations. Si la distance est inférieure au seuil sélectionné, LFD ajuste les positions de ces solutions en utilisant (3.3)

$$s_l(t+1) = LF(s_l(t), s_{best}, LB, UB) \quad (3.3)$$

Où t représente l'indice d'itération, LF effectue une marche aléatoire en utilisant les vols de Lévy, s_{best} représente le meilleur nœud de capteur (solution candidate) avec le plus petit nombre de voisins, LB et UB les limites supérieure et inférieure de l'espace de solution, respectivement. Ici, s_l est déplacé vers le capteur ayant le plus petit nombre de voisins.

$$s_j^{t+1} = LB + (UB - LB) \times rand() \quad (3.4)$$

Où $rand()$ est un nombre aléatoire avec une distribution uniforme [0,1]. De cette manière, LFD est capable d'explorer des zones non visitées dans l'espace des solutions.

$$R = rand(), CSV = 0,5 \quad (3.5)$$

LFD utilise une valeur scalaire comparative $R = rand()$ et un seuil de comparaison $CSV = 0,5$ pour mettre à jour la position de s_j . L'algorithme LFD compare la valeur de R , et si $R < CSV$, LFD exécute l'équation (3.3); sinon (3.4). De cette manière, LFD trouve plus d'opportunités pour découvrir efficacement l'espace de recherche. Selon le

problème en question, la valeur de CSV peut varier. La nouvelle position de l'agent de recherche si est obtenue comme (3.6):

$$s_i^{t+1} = TP + \alpha_1 \times TF_{Neighbours} + rand() \times \alpha_2 \times \frac{(TP + \alpha_3 \times s_{best})}{2} - s_i^{t+1} TF_{Neighbours} = \sum_{k=1}^{NN} \frac{d_k \times s_k}{NN} \quad (3.6)$$

$$s_{new}^{t+1} = LF(s_i^{t+1}, TP, LB, UB) \quad (3.7)$$

La nouvelle solution s_i^{t+1} est mise à jour via (3.6), et elle est finalisée via (3.7). Ici, TP est la meilleure solution avec meilleure valeur d'aptitude à l'aide de la fonction objective, et elle est appelée solution cible. Dans (6), α_1, α_2 et α_3 sont des nombres aléatoires tels que $\alpha_1 = 10, \alpha_2 = 0,00005$ et $\alpha_3 = 0,005$.

L'équation (3.8) définit comment calculer l'aptitude cible totale des voisins $TF_{Neighbours}$ autour de s_i^t , où s_k désigne la position voisine de s_i^t , où k l'indice de la solution voisine, NN le nombre d'éléments de la solution voisine s_i^t , tandis que le degré d'aptitude de chaque solution voisine est donné par d_k

$$d_k = \frac{\delta_1(V - \min(V))}{\max(V) - \min(V)} + \delta_2, \text{ Où} \quad (3.8)$$

$$V = \frac{fit(s_j(t))}{fit(s_i(t))}, \text{ et } 0 < \delta_1, \delta_2 \leq 1$$

3.5 Exemple d'application

Pour mieux comprendre le mécanisme des paramètres de l'algorithme LFD (LB, UB, r, T_{max}), nous avons appliqué cette méthode à l'optimisation de l'équation suivante [1] :

$$f(x) = -20 \times e^{(-2\sqrt{\sum(x^2/50)})} - e^{(\sum(\cos 2\pi.x)/50)} + 20 + e^1$$

Nous allons résoudre ce problème avec l'algorithme de distribution des vols de Lévy (LFD) en deux étapes :

La première étape : (Influence de la taille des agents)

Les paramètres de l'algorithme LFD choisis sont les suivants :

- La limite inférieure de l'espace de solution $LB = -32$.
- La limite supérieure de l'espace de solution $UB = 32$.
- $dim = 50$.
- Nombre d'itération maximal $T_{max} = 1000$.
- le seuil $r = 2$.

Taille réduite des agents de recherche

Une taille de $n_0 = 5$ agents de recherche a été choisie:

- Les résultats suivants :
 - Le score de la fonction est $2,4240 \times 10^{-5}$.
 - Le temps de calcul est de 8 secondes.

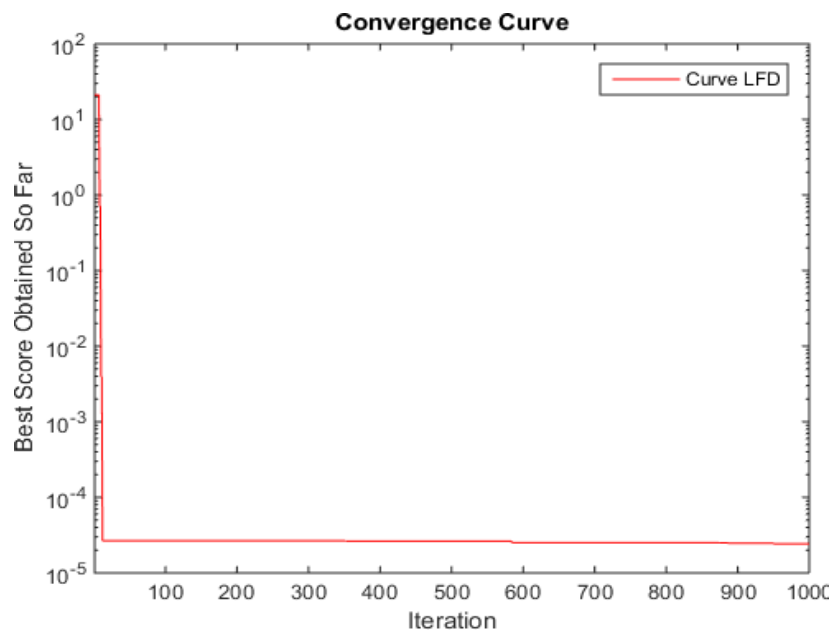


Figure 3.3: évolution de la courbe de convergence dans le cas de search agent petit.

Taille moyenne des agents de recherche.

Dans ce cas, nous prenons l'agent de recherche $n_0 = 35$.

Après exécution, nous obtenons les résultats suivants :

- Le score est $1,5789 \times 10^{-4}$.

- Le temps de calcul est 2 minutes et 23 secondes

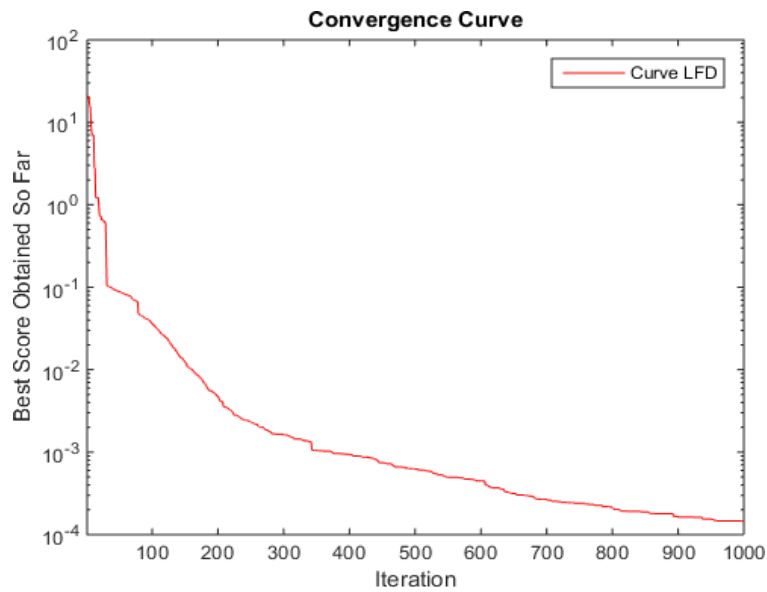


Figure 3.4 : évolution de la courbe de convergence dans le cas de search agent moyen.

a) Grande taille des agents de recherche

- Dans ce cas nous prenons une taille des agents de recherche de $n_0 = 100$.

