



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



République Algérienne démocratique et populaire

*Ministère de l'enseignement supérieure et de la recherche
scientifique*

Université Saad Dahlab Blida 1

Faculté des sciences

Département de mathématiques

Mémoire de fin d'étude

En : Mathématiques

Option : Recherche Opérationnelle

Thème

**Modélisation et résolution du problème de la
planification de la flotte aérienne.**

Présenté par :

-M^{elle} : CHERRADAH Bouchra

-M^{elle} : ACHOUR Ihcene

Encadré par :

-Mr : BOUDJEMAA Redouane

Devant le jury composé de :

-Examineur : BENDRAOUCHE Mohamed

USDB 1.

-President: CHELLALI Mustapha

USDB 1.

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Nous profitons par le biais de ce rapport pour exprimer nos vifs remerciements premièrement à Allah tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la volonté pour la réalisation de ce mémoire et à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de cet humble travail.

*Nous exprimons notre plus profonde reconnaissance à notre promoteur Monsieur **BOUDJEMAA Redouane**, merci à vous pour nous avoir prodigué tous ses précieux conseils techniques et scientifiques.*

Ces remerciements vont tout d'abord au corps enseignant et administratif du département de mathématiques, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous tenons aussi remercier les membres du jury qui ont accepté d'examiner notre mémoire.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos collègues et nos amis qui ont partagé avec nous les bons moments d'étude pendant cinq années.

Nous remercions aussi nos familles respectives pour leurs soutiens, présences et sacrifices qu'ils ont dû faire pour faire de nous ce que nous sommes devenues aujourd'hui.

Bouchra et Incene

Dédicace

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour :

À LA MÉMOIRE DE MON PÈRE

Ce travail est dédié à mon père, décédé en 2018, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études.

J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme.

Puisse Dieu, le plus puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !

À MA CHÈRE MÈRE

Celle qui m'a donné le sens de vie, qui m'a arrosé de tendresse et d'espairs, à la source d'amour, et à qui n'a pas cessé de prié pour moi et de m'encourager.

À mes chers frères Mohamed et Khaled source de joie, que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

À toute ma famille paternelle et maternelle.

*Sans oublier ma chère binôme Ihcene, ma confidente, merci pour sa présence, pour son soutien moral, sa compréhension et pour avoir su m'écouter
Durant ces années, ainsi qu'à son adorable famille.*

À mes chères amies Ikram, Ahlem pour leurs amitiés, leurs encouragements et leurs soutiens.

À tous ceux qui sont chères et dont je n'ai pas cités leurs noms.

Bouhra

Dédicace

À MA CHÈRE MÈRE

« Tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir.

*Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance
que je te porte.*

*En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes
sacrifices et pour l'affectation dont tu m'as toujours entourée. »*

À MON CHER PÈRE

*« L'épaule solide, l'œil attentif et compréhensif qui est la personne la plus digne
de mon estime et de mon respect.*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que Dieu te Préserve et te
procure santé et longue vie. »*

*À mon frère Tadj Eddine et à ma sœur Malak, source de joie et de bonheur ma
vie ne serait pas aussi magique sans votre présence et votre amour.*

À tout ma famille maternelle et paternelle, source d'espoir et de motivation.

*À mon chère amie Bouchra, avant d'être binôme, merci pour l'encouragement
et pour la patience durant la période de notre travail, ainsi qu'à son adorable
famille.*

*À tout mes cherres amies, tout particulièrement Meriem, merci énormément
pour votre soutien plus que précieux.*

Incene

Résumé

Le Hub étant un outil stratégique indispensable et un instrument de développement du transport aérien permet d'attirer davantage de trafic international.

Ce travail consiste à proposer une solution et un programme au problème de planification de la flotte, nous avons utilisés les travaux de Wang, Zhu et Hong.

Le modèle que nous avons développé consiste à de deux problèmes d'optimisation, non linéaire mixte en nombres entiers et linéaire mixte en nombre entiers.

Pour la résolution approchée de notre problème non linéaire mixte en nombres entiers, nous avons améliorée par une des méta-heuristiques qui est : algorithmes génétiques (AG).

Nous avons pu déterminer la taille et la structure d'une flotte aérienne opérant sur un réseau en étoile.

Mots clés :

- Planification de la flotte.
- Réseau en étoile.
- Les modèles de programmation non linéaire et linéaire.
- Algorithmes de décomposition.

Abstract

The Hub is an indispensable strategic tool and an instrument of development of air transport and attracts more international traffic.

This work consists of proposing a solution and program to the problem of planning the fleet; we used the work of Wang, Zhu and Hong.

The model we have developed consists of two optimization problems, mixed nonlinear in integers and mixed linear in integers.

For the approximate resolution of our mixed integer non linear optimization problem, we have adapted one of the meta-heuristics that is: genetic algorithm (GA).

The outcome is to determine the fleet size and structure for those Airlines operating on Hub-and-Spoke networks.

KEY words:

- Fleet planning.
- Hub-and-Spoke network.
- Linear and Nonlinear programming models.
- Decomposition algorithm.

الملخص

المحور هو أداة إستراتيجية لا غنى عنه وأداة لتنمية النقل الجوي وجذب المزيد من الحركة الدولية.

يطمح هذا العمل إلى حل وبرمجة مشكلة تخطيط الأسطول و ذلك باستخدام أعمال Zhu·Wang و Hong.

النموذج الذي تم تطويره ينقسم إلى نموذجين هما: نموذج الأول لمشكلة تحسين غير خطية مختلطة مرفقة بأعداد صحيحة ونموذج الثاني لمشكلة تحسين خطية مختلطة مرفقة بأعداد صحيحة.

من أجل حل تقريبي لمشكلتنا في النموذج الأول يتم استعمال طريقة واحدة من الطرق الاستدلالية و هي : الخوارزمية الجينية (AG).

و عليه يسمح عملنا بتحديد حجم وبنية الأسطول في شبكة المحور والتحدث.

الكلمات الرئيسية:

- تخطيط الأسطول.
- شبكة المحور والتحدث.
- نموذج البرمجة غير الخطية والخطية.
- خوارزمية التطل.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	2
<i>Dédicace</i>	3
<i>Dédicace</i>	4
<i>Résumé</i>	5
<i>Abstract</i>	6
<i>المخلص</i>	7
<i>Table des figures et des tableaux</i>	11
<i>Introduction générale</i>	12
Chapitre 1 : Le réseau en étoile « Hub-and-Spoke »	15
1.1 Introduction	15
1.2 Définition d'un réseau en étoile « Hub-and-Spoke »	15
1.3 Typologie des réseaux en étoile « Hubs »	16
1.4 Les bénéfices de réseau en étoile « Hub-and-Spoke »	17
1.5 Avantages et conséquences d'un réseau en étoile « Hub-and-Spoke ».....	19
1.6 Les caractéristiques d'un réseau en étoile « Hub-and-Spoke »	20
1.7 Le concept réseau en étoile « Hub-And-Spoke »	21
1.8 Les plus grands Hubs au monde	22
1.9 Alliance de compagnies aériennes.....	22
1.10 Traitement des passagers et des bagages	24
Conclusion	28
Chapitre 2 : Problématique et modélisation	30
2.1 Introduction	30
2.2 Définitions et terminologies	30
2.3 Planification de la flotte.....	31
2.4 Position de problème	31

2.4.1	Problématique.....	31
2.4.2	Objectif.....	31
2.5	Modélisation mathématique	32
2.6	Approche de modélisation du problème	32
2.7	Notations et définitions.....	33
2.7.1	Notations	33
2.7.2	Variables de décision	33
2.7.3	Définition des fonctions	34
2.7.4	Définition des contraintes.....	34
2.8	La fonction objectif	36
2.9	Le modèle mathématique.....	36
	Conclusion	38
Chapitre 3 : Les méthodes de résolution d'un problème d'optimisation		40
3.1	Introduction	40
3.2	Notions de base sur l'optimisation	40
3.3	Modèles d'optimisation	41
3.3.1	Problème d'optimisation d'un programme non linéaire mixte en nombres entiers 42	
3.3.2	Problème d'optimisation d'un programme linéaire mixte en nombres entiers ..	43
3.4	Méthodes de résolution d'un problème d'optimisation mixte.....	44
3.5	La méthode de la Branch-and-Bound	46
3.6	Définition d'une variable stochastique :.....	46
3.7	Les méthodes approchées	46
3.7.1	Les heuristiques.....	47
3.7.2	Les méta-heuristiques.....	49
3.8	Présentation d'une méthode des méta-heuristiques.....	50
3.8.1	Les algorithmes génétiques	50
3.9	Caractéristiques des méta-heuristiques.....	55
	Conclusion	56
Chapitre 4 : Résolution du problème		58
4.1	Introduction	58
4.2	Les étapes de résolution.....	58

4.3	Algorithmes	59
4.4	Adaptation de l'algorithme génétique pour la résolution du problème	61
4.4.1	Initialisation.....	61
4.4.2	L'évaluation	61
4.4.3	La sélection	62
4.4.4	Le croisement	62
4.4.5	La mutation	64
4.5	C'est quoi le MATLAB ?	65
4.6	Pour quoi programmer en MATLAB ?	65
4.7	Algorithme « intlinprog » de MATLAB	65
4.8	Procédure de reformulation	67
4.9	Les données	69
4.10	Programme.....	70
4.11	Résultat de programmation.....	79
	Conclusion	81
	Conclusion générale	82
	Bibliographie	83

Table des figures et des tableaux

Figure 1.1: réseaux « point-to-point » et « Hub-and-Spoke ».....	15
Figure 1.2 : schéma fonctionnel de planification d'un vol de départ et d'arrivée.....	18
Tableau 1.1 : les plus grands « Hubs » au monde	22
Figure 3.1 : Les types de problèmes de l'optimisation	42
Figure 3.3 : Croisement d'un individu	51
Figure 3.4 : Mutation d'un individu	51
Figure 3.5 : principe général des algorithmes génétiques	52
Figure 3.6 : Organigramme de l'algorithme génétique	54
Figure 4.1 : Description de l'algorithme de décomposition.....	59
Figure 4.2 : Résultats par l'algorithme génétique	79
Figure 4.3 : Résultats par intlinprog.....	80

Introduction générale

La libéralisation du transport aérien a en effet conduit les grandes compagnies à s'implanter sur une plateforme particulière pour en faire leur Hub.

Un Hub se caractérise par le fait de permettre aux passagers de changer rapidement et facilement de vol, en synchronisant les horaires des vols domestiques et internationaux, ainsi que les atterrissages. Il permet de démultiplier l'offre de correspondance sur des plages horaires réduites tout en optimisant le remplissage des vols.

C'est aussi un outil d'aménagement du territoire, les Hubs donnent aux compagnies aériennes le moyen de construire un réseau plus efficace.

Une les vols sont organisés en plusieurs périodes de rendez-vous, chacune constituée d'une vague d'arrivées et d'une vague de départs, cadencées pour permettre un maximum de correspondances dans un délai le plus court possible.

L'objectif recherché de ce mémoire est de trouver une solution au problème de la planification de la flotte, qui est une allocation faisable pour les différents types d'aéronef en se basant sur les segmentations d'une route et en utilisant un coût d'achat de la flotte minimum (Wang, Zhu et Hong). Par cette manière, le profit attendu de la flotte sera maximisé sous réserve de plusieurs contraintes de ressources critiques.

Pour ce faire, la présente étude s'articulera autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est présentation du concept Hub-and-Spokes.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié un modèle mathématique relie deux programmes non linéaire et linéaire mixte en nombres entiers. Ce dernier vise l'objectif et respecte les différentes contraintes du problème.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de quelques méthodes approchées pour la résolution d'un problème d'optimisation non linéaire mixte en nombres entiers (PNLME). On a utilisée une des méta-heuristiques qui est algorithme génétique (AG), pour calculer la solution de départ.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté une application numérique et on a conduit une analyse des résultats.

Enfin, nous clôturons notre étude par une conclusion qui regroupera l'essentiel des idées abordées dans ce travail.



CHAPITRE 1



Chapitre 1 : Le réseau en étoile « Hub-and-Spoke »

1.1 Introduction

Les réseaux « Point-to-Point » et les réseaux en étoile « Hub-and-Spoke » sont situés aux extrémités opposées du spectre de la connectivité. Un réseau « Point-to-Point » relie directement un ensemble d'emplacement sans interruption des services (par exemple, prise en charge ou dépose), même si la route elle-même peut ne pas être directe.

Un réseau en étoile « Hub-and-Spoke » relie chaque emplacement par le biais d'un emplacement intermédiaire unique appelé « Hub ». En tant que structure de réseau, le réseau « Hub-and-spoke » permet une plus grande flexibilité au sein du système grâce à une concentration des flux.

1.2 Définition d'un réseau en étoile « Hub-and-Spoke »

Le « Hub-and-Spoke » est aussi appelé réseau en étoile qui utilise des liaisons indirectes, comparé à l'ancien réseau « point-to-point », il est complètement différent car le « point-to-point » utilise des liaisons directes.

C'est aussi un modèle d'organisation aéroportuaire qui offre aux passagers la possibilité de voyager d'un point à l'autre de la planète en passant par une seule plate-forme de correspondances.

Un « Hub » se caractérise par le fait de permettre aux passagers de changer rapidement et facilement de vol [5].

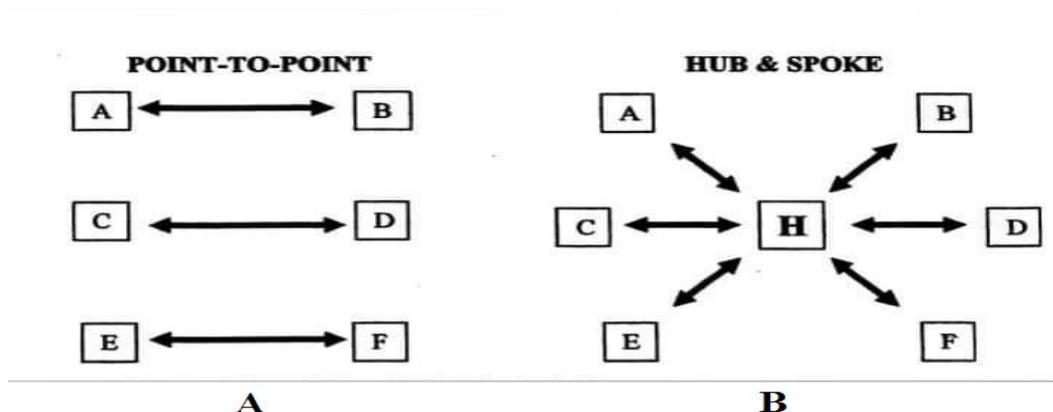


Figure 1.1: réseaux « point-to-point » et « Hub-and-Spoke »

- **La Figure 1.1 A :** « point-to-point » concept classique, consiste-en des liaisons directes entre les aéroports, les villes du réseau sont chacune directement reliée à un certain nombre de villes de manière à avoir un ensemble de lignes directes.
- **La Figure 1.1 B :** « Hub-and-Spoke» s'organise autour d'un aéroport pivot « Hub ». Les autres villes du réseau sont toutes reliées à celui-ci, imposant une correspondance aux passagers qui veulent voyager d'une ville à l'autre.

