



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
Faculté des Sciences et Techniques
Fès



Rapport de Stage

Présenté en vue d'obtenir le diplôme de la LICENCE SCIENCE ET TECHNIQUE

SPECIALITE : Calcul Scientifique et Application

Elaboré par :

SEDDATI Lamiae

AUTOUR DE LA RESOLUTION DU CONFLIT AERIEN

Réalisé au sein de :

FACULTE SCIENCE ET TECHNIQUE FES

Encadré par :

EL KHAOULANI EL IDRISSI Rachid

Soutenu le 17 juin 2015 devant le jury composé de :

Pr. EL KHAOULANI EL IDRISSI Rachid (encadrant).

Pr. ETTEOUIL Mohammed (examineur).

Pr. CHAKIR Luqman (examineur).

Dédicaces

A

Mon cher père qui a été d'un soutien inimaginable et qui a comblé ma vie.

Ma très chère mère pour raisons du monde.

Ma petite famille.

Mes grands-parents.

Mes amours : Ismail et Azza.

Mme Ezzaki Fatima et Mme Ben aicha Khadija Grâce à vos compétences et conscience professionnelles toujours si efficaces, mon niveau d'instruction s'est amélioré ce qui me permettra d'aller plus loin et faire une bonne carrière dans l'avenir.

*Votre méthode d'inculquer les connaissances que vous possédez a eu pour moi des conséquences que je n'ose même pas espérer. Croyez-moi à la sincérité de mes affections. Encore une fois, je vous remercie infiniment de votre tendre sentiment qui jaillit toujours d'un cœur noble. Que dieu vous bénisse et vous protège
Un grand merci....*

Mon défunt le docteur ELFIKI IBRAHIM grâce à vous mes connaissances s'améliorent au jour le jour et d'une façon extrêmement satisfaisante et vous qui me rend aimer beaucoup la philosophie et la psychothérapie.

Une personne qui est toujours à mes côtés aux moments difficiles.

Tous ceux que j'aime.

Tous ceux-ci je dédie ce travail.

Seddati Lamiae.

Remerciements

*Un seul mot, mais qui brille comme une vieille pièce de monnaie :
MERCY !*

*Un peu plus qu'un seul mot pour remercier tout ceux qui m'ont permis de
mener à bien ce travail, directement, indirectement ou parfois même les
deux .*

*Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont rendu ce travail possible
par leur aide et leurs contributions.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude et présenter mes chaleureux
remerciements à :*



*Monsieur le professeur RACHID ELKHAOULANI, pour
avoir accepté de m'encadrer durant la période de mon stage, pour tout le
temps qu'il m'a octroyé et pour tous les conseils qu'il m'a prodigué, pour
son attention, sa compréhension et son encadrement de qualité, qu'il trouve
ici l'expression de ma profonde gratitude et mes respects les plus distingués.*



A messieurs les membres de jury composé de :
-Pr.ELKHAOULANIELIDRISSIRachid.
-Pr. ETTAOUIL Mohamed.
-Pr. CHAKIR Luqman.

*Qu'ils trouvent ici l'expression de mes reconnaissances pour avoir
accepté de juger mon travail.*

*A tous ceux qui, directement ou indirectement, ont aidé à la finalisation
de ce travail.*

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements	ii
Table des matières	iii&iv
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux et organigramme	vi
Introduction générale.....	Erreur ! Signet non défini.&2
CHAPITRE I. LA GESTION DU TRAFIC AERIEN.....	3
I.1 Introduction	3
I.2 Gestion du trafic aérien.....	3
I.2.1 Organisation de l'espace aérien	3
I.2.2 Tâche des contrôleur aériens	4
I.3 La planification.....	7
I.4 La sectorisation.....	8
I.5 Description d'un problème de conflits aériens.....	10
I.5.1 Définitions	10
I.5.1.1 Les types de conflits aériens	11
I.6 Conclusion.....	13
CHAPITRE II. L'OPTIMISATION COMBIANATOIRE.....	14
II.1 Introduction	14
II.2 Notion d'optimisation combinatoire.....	14
II.3 Les méthodes d'optimisation combinatoire.....	15
II.3.1 Les méthodes de résolution exactes.....	15
II.3.1.1 Méthode de séparation et évaluation	16
II.3.1.2 La programmation dynamique.....	18
II.3.2. Méthode de résolution approchées	18
II.3.2.1. Méthode de résolution heuristiques	19
II.3.2.2. Méthode de résolution méta-heuristiques	21
II.A. Méthodes à solution unique	22
II.A.a. Méthode de recuit simulé	22
II.A.b. Méthode de recherche tabou	24
II.B. Méthode à base de population.....	26
II.B.a. Les algorithmes génétiques	27
II.B.b. Les algorithmes de colonies de fourmis.....	34
II.4 Conclusion	38
CHAPITRE III. LA RESOLUTION DE CONFLIT AERIEN PAR COLONIES DE FOURMIS	39
III.1 Introduction	39
III.2 Description de problème.....	39
III.3 Modélisation de problème sous forme d'un graphe.....	41
III.4 L'adaptation d'algorithme de colonies de fourmis au conflit aérien.....	42

III.5 Description de l'algorithme	43
III.6 Conclusion	46
Conclusion générale	47
Bibliographie	48

Liste des figures

Figure 1 : Le contrôle de la circulation aérien.....	4
Figure 2 : Les trois catégories de contrôle lors des phases finale d'un aéronef	5
Figure 3 : Archétype de la « vie d'un vol».....	6
Figure 4 : Le découpage de l'espace aérien en secteurs de contrôle	9
Figure 5 : Norme de sécurité.....	10
Figure 6 : Avion en conflit	11
Figure 7 :Types de conflits aériens rencontrés dans le trafic en-route.....	12
Figure 8 : Les méthodes de recherche de solutions.....	15
Figure 9 : Evolution d'une solution dans la méthode de descente	19
Figure 10 : Les composantes de l'algorithme génétique.....	28
Figure 11: Fonction fitness.....	29
Figure 12 : Croisement en un point.....	31
Figure 13 :Croisement en deux point	31
Figure 14 :Représentation schématique d'une mutation dans le cas d'un codage binaire	32
Figure 15 : Origine biologique de Ant System.....	34
Figure 16 :Conflit entre deux