Les résultats suivants sont obtenus :

- Le score est $4,2120 \times 10^{-5}$.
- Le temps de calcul est 18 minutes et 52 secondes.

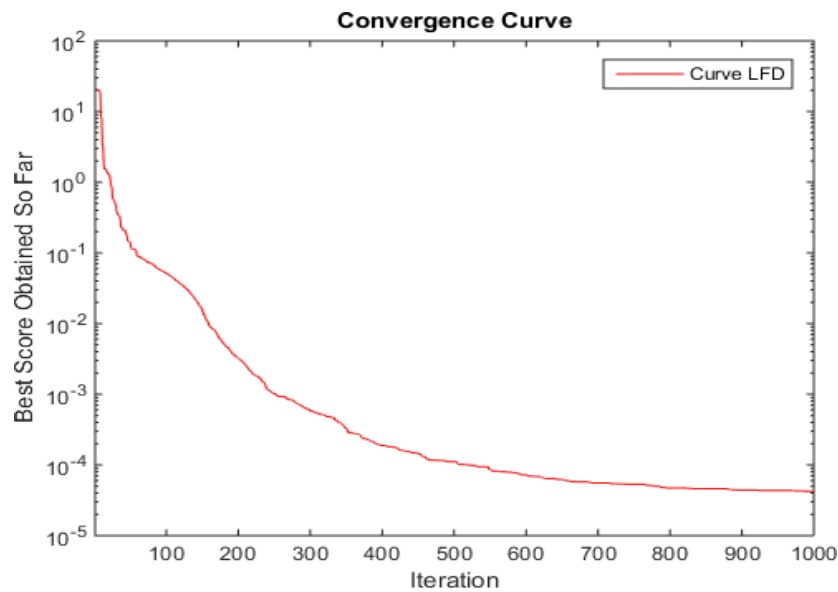


Figure 3.5 : évolution de la courbe de convergence dans le cas de search agent grand.

Commentaire-1 :

Dans cette première partie, nous examinerons l'influence de la taille de l'agent de recherche sur les performances de l'algorithme LFD. Des distributions d'agents de recherche de taille $n_0=5,35,100$ sont testées avec un nombre constant de générations. Les figures (3.3-3.5) montrent la minimisation de la fonction f en fonction du nombre d'itérations par l'algorithme d'optimisation LFD. Dans la figure 3.3, la convergence est rapide, le meilleur score étant obtenu dans les 20 premières itérations, et avec une légère amélioration observée dans les itérations suivantes. Cela pourrait expliquer le fait que l'algorithme LFD ne trouve pas suffisamment d'agents de recherche pour explorer de nouvelles solutions. Dans la figure 3.4, en augmentant le nombre d'agents, la convergence ralentit, et la solution optimale est probablement atteinte dans les dernières itérations avec un temps de calcul élevé (~18 fois plus élevé que dans la précédente simulation). Dans un troisième essai pour observer l'influence de la taille des agents de recherche sur la résolution, une taille de 100 a été fixée. Il est à noter que cette solution n'améliore pas la précision de la solution. En outre, le temps de calcul augmente considérablement. Les résultats ont montré qu'une taille de population optimale de 35 agents pour 1000 générations est suffisante pour trouver la solution optimale.

La deuxième étape (Influence de seuil (r))

Les paramètres du LFD choisis sont:

- La limite inférieure de l'espace de solution $LB = -32$.
- La limite supérieure de l'espace de solution $UB = 32$.
- $dim = 50$.
- Nombre d'itération maximal $T_{max} = 1000$.
- search agent $n_0 = 35$.

Petit Seuil

Dans ce cas on prend $r = 0,2$:

On obtient les résultats suivants :

- Le score est $1,0038 \times 10^{-5}$
- Le temps de calcul est 38 seconds

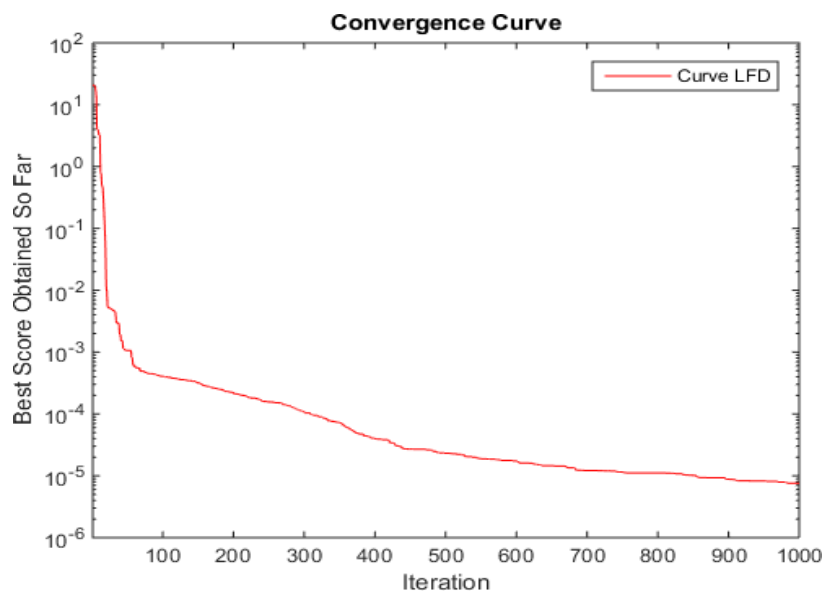


Figure 3.6 : évolution de la courbe de convergence dans le cas de seuil petit.

Seuil moyen

Dans ce cas on prend $r = 2$.

Les résultats suivants sont obtenus :

- Le score est $1,5789 \times 10^{-4}$.
- Le temps de calcul est 2 minutes et 25 seconds.

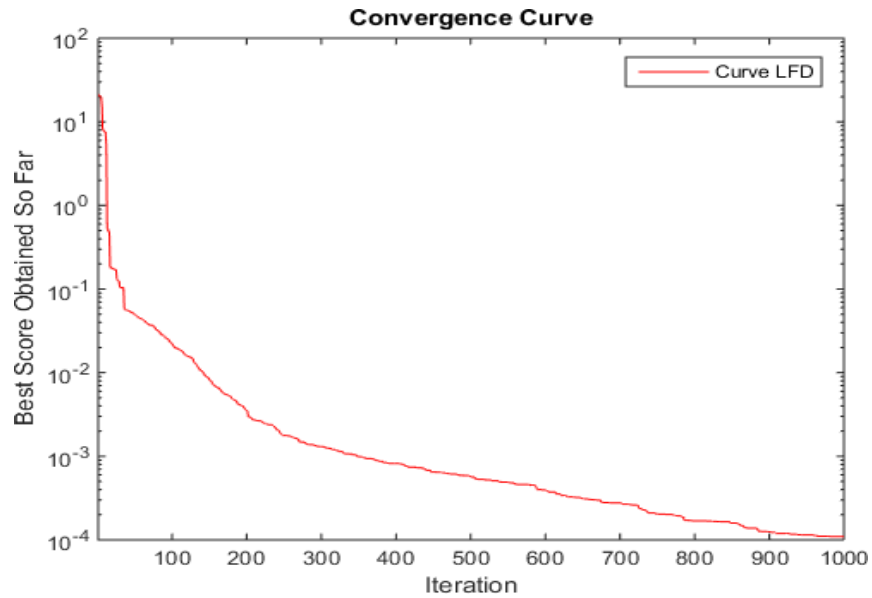


Figure 3.7 : évolution de la courbe de convergence dans le cas de seuil moyen.

Seuil grand

Dans ce cas on prend $r = 20$.