Les réseaux en étoile sont fondés sur l'utilisation d'un aéroport pivot «Hub» situé grossièrement au centre de l'ensemble. Chaque ville est reliée au « Hub » et uniquement à lui. Ce modèle d'organisation aéroportuaire offre aux passagers la possibilité de voyager d'un point à l'autre de la planète en passant par une seule plate-forme de correspondance.

1.3 Typologie des réseaux en étoile « Hubs »

On distingue deux types de « Hub » :

- Hub de passagers.
- Hub cargo.

On distingue plusieurs dimensions de « Hubs » :

- **Hubs principaux** (des grands aéroports): c'est la base d'opérations principale choisie pour chaque compagnie aérienne qui veut en faire son « Hub », ou se situe les installations de maintenances, ils alimentent les gros porteurs sur une destination de long-courrier, ou reçoivent les long-courriers pour les dispatchers en moyen ou court-courrier au niveau national ou international. C'est les plus développés et les plus étudiés.

But : Augmenter les flux de passagers et collecter en un seul vol avec différentes destinations récentes et augmenter les bénéfices de la compagnie aérienne [2].

- **Hubs secondaires** (petit aéroport): transfert de petit porteur sur des lignes qualifiées.

But : éviter aux passagers le transit par la capitale, afin que le voyage puisse gagner plus de rapidité et du confort.

1.4 Les bénéfices de réseau en étoile « Hub-and-Spoke »

La libéralisation du transport aérien a en effet conduit les grandes compagnies à s'implanter sur une plateforme particulière pour en faire leur « Hub ». Un « Hub » se caractérise par le fait de permettre aux passagers de changer rapidement et facilement de vol, en synchronisant les horaires des vols domestiques et internationaux, ainsi que les atterrissages et les décollages. Il permet de démultiplier l'offre de correspondance sur des plages horaires réduites tout en optimisant le remplissage des vols.

C'est aussi un outil d'aménagement du territoire, les « Hubs » donnent aux compagnies aériennes le moyen de construire un réseau plus efficace, tout en réalisant, grâce à la concentration des moyens, des économies d'échelle (meilleure rentabilité des équipements et meilleur amortissement des investissements) [8].

La Figure 1.2 explique les différentes sections d'un terminal, il y a 2 trajets international et national pour l'arrivée et le départ d'un vol [8].

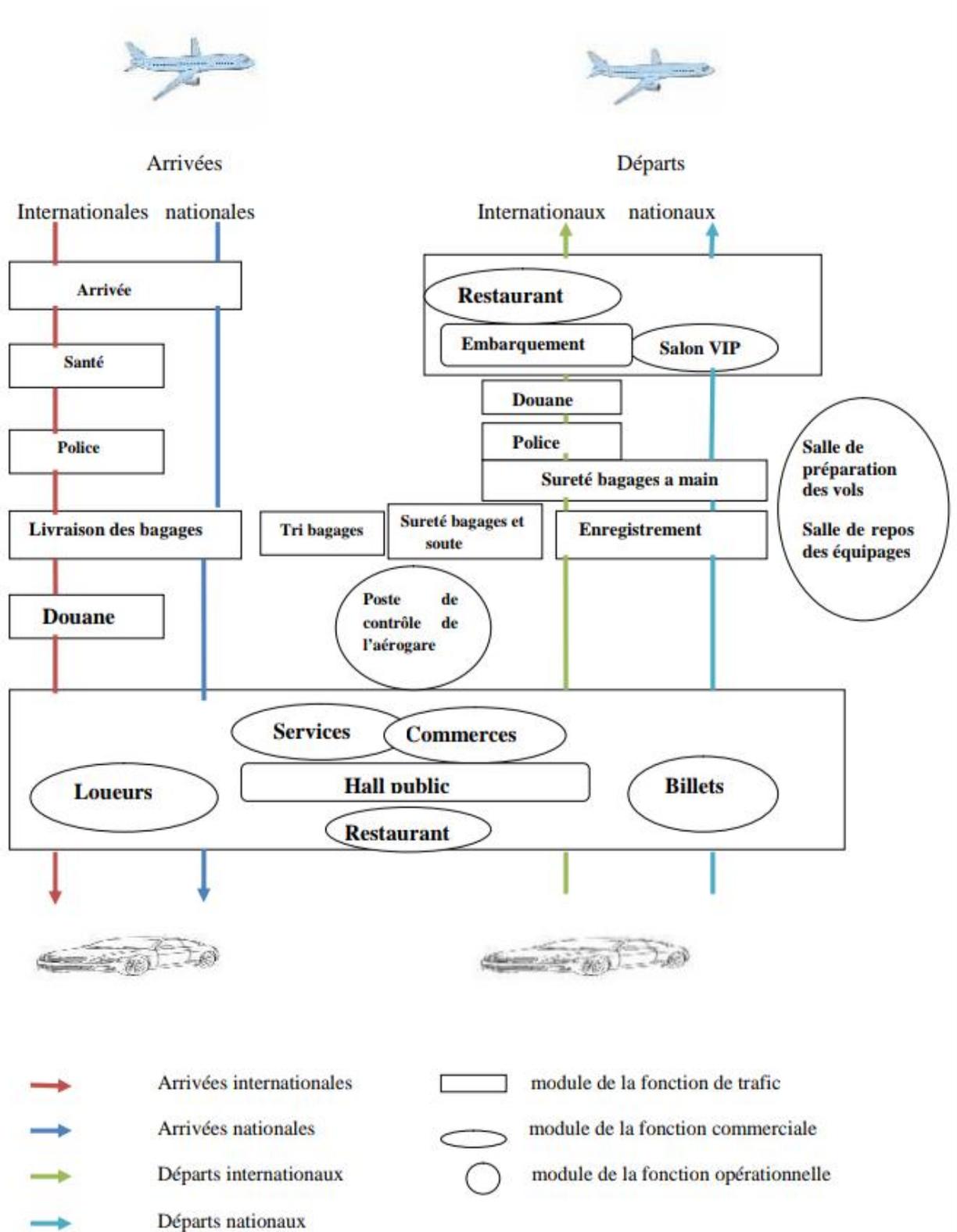


Figure 1.2 : schéma fonctionnel de planification d'un vol de départ et d'arrivée

1.5 Avantages et conséquences d'un réseau en étoile « Hub-and-Spoke »

Dans cette partie, on va s'intéresser aux avantages et conséquences d'un réseau en étoile concernant la compagnie et les passagers :

a) Avantages

Le réseau en étoile « Hub-and-Spoke » procure une position privilégiée à son opérateur :

- D'une part, l'investissement que représente sa constitution protège ses exploitants contre les nouveaux venus.
- D'autre part, la propriété donne aux compagnies dotées d'un tel réseau la possibilité d'attaquer les concurrents puisqu'en ouvrant une nouvelle liaison, elles proposent d'emblée une nouvelle destination tout en ayant la capacité de pratiquer des prix attractifs.

❖ Avantages pour la compagnie

Les avantages d'un tel système sont nombreux parmi lesquels on cite :

- Amélioration de la productivité : chaque avion circule 8h/jour sans connaître de temps mort dans le planning hors aléas météorologiques.
- Multiplication des dessertes.
- La qualité des correspondances.
- Augmentation des taux de remplissage.
- Sur chaque liaison, la progression du trafic devient très forte.

❖ Avantages pour les passagers

- Multiplication des destinations desservies par une même compagnie à partir de son aéroport de départ.
- Enregistrement au départ sur l'ensemble des segments de son vol.
- Correspondance rapide (souvent inférieure à une heure). Toutefois, le passage par un « Hub » rajoute au moins deux heures (correspondance + détour + atterrissage et décollage supplémentaire) sur le temps de voyage par rapport à un vol direct s'il existe.
- Correspondance garantie, dans une certaine mesure.

- Enregistrement unique, transfert et traçabilité des bagages.
- Les deux (ou plus) segments du vol sont assurés par des appareils de même type de confort.

b) Conséquences

Les conséquences d'un réseau en étoile sont variées :

❖ Conséquences pour la compagnie

- L'offre de correspondance rapide l'oblige à adapter ses horaires et à faire atterrir et décoller ses vols par vagues. La plaque tournante peut être saturée pendant ces créneaux horaires.
- L'augmentation du nombre de passagers en correspondance l'oblige à adapter ses installations pour assurer le transit des passagers et des bagages entre deux avions.
- La garantie de correspondance peut l'obliger à retarder certains vols pour attendre les passagers d'un autre vol. Ceci entraîne une cascade de retards qui peut affecter une grande partie des opérations.
- Un système informatique performant doit être utilisé pour tracer chaque passager et chaque bagage afin d'optimiser la gestion des transits et des vols à partir ou à destination du « Hub » [8].

❖ Conséquences pour passagers

- Augmentation du temps de vol.

1.6 Les caractéristiques d'un réseau en étoile « Hub-and-Spoke »

Les caractéristiques d'un réseau en étoile sont :

- Optimiser en connectant le service à une large zone géographique et à de nombreuses destinations.
- La plupart des passagers prennent une correspondance au(x) « Hub(s) » pour un (des) vol(s) continu(s) vers leur destination.
- Un large éventail de places assises est nécessaire pour adapter au trafic, ce qui nécessite généralement plus d'un type de flotte.
- Desservir efficacement des villes de taille très variable.

- Desserte efficace de villes dont la taille, le moment de la connexion et l'encombrement du « Hub » varient considérablement.
- Les variations de la demande dans une paire de villes donnée peuvent être compensées par la demande des autres marchés [5].

1.7 Le concept réseau en étoile « Hub-And-Spoke »

➤ Administratif et technique

C'est l'aéroport choisi qui devient la base principale d'opérations qui regroupe les services administratifs et commerciaux et surtout la maintenance des avions.

Optimiser la gestion de la base est beaucoup plus facile qu'aux nombreuses escales, qui représentent une charge dont les coûts fixes y sont moins aisément compressibles. C'est en particulier le cas pour les services de maintenance des avions, qui requièrent à la fois des ateliers, des stocks de pièces et des équipes de techniciens spécialisés.

Depuis longtemps, partant du constat qu'une escale distante est souvent la base centrale d'une compagnie locale, les compagnies aériennes passaient des accords, qui portaient sur des domaines aussi divers que le partage des comptoirs d'aéroport, du personnel commercial, des services de maintenance, etc...

➤ Commercial

C'est l'aéroport de destination principal de ses vols et donc une plate-forme de correspondance.

Pour les compagnies importantes les « Hubs », aussi bien administratifs, techniques ou commerciaux, peuvent être multiples. Ce sont souvent les aéroports où les compagnies qui se sont fusionnées pour former la compagnie actuelle ont été créées.

Pour les compagnies moins importantes le « Hub » unique est souvent la capitale ou la ville la plus importante du pays d'origine. Cet aéroport est la plate-forme de correspondance entre les vols nationaux et les vols internationaux.

Enfin les compagnies dites à bas coûts (low coast) n'ont pas par définition un « Hub » qui pour la plupart, n'assurent pas le transfert des passagers et des bagages entre les vols [6].

1.8 Les plus grands Hubs au monde

Le tableau 1.1 représente les grands Hubs au monde [17]

Aéroport	Classement	Passager / ans	Compagnie aérienne
Atlanta	N°1	110 531 300	Delta Airlines
Beijing capital(Pékin)	N°2	100 011 438	Air China
Los Angeles	N°3	88 068 013	Delta, United et American Airlines
Dubaï	N°4	86 396 757	Emirates Airlines
Tokyo-Haneda(Japon)	N°5	85 505 054	All nippon Airways Japan anilines
Chicago-O'Hare	N°6	84 649 115	American Airlines
Heathrow	N°7	80 844 310	British Airways
Shanghai-Pudong(Chine)	N°8	76 153 455	Chinoise China Eastern
CDG	N°9	76 150 455	Air France
Dallas	N°10	75 066 956	American Airlines

Tableau 1.1 : les plus grands « Hubs » au monde

1.9 Alliance de compagnies aériennes

a) Définition

Les alliances entre compagnies aériennes sont des accords de coopération entre compagnies aériennes. Les compagnies aériennes opèrent généralement à partir d'une base centrale, depuis laquelle leurs lignes rayonnent vers les escales de destinations plus ou moins lointaines. La base centrale regroupe les services administratifs et commerciaux et, surtout, la maintenance

des avions.

b) Les alliances existantes dans le monde

- **SkyTeam (20 membres)**

Aeroflot, Aerolíneas Argentinas, AeroMexico, Air Europa, Air France, Alitalia, China Airlines, China Eastern Airlines, China Southern Airlines, CSA Czech Airlines, Delta, Kenya Airways, KLM, Korean Air, MEA, Saudia, TAROM, Vietnam Airlines, Xiamen Airlines, Garuda Indonesia.

- **Oneworld (15 membres)**

Air Berlin, American Airlines, British Airways, Cathay Pacific, Finair, Iberia, Japan Airlines, LAN, Malaysia Airlines, Qantas , Qatar Airways, Royal Jordanian, S7 Airlines, JAL ,LATAM Airlines.

- **Star Alliance (28 membres)**

Adria Airways, Aegean, Air Canada, Air China, Air New Zealand, ANA, Asiana, Austrian Airlines, Avianca-Taca, Brussels Airlines, Copa Airlines, Croatia Airlines, EgyptAir, Ethiopian Airlines, Eva Air, LOT, Lufthansa, SAS, Shenzhen Airlines, Singapore Airlines, SAA, Swiss , TAM, TAP, Thai Airlines, Turkish Airlines, United Airlines, US Airways.

- **U-Fly (5 membres)**

Hong Kong Express, Eastet Jet, lucly Air, West Air, Urumqi Air.

- **Value Alliance (9 membres)**

Cebu Pacific, Jeju Air, Nok Air, NokScoot, Scoot, Tigerair, Tigerair Australia, Vanilla Air [16].

1.10 Traitement des passagers et des bagages

Traitement des passagers

Ventes et réservation

C'est à partir du point de vente, premier contact avec l'Entreprise, que le passager sera informé de la mise en place du « Hub » qui consiste à le transporter via une escale intermédiaire jusqu'à sa destination finale.

Le point de vente est chargé d'informer le passager en matière d'horaire, d'itinéraire et de formalités et il est chargé de vérifier la conformité des documents de voyage du passager et insister particulièrement sur l'autorisation paternelle pour les enfants mineurs.