On obtient le résultat suivant :

- Le score est $2,2941 \times 10^{-4}$.
- Le temps de calcul est 2 minutes et 40 seconds.

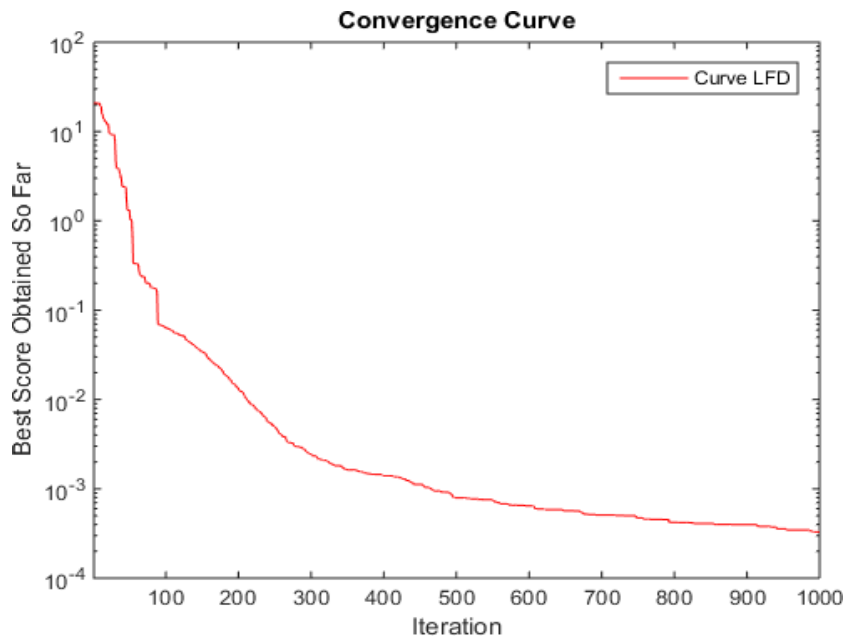


Figure 3.8 : évolution de la courbe de convergence dans le cas de seuil grand.

Commentaire 2

Dans cette deuxième partie, nous procédons à l'analyse de l'influence de la taille du seuil sur les performances de l'algorithme LFD. Des distributions de seuils de $\tau=0,2, 2,20$ sont expérimentées avec un nombre constant de tailles d'agents et d'itérations. Les figures (Figs.3.6-3.8) reflètent la minimisation de la fonction f en fonction du nombre de générations par l'algorithme d'optimisation LFD. Il apparaît que lorsque la valeur du seuil est faible, le taux de convergence est particulièrement rapide et aboutit à une solution optimale ; en augmentant la valeur du seuil, l'algorithme LFD maintient ses performances, mais il est apparu que le taux de convergence ralentisse légèrement; enfin, en multipliant la valeur du seuil initial par 100, la convergence est devenue plus lente et la solution optimale est loin d'être atteinte, ce qui pourrait expliquer pourquoi les solutions sont très éloignées de la meilleure solution.

D'après ce qui précède, Il est difficile de trouver un compromis entre les paramètres de l'algorithme pour aboutir à un résultat satisfaisant dans un délai raisonnable.

3.6 Conclusion

L'algorithme LFD utilise la distribution de Lévy pour générer des déplacements aléatoires des agents de recherche, ce qui permet d'explorer efficacement l'espace de recherche et de trouver des configurations optimales pour améliorer la solution. En évaluant et en sélectionnant les meilleures solutions à chaque itération, l'algorithme vise à optimiser les critères de solution. Dans la suite de ce travail, nous adapterons l'algorithme LFD à notre problème d'optimisation du déploiement des stations de radionavigation VOR/DME.

Chapitre 4

Simulation et re'sultats

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats de nos expériences en utilisant le modèle numérique de terrain (MNT). Tout d'abord, les stations VOR/DME disponibles sont étudiées et évaluées. Ensuite, la mise en œuvre de l'algorithme d'optimisation LFD visant à améliorer la couverture du système de navigation conçu pour garantir une couverture VOR/DME continue et complète à haute et basse altitude dans la FIR d'Alger.

4.2 Préliminaires

4.2.1 Notions de couverture

La couverture de navigation fait référence à l'espace aérien balayé par un dispositif ou un réseau de dispositifs de navigation tels que le VOR/DME ou le VOR. Il s'agit généralement d'une balise bidimensionnelle avec un faisceau en cosécante carrée qui couvre un secteur vertical triangulaire et balaye l'horizon sur 360°. Ainsi, cela crée un volume en forme de cylindre torique plat où notre dispositif peut détecter toute cible d'intérêt.

a) Couverture simple

Une couverture simple englobe la totalité du secteur visible depuis un unique point de vue.

b) Couverture double

Une double couverture se produit lorsqu'un point spécifique de l'espace est surveillé ou communiqué par un organisme de circulation aérienne (ATS, Air Traffic Services) à partir d'au moins deux sources distinctes.

4.2.2 Fonction viewshed

La fonction "*viewshed*" de Matlab® est employée pour calculer la visibilité d'un point à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT). Elle calcule la zone visible à partir d'un point d'observation en tenant compte de l'altitude du point d'observation et des élévations du terrain environnant. Cette fonction est souvent utilisée en géomantique pour l'analyse de la visibilité dans les projets de développement urbain, la planification des transports ou la gestion des ressources naturelles.

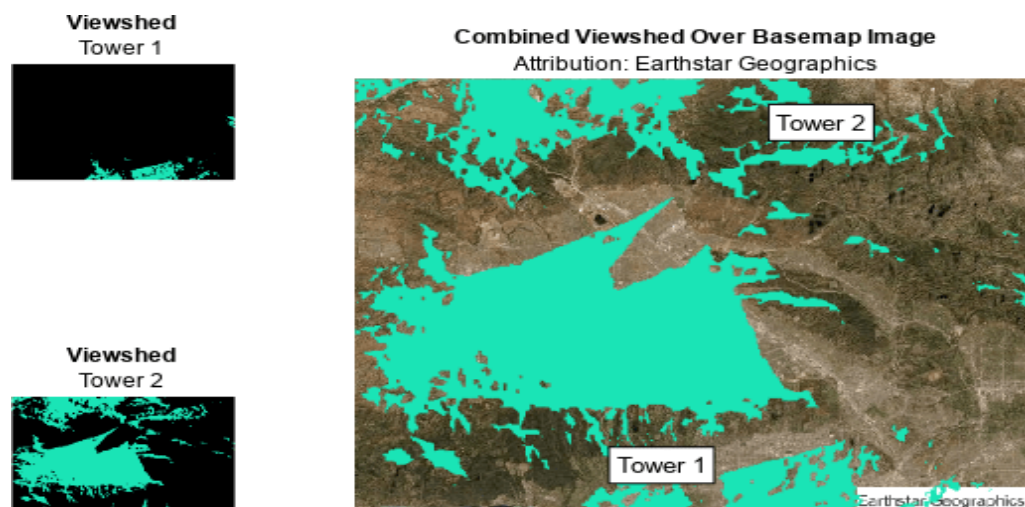


Figure 4.1: Viewshed de deux antennes (tower 1 et 2, la couleur verte est la zone visible et le reste est la zone invisible).

La syntaxe de la fonction *viewshed* est la suivante :

$V(p)$
= *viewshed* (matrice d'altitude ,reference vectorielle ,hauteur d'observateur, ...
hauteur de cible ,rayon delaterre,rayoneffectif)

4.3 Protocole expérimental

4.3.1 Données disponibles

La FIR Alger est délimitée par les points suivants : 39°00'N 008°00'E, 39°00'N 004°40'E, 38°20'N 003°45' E, 36°15'N 00130'W, 35°50'N 002°06'W, 35°05'N 002°12'W, suivant ensuite les frontières nationales de l'Algérie, la prestation de navigation est actuellement fournie par trente-six (36) stations (VOR/DME) [xx]. Dans cette étude, nous avons utilisé ces 36 stations de pour analyser l'existant en matière de couverture navigation du réseau actuel. Un modèle numérique de terrain MNT couvrant la totalité du territoire algérien de type SRTM3 en degrés décimales et DATUM WGS84.

Ils sont dérivés par des données de (USGS/ NASA) SRTM [15] à une résolution de trois (03) secondes d'arc (= 90 m) et d'autres fichiers des coordonnées géographiques de la

Simulation et résultat

FIR Alger de type (.shp). Dans cette étude nous avons utilisé un MNT délimité par les latitudes 18° 00' N jusqu'à 40° 26' N et de longitudes 12° 00' W jusqu'à 12° 00' E. Une grille de (2694 x 2881) altitudes avec une taille de (29,6 Mo). Le calcul est paramétré avec une hauteur h_r de vingt mètre (20) m pour toutes les stations (VOR/DME) et une cible (avion) à trois d'altitudes différentes (10000 pi, 20000 pi et 30000 pi) par rapport au niveau moyen de la mer (Msl). La résolution utilisée dans cette étude correspond à un compromis entre la rapidité de calcul estimée et la précision espérée pour le calcul de ligne de visé (Los)

4.3.2 La modélisation du terrain pour notre simulation

Nous présentons dans cette partie la modélisation du terrain dans notre simulation. L'information topographique d'une région donnée, représentée dans un système de coordonnées cartésien en trois dimensions (3D), est un paramètre clé utilisé dans notre modélisation et la création de divers scénarios. Elle est définie par la combinaison des coordonnées :

$$x, y, z \rightarrow S(x_p, y_p, z_p) \quad (4.1)$$

Où z_p représente l'altitude, y_p représente la latitude et x_p représente la longitude.

Les données sont disponibles dans une image sous une extension "*Tiff*". L'exemple suivant présente le contenu du MNT couvrant l'espace aérien algérien.

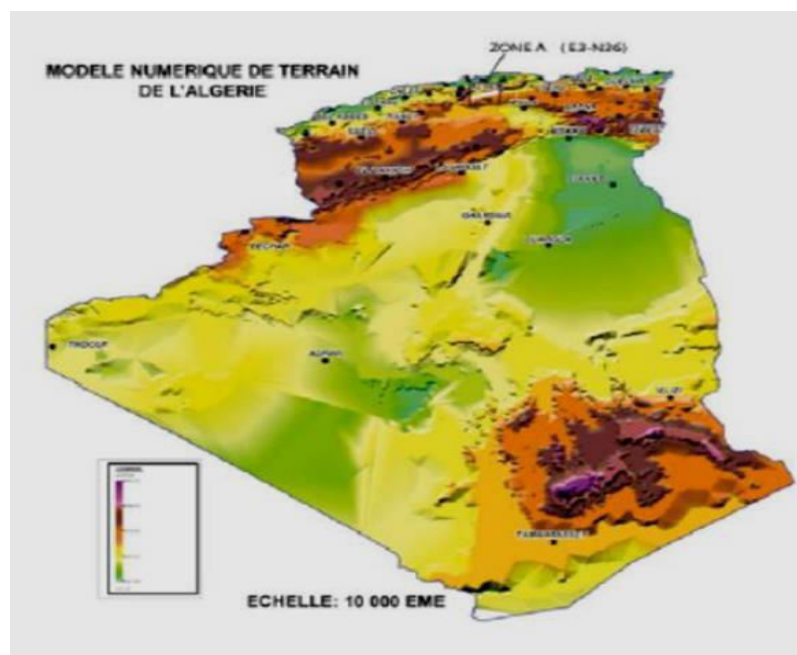


Figure4.2 : Mosaïque des données fournies de la FIR d'Alger.

Les colonnes représentent respectivement la latitude, longitude et l'altitude. Le nombre des champs qu'il contient dans la grille est x_p , y_p , z_p .

x_p	y_p	z_p
3.0000000000	36.8666666667	0.000
3.0000000000	36.8583333333	0.000
3.0000000000	36.8500000000	0.000
3.0000000000	36.8416666667	0.000
3.0000000000	36.8333333333	0.000
3.0000000000	36.8250000000	0.000
3.0000000000	36.8166666667	1.000
3.0000000000	36.8083333333	208.00
3.0000000000	36.8000000000	300.00

Figure4.3 : Format d'un exemple réduit d'une image type « *Tiff* », les coordonnées géographiques (x_p , y_p) sont implicitement présentées dans la grille des altitudes z_p .

4.4 Méthodologie de résolution du problème

Dans ce cas, nous considérons que la réflexion, la diffraction et les paramètres météorologiques (pluie, brouillard, brume, etc.) sont négligés, car ils sont extrêmement difficiles à modéliser. Considérons également que notre station (VOR/DME) est définie comme suit :

- Visibilité de 0 mètre à l'infini.
- Visibilité sur tous les azimuts (soit sur 360°).
- Visibilité du zénith au nadir (soit de $+90^\circ$ à -90°).

4.5 Calcul de couverture

Afin de compléter la démarche d'expérimentation, nous avons mis au point deux algorithmes de simulation.

ALGORITHME-1

Simulation et résultat

La fonction "*viewshed*" employée dans notre algorithme est capable de calculer si des lignes droites (LOS, lignes de visé) peuvent être tracées entre deux points (la station (VOR/DME) et un avion à différents niveaux de vol, à savoir FL100, FL200 et FL300) sans intersection avec des obstacles sur une grille carrée régulière (RGS). Nous utilisons un ensemble de données au format "*Tiff*", adapté à la géométrie de l'algorithme, et un format "*shapefile*" avec l'extension (*.shp*) produit avec le logiciel de système d'information géographique (SIG) MapInfo.

L'algorithme détermine les cellules raster visibles et celles qui ne le sont pas. Le résultat de sortie est donc une grille où les cellules visibles sont codées par le nombre (1) et les cellules non visibles par le nombre (0).

Cet algorithme est traduit comme suite :

Soit ($O \in R^3$) observateur sur la surface du terrain S , $altobs$ et $altarg$ soient la hauteur l'antenne (VOR/DME) par rapport au niveau de surface (*above ground level*, AGL) et l'altitude de l'avion par rapport au niveau de la mer (*mean sea level*, MSL) en mètre (m), respectivement. Soit S l'ensemble des points de la grille, et soit *champvis* une fonction qui estime la couverture.

$$champvis : \forall p = \begin{cases} 1 & \text{si la zone entre le site } p \text{ et l'avion est visible,} \\ 0 & \text{Autrement.} \end{cases} \quad (4.2)$$

Pseudo-code pour l'estimation de la couverture simple (VOR/DME)

Étape1 : Chargement des données et prévisualisation des cartes de visibilité (VOR/DME).

1. Charger et lire $Z, altobs, altarg, refvec, Re$.
2. Convertir $Z_p (z_p < 0) = -1$.
3. Charger les coordonnées: points significatifs p (aéroport, points de compte redu).
4. Obtenir et visualiser (x_p, y_p) les points significatifs p .
5. Attribuer du texte aux points p .
6. Charger le réseau de routes ATS.
7. Charger les limites sectorielles.

Simulation et résultat

8. Charger les coordonnées géographiques s des stations (VOR/DME).

Etape2 : Estimation de la couverture des stations (VOR/DME)

9. Appeler `champvis` pour estimer V_{ij} % couverture simple.

10. **Pour $s:=1$ jusqu' au faire**

11. $[V_{ij}, visa] = \text{champvis}(S, \text{refvec}, x, y, \text{altobs}, \text{alttarg}, 'AGL', 'MSL', Re, 4*Re).$

12. Calculer $S_t = \{area/V_{ij} == 1\}$.

13. **Return** $area, V_{ij}$.