Le point de vente informera également le passager :

Informers les passagers de l'existence d'un service « Hub » au niveau de l'escale ou une structure d'accueil spécialisée pour la prise en charge des passagers et des bagages en continuation est installée dans le hall des arrivées de l'aérogare des lignes domestiques.

- Les formalités de sortie du territoire national se feront à l'escale intermédiaire ou le passager devra récupérer ses bagages à l'arrivée.
- Le passager devra s'acquitter des formalités d'enregistrement (passager et bagages) à l'escale de départ et à l'escale intermédiaire.
- A l'escale intermédiaire, le passager sera pris en charge et assisté tout au long des différentes opérations jusqu'à son embarquement sur le vol de continuation.

A l'escale de départ

Les préposés à l'acceptation des passagers et les responsables de permanence sont chargés de:

- Recueillir les informations données sur la liste des passagers prévus sur le vol concernant les passagers en correspondance.
- Vérifier, en cas de retard prévisible du vol, les temps de correspondance en les rapprochant des temps minimaux de l'escale intermédiaire (Minimum Connecting Time).

- Un temps court entraînant une correspondance difficile :
 - Informer le passager dès sa présentation.
- Un temps trop court entraînant une correspondance manquée :
 - Étudier les possibilités de réacheminement du passager par d'autres vols.
 - Effectuer alors les réservations de places nécessaires.
 - Informer éventuellement l'escale de destination.
 - Confirmer auprès du passager sa destination finale.
 - Vérifier la conformité des documents de voyage (validité des visas, autorisation paternelle pour les enfants mineurs...).
 - Rappeler au passager que les formalités de sortie du territoire national se feront à l'escale intermédiaire.
 - Confirmer obligatoirement au passager que ses bagages enregistrés devront être récupérés à son arrivée pour les réacheminés vers l'escale internationale.
 - Informer le passager de l'existence à l'escale intermédiaire d'une structure d'accueil et d'assistance, des passagers et des bagages en continuation.
 - Informer le Commandant de bord et le Chef de cabine du transport de passagers en continuation et des particularités ou irrégularités éventuelles.

A l'escale intermédiaire

A l'escale intermédiaire, une équipe spécialisée est mise en place pour le traitement et l'assistance de ces passagers. L'équipe spécialisée est composée d'un responsable, d'agents commerciaux et de manutentionnaires et, est domiciliée dans le hall des arrivées de l'aérogare

Des lignes domestiques. Elle est chargée de :

- Recueillir les informations données sur la liste des passagers prévus sur le vol concernant les passagers en continuation.
- Confirmer éventuellement auprès des escales de départ les informations recueillies sur la liste des passagers prévus sur le vol.

- Vérifier les heures d'arrivées des vols d'apports et les heures de départ des vols d'emport et les délais de correspondance.
- Accompagner et assister les passagers en continuation tout au long du cheminement des différentes formalités.
- Récupération des bagages à l'arrivée à l'aérogare intérieure.
- Départ vers l'aérogare internationale.
- Présentation des passagers pour enregistrement au guichet groupe.
- Formalités de police et douanes.
- Formalités d'embarquement.
- Effectuer alors les réservations de places nécessaires.

Traitement des bagages

A l'escale de départ

Les préposés à l'acceptation de ces passagers sont chargés de :

- Eventuellement, jusqu'à destination finale.

Demander au passager de récupérer ses bagages à l'arrivée à l'escale afin d'assurer leur transfert.

- Charger les bagages en continuation dans un seul conteneur ou chariots.
- Présenter les bagages en continuation en un lot séparé au niveau de la reconnaissance des bagages.
- Veiller à ce que tous les bagages soient reconnus.
- Toute anomalie concernant les bagages en continuation doit être signalée sans délai à l'escale intermédiaire.
- Procéder au chargement de la totalité des bagages en continuation en dernier pour permettre leur déchargement immédiat et prioritaire par rapport à tous les autres y compris ceux de la Première classe.

A l'escale intermédiaire

- L'équipe chargée du traitement et de l'assistance des passagers et des bagages en continuation procédera à la vérification des informations recueillies sur la liste des passagers prévus sur le vol et à l'exploitation des télex à chaque préparation de vol. Cette équipe est chargée de procéder dès l'arrivée de l'avion.
- Au déchargement rapide et prioritaire des bagages en continuation.
- À l'acheminement immédiat et séparé de ces bagages vers la zone de livraison.
- À l'assistance des passagers pendant la récupération des bagages.
- À l'acheminement des bagages en continuation vers l'aérogare internationale.
- À la présentation des bagages à l'enregistrement du guichet groupe relever toute anomalie conformément aux procédures.

Passagers à particularités

Il s'agit ici de passagers à mobilité réduite, sur civière et, d'enfants non accompagnés... La sensibilité et la difficulté de traitement de cette catégorie de passagers recommandent un transfert direct, sauf urgence médicalement signalée et avec toutes les dispositions utiles et nécessaires. Il est également recommandé de procéder au transfert direct pour les enfants non accompagnés.

Traitement en vol

Le Commandant de bord et le personnel de cabine seront informés par les escales du transport de passagers en continuation et de toutes les anomalies les concernant, particulièrement, les délais de transit. Le personnel de bord de plus, confirmera par radio à l'escale intermédiaire le nombre à bord de passagers en continuation et, les particularités éventuelles et veillera au débarquement prioritaire des passagers en continuation.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques et le concept de model aérien réseau en étoile « Hub-and-Spoke » avec ses avantages et ses conséquences par rapport la compagnie et le passager d'une manière générale.



CHAPITRE 2



Chapitre 2 : Problématique et modélisation

2.1 Introduction

La majorité des grandes compagnies aériennes ont mis en place un mode de fonctionnement d'un réseau en étoile «Hub-and-Spoke» en réponse à la pression croissante de l'environnement concurrentiel des coûts élevés et des tarifs bas dans le secteur aérien.

Afin de maintenir une large couverture du marché la compagnie aérienne peut être amenée à fournir une composition de flotte à la fois large et flexible pour réaliser la collecte, le transfert et la distribution des passagers et du fret. Pour qu'une compagnie aérienne puisse réaliser des économies sur les réseaux en étoile «Hub-and-Spoke». D'une part, une flotte de grande taille doit être proposée et de nombreux vols afin de maintenir d'énormes possibilités de correspondance dans les grands aéroports et d'accomplir la tâche de transport sur le réseau. D'un autre côté, les vols fortement et densément fréquentés sur l'ensemble du réseau, la compagnie aérienne doit mettre en place une structure de flotte flexible afin d'adapter les types d'aéronefs de grande taille avec de grandes capacités de sièges. Et les petits avions à faible capacité pour les vols à forte densité de trafic. De manière plus complexe, ces fonctions de collecte, de transfert et de distribution sur le réseau en étoile «Hub-and-Spoke» permettent à différents flux de passagers d'être transportés sur plus d'un vol.

2.2 Définitions et terminologies

- 1) **La route d'avion:** est une séquence finie de segments de vols consécutifs réalisés par un type spécifique d'avion partant d'un aéroport origine et allant à un aéroport destination [9].
- 2) **Un marché :** (en anglais market) est défini par une demande entre un aéroport d'origine et un aéroport de destination pendant une période donnée. Il représente la demande des passagers qui voyagent d'une origine à une destination pendant une période donnée [9].
- 3) **Une escale:** est un arrêt dans un aéroport intermédiaire où le passager ne change pas l'avion. Ce type de vol est appelé vol avec escale (en anglais direct flight) où le même vol assure plusieurs dessertes, mais uniquement avec le même avion. Quand il s'agit d'une seule escale, le vol comporte deux segments de vol [9].

- 4) **Les horaires de vols** : un ensemble de vols définis par une paire d'origine et de destination constitué d'un horaire de vols (en anglais schedule) : chaque vol est caractérisé par un ensemble d'information incluant l'heure de départ et l'heure d'arrivée. La gestion des horaires de vols fait partie des décisions opérationnelles où les compagnies aériennes proposent de construire un horaire de vols cyclique [9].

2.3 Planification de la flotte

La planification de la flotte (en anglais fleet planning) fait partie de la gestion des ressources d'une compagnie aérienne. Une flotte est un ensemble d'avions caractérisée par le nombre total des avions que la compagnie possède, ainsi que le type d'avion. Cette décision concerne également l'achat, la location ou bien simplement l'utilisation d'appareils déjà existants [9].

2.4 Position de problème

2.4.1 Problématique

Pour la planification de la flotte de la compagnie dans les réseaux étoile « Hub-and-Spoke », nous avons utilisés les travaux de Wang, Zhu et Hong [12] qui ont présentés une nouveau modèle pour la détermination de la taille et de la structure d'une flotte aérienne opérant sur un réseau en étoile « Hub-and-Spoke ». Cette approche met en évidence l'impact des effets stochastiques liés au flux du réseau de trafic sur le processus de planification de la flotte et en construisant un modèle de revenus amélioré qui optimise les revenus attendus dans ce processus de planification. Une approximation linéaire de la fonction de revenus totaux du réseau est proposée en prenant en considération une décomposition du revenu en deux aspects :

- L'aspect non linéaire de l'optimisation des revenus attendus,
- L'aspect linéaire de la détermination de la taille et de la structure de la flotte par l'allocation optimale des types de flotte d'aéronefs aux segments de route.

2.4.2 Objectif

L'objectif du modèle est de trouver une allocation faisable pour les différents types d'aéronefs en se basant sur les segmentations d'une route et en utilisant un coût d'achat de la flotte minimum (Wang, Zhu et Hong [12]). Par cette manière, le profit attendu de la flotte sera maximisé sous réserve de plusieurs contraintes de ressources critiques.

2.5 Modélisation mathématique

En recherche opérationnelle, une modélisation d'un problème représente une phase importante dans le processus de sa réalisation. Elle consiste en la conversion la plus fidèle possible d'un phénomène réel (industriel, économique, pétrochimique, physique, aéronautique...), généralement très complexe en un modèle mathématique. Il comprend trois étapes :

- **Identification des variables de décision**

Les variables de décision représentent comme leurs noms l'indiquent, les décisions à prendre afin de satisfaire le ou les objectifs. Une solution est un ensemble de décision particulier. Le principe est de fixer ces variables afin d'optimiser le ou les objectifs.

- **Définition d'une fonction objective**

La fonction objective appelée aussi fonction coût ou fonction économique, permettant d'évaluer l'état du système. Autrement dit, c'est le but à atteindre.

On parle alors d'optimisation multicritères.

- **Description des contraintes imposées aux variables de décision**

Les solutions doivent satisfaire des contraintes [1].

2.6 Approche de modélisation du problème

Un modèle avec une modélisation améliorée des revenus est présenté, basé sur un marché spécifique au chemin. Pour faciliter la description du problème, nous définissons le terme suivant : Un marché spécifique au chemin est un chemin spécifique que les passagers souhaitent voyager.

Il convient de noter qu'un marché de transport d'une compagnie aérienne peut inclure différents marchés spécifiques au chemin, de sorte que le passager qui se déplace n'est pas exactement le même. Par exemple, le voyage d'un passager du point d'origine A au point de destination B pourrait être considéré comme un marché de transport, car en effectuant ce voyage A-B, le passager a le choix à différents chemins (tels que A-C-B et A-D-B). Chacun de ces chemins est appelé marché spécifique au chemin.

2.7 Notations et définitions

2.7.1 Notations

- **Notations des ensembles**

I : ensemble des segments des routes indexées par i .

J : ensemble des marchés spécifiques à un chemin indexés par j .

K : ensemble des types d'aéronefs candidats indexés par k .

- **Notations des paramètres**

p_j : Le tarif moyen pour le marché j spécifique au chemin.

a_k : Le coût fixe du type d'avion k .

c_{ik} : Les coûts d'exploitation pour le segment de route i effectué par le type d'avion k .

r_j : La demande des passagers pour le marché j spécifique au chemin qui suit une distribution normale.

b_{ik} : Le nombre d'heures de vol pour le segment de route i effectuée par le type d'avion k .

F_i^{min} : Le nombre minimal de vols sur le segment de route i par rapport au marché j .

F_i^{max} : Le nombre maximal de vols sur le segment de route i par rapport au marché j .

Cap_{ik} : Le nombre des sièges offerts au segment de route i effectués par le type d'avion k .

u_k : La durée de vol prévu en heure pour le type d'avion k .

$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le segment de route } i (i \in I) \text{ est effectué par le marché spécifique à un chemin } j (j \in J) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

2.7.2 Variables de décision

x_{ik} : La fréquence de vol attribuée au segment de route i effectué par le type d'avion k .

s_j : Le nombre des sièges offerts au marché j spécifique au chemin.

l_j : Le facteur de charge moyen pour le marché j spécifique au chemin.

z_k : Le nombre d'avions de type k .

R_{Total} : Le revenu total d'un réseau.

$seat_i$: Le nombre des sièges offerts au segment de route i .

2.7.3 Définition des fonctions

$f(r_j)$: La fonction de densité de probabilité par rapport à r_j .

$P_{Total}(s_j, x_{ik}, z_k)$: La fonction de profit total de l'exploitation de la flotte en fonction de s_j, x_{ik} et z_k .

$R_j(s_j)$: La fonction de revenu attendu pour le marché j spécifique au chemin, par rapport à s_j s'écrit comme suit :

$$R_j(s_j) = p_j \left[\int_0^{l_j s_j} r_j f(r_j) dr_j + \int_{l_j s_j}^{+\infty} l_j s_j f(r_j) dr_j \right]$$

$H_i(seat_i)$: La fonction de revenu attendu pour le segment de route i par rapport à $seat_i$.