14. **Fin faire**

Fin de pseudo code.

Où Z une matrice de dimension $(m \times n)$, $m=2694$ représente les lignes, et $n=2881$ correspond le nombre de colonnes.

$$Z = \begin{bmatrix} alt^1 & alt^1 & \dots & alt^1 \\ alt^1 & alt^2 & \dots & alt^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ alt^m & alt^m & \dots & alt^m \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Pour la référence vectorielle, le $refvec$ suivant est utilisé dans notre algorithme :

$$rrefvec = \begin{bmatrix} 0 & -0.0083 \\ 0.00831 & 0 \\ -12.083 & 40.4491 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Pour toutes nos simulations, nous avons appliqué un facteur de correction atmosphérique $k=4/3$, qui tient compte de la courbure de la Terre. Le rayon effectif R_e est calculé en fonction du rayon moyen de la Terre $R_0=6371$ km, selon la formule suivante:

Le rayon effectif en fonction rayon de la terre est donné par (4.5) :

$$R_e = KR_e \quad (4.5)$$

Simulation et résultat

La zone de couverture théorique maximale des stations VOR/DME, V_{ij} , est calculée en tenant pas compte des paramètres tels que le facteur de réfraction k et les réflexions causées par le modèle numérique du terrain (MNT) utilisé dans l'équation (1). Tant que V_{max} est limitée par la portée optique maximale D_{max} , comme illustré dans l'équation (4.6) :

$$D_{max} = \sqrt{2R_0(h_{vor/dme})} + \sqrt{2R_0(h_{cible})} \quad (4.6)$$

Les grandeurs $h_{vor/dme}$ et h_{cible} en (mètre) et D_{max} en Km.

Ensuite, nous avons utilisé l'équation (4.7) pour calculer l'indice de visibilité (Ind_s) de la zone visible (V_{ij}) par rapport à la zone visible théorique maximale (V_{max}) pour les trois (03) niveaux de vol :

$$Ind_s = \frac{V_s(h_0, h_a) \cap V_{max}}{V_{max}} \quad (4.7)$$

À partir de la matrice V_{ij} , nous avons calculé la surface S_t pour chaque station (VOR/DME), tels que :

$$S_t = \text{area}(V_{ij} == 1) \quad (4.8)$$

Le calcul de la zone de couverture global par (4.9):

$$V_t(i) = \bigcup_{i=1}^n V_{ij} \quad (4.9)$$

Le calcul de la surface globale S_t est obtenu en combinant deux stations (VOR/DME) adjacentes. Les cellules visibles qui se trouvent à l'intersection de deux sites ont été exclues. En suivant le processus de l'étape 1, le calcul est répété jusqu'à ce qu'il n'y ait plus aucun site sans couverture.

$$\{(I, J) = (x_i, y_j) \cup_{i=1}^{36} x_i y_j\} \quad (4.10)$$

$$S_t = \{\text{area}(I, J) == 1\} \quad (4.11)$$

4.6 Résultat de simulation de la couverture (VOR/DME)

4.6.1 Analyse de performance de la couverture VOR/DME

Les résultats illustrés dans les Fig. (4.4, 4.5 et 4.6) représentent des cartes de visibilité de volumes de service variés (à des altitudes de 10 000 ft, 20 000 ft et 30 000 ft), délimités par

Simulation et résultat

Le tableau 4.1 fournit des informations détaillées sur les résultats des évaluations de la couverture volumétrique constituées de Fig. (Fig. 4.4-4.6). Une couverture moyenne de 38,6% au FL 100, 48,6% au FL 200 et 53,9% au FL 300 est présentée dans l'ensemble de la FIR d'Alger, le site TBS offrant la couverture la plus faible (6,96% au FL 100, 14,35% au FL 200 et 19,70 au FL 300). Il est à noter que ce pourcentage est calculé par rapport à la couverture maximale du site qui devrait être présentée.

Tableau 4.1: Surface de chaque Service VOR à 10.000, 20.000 et 30.000 Pieds msl en Km^2 ≠ indice de visibilité ≠ la surface S_t en pourcentage %, Calculé par rapport à la zone de couverture maximale V_{max} , pour une hauteur de station $h_o=20$ m, MNT de résolution de trois (03) secondes d'arc (environ ≈ 90 m).

N°	Sites	FL100			FL200			FL300		
		Surfaces (Km ²)	Inds	Per%	Surface S_t (Km ²)	Inds	Per%	Surface S_t (Km ²)	Inds	Per %
1	ADR	1,75E+05	0,6299	62,996	3,47E+05	0,7243	72,437	5,17E+05	0,7690	76,904
2	ALR	9,69E+04	0,4781	47,811	2,09E+05	0,5497	54,977	3,27E+05	0,5927	59,273
3	SDM	5,33E+04	0,2397	23,970	1,33E+05	0,3269	32,692	2,24E+05	0,3830	38,308
4	ANB	9,36E+04	0,4925	49,251	2,07E+05	0,5712	57,124	3,26E+05	0,6143	61,430
5	BTN	4,35E+04	0,1162	11,623	1,37E+05	0,2265	22,650	2,44E+05	0,2980	29,800
6	BCR	4,35E+04	0,1134	11,341	1,37E+05	0,2221	22,216	2,44E+05	0,2930	29,309
7	BBS	1,15E+05	0,3561	35,614	2,64E+05	0,4892	48,928	4,15E+05	0,5593	55,931
8	BIS	1,38E+05	0,6186	61,861	2,79E+05	0,6859	68,593	4,24E+05	0,7234	72,347
9	MOK	1,61E+05	0,5327	53,271	3,32E+05	0,6474	64,746	4,94E+05	0,6955	69,556
10	BOD	8,16E+04	0,2774	27,741	2,04E+05	0,4064	40,644	3,35E+05	0,4795	47,959
11	BSA	5,77E+04	0,1838	18,380	1,49E+05	0,2832	28,322	2,51E+05	0,3455	34,552
12	CSO	4,09E+04	0,1146	11,469	1,31E+05	0,2247	22,477	2,35E+05	0,2971	29,716
13	DJA	8,07E+04	0,2032	20,325	2,13E+05	0,3364	33,646	3,41E+05	0,4007	40,078
14	BAY	3,40E+04	0,0750	7,5066	1,20E+05	0,1704	17,049	2,17E+05	0,2330	23,301
15	MNA	1,52E+05	0,4940	49,400	3,18E+05	0,6143	61,431	4,83E+05	0,6735	67,356
16	ELO	1,68E+05	0,7753	77,535	3,32E+05	0,8335	83,358	4,95E+05	0,8608	86,083
17	GHA	1,25E+05	0,4025	40,258	2,75E+05	0,5276	52,761	4,28E+05	0,5931	59,319
18	GRS	6,02E+04	0,1872	18,727	1,64E+05	0,3051	30,513	2,79E+05	0,3771	37,719
19	HME	1,55E+05	0,6376	63,762	3,16E+05	0,7287	72,879	4,77E+05	0,7723	77,239
20	HRM	1,37E+05	0,3743	37,438	3,06E+05	0,5143	51,438	4,73E+05	0,5849	58,498

Simulation et résultat

21	ILZ	1,48E+05	0,4499	44,999	3,16E+05	0,5787	57,871	4,60E+05	0,6130	61,304
22	IGZ	1,51E+05	0,4981	49,814	2,74E+05	0,5341	53,411	3,84E+05	0,5408	54,081
23	NSL	1,56E+05	0,5656	56,563	3,20E+05	0,6716	67,164	4,83E+05	0,7230	72,306
24	JIL	7,99E+04	0,4109	41,098	1,70E+05	0,4618	46,180	2,67E+05	0,4952	49,522
25	MOS	1,45E+05	0,5516	55,163	2,98E+05	0,6469	64,692	4,52E+05	0,6966	69,660
26	ORA	1,45E+05	0,6395	63,958	2,98E+05	0,7227	72,270	4,52E+05	0,7643	76,439
27	OUR	1,58E+05	0,6431	64,319	3,21E+05	0,7324	73,244	4,83E+05	0,7754	77,543
28	TMS	9,69E+04	0,2141	21,414	2,49E+05	0,3545	35,457	4,03E+05	0,4320	43,209
29	TBS	2,60E+04	0,0696	6,9653	8,66E+04	0,1435	14,359	1,61E+05	0,1970	19,705
30	TRB	8,44E+04	0,2117	21,175	2,24E+05	0,3523	35,234	3,68E+05	0,4314	43,149
31	TIO	1,65E+05	0,5802	58,028	3,34E+05	0,6845	68,452	5,01E+05	0,7346	73,468
32	TDF	1,58E+05	0,5113	51,134	3,27E+05	0,6277	62,771	4,93E+05	0,6845	68,451
33	TLM	3,68E+04	0,1360	13,606	1,05E+05	0,2226	22,269	1,87E+05	0,2828	28,284
34	TGU	6,06E+04	0,2684	26,842	1,54E+05	0,3750	37,501	2,59E+05	0,4386	43,865
35	IMN	1,26E+05	0,3771	37,717	2,59E+05	0,4697	46,975	3,73E+05	0,4932	49,322
36	ZEM	1,05E+05	0,4593	45,931	2,17E+05	0,5226	52,265	3,33E+05	0,5600	56,007

La Fig. 4.6 donne un aperçu de l'augmentation de la zone de couverture totale au fur et à mesure de la sélection de chaque nouvel emplacement de VOR/DME. Au sud de la FIR d'Alger, l'espacement entre chaque station étant plus grand, on observe une forte croissance du taux de couverture totale du réseau dans les 14 premières stations (environ). Cependant, au-delà, l'espacement réduit au nord augmente le chevauchement entre les stations VOR/DME et, par conséquent, diminue la quantité de couverture supplémentaire pour chaque nouvelle sélection de station. Dans le réseau résultant, la couverture totale au FL 100 est de 2212206.51 Km², au FL 200 de 3406407.00 Km² et enfin au FL 300 de 4061160.88 Km².

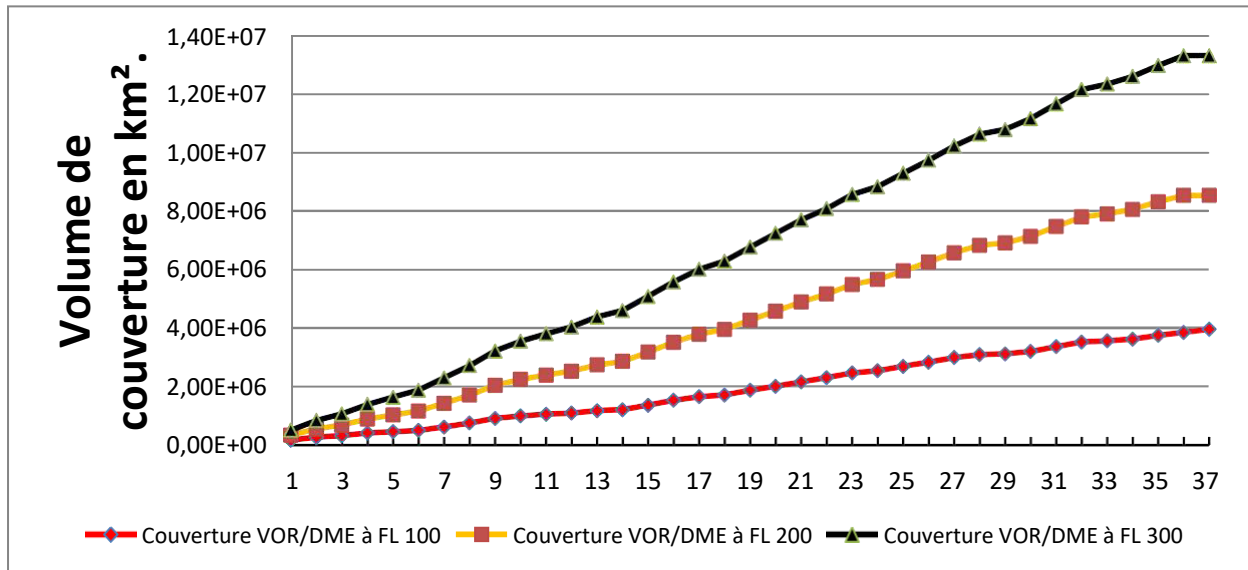


Figure 4.7: l'évolution de la couverture maximale théorique du réseau VOR/DME dans les trois niveaux de vol (ha=10000 pi-20000 pi ha =30000 pi) dans l'ordre où ils ont été sélectionnés par notre l'algorithme.

Pour mieux analyser la couverture totale de la couverture navigation, une comparaison de ce volume de navigation avec la couverture théorique maximale à trois niveaux de vol. La colonne(Ind_s) du Tableau 4.1 montre la couverture totale des stations VORs/DMEs à (10000 pi, 20000 pi et 30000 pi) msl, choisies dans l'ordre où elles ont été sélectionnées par notre algorithme. La couverture du réseau est comparée à la couverture maximale théorique pour le même nombre des stations VORs/DMEs. Comme le montre la Tableau 4.1, l'indice de visibilité mesuré par rapport à la couverture maximale est légèrement proche à la couverture réelle dans les sites (ADR, BIS, ELO, HME, ORA, OUR) qui représente en moyenne environ 65,73 % à FL100, à FL 200 est de 73,79 % et à FL 300 est de 77,13%.

4.7 Deuxième partie : Optimisation par l'algorithme LFD.

Pour améliorer la couverture des stations VOR/DME, nous avons appelé l'algorithme d'optimisation LFD pour optimiser la performance de la couverture des stations VOR/DME.