2.7.4 Définition des contraintes

- **Contrainte de modèle linéaire**
- **Contraintes de fréquence de vol minimal et maximal** : la fréquence de vol attribuée à chaque étape de segment de route i ne soit pas inférieure à la fréquence de vol minimal, et que la fréquence de vol attribuée à chaque étape de segment de route ne dépasse pas la fréquence de vol maximale sur l'étape de segment de route.

$$\sum_{k \in K} x_{ik} \geq F_i^{min} \quad \forall i \in I \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ik} \leq F_i^{max} \quad \forall i \in I \quad (2)$$

- **Contrainte d'heure de vol de la flotte :** les heures de vol de la flotte de chaque type d'avion ne peuvent pas dépasser les heures de vol maximales disponibles.

$$\sum_{i \in I} b_{ik} x_{ik} \leq u_k z_k \quad \forall k \in K \quad (3)$$

- **Contrainte d'approximation du revenu total attendu du réseau :**

$$\sum_{i \in I} H_{0i} + \sum_{i \in I} \left(\mu_i \sum_{k \in K} Cap_{ik} x_{ik} \right) \geq R_{total} \quad (4)$$

μ_i : Chiffre d'affaires (prix d'offre) est une valeur marginale d'un siège supplémentaire donné au segment de route i . Mathématiquement, peut être définie comme :

$$\mu_i = \frac{\partial H_i(seat_i)}{\partial seat_i} \quad \forall i \in I$$

- **Contrainte de type de variable :**

$$x_{ik} \in N \quad \forall i \in I, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$z_k \in N \quad \forall k \in K \quad (6)$$

- **Contrainte de modèle non linéaire**

- 1) **Contrainte de la capacité maximale de siège :** les sièges offerts à chaque segment de route ne doivent pas dépasser la capacité des sièges fournis par le choix du mélange de types d'avions et de fréquences.

$$\sum_{j \in J} \delta_{ij} s_j \leq \sum_{k \in K} Cap_{ik} x_{ik} \quad \forall i \in I \quad (7)$$

- 2) **Contrainte de type de variable :**

$$s_j \in N \quad \forall j \in J \quad (8)$$

2.8 La fonction objectif

- **Le modèle linéaire**

L'objectif est de maximiser le profit total de planification de la flotte.

L'expression de la fonction objective est la suivante :

$$\max P_{Total} = R_{Total} - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} c_{ik} x_{ik} - \sum_{k \in K} a_k z_k$$

- **Le modèle non linéaire**

L'objectif est de maximiser les revenus de réseau, donné par :

$$\max W_{Total} = \sum_{j \in J} p_j \left[\int_0^{l_j s_j} r_j f(r_j) dr_j + \int_{l_j s_j}^{+\infty} l_j s_j f(r_j) dr_j \right]$$

W_{Total} : représente le total des revenus attendus résultant du modèle non linéaire et utilisé pour distinguer le total de revenu attendu R_{Total} résultant du modèle linéaire.

2.9 Le modèle mathématique

Notre modèle peut s'écrire comme deux programmes liés linéaire et non linéaire à contraintes mixtes sous la forme suivante :

- **Le modèle linéaire**

$$\left\{ \begin{array}{l} \max P_{Total} = R_{Total} - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} c_{ik} x_{ik} - \sum_{k \in K} a_k z_k \\ \sum_{k \in K} x_{ik} \geq F_i^{min} \quad \forall i \in I \quad (1) \\ \sum_{k \in K} x_{ik} \leq F_i^{max} \quad \forall i \in I \quad (2) \\ \sum_{i \in I} b_{ik} x_{ik} \leq u_k z_k \quad \forall k \in K \quad (3) \\ \sum_{i \in I} H_{0i} + \sum_{i \in I} \left(\mu_i \sum_{k \in K} Cap_{ik} x_{ik} \right) \geq R_{total} \quad (4) \\ x_{ik} \in N \quad \forall i \in I \quad (5) \\ z_k \in N \quad \forall k \in K \quad (6) \end{array} \right.$$

- **Le modèle non linéaire**

$$\left\{ \begin{array}{l} \max W_{Total} = \sum_{j \in J} p_j \left[\int_0^{l_j s_j} r_j f(r_j) dr_j + \int_{l_j s_j}^{+\infty} l_j s_j f(r_j) dr_j \right] \\ \sum_{j \in J} \delta_{ij} s_j \leq \sum_{k \in K} Cap_{ik} x_{ik} \quad \forall i \in I \quad (7) \\ s_j \in N \quad \forall j \in J \quad (8) \end{array} \right.$$

Conclusion

Dans ce chapitre le modèle proposé fournit une meilleure solution au problème selon lequel la demande des passagers est généralement considérée comme un paramètre déterministe dans les modèles de planification de la flotte existante. Les tailles et les structures de flotte qui en résultent ne pourraient pas être bien adaptées à la fluctuation de la demande dans la nature. Deuxièmement, le modèle proposé pourrait également mieux résoudre le problème selon lequel le modèle de planification de la micro flotte basée sur les segments de route avec l'approche au prorata des revenus contribue généralement à la perte de revenus des passagers lorsqu'il est appliqué au problème de planification de la flotte sur les réseaux en étoile « Hub-and-Spoke ».



CHAPITRE 3



Chapitre 3 : Les méthodes de résolution d'un problème d'optimisation

3.1 Introduction

L'optimisation est un outil important dans la prise de décisions et dans l'analyse des systèmes physiques. En termes mathématiques, un problème d'optimisation est le problème de trouver la meilleure solution parmi l'ensemble de toutes les solutions possibles.

Les problèmes d'optimisation combinatoire se répartissent en deux catégories : ceux qui sont résolus optimale par des algorithmes efficaces et rapides dans un temps polynomial et ceux dont la résolution optimale peut prendre un temps non polynomial.

Les notions de complexité des problèmes sont très importantes, car si un problème est identifié comme complexe, il sera difficile d'en spécifier un modèle, on pourra même perdre espoir de trouver un algorithme pour le résoudre. Dans ce cas, on se contentera d'exigences plus limitées : résolution approchée du problème posé.

La résolution d'un problème est considérée comme un processus complexe de l'optimisation. Ce processus peut induire plusieurs phases traduisant la mise en œuvre d'une démarche de résolution. Déterminer la nature de modèle est l'étape intermédiaire entre la modélisation mathématique et la résolution. Les problèmes d'optimisation sont classés en fonction de leurs caractéristiques mathématiques en grandes catégories : Programme linéaire (PL), Programme non linéaire (PNL), programme linéaire mixte en nombres entiers (PLME), et problème non linéaire mixte en nombres entiers (PNLME).

Dans ce chapitre, nous allons définir les problèmes linéaire et non linéaire mixtes en nombres entiers (PLME & PNLME) et présenter quelques méthodes pour se résolution.

3.2 Notions de base sur l'optimisation

L'optimisation est une discipline mathématique à part entière, elle est présentée partout où il y a nécessité de rationaliser la conception d'un système ou l'exploitation d'un procédé qu'il soit industriel ou autre.

L'optimisation peut être définie comme :

- Une opération permettant de trouver la meilleure solution possible dans un espace de solution faisable.
- Le choix parmi une série de possibilités, de la solution optimale suivant un critère défini à l'avance.
- Optimiser c'est toujours trouver les valeurs extrémales d'une fonction permettant de minimiser ou maximiser cette dernière.

3.3 Modèles d'optimisation

La première étape du processus d'optimisation consiste à construire un modèle approprié ; la modélisation est le processus d'identification et d'expression en termes mathématiques de l'objectif, des variables et des contraintes du problème.

La deuxième étape du processus d'optimisation consiste à déterminer à quelle catégorie d'optimisation appartient le modèle [14].

Nous présentons dans la Figure 3.1 une perspective, axée principalement sur les sous-domaines de l'optimisation [10]:

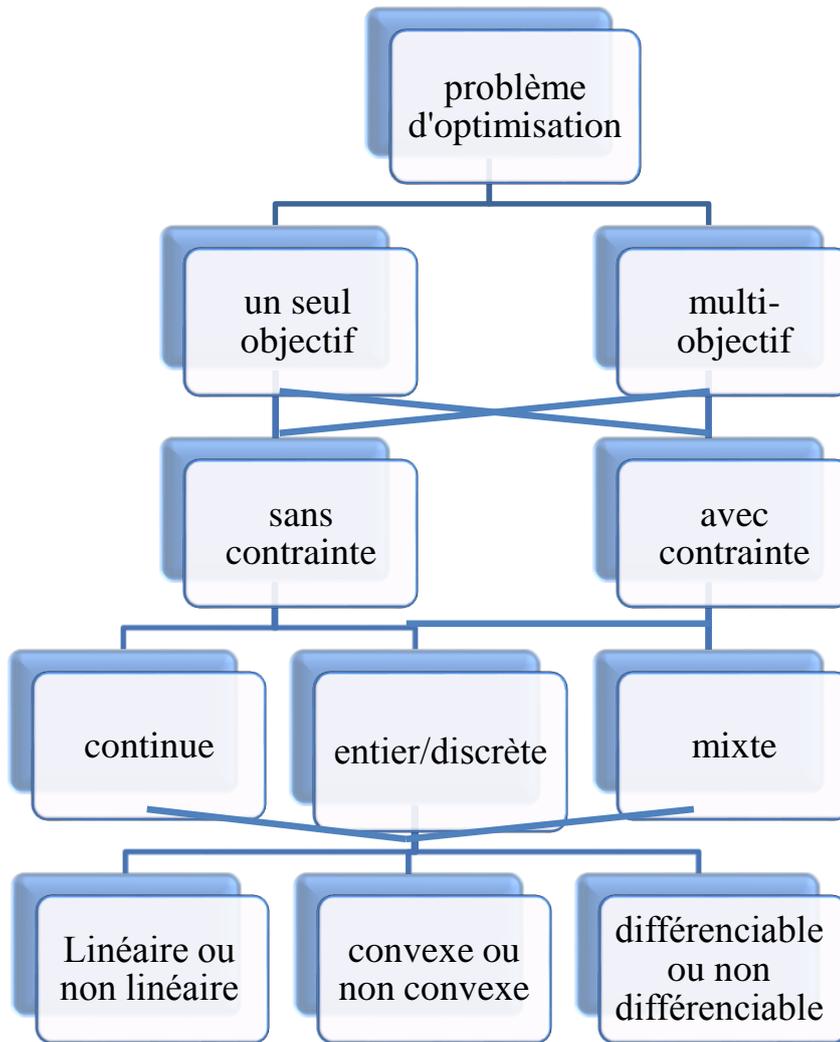


Figure 3.1 : Les types de problèmes de l'optimisation

3.3.1 Problème d'optimisation d'un programme non linéaire mixte en nombres entiers

La programmation non linéaire mixte en nombre entiers (PNLME) fait référence à des problèmes d'optimisation avec des variables continues ou discrètes qui consiste à minimiser une fonction objective non linéaire et soumises à un ensemble de contrainte non linéaire, ou l'un des deux linéaire et l'autre non linéaire, exprimées sous forme d'égalité et d'inégalité.

Les PNLME apparaissent dans des applications dans un large éventail de domaines, notamment le génie chimique, la finance et la fabrication ...etc. La forme générale d'un problème PNLME est donnée par [14] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f(x, y) \\ \square(x, y) = 0 \\ g(x, y) \leq 0 \\ x \in X \\ y \in Y \end{array} \right.$$

$f(x, y)$: La fonction objective.

$\square(x, y)$: Ensemble des contraintes égalités.

$g(x, y)$: Ensemble de contraintes inégalités.

X : Ensemble des variables continues.

Y : Ensemble des variables entières.

La variable x correspond généralement aux variables physiques (débit, pression, hauteur, rendement,...).

3.3.2 Problème d'optimisation d'un programme linéaire mixte en nombres entiers

La programmation linéaire entière mixte est construite sur la base de la méthode simplex de Dantzig. BIXBY affirme que le premier code de programmation linéaire entier mélangé commercial a été utilisé dans le plan commercial à 1960. En bref, il existe deux types de variables dans les modèles mathématiques, continues et discrètes. Les variables continues peuvent prendre toute valeur de nombres réels, tandis que des variables discrètes ne prennent que des valeurs entières. MILP (également appelé MIP) ajoute essentiellement des variables qui ne prennent qu'une valeur de 0 ou 1. Ces variables sont également appelées variables binaires.

Le modèle suivant est illustré pour spécifier la légère différence entre les langages LP et MILP.

$$\left\{ \begin{array}{l} \min c^T x \\ \text{s.t. } Ax \leq b \\ x \geq 0 \end{array} \right.$$

Dans cette démonstration classique du modèle LP, min(ou max) représente l'objectif de création du modèle. Par exemple, la fonction objective d'un problème de coût vise généralement à minimiser le coût, alors qu'un problème de profit tend souvent à maximiser la fonction objective. « c » est un vecteur ligne qui représente les coefficients des inconnues dans la fonction objective. « b » est un vecteur colonne qui démontre les coefficients de droite des contraintes. « T » est le symbole de transposition qui convertit le vecteur ligne en vecteur colonne. « s.t. » signifie « soumis à » dans le contexte de l'optimisation, mais il est également connu sous le nom de « tel que » dans la littérature mathématique. « A » est une matrice qui contient des coefficients d'inconnues dans les contraintes. « x » est un vecteur colonne qui symbolise des variables inconnues qui peuvent prendre des valeurs continues ou discrètes. A ce stade, MILP vient au sol ; si le problème suppose x comme variable continue, alors le problème est un problème LP, sinon (x est discret ou entier), c'est un problème MILP. Par conséquent, en ajoutant une contrainte supplémentaire, telle que $x \in Z^m$, rendrait le problème LP un problème MILP.

3.4 Méthodes de résolution d'un problème d'optimisation mixte

La résolution d'un problème mixte (PLME ou PLNME) a été généralement abordée par deux voies qui consistent, soit à :

- Résoudre le problème en variable entières après avoir discrétisé l'ensemble des variables continues.
- Traiter le problème de programmation non linéaire obtenu en substituant les variables entières par des approximations continues.

La première démarche met généralement en œuvre des méthodes de type séparation et évaluation (Branch and Bound), certes rapides et efficaces pour un choix donné des variables continues, mais présente l'inconvénient d'un important caractère combinatoire par suite du choix toujours délicat de la discrétisation des variables continues. La seconde approche

nécessite une lourde formulation du problème par suite de la définition d'une superstructure contenant toutes les structures possibles par l'intermédiaire de paramètres structuraux.

Il existe des méthodes déterministes permettant de résoudre certains problèmes d'optimisation en un temps fini. Ces méthodes nécessitent généralement un certain nombre de caractéristiques de la fonction objectif, comme la stricte convexité, la continuité ou encore la dérivabilité. Peut citer comme exemple de méthodes de résolutions : la programmation linéaire, quadratique ou dynamique, la méthode du gradient, la méthode de Newton...

Certains problèmes d'optimisation demeurent cependant hors de portée des méthodes exactes. Un certain nombre de caractéristiques peuvent en effet être problématiques, comme l'absence de convexité stricte, l'existence de discontinuités, une fonction non dérivable, présence de bruit, etc. Dans de tels cas, le problème d'optimisation est dit difficile, car aucune méthode exacte n'est capable de le résoudre exactement en un temps raisonnable, on devra alors faire appel aux techniques permettant une optimisation approchée.

Ce schéma résume les méthodes qui permettent de déterminer l'optimum d'une fonction avec ou sans contraintes [13] :

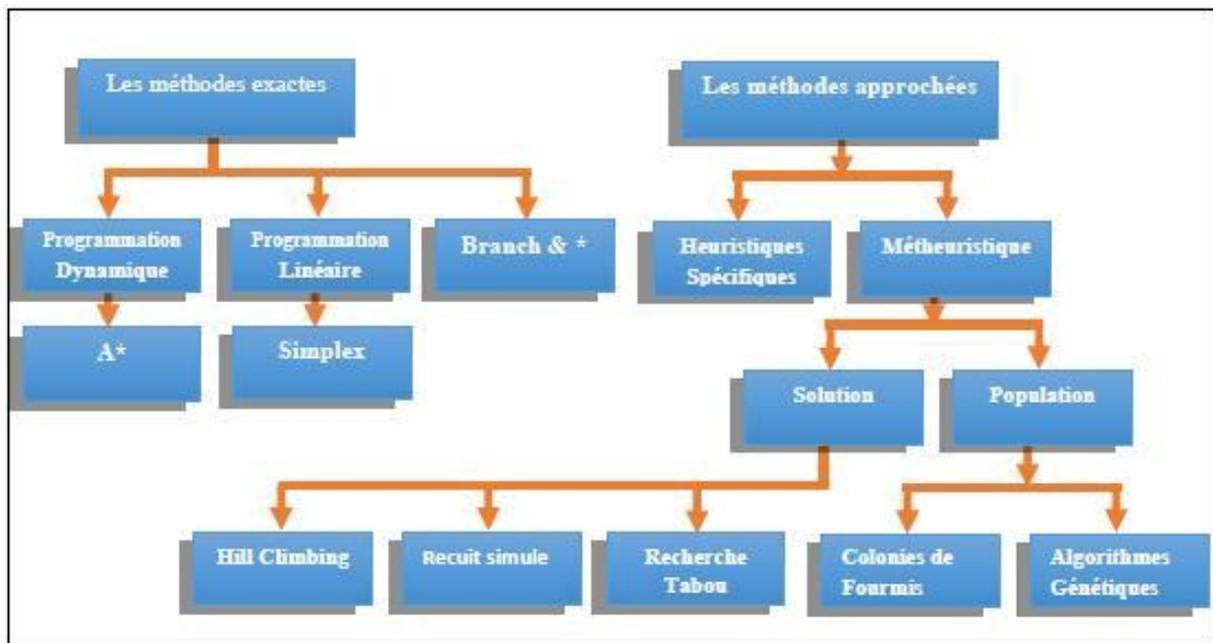


Figure 3.2 : Quelques méthodes de résolution d'un problème d'optimisation

3.5 La méthode de la Branch-and-Bound

La méthode de la Branch-and-Bound (procédure par évaluation et séparation progressive), est une méthode générique de résolution de problème d'optimisation combinatoire, apparue au milieu du XX^e siècle. Elle énumère de manière intelligente l'ensemble des solutions. Pour cela, elle décompose l'espace des solutions en sous-ensemble de plus en plus petits, dont une bonne partie est éliminée à l'aide de bornes. Ce type d'énumération peut donc fournir une solution optimale en un temps réduit par rapport à une énumération complète.

Cependant, pour les instances de grande taille des problèmes NP-difficiles, leur durée d'exécution est encore trop importante pour pouvoir être utilisable dans des applications réelles et il faut alors se tourner vers les approches heuristiques.

3.6 Définition d'une variable stochastique :

Une variable stochastique est une caractéristique pouvant prendre plusieurs des valeurs d'un ensemble d'observations possibles auquel une mesure ou une qualité peut être appliquée.

- **Fondamental :**

Une variable est dite, selon le cas : « Quantitative » : ses valeurs sont des nombres exprimant une quantité, sur lesquels les opérations arithmétiques (somme, etc...) ont un sens. La variable peut alors être discrète ou continue selon la nature de l'ensemble des valeurs qu'elle est susceptible de prendre (valeurs isolées ou intervalle de R).

« Qualitative » : ses valeurs sont des modalités, (ou catégories, ou caractères) exprimées sous forme littérale ou par un codage numérique sur lequel des opérations arithmétiques n'ont aucun sens. On distingue des variables qualitatives ordinales ou naturellement ordonnées ou pas.

3.7 Les méthodes approchées

La majorité des problèmes d'optimisation combinatoire des problèmes NP-difficiles et donc ne possèdent pas à ce jour un algorithme efficace, c'est-à-dire de complexité polynomiale, valable pour trouver la solution optimale en un temps raisonnable.

Ceci a motivé les chercheurs à développer de nombreuses méthodes de résolution en recherche opérationnelle et en intelligence artificielle :

- La recherche s'est d'abord orientée vers des heuristiques spécifiques aux problèmes.

- Elle s'est progressivement intéressée aux méthodes plus générales, c'est-à-dire les méta-heuristiques.

Les méthodes approchées ont pour but de trouver une solution admissible en un temps raisonnable, mais sans garantir l'optimalité de cette solution.

L'avantage principale de ces méthodes est qu'elles peuvent s'appliquer à n'importe quelle classe de problèmes, faciles ou très difficiles. De plus, elles ont démontré leur robustesse et leur efficacité face à plusieurs problèmes d'optimisation combinatoire.

3.7.1 Les heuristiques

L'analyse heuristique (du grec *heuriskein* qui veut dire trouver) est une méthode de résolution utilisée pour fournir une solution réalisable lorsqu'un problème est trop complexe, notamment en raison de l'explosion combinatoire (grand nombre de critères à prendre en compte). Contrairement à un algorithme, qui va chercher à explorer une à une toutes les combinaisons possibles jusqu'à trouver la solution optimale.

L'heuristique est une sorte de « raccourci » qui va s'appuyer sur une technique de filtrage pour réduire délibérément le champ des possibilités. Elle se base pour cela sur des expériences passées, des statistiques générales, le hasard ou l'intuition.

Les heuristiques sont des règles empiriques simples basées sur l'expérience, ne fournissant pas nécessairement une solution optimale [15].

Domaines d'applications de l'heuristique

Les heuristiques sont appliquées dans des problèmes difficiles de nombreux domaines par exemple en psychologie, en processus industriels (exemple : affecter des tâches à des machines, minimiser les pertes de production, définir un prix...), en informatique et en intelligence artificielle.

Les heuristiques peuvent être réparties en trois classes : les heuristiques de construction, les heuristiques d'amélioration et les algorithmes composés.

- a) **Les heuristiques de construction** : sont des méthodes approchées dont leurs principes consistent à démarrer d'une solution aléatoire puis construire de proche en proche une solution réalisable. Parmi ces heuristiques :
- L'heuristique de plus proche voisin.
 - L'algorithme Glouton.
 - L'algorithme de Christofides.
- b) **Les heuristiques d'amélioration** : consistent à démarrer d'une solution aléatoire réalisable et l'améliorer de proche en proche. Parmi ces heuristiques, on peut citer :
- L'algorithme de recherche local 2-Opt.
 - L'algorithme de recherche local 3-Opt.
 - La méthode de descente.
- c) **Les algorithmes composés** : sont des méthodes approchées qui consistent à combiner les deux premières classes d'heuristiques pour obtenir une solution réalisable.

L'approche heuristique a pour but une intensification et une diversification des solutions.

L'intensification (qui explore les combinaisons proches de celles déjà trouvées) permet d'accélérer la résolution des problèmes mais risque de cantonner les résultats à une petite zone de recherche. La diversification permet d'introduire de nouveaux éléments mais avec une possibilité d'introduire de moins bonnes combinaisons [11].

Qualité d'une heuristique

Elle peut s'évaluer selon divers critères :

- a) **Qualité du résultat** : on implémente l'heuristique et on évalue la qualité de solutions par rapport aux solutions optimales (ou aux meilleures solutions connues), soit en termes de distance, soit en termes de probabilité de réussite. Ceci passe par la mise en place d'un jeu d'essai ou benchmark, ensemble d'instances d'un même problème accessible à tous.
- b) **Coût de l'heuristique** : complexité (temps, espace) de l'heuristique.
- c) **Remise en cause du contexte original** : heuristique positive visant à enrichir le paradigme, mais sans remettre en cause son noyau dur.

d) Étendue du domaine d'application : domaine d'optimalité et domaine d'admissibilité des solutions.

Ces critères permettent de comparer les heuristiques résolvant un même problème, afin de dégager les heuristiques dominantes.

Certaines sont non compétitives, d'autres se révèlent utiles dans les cas simples, ou au contraire ne montrent efficaces que si elles s'attaquent à des problèmes importants.

Si une méthode algorithmique est hors d'atteinte, on peut mettre en concurrence diverses heuristiques pour profiter de l'ensemble de leurs domaines d'activités.

3.7.2 Les méta-heuristiques

Les méta-heuristiques forment un ensemble des méthodes utilisées en recherche opérationnelle et en intelligence artificielles pour résoudre des problèmes d'optimisation réputés difficiles. Une méta-heuristique est un ensemble de concepts qui permettent de construire des méthodes approchées pour plusieurs problèmes différents. En d'autres termes, une méta-heuristique peut être vue comme un cadre algorithmique général qui peut être appliqué à différents problèmes avec peu de modifications pour les adapter à un problème spécifique.

Domaine d'utilisation des méta-heuristiques

Les méta-heuristiques sont utilisées pour résoudre les problèmes d'optimisation difficiles qui sont des problèmes pour lesquelles aucune méthode exacte n'est capable de les résoudre exactement en un temps raisonnable. Ces problèmes peuvent se découper en deux types de problèmes : les problèmes discrets et les problèmes continus.

- Certains problèmes d'optimisation discrète, pour lesquels on ne connaît pas d'algorithme exacte polynomial. C'est le cas, des problèmes dits « NP-difficiles », pour lesquels on conjecture qu'il n'existe pas un constant n tel que le temps de résolution soit borné par un polynôme de degré « n ».
- Certains problèmes d'optimisation discrète, pour lesquels on ne connaît pas d'algorithme permettant de repérer un optimum global (c'est-à-dire la meilleure solution possible) à coup sûr et en un nombre fini de calculs.

Des efforts ont été longtemps menés, séparément, pour résoudre ces deux types de problèmes. Dans l'optimisation continue, il existe ainsi un arsenal important de méthodes classiques des d'optimisation global, mais ces techniques sont souvent inefficaces si la fonction objectif ne possède pas une propriété structurelle particulière, tel que la convexité.

Dans le domaine de l'optimisation discrète, un grand nombre d'heuristiques qui produisent une solution proche de l'optimum ont été développées mais la plupart d'entre elles ont été conçues spécifiquement pour un problème donné.

L'arrivée des méta-heuristiques marque une réconciliation des deux domaines (celle-ci s'appliquent à toutes sortes de problèmes discrets et peuvent s'adapter aussi aux problèmes continus). En pratique, certains problèmes sont mixtes et présentent à la fois des variables discrètes et des variables continues. On peut donc souligner une autre richesse des méta-heuristiques : elles se prêtent à toutes sortes d'extensions.

3.8 Présentation d'une méthode des méta-heuristiques

3.8.1 Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) sont des méthodes approchées car ils ne s'appuient pas, dans leur conception, sur des théorèmes qui permettent d'affirmer la qualité de la solution obtenue. Les algorithmes génétiques sont partie d'une famille d'algorithmes dits évolutionnaires [4].

Principe d'algorithme génétique :

Ils simulent l'évolution naturelle d'organismes (individus), génération après génération, en respectant des phénomènes d'hérédité lors de reproduction par croisement ou mutation et une loi de survie. En développant une analogie entre individu dans une population et une solution d'un problème dans un ensemble de solutions.

Voici la liste d'hypothèses d'évolution dans une population :

- Les bons chromosomes doivent avoir une probabilité plus grande d'être choisis comme parents.
- Le mariage de bons parents devraient donner de bons enfants.
- Les bons chromosomes doivent avoir une meilleure chance de survivre.
- Les croisements cherchent à conserver les meilleures caractéristiques des parents.

- Le rôle des opérateurs de mutation et de créer de la diversité de manière à éviter la dégénérescence.

Terminologie d'un algorithme génétique :

- **Individus ou chromosomes** : Les éléments d'une population sont appelés des individus ou des chromosomes.
- **Gène** : Les différents éléments d'un chromosome.
- **Fitness** : On appelle **force** ou *fitness* une valeur calculée associée à chaque chromosome et qui mesure sa qualité.
- **Opérateur de croisement** : C'est un opérateur binaire, à partir de deux parents conçoit deux enfants ou plus.

Nous suivrons ici le schéma classique (Figure 3.3) où deux enfants (F1 et F2) sont créés par le croisement de deux parents (P1 et P2) (le croisement localisé à la troisième position).

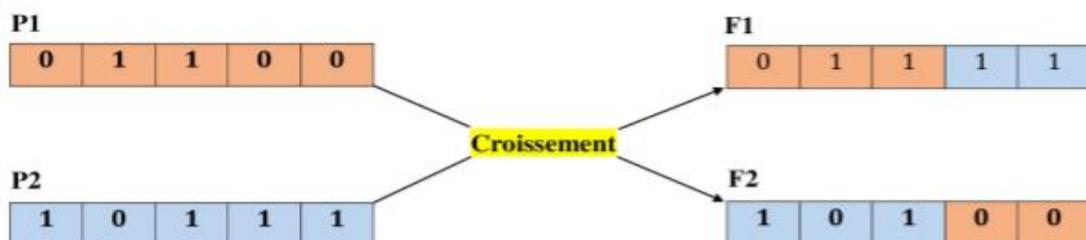


Figure 3.3 : Croisement d'un individu

- **Opérateur de mutation** : C'est un opérateur unaire qui modifie légèrement un chromosome.

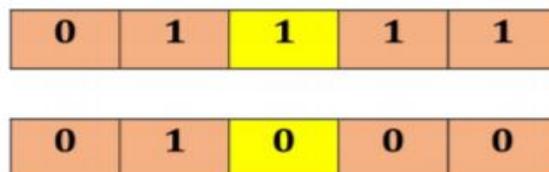


Figure 3.4 : Mutation d'un individu

Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté sur la Figure 3.5 :

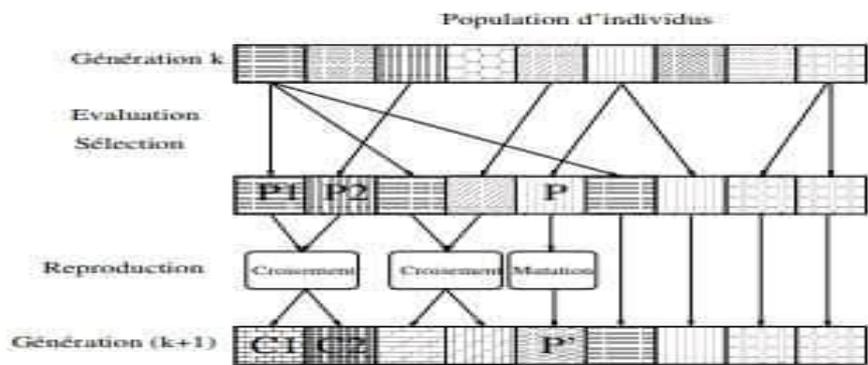


Figure 3.5 : principe général des algorithmes génétiques

Schéma générale d'un algorithme génétique

a) Initialisation :

Générer une population initiale P_0 de N individus.

b) Évaluation :

Évaluer la "force" de tout individu de la population P_{n-1} .

c) Sélection :

Sélectionner $N/2$ couples d'individus dans la population P_{n-1} .

d) Croisement :

Tout couple d'individus est

- Avec la probabilité de croisement (pc) remplacé par un nouveau couple d'individus dans la population P_n obtenu en lui appliquant un opérateur génétique de croisement.
- Avec la probabilité $1-pc$ conservé.

e) Mutation :

Tout individu P_n

- Avec la probabilité pm subit une mutation.