4.7.1 ALGORITHME-2

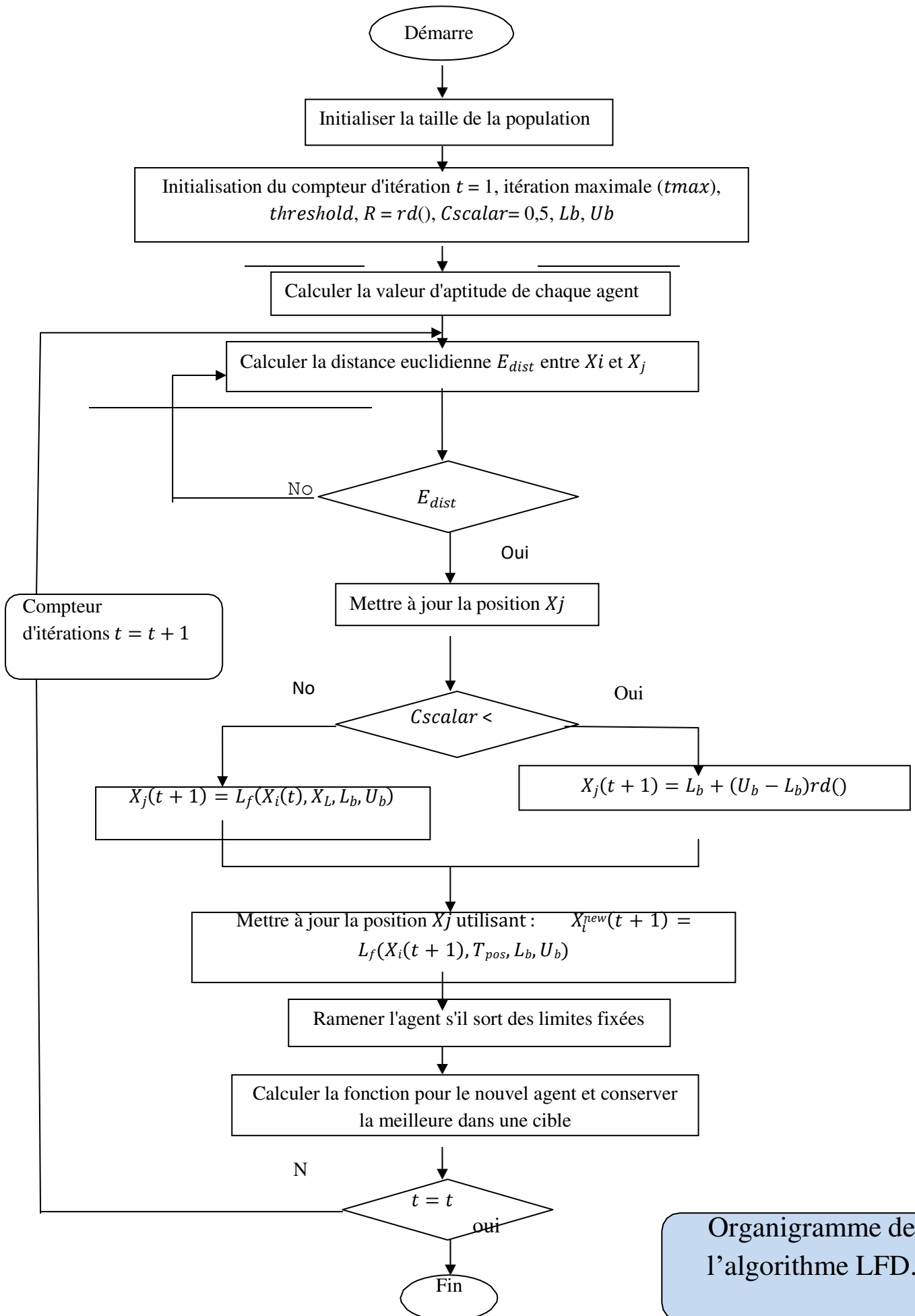
L'algorithme-2 prend les étapes suivantes :

Simulation et résultat

1. Appeler l'algorithme 1 pour générer la couverture VOR/DME en utilisant la fonction *viewshed*.
2. Appeler l'algorithme LFD pour (décrit en chapitre3) pour optimiser les sites VOR/DME.

L'organigramme suivant écrit en détail les étapes pour estimer les nouveaux sites VOR/DME.

Simulation et résultat



Organigramme de l'algorithme LFD.

4.7.2 Qualité des résultats

Afin de maximiser la couverture VOR/DME du réseau avec des contraintes géographiques imposées. La performance de l'optimiseur LFD a été testée sur huit sites dans différentes régions de l'espace aérien algérien.

4.7.3 Paramétrage de l'algorithme

Aucune tentative n'a été faite pour rechercher le paramétrage optimal pour chaque problème. Le paramétrage de l'algorithme LFD est resté inchangé pour tous les sites sélectionnés. Nous avons fixé les paramètres suivants : $T_{max} = 50, r = 1, s_i = 20$.

4.7.4 Analyse des résultats

Pour tenir compte de la robustesse de notre algorithme LFD Le tableau 4.2 présente les performances de plusieurs exécutions du l'algorithme LFD sur le problème des réseaux VOR/DME, indiquant à la fois la qualité des résultats.

Tableau 4.2 : Comparaison de volume de couverture de chaque Service VOR à 10.000, 20.000 et 30.000 Pieds msl en Km² calculé par l'algorithme LFD.

N°	Sites	FL100		FL200		FL300	
		S _t (Km ²)	S _t (Km ²) par LFD	S _t (Km ²)	S _t (Km ²) par LFD	S _t (Km ²)	S _t (Km ²) par LFD
1	ALR	9,69E+04	1,74 E+05	2,09E+05	3,47E+05	3,27E+05	3,37E+05
2	ANB	9,36E+04	9,35E+04	2,07E+05	2,06E+05	3,26E+05	3,16E+05
3	BOD	8,16E+04	8,47E+04	2,04E+05	2,09E+05	3,35E+05	3,43E+05
4	DJA	8,07E+04	8,04E+04	2,13E+05	3,50E+05	3,41E+05	3,50E+05
5	IGZ	1,51E+05	1,51E+05	2,74E+05	2,74E+05	3,84E+05	4,57E+05
6	TMS	9,69E+04	1,00E+05	2,49E+05	2,56E+05	4,03E+05	3,76E+05
7	TDF	1,58E+05	1,66E+05	3,27E+05	3,39E+05	4,93E+05	5,09E+05
8	TLM	3,68E+04	5,43E+04	1,05E+05	1,41E+05	1,87E+05	2,44E+05

Le Tableau 4.2 présente les résultats du volume de visibilité pour les huit stations VOR/DME proposées par l'algorithme LFD. Il est constaté que le VOR/DME (ANB) a le volume le plus faible avec - 0,1 % au FL100, -0,48 % au FL 200 et - 0,30 % au FL300. Ce résultat est dû au fait que ce site est entouré de reliefs, même avec une distance totale (horizon-VOR/DME) $d_{max} = 343,97$ km au FL 100, $d_{max} = 343,97$ km au FL 100. Il convient

Simulation et résultat

également de noter que le gain global en couverture moyenne pour les 08 sites considérés est de l'ordre de 11,00% au FL 100, 14,1% au FL 200 et 5,00% au FL 300. Le tableau 4.3 décrit les coordonnées géographiques des nouveaux sites et précise leur distance par rapport à l'emplacement précédent. Il est à noter que les nouveaux sites ne sont pas très éloignés des positions antérieures, à l'exception du site du TLM, ce qui rend l'utilisation des approches VOR/DME possible dans la pratique, puisque les distances sont de l'ordre de ~ 1 km. Il est également à noter que les nouvelles positions n'affectent pas la portée de la distribution de l'électricité. Ces constatations nous amènent à conclure que la nouvelle position peut être exploitable.

Tableau 4.3: les nouvelles coordonnées proposées par LFD et la distance par rapport au ancien site (km) pour les huit stations VOR/DME proposées par l'algorithme LFD

N°	Sites	Nouvelle coordonnées proposées par LFD		Distance par rapport au ancien site (km)
		Latitude	Longitude	
1	ALR	36,69°	3,22°	1,62
2	ANB	36,82°	7,81°	1,11
3	BOD	28,126°	6,83°	1,24
4	DJA	24,28°	9,44°	1,35
5	IGZ	19,57°	5,71°	1,77
6	TMS	22,79°	5,43°	1,85
7	TDF	27,70°	-8,14°	2,09
8	TLM	35,05°	-1,44°	4,79

La figure 4.8 illustre la carte de visibilité au niveau de col FL200 avec les nouvelles positions trouvées par l'algorithme LFD.

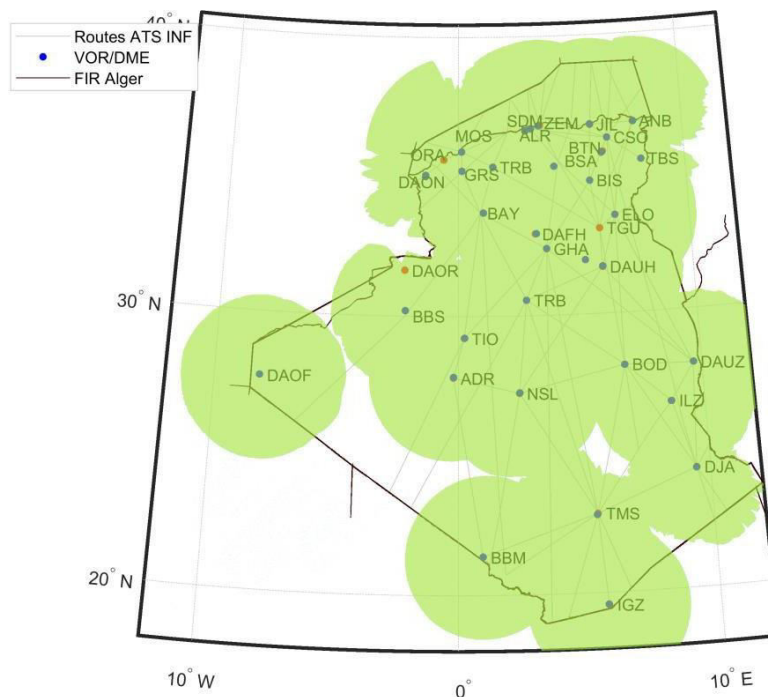


Figure 4.8: Résultats de simulation de la nouvelle couverture du VOR/DME à FL 200.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons estimé la performance des supports de navigation VOR/DME en calculant le volume de couverture et l'indice de visibilité pour chaque site. Des cartes de visibilité sont présentées pour illuminer le champ de vision correspondante de toutes les positions VOR/DME. Ensuite, un algorithme d'optimisation LFD a été utilisé pour déterminer les meilleures positions pour ces emplacements de radionavigation tout en optimisant la couverture et en respectant les contraintes (distance par rapport les sites précédent et réfraction atmosphérique) imposées dans le modèle.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Le positionnement à l'aide des données des aides à la navigation est considéré comme la principale méthode de secours utilisée dans l'aviation civile. Actuellement, le réseau terrestre d'aides à la navigation est réduit au minimum pour garantir un service de navigation aérienne efficace. Le DME (équipement de mesure de distance) et le VOR (radiophare omnidirectionnel à très haute fréquence) sont les aides à la navigation les plus utiles dans l'aviation civile. Une paire de VOR/DME Co-localisés est utilisée pour la navigation et le positionnement des avions. Dans ce travail, nous avons évalué en premier lieu l'état des lieux du système de positionnement VOR/DME à l'aide de modèle numérique de terrain. En deuxième lieu nous avons appelé un algorithme d'optimisation LFD pour maximiser la couverture des stations de radionavigation VOR/DME

L'examen de l'emplacement des stations radionavigation VOR/DME est l'un des objectifs de notre étude est d'analyser l'influence de l'information topographique sur la visibilité à partir des emplacements (VOR/DME). Le calcul de la visibilité à l'aide des MNT est basé sur l'algorithme du champ de visibilité (viewshed). L'algorithme calcule les cellules visibles qui sont codées par le chiffre (1) à partir d'une position située à la hauteur, et d'un avion à trois niveaux de vol différents (FL100, FL200 et FL300). Les cellules invisibles sont codées par le chiffre (0). En sortie, une matrice binaire contient les points visibles (1) et non visibles (0). Un facteur de correction atmosphérique a été utilisé pour le calcul du rayon effectif en fonction du rayon terrestre. Les résultats sont présentés par des cartes de visibilité de trente-six (36) sites VOR/DME à différentes échelles (FL100, 200,300), une estimation des volumes de couverture et des indices de visibilité de chaque site ont été donnés. Les résultats ont montré que la visibilité de à partir des sites dépend de la position géographique, l'altitude et les obstacles environnementaux de chaque emplacement. Ensuite, le déploiement des stations de radionavigation (VOR/DME) par l'algorithme LFD est formulé comme un problème d'optimisation NP-difficile pour atteindre un déploiement optimal des stations. Le problème de positionnement des moyennes radionavigations a consisté de trouver un ensemble d'emplacements pour les stations (VOR/DME) à partir d'un ensemble randomisé de sites candidats, et pour chaque site sélectionné, à déterminer le volume de couverture de chaque station pour tout aéronef volant aux différents niveaux de vol (FL). Tous ces choix ont permis de satisfaire un ensemble de contraintes (distance par rapport aux sites précédents et la

réfraction atmosphérique) tout en optimisant la couverture des stations de radionavigation. Pour valider l'approche, huit sites ont été sélectionnés dans diverses régions afin de tester le bon fonctionnement de notre algorithme (zone à forte densité de relief, zone à faible densité). Les résultats obtenus sont comparés au volume de couverture ainsi que les distances trouvées rapport à la localisation précédente. Les résultats sont encourageants lorsque les distances au niveau du site sont d'environ 1.0 km. Ce choix semble avoir peu d'impact sur le réseau aérien.

Cette étude conclut que la mise en œuvre de nouvelles locations des stations de radionavigation VOR/DME est clairement liée à une sélection optimisée des sites. Ce choix revient à opter pour des méthodes d'optimisation telles LFD pour la prise de décision.

Comme de travaux de future, un ensemble de contraintes applicables aux vols réelles telles que l'alignement des stations de radionavigation rapport aux pistes d'atterrissage, distance par rapport à la source électricité et la distance d'accès au site.).

Bibliographie

- [1] Essam H. Houssein , Mohamed H. Hassan , Salah Kamel ,Kashif Hussain, Fatma A. Hashim article intitulé « Algorithme de distribution de vol de Levy modifié pour l'optimisation globale ' et estimation des paramètres du modèle photovoltaïque à trois diodes modifié à trois diodes » publié le 12 septembre 2022 .
- [2] : Mridul Chawla & Manoj Duhan « Levy Flights in Metaheuristics Optimization Algorithms – A Review, Applied Artificial Intelligence, 32:9-10, 802-821, publié le 05 septembre 2018.
- [3] Abdelkader Boudani « Utilisation de conception CNS-ATM pour amélioration de la gestion du trafic aérien algérien » thèse doctorat 2019, université Blida 1.
- [4] Ouzanadji Khadidja « Optimisation du diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes par la méthode des algorithmes d'abeilles (BA) » thèse d'ingénieur 2011, université Blida 1.
- [5] X. Li, Y. Zhang, X. Wang, et al. (2018). Optimization of radar antenna placement using genetic algorithm. IEEE Access, 6, 58972-58981.
- [6] S. Yang, Y. Zhang, L. Wang, et al. (2019). Ant Colony Algorithm for VHF Antenna Location Problem. Proceedings of the International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems, 156-160.
- [7] J.M. Garibaldi, A.J. Giarola (2019). Optimization of the site location of radar sensors for air traffic control. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 106, 226-240.
- [8] A. Aguado, M. Sánchez-Matamoros, R. López-Ramos, et al. (2017). Optimal Deployment of VHF Omnidirectional Range Systems. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 53(3), 1426-1439.

- [9] J. Zhang, Y. Yuan (2016). Optimal deployment of air traffic control surveillance systems using hybrid genetic algorithms. *Journal of Air Transport Management*, 57, 216-225.
- [10] site internet : <https://www.sia-enna.dz/GEN2-5-1> list of Radionavigation Aids Établissement National de la Navigation Aérienne consulté le 18/05/2023.
- [11] site internet : https://www.enna.dz/vhf_radar.htm couverture VHF/RADAR- VOR
- [12] site internet : <https://www.sia-enna.dz/PDF/AIP/ENR/ENR4/ENR4.3.pdf> ENR 4.3 GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM (GNSS)
- [13] site internet : https://www.sia-enna.dz/PDF/AIC/2011/AIC_03-2011.pdf Mise en œuvre du CPDLC à titre supplétif dans l'Espace aérien de la FIR Alger.
- [14] LARSEN, Martin Vonheim. Viewshed algorithms for strategic positioning of vehicles. 2015. Thèse de maîtrise
- [15] Nocedal, J., & Wright, S. J. (2006). Numerical optimization. Springer Science & Business Media.
- [16] Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). Convex optimization. Cambridge University Press.