- Avec la probabilité $1-p_m$ conservé.

f) Arrêt :

On reprend en étape b jusqu'à avoir effectué un nombre donné d'itérations.

g) Résultat :

Un des chromosomes qui a la meilleure force.

Remarque :

Ils existent d'autres variantes différentes du schéma donné ci-dessus. Nous citons les différences suivantes :

- Donner plus de chance de sélection aux individus forts, i.e. On attribue à chaque individu de la population une probabilité d'être reproduit qui est proportionnelle à sa force (technique de la roulette).
- Le croisement peut faire intervenir plusieurs parents ou plusieurs points de croisement. Un individu peut être le parent de plusieurs enfants.
- On peut concevoir une mutation améliorant la fitness de l'individu.
- La condition d'arrêt peut dépendre de l'amélioration de la population, on s'arrête par exemple lorsqu'on progresse plus pendant un certain nombre d'itération.

Choix du codage des chromosomes

L'étape clef dans un algorithme génétique est de définir et coder convenablement les variables du problème.

Dans le cas d'un **codage direct** : le chromosome contient la description complète d'une solution.

Dans le cas d'un **codage indirect** : le chromosome contient des paramètres qui permettront de construire une solution en utilisant un générateur.

Le codage binaire est fréquemment utilisé, il est efficace lorsque les solutions sont réels ou formées de réels. On représente ainsi un réel par sa représentation binaire. Ce type de codage facilite le croisement et la mutation.

Le codage réel n'utilise pas la représentation binaire, il est considéré plus efficace mais nécessite la conception d'opérateurs de croisement et de mutation adaptés.

Dans les problèmes d'ordonnancement ou les problèmes d'optimisation combinatoire en général, on utilise des valeurs qui ont une signification pour le problème considéré, par exemple des lettres ou des chiffres, on parle alors de **codage symbolique**.

Organigramme de l'AG

Il est donné comme suit

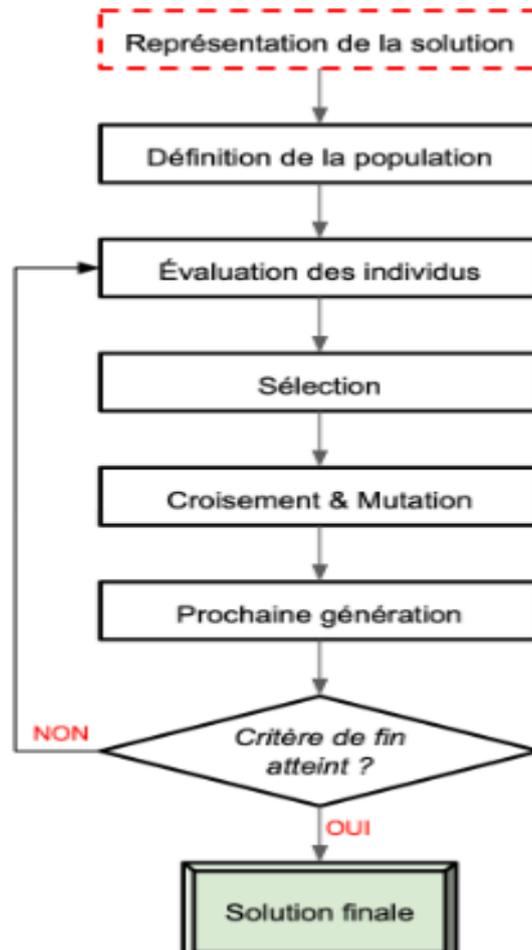


Figure 3.6 : Organigramme de l'algorithme génétique

Avantages et inconvénients des AG

Les avantages :

- Facilité d'adaptation, réactive et prise en compte de l'environnement (les autres individus sont compris).

- Permet de traiter des espaces de recherche important (beaucoup de solution, pas de parcours exhaustifs envisagé).

Les inconvénients

- Nécessitent plus de calculs que les autres algorithmes méta-heuristiques (notamment la fonction évaluation).
- Problème des optimums locaux si les paramètres sont mal évalués.

3.9 Caractéristiques des méta-heuristiques

Selon Clere et Siarry [3], les méta-heuristiques ont en commun les caractéristiques suivantes :

- La plupart des méta-heuristiques utilisent des processus aléatoires comme moyens de récolter de l'information et de faire face à des problèmes comme l'explosion combinatoire.
- En plus de cette base stochastique, les méta-heuristiques sont généralement itératives, c'est-à-dire qu'un même schéma de recherche est appliqué plusieurs fois au cours de l'optimisation, et directes, c'est-à-dire qu'elles n'utilisent pas l'information du gradient de la fonction objectif. Elles tirent en particulier leur intérêt de leur capacité à éviter les optimums locaux. Soit en acceptant une dégradation de la fonction objective au cours de leur progression, soit en utilisant une population de points comme méthode de recherche.
- Les méta-heuristiques du fait de leur capacité à être utilisées sur un grand nombre de problème différents, se prêtent facilement à des extensions.
- Souvent d'origine discrète à l'exception des essaims de particules et l'électromagnétisme.
- Elles sont inspirées par analogie avec la réalité : avec la physique (le recuit simulé), avec la biologie (les algorithmes génétiques) ou avec l'éthologie (les colonies de fourmis).
- Les concepts de base des méta-heuristiques peuvent être d'écrits de manière abstraite, sans faire appel à un problème spécifique.
- Les méta-heuristiques peuvent contenir des mécanismes qui permettent d'éviter d'être bloqué dans des régions de l'espace de recherche.

- Elles partagent aussi les mêmes inconvénients : les difficultés de réglage des paramètres, et le temps de calcul élevé.

Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation de quelques méthodes, approchée et exacte, pour la résolution d'un problème d'optimisation linéaire et non linéaire en nombre entier. Nous allons illustrer une méthode approchée qui est algorithmes génétiques.



CHAPITRE 4



Chapitre 4 : Résolution du problème

4.1 Introduction

Le choix de l'approche pour la résolution d'un problème d'optimisation est très important en recherche opérationnelle car il détermine l'issue de ce dernier.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une approche de résolution de départ que nous allons utiliser dans les méta-heuristiques (algorithme génétique AG) pour la résolution de modèle non linéaire, ainsi que la méthode Branch-and-Bound pour la résolution de modèle linéaire. Ensuite, nous déroulons un algorithme résolvant le problème d'optimisation de la planification de la flotte, conçu par les auteurs [12], sur une série de données aléatoires.

4.2 Les étapes de résolution

Pour atteindre le profit maximal de la flotte, la solution optimale du modèle de planification de la flotte se réfère aux revenus totaux attendus résultant des modèles linéaires et non linéaires qui sont exactement égaux.

Le noyau de la recherche de la solution optimale peut être résumé par les étapes suivantes :

Etape 1 : Pour un choix initialisé de type d'aéronefs et de fréquences de vol pour chaque segment de route au sein d'un réseau, le modèle non linéaire produit un ensemble de chiffres d'affaires (prix d'offre) pour tous les segments de route dans le réseau.

Etape 2 : Ces prix d'offre produisent une fonction d'approximation du revenu total attendu qui s'ajoute au modèle linéaire. Cette fonction d'approximation garantit que le résultat maximum de la flotte dans le modèle linéaire est constamment refusé, car l'espace réalisable du revenu total attendu est généralement réduit.

Etape 3 : Le modèle linéaire peut apporter une nouvelle solution au choix des types d'avions et des fréquences de vol pour chaque segment de route au sein du réseau. Cette solution génère un ensemble de schémas d'attribution de siège à tous les segments de route du réseau.

Etape 4 : En ajoutant ces systèmes d'attribution des sièges dans le modèle non linéaire, le revenu total attendu est généré et comparé au revenu précédent résultant du modèle linéaire.

Etape 5 : Si l'écart des revenus n'est pas nul, le nouvel ensemble de prix d'offre pour tous les segments de route est à nouveau généré pour produire une autre fonction d'approximation des revenus totales attendues pour le modèle linéaire.

Par conséquent, l'ensemble de l'itération pourrait être décrit comme la Figure 4.1

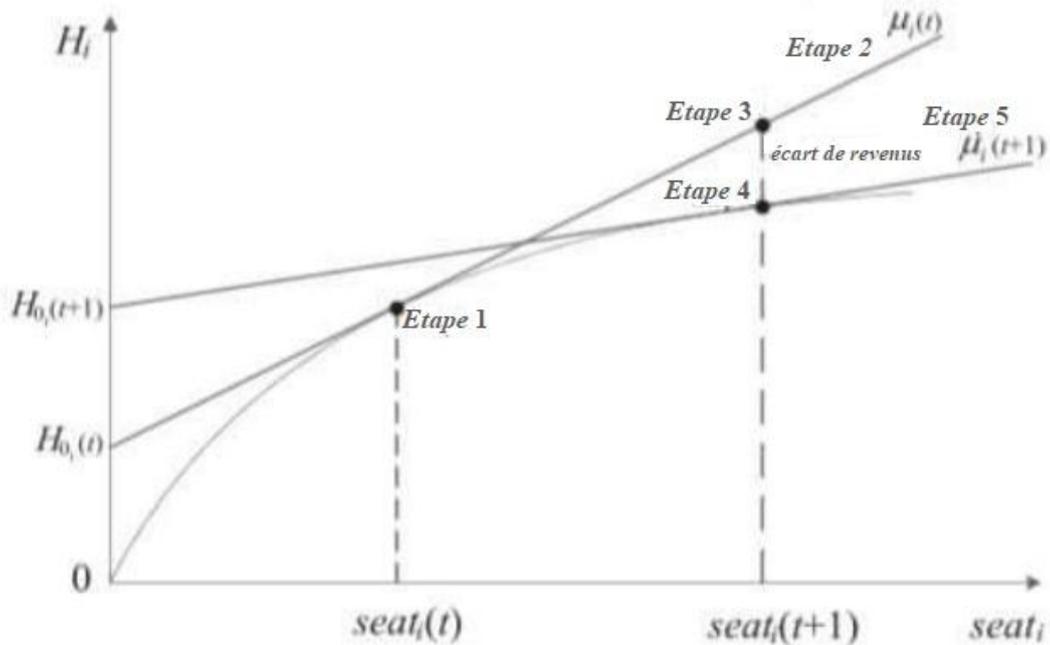


Figure 4.1 : Description de l'algorithme de décomposition

4.3 Algorithmes

L'algorithme itératif de résolution de problème de la planification de la flotte, exactement choix de type d'avion et de fréquence de vol pour chaque segment de route, donné sous la forme suivante :

Algorithme 1	Algorithme de décomposition
Input :	Tous les paramètres.
Initialiser :	$t = 0; x_{ik} = 0; z_k = 0; seat_i(t) = 0;$ Do { <ul style="list-style-type: none"> -utilisation de modèle non linéaire avec résolution par méthode, Algorithme génétique pour calculer une solution optimale actuelle $W_{total}(t)$, le nombre des sièges $s_j(t)$, et le prix d'offre $\mu_i(t)$.
Revenu modèle non linéaire :	$Nmr_P_{total}(t) = W_{total}(t) - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} c_{ik} x_{ik}(t) - \sum_{k \in K} a_k z_k(t)$

For $i \leq$ le nombre des éléments de l'ensemble I

$$seat_i(t) = \sum_{k \in K} Cap_{ik} x_{ik}(t)$$

End for ;

For $j \leq$ le nombre des éléments de l'ensemble J

$$R_j(t) = P_j \left[\int_0^{l_j s_j(t)} r_j f(r_j) dr_j + \int_{l_j s_j(t)}^{+\infty} l_j s_j(t) f(r_j) dr_j \right]$$

End for ;

For $i \leq$ le nombre des éléments de l'ensemble I

$$-Revenue_i(t) = 0;$$

-For $j \leq$ le nombre des marchés spécifique sur le segment i

$$Revenue_{oi}(t) = Revenue_i(t) - \mu_i(t) seat_i(t);$$

-End for ;

Le modèle linéaire :

Calculer la solution optimale $Lmr_P_{total}(t)$, la fréquence de vol $x_{ik}(t)$, le nombre d'avion de type k ;

For $i \leq$ le nombre des éléments dans l'ensemble I

$$seat_i(t) = 0 ;$$

For $k \leq$ le nombre des éléments de l'ensemble K

$$seat_i(t) = seat_i(t) + Cap_{ik} x_{ik}(t);$$

End for ;

End for ;

} $t = t + 1$; jusqu'à $Nmr_{P_{total}(t)} \approx Lmr_P_{total}(t)$;

Output :

Solution optimale et objectif.

4.4 Adaptation de l'algorithme génétique pour la résolution du problème

4.4.1 Initialisation

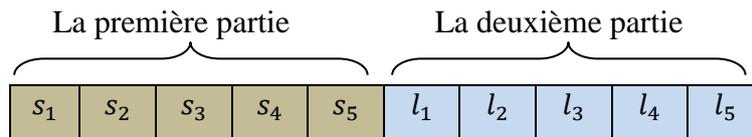
a) Le codage des données :

On définit l'individu ou le chromosome comme étant un vecteur B de taille 10

Divisé en deux parties de même taille :

- **La première partie :** Un vecteur de taille 5, de composante entière (le nombre des sièges offerts au marché j spécifique au chemin).
- **La troisième partie :** Un vecteur de taille 5, de composante entière (le facteur de charge moyen pour le marché j spécifique au chemin).

L'individu est présenté par le vecteur suivant :



b) Population initial :

On génère N solutions aléatoires réalisables qui forme une population initiale pour l'algorithme génétique.

4.4.2 L'évaluation

Procédure d'évaluation :

Entrées : p, r : vecteurs ;

Sortie : f, W : vecteurs ;

Début

Pour $i=1$ à N **faire** // pour les individus

$y := 0$; // pour l'évaluation (*fitness*)

Pour $k=1$:5 **faire**

$$f(i, k) := - \left(p[k] \left[\int_0^{l[k]s[k]} r[k] f(r[k]) dr[k] + \int_{l[k]s[k]}^{+\infty} l[k]s[k] f(r[k]) dr[k] \right] \right)$$

$y := y + f(i, k)$;

fait ;

$W[i] := y ;$

fait ;

Fin.

4.4.3 La sélection

La sélection qu'on a utilisé pour la reproduction est la sélection par tournoi qui est présentée par la sélection des couples d'individus aléatoire. Pour chaque couple d'individus très aléatoirement on compare et on sélectionne le meilleur parmi les deux, ce qui produit deux parents $P1$ et $P2$.

4.4.4 Le croisement

On a utilisé un croisement en un point et pour effectuer ce type de croisement sur les individus on choisit aléatoirement une position de croisement dans chacun des parents, puis on échange les deux chaînes terminales de chacun des deux individus, ce qui produit deux filles $F1$ et $F2$, avec la probabilité de croisement P_C .

Procédure de croisement :

Entrées : N : entière ; P_C, r : réels ;

Sorties : indice 1, indice 2, $P1, P2, F1, F2, B$: vecteurs ;

Début

Pour $i=1$ à N **faire**

// Pour le choix de première individu

$I1 := \text{rand}(N);$

$I2 := \text{rand}(N);$

Minimum := $\min(W[I1], W[I2]);$

Si (minimum = $W[I1]$) **alors** indice 1 := $I1$;

Sinon indice 1 := $I2$;

// Pour le choix de deuxième individu.

$I3 := \text{rand}(N);$

$I4 := \text{rand}(N);$

Si (minimum= $W[I3]$) **alors** indice 2:= $I3$;

Sinon indice 2 := $I4$;

// Pour la position sur l'individu.

Pour $j=1$ à 10 **faire**

$PI[j] := B(j, \text{indice } 2)$://la position j de parent reçoit la position j de l'indice 1.

$P2[j] := B[j, \text{indice } 2]$;

fait ;

// Pour le croisement

$r := \text{rand}(1)$;

Si ($r < P_C$) **alors** $s := 5$;

pour $k=1$ à $s-1$ **faire**

$FI[k] := PI[k]$;

$F2[k] := P2[k]$;

$FI[k+5] := PI[k+5]$;

$F2[k+5] := P2[k+5]$;

fait;

$FI[s] := P2[s]$;

$F2[s] := PI[s]$;

$FI[s+5] := P2[s+5]$;

$F2[s+5] := PI[s+5]$;

fait;

sinon garder les deux parents PI et $P2$.

finsi ;

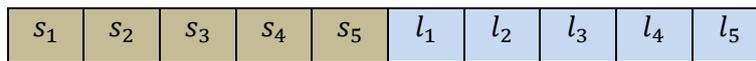
fait ;

Fin.

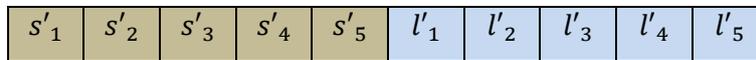
Voici un exemple de la procédure du croisement :

Soient les deux parents PI et $P2$:

Parent $P1$:

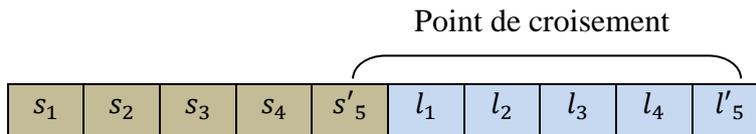


Parent $P2$:



Après le croisement on obtient les deux filles $F1$ et $F2$.

Fille $F1$:



Filles $F2$:



4.4.5 La mutation

Aléatoirement un individu avec certaine probabilité de mutation P_m on applique la mutation sur un point dans la première partie de cet individu (le vecteur de nombre des sièges offerts au marché k spécifique au chemin). Sera choisi aléatoirement pour être changé.

Procédure de mutation :

Entrées : N, m_δ : entiers ; R, P_m : réels ;

Sorties : α, δ : entiers ; B : vecteur ;

Début

Pour $i = 1$ à N **faire**

$I := \text{rand}(N)$;

$R := \text{rand}(1)$; // Nombre aléatoire

Si ($r < P_m$) **alors**

$\alpha := \text{rand}(2,5)$; // Pour le choix de la position de mutation.

$\delta := \alpha - 5$; // la position sur le vecteur de la partie 1.

$B[I, \delta] := \text{rand}(1, m_\delta)$;

Si ($B[I, \alpha] > 0$) et $B[I, \alpha] \neq B[I, \delta]$ **alors** $B[I, \alpha] := B[I, \delta]$;

finsi; Fin.

Voici un exemple de la procédure de mutation on a choisit la première fille F1 et on applique la mutation sur la 3^{ème} position dans la première partie :

Filles F1 :

s_1	s_2	s''_3	s_4	s'_5	l_1	l_2	l_3	l_4	l'_5
-------	-------	---------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	--------

4.5 C'est quoi le MATLAB ?

MATLAB « matrix laboratory » est une langue de script émulé par un environnement de développement du même nom, il est utilisé à des fins de calcul numérique. Développé par la société The MathWorks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java et Fortran.

Les utilisateurs de MATLAB (environ 4 millions en 2019) sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. MATLAB peut s'utiliser seul ou bien avec des toolboxes « boîte à outils ».

4.6 Pour quoi programmer en MATLAB ?

- ✓ MATLAB possède une programmation facile, une continuité parmi les valeurs entières, réelles et complexes.
- ✓ Le bagage de langage sur MATLAB contient une interface graphique puissante ainsi qu'une grande variété de méthodes scientifiques implémentées (prédéfinies).
- ✓ MATLAB contient une bibliothèque mathématique très comprehensive avec l'outil graphique qui inclut les fonctions d'interface graphique et les utilitaires.
- ✓ La possibilité de liaison avec les autres langues (C, Java, C++, Python,...).

4.7 Algorithme « intlinprog » de MATLAB

MATLAB a essentiellement de nombreux types d'algorithmes pour une grande variété de problèmes d'optimisation, tels que des problèmes de programmation linéaire, non linéaire et quadratique dans sa boîte à outils d'optimisation. L'algorithme intlinprog de MATLAB est l'un des outils impliqués dans cette boîte à outils pour résoudre les problèmes MILP. Le mot « intlinprog » est l'abréviation de la programmation linéaire en nombre entiers dans le

contexte. Cet algorithme a été ajouté à la boîte à outils d'optimisation en 2014. Étant donné que MILP est devenu un langage mathématique connu dans la littérature depuis les années 1960, la date d'ajout de cet algorithme pourrait être qualifiée de version tardive. Cependant, il a déjà existé d'autres codes pour d'autres langages de programmation pour résoudre les problèmes MILP parmi les logiciels d'optimisation. La différence qui attire les utilisateurs à préférer cet algorithme est sa convivialité. Cet algorithme sert une très grande variété d'options qui peuvent être personnalisées par ses utilisateurs pour aborder les moyens de résolution des problèmes sous différents aspects. Cet algorithme utilise essentiellement trois méthodes pour trouver des solutions optimales aux problèmes MILP. Il s'agit de la méthode B&B, de la méthode du plan de coupe et de la méthode heuristique de MATLAB.

L'algorithme conçu comme un minimiseur et nécessite une fonction objective pour viser à minimiser. Ainsi, un problème de maximisation doit être converti en un problème de minimisation en multipliant sa fonction objective par « -1 » afin de pouvoir s'adapter à l'approche de solution de ce solveur. De plus, toutes les contraintes d'inégalité de tout type de problème (minimisation ou maximisation) qui ont des signes supérieurs ou égaux à (\geq) doivent également être converties en signe inférieur ou égal à (\leq) en multipliant les deux côtés des contraintes par « -1 ». En résumé, l'algorithme `intlinprog` résout des problèmes sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f^T x \\ s.t. A \cdot x \leq b \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \\ x \leq ub \\ x(intcon) \text{ Les valeurs sont des nombres entiers.} \end{array} \right.$$

L'algorithme `intlinprog` nécessite essentiellement des matrices et des vecteurs, tels que la matrice « A » pour les coefficients de contraintes d'inégalité, le vecteur colonne « b » pour les contraintes d'inégalité correspondant aux côtés droits de la main droite, la matrice « Aeq » pour les coefficients de contraintes d'égalité des côtés droits correspondants, le vecteur colonne « beq » pour les contraintes d'égalité des côtés droits correspondants, vecteur « f » pour les coefficients des variables dans la fonction objectif, vecteurs colonnes « ub » et « lb » pour fixer les limites supérieures et inférieures pour les valeurs des variables données dans la

fonction objectif, et vecteur ligne « *intcon* » pour différencier les variables binaires des variables continues.

Après avoir défini ces matrices et ces vecteurs pour un problème de MILP particulier, l'algorithme intlinprog applique les procédures de résolution de trois militaires mentionnées et détecte la solution optimale.

4.8 Procédure de reformulation

Le modèle entier est le suivant (supposé être toutes les variables positifs) :

Minimise :

$$I_1 = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} c_{ik} x_{ik} + \sum_{k \in K} a_k z_k$$

Tel que :

$$-\sum_{k \in K} x_{ik} \leq -F_i^{min} \quad \forall i \in I \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ik} \leq F_i^{max} \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} b_{ik} x_{ik} - u_k z_k \leq 0 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$-\sum_{i \in I} \left(\mu_i \sum_{k \in K} Cap_{ik} x_{ik} \right) \leq \sum_{i \in I} H_{oi} - R_{total} \quad (4)$$

$$I_1 \leq R_{total} \quad (5)$$

$$x_{ik} \in N \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (6)$$

$$z_k \in N \quad \forall k \in K \quad (7)$$

L'illustration suivante décrit dans les variables de séquence peut être répertoriée dans les vecteurs et comment un vecteur *f* est créé pour le modèle mathématique.

$$\begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ \vdots \\ x_{ik} \\ z_1 \\ \vdots \\ z_k \end{pmatrix} \longrightarrow f = \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ \vdots \\ c_{ik} \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{pmatrix}$$

L'étape suivante peut être déterminée des limites inférieure et supérieure des variables et de créer leurs vecteurs de colonne correspondants. Les vecteurs suivants élucident la manière de vectorisé les limites supérieure et inférieure.

$$\begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ \vdots \\ x_{ik} \\ z_1 \\ \vdots \\ z_k \end{pmatrix} \longrightarrow ub = \begin{pmatrix} Inf \\ Inf \\ \vdots \\ Inf \\ Inf \\ \vdots \\ Inf \end{pmatrix} \quad lb = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

Matrice A est un certain nombre de contraintes par la matrice de taille de variables numériques.

$$A = \left. \begin{array}{cc} & \begin{array}{c} x_{ik} \\ z_k \end{array} \\ \begin{array}{c} -1 \\ 1 \\ b_{ik} \\ -\mu_i * Cap_{ik} \\ c_{ik} \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ -u_k \\ 0 \\ a_k \end{array} \end{array} \right\} \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \\ (5) \end{array}$$

Le vecteur b correspondant pour matrice A , qui comprend également la base des côtés de la main droite des contraintes d'inégalité. Étant donné que les côtés de droite impliquent uniquement des paramètres pouvant être obtenus à partir de données d'entrée, la création de ce vecteur est très simple.

$$b = \left. \begin{array}{c} -F_i^{min} \\ F_i^{max} \\ 0 \\ \sum_{i \in I} H_{0i} - R_{total} \\ R_{total} \end{array} \right\} \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \\ (5) \end{array}$$

En faisant toutes ces opérations, la seule tâche requise consiste à appeler l'optimiseur de MATLAB avec une fonction simple et à trouver la solution. En appliquant ces opérations, la compagnie serait capable de déterminer de la taille et de la structure d'une flotte aérienne opérant sur un réseau en étoile « Hub-and-Spoke ».

4.9 Les données

Avant le lancement de l'application, nous allons tout d'abord introduire toutes les informations nécessaires, ces données dans le tableau suivant :

Schéma introduit	Segment de route	Type d'aéronef	Coût d'exploitation	Tarif moyen	Demande	Contribution de bénéfices	Profit attendu
A321/1	A-H	A321	55,500	946	(160,58)	79,833	-50,167
A319/1	H-A	A319	66,000	1,122	(120,50)		
A321/1	A-H	A319	49,500	946	(160,58)	87,006	-42,995
A319/1	H-A	A321	74,000	1,122	(120,50)		
A321/1	A-H	A319	49,500	946	(160,58)	56,766	16,766
A319/1	H-A	A319	66,000	1,122	(120,50)		
A321/1	A-H	A321	55,500	946	(160,58)	110,072	20,072
A319/1	H-A	A321	74,000	1,122	(120,50)		

Remarque : Les valeurs dans () désignent la moyenne et la déviation, respectivement.

Indice	Approche sur le marché spécifique au chemin	Approche basée sur les segments de route avec des revenus attendus
Flotte	BA321/10, B737-700/1	BA321/10, B737-700/1
Profit de la flotte	438.85	140.92
Coût d'achat de flotte	186.0	385.0
Coût d'exploitation de la flotte	1557.0	2669.8
Flux de passagers attendu	11,116	16,142
Siège offert	36,666	61,506
Revenus attendus	2181.9	3201.5
Facteur de charge réel	63.62%	54.70%
Siège / vol	169.8	189.8
Flux de passagers / vol	108.1	104.1

4.10 Programme

```

clear all;
close all;
clc
m= input('donner le nombre des segments de routes');
n= input('donner le nombre des marchés spécifiques au
chemin');
L= input('donner le nombre des avions candidats');
p=zeros(n,1);
input('donner pj le tarif moyen pour un marche spécifique au
chemin j');
for j=1:n
    p(j)=input(' ');end
disp('pj=');
disp(p);
a=zeros(L,1);
input('donner ak le cout fixe de l avion de type k');
for k= 1:L

```

```

    a(k)= input('');end
disp('ak=');
disp(a);
cik=zeros(m,L);
input('donner cik les couts d exploitation pour le segment de
route i effectué par l avion de type k');
for i=1:m
    for k=1:L
        cik(i,k)= input('');end
end
disp('cik=');
disp(c);
r=zeros(1,n);
input ('donner rj la demande de passagers pour le marchés
spécifique au chemin j qui donne une distribution normale ');

for j=1:n
    r(j)=input(' ');end
disp('rj=');
disp(r);
bik=zeros(m,L);
input('donner bik le nombre de vol pour le segment de route i
volé par l avion de type k');
for i=1:m
    for k=1:L
        bik(i,k)= input('');end
end
disp('bik');
disp(bik);
fimin=zeros(m,1);
input('donner Fimin le nombre minimal de vols sur le segment
de route j');
for i=1:m
    fimin(i)= input('');end

```

```

disp('Fimin=');
disp(fimin);
fimax=zeros(m,1);
input('donner Fimax le nombre maximal de vols sur le segment
de route j');
for i=1:m
    fimax(i)= input('');end
disp('Fimax=');
disp(fimax);
Cap=zeros(m,L);
input('donner Capik le nombre des sièges pour le segment de
route i volé par l avion de type k');
for i=1:m
    for k=1:L
        Cap(i,k)= input('');end
end
disp('Capik=');
disp(Cap);
u=zeros(1,L);
input('donner uk le temps prévu en heures de l avion de type
k');
for k=1:L
    u(k)= input('');end
disp('uk=');
disp(u);
sigmaij=zeros(m,n);
input('donner sigmaij tel que il prend la valeur 1 si le
segment de route i volé par le marche specicfque au chemin j
sinon 0');
for i=1:m
    for j=1:n
        sigmaij(i,j)=input(' ');
    end
end
end

```

```

disp('sigmaij=');
disp(sigma);
H0=zeros(m,1);
input('donner H0');
for i=1:m
    H0(i)=input(' ');
end
disp('H0=');
disp(H0);
xik=zeros(m,L);
s=zeros(1,n);
l=zeros(1,n);
z=zeros(L,1);
seat=zeros(m,1);
mui=zeros(m,1);
R=zeros(n,1);
Revenue=zeros(m,1);
Revenue_0=zeros(m,1);
W=zeros(n,1);
v=zeros(1,2*n);
eps=0.01;
deff=1;
while deff>eps
mu=150;
sigma=10;
pd=makedist('Normal',mu,sigma);
int_1=zeros(1,n);
for j=1:n
int_1(j)=integral(@(r) r(j)*pdf(pd,r),0,l(j)*s(j));
end
disp('int_1=');
disp(int_1);
int_2=zeros(1,n);
for j=1:n

```

```

int_2(j)=integral(@(r) l(j)*s(j)*pdf(pd,r),l(j)*s(j),Inf);
end
disp('int_2=');
disp(int_2);
for j=1:n
    W(j)=W(j)-p(j)*(int_1(j)+int_2(j));
end
disp('W');
disp(W);
b_ga=zeros(m,1);
for i=1:m
    for k=1:L
        b_ga(i)=b_ga(i)+Cap(i,k)*xik(i,k);
    end
end
end
f=@W_total;
v=[s l];
g=f(v);
A = [sigmaij,zeros(m,n)];
disp('A=');
disp(A);
b = b_ga;
disp('b=');
disp(b);
Aeq = [];
beq = [];
lb = zeros(1,2*n);
disp('lb');
disp(lb);
ub = 1000*ones(1,2*n);
disp('ub=');
disp(ub);
[v,fval] = ga(f,2*n,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
disp('la solution de modele non lineare =');

```

```

disp(v);
disp('Wtotal=');
disp(fval);
som1=0;
for i=1:m
    for k=1:L
        som1=som1+cik(i,k)*xik(i,k);
    end
end
som2=0;
for k=1:L
    som2=som2+a(k)*z(k);
end
Wtotal=fval;
Nmr_Ptotal=Wtotal-som1-som2;
disp('Nmr_Ptotal');
disp(Nmr_Ptotal);
for i=1:m
    for k=1:L
        seat(i)=seat(i)+Cap(i,k)*xik(i,k);
    end
end
disp('seat=');
disp(seat);
int_1=zeros(1,n);
int_2=zeros(1,n);
for j=1:n
    fun1 = @(r) r.*pdf(pd,r);
    int_1(j)=integral(fun1,0,l(j)*s(j));
    fun2 = @(r) l(j).*s(j).*pdf(pd,r);
    int_2(j)=integral(fun2,l(j)*s(j),Inf);
    R(j)= p(j).*(int_1(j)+int_2(j));
end
disp('R=');

```

```

    disp(R);
for i=1:m
    Revenue(i)=0;
    for j=1:n
        Revenue(i)=Revenue(i)+R(j);
    end
    Revenue_0(i)=Revenue(i)-mui(i)*seat(i);
end
disp('revenue_0=');
disp(Revenue_0);
R_total= 0;
for j=1:n
    R_total=R_total+R(j);
end
disp('R_total=');
disp(R_total);
cont1=zeros(1,(m+1)*L);
for i=1:m
    cont1(i,(i-1)*L+1:i*L)=-1;
end
disp('cont1=');
disp(cont1);
cont2=zeros(1,(m+1)*L);
for i=1:m
    cont2(i,(i-1)*L+1:i*L)=1;
end
disp('cont2=');
disp(cont2);
cont3=zeros(L,(m+1)*L);
for i=1:m
    for k=1:L
        cont3(k,(i-1)*L+k)=bik(i,k);
    end
end
end

```

```

for k=1:L
    cont3(k,m*L+k)=-u(k);
end
disp('cont3=');
disp(cont3);
Q=zeros(m,L);
for i=1:m
    for k=1:L
        Q(i,k)=mui(i)*Cap(i,k);
    end
end
Q=reshape(Q',1,m*L);
cont4=[Q,zeros(1,L)];
disp('cont4=');
disp(cont4);
b1=sum(H0)-R_total;
ct= reshape(cik',m*L,1);
f=[ct;a];
A=[f';cont1;cont2;cont3;cont4];
disp('A=');
disp(A);
b_int=[R_total;-fimin;fimax;zeros(L,1);b1];
disp('b_int=');
disp(b_int);
intcon=1:1:(m+1)*L;
[xik,z]=
intlinprog(f,intcon,A,b_int,[],[],zeros((m+1)*L,1),Inf((m+1)*L
,1));
soml=0;
for i=1:m
    for k=1:L
        soml=soml+cik(i,k)*xik(i,k);
    end
end
end

```

```

som2=0;
for k=1:L
    som2=som2+a(k)*z(k);
end
Lmr_Ptotal= R_total-som1-som2;
disp('Lmr_Ptotal=');
disp(Nmr_Ptotal);
for i=1:m
    seat(i)=0;
    for k=1:L
        seat(i)=seat(i)+Cap(i,k)*xik(i,k);
    end
end
disp('seat=');
disp(seat);
deff= Nmr_ptotal-Lmr_ptotal;
end

```

- La fonction qu'on a rappelée :

```

function f=W_total(v)
global n p
mu=150;
sigma=10;
pd=makedist('Normal',mu,sigma);
int_1=zeros(1,n);
int_2=zeros(1,n);
for j=1:n
    fun1 = @(r) r.*pdf(pd,r);
    int_1(j)=integral(fun1,0,l(j)*s(j));
    disp(int_1);
    fun2 = @(r) l(j).*s(j).*pdf(pd,r);
    int_2(j)=integral(fun2,l(j)*s(j),Inf);
    disp(int_2);
end
f=sum(-p.*(int_1+int_2));

```

4.11 Résultat de programmation

Après avoir programmé les méthodes exposées dans le chapitre précédent, nous avons illustré nos résultats.

- Résultats de modèle non linéaire obtenus par algorithme génétique :

```
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

int_1=
  74.1432    0.0000

int_2=
   0    1.0000

W=
 -667.2896
  -8.0000

A=
  1  0  0  0
  1  1  0  0
  0  0  0  0

b=
  4385
  7708
  3731

ub=
  0  0  0  0

lb=
  1000    1000    1000    1000

Optimization terminated: average change in the fitness value less than options.FunctionTolerance.
la solution de modele non lineaire =
   0    0.8215    0    1.4329

Wtotal=
   0

Nmr_Ptotal
 -583
```

Figure 4.2 : Résultats par l'algorithme génétique

- Résultats obtenu par intlinprog :

```
Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

seat=
  4385
  7708
  3731

R=
  1.0e+03 *
  1.3500
  0.0080

revenue_0=
  1.0e+04 *
 -2.0567
 -6.8014
 -2.4759

R_total=
  1.3580e+03

cont1=
 -1  -1  -1  -1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
  0  0  0  0  -1 -1 -1 -1  0  0  0  0  0  0  0
  0  0  0  0  0  0  0  0  -1 -1 -1 -1  0  0  0

cont2=
  1  1  1  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
  0  0  0  0  1  1  1  1  0  0  0  0  0  0  0
  0  0  0  0  0  0  0  0  1  1  1  1  0  0  0
```

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

cont3=
 24   0   0   0   11   0   0   0   15   0   0   0  -24   0   0   0
  0  36   0   0   0   22   0   0   0   64   0   0   0  -63   0   0
  0   0  12   0   0   0   78   0   0   0   58   0   0   0  -12   0
  0   0   0  17   0   0   0  120   0   0   0   77   0   0   0  -11

cont4=
Columns 1 through 13
    600    560    1605     510     999    2295    1989    5400    3885     728    1435    2247     0

Columns 14 through 16
     0     0     0

A=
Columns 1 through 13
     6     7     5     3    12     8     9     7    31    41     6     7     1
    -1    -1    -1    -1     0     0     0     0     0     0     0     0     0
     0     0     0     0    -1    -1    -1    -1     0     0     0     0     0
     1     1     1     1     0     0     0     0     0     0    -1    -1     0
     0     0     0     0     1     1     1     1     0     0     0     0     0
     0     0     0     0     0     0     0     0     1     1     1     1     0
    24     0     0     0    11     0     0     0    15     0     0     0    -24
     0    36     0     0     0    22     0     0     0     64     0     0     0
     0     0    12     0     0     0    78     0     0     0     58     0     0
     0     0     0    17     0     0     0    120     0     0     0     77     0
    600    560    1605     510     999    2295    1989    5400    3885     728    1435    2247     0

```

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

Columns 14 through 16
     9     8     3
     0     0     0
     0     0     0
     0     0     0
     0     0     0
     0     0     0
     0     0     0
    -63     0     0
     0    -12     0
     0     0    -11
     0     0     0

b_int=
 1.0e+03 *
 1.3580
 -0.0020
 -0.0030
 -0.0040
 0.0960
 0.0550
 0.0320
 0
 0
 0
 0
 -1.3330

No feasible solution found.

Intlinprog stopped because no point satisfies the constraints.

```

Figure 4.3 : Résultats par intlinprog

Conclusion

Ce chapitre a été consacré essentiellement à la présentation de l'algorithme de la planification de la flotte que nous avons programmée, à l'aide du logiciel MATLAB, pour concrétiser notre application de travail.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études nous a permis d'être confronté pour la première fois à un problème du monde réel avec le savoir académique dont nous disposons. Hub-and-Spokes est un aéroport choisi et un réseau de connexion mis en place par des compagnies aériennes pour faire transiter une partie notable de leurs vols et assurer des correspondances rapides et garanties. Ce principe est apparu après la déréglementation acte en 1973 au U.S.A Des lors toutes les compagnies aériennes se sont converties a ce nouveau système.

Le but de mettre le Hub-and-Spokes comme système en plus de s'ouvrir au monde, réduit les pertes endossées par ses compagnie aérienne et offre de meilleure destination pour nos clients, les avions sont le bien le plus précieux que peut posséder une compagnie, chaque vol a un coût fixe, et chaque siège représente une partie du coût total de cette avion, avec l'ancien système les avions avaient l'habitude de partir à moitié plein, il est temps de cesser de perdre le l'argent et de rentabiliser ses vols.

Pour une bonne compréhension du sujet proposé, il a fallu maîtriser et comprendre des notions qui sont hors de notre domaine d'étude comme les termes et les données aéronautiques. A partir des différentes formules, nous avons essayé la planification de la flotte afin d'obtenir un résultat qui traduit la réalité.

Un modèle mathématique traduisant toutes les contraintes du problème, notre modèle est un problème d'optimisation non linéaire mixte en nombre entiers, pour le résoudre, nous avons utilisé une des méta-heuristiques (Algorithmes génétiques). L'implémentation de cette approche est réalisée par le langage MATLAB.

Enfin, nous avons élaboré un programme qui permet de déterminer la taille et la structure d'une flotte aérienne opérant un réseau en étoile « Hub-and-Spoke », que nous avons utilisés les travaux de Wang, Zhu et Hong.

Le travail que nous avons effectué, n'est qu'une parcelle de ce qui pourrait être fait a l'avenir dans le domaine de planification de la flotte de transport aérien.

Nous espérons que notre travail soit bénéfique et qu'il fasse l'objet de développement et de recherche plus approfondis.

Bibliographie

- [1] ADADA, D., & KHIDER, M. (23septembre2020). Modèle d'aide à la décision à l'exploitation du gaz. Mémoire Master. Spécialité: Recherche Opérationnelle.
- [2] Alderighi, M., Cento, A., Njikamp, P., & Rietveld, P. (s.d.). Network Competition: The coexistence of Hub_and_Spoke and Point_to_Point Systemes.
- [3] Belkhira, & Hicham, S. A. (Juin2010). Méta-heuristiques hybrides parallèles. Mémoire de magister.Université des Sciences et de la Technologie d'Oran,-Mohamed Boudiaf-USTO-MB.
- [4] Boumedienne, H. (2019,2020). les méta-heuristiques. Département de mathématique, université de Blida1.
- [5] Cook, G. N., & Goodwin, J. (2008). Airline Networks: A Comparaison of Hub_and_Spoke and Point_to_Point Systemes. Journal of Aviation/ Aerospace Education & Research , 17 (2).
- [6] DAAOU, M., & BENOUIS, K. (2015/2016). Mémoire de fin de cycle de master titré par: Etude de le mise en place du hub d'Air Algérie (Développement et perspective).
- [7] Derbala, A. (2009,2010). Optimisation combinatoire. Cours de master1.Département de mathématiques. Université de Blida1 .
- [8] GASSAM, C., & KOUACI, N. (2012). Mémoire de fin de cycle master titré par: Etude de mise en place d'un Hub à l'aéroport d'Alger Houari Boumediene. (U. Blida1, Éd.)
- [9] KAMAL-IDRISSI, A. (19 Octobre 2020). Thèse de Doctorat titré par: Optimisation du réseau aérien "analyse et sélection de voveaux marchés". (U. c. d'azur, Éd.)
- [10] Kuhul, A. s., & Charless, N. Optimisation modeling apartial approche.
- [11] Tadunfock Teti, B., & Fotso Laure, P. Heuristiques du problème de voyageur de commerce. Université de Yaoundé I-Caméroun.
- [12] Yu Wang, Jinfu Zhu, & Hong Sun. (2016, 09 28). a decomposition approach to determining fleet size and structure with network flow effects and demand uncertainty. advanced transportation , 1447-1469.

[13] Yuan, X., Zhang, S., Pibouleau, L., & Domenech, S. (1988). Une méthode d'optimisation non linéaire en variables mixtes pour la conception de procédés (Vol. 22). Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle.

[14] http://neos_guide.org/content/optimization-taxonomy

[15] <http://www.future-sciences.com/sciences/definitions/mathematiques-heuristique/>

[16] www.voyage.d.affaires.com

[17] www.merki_aviation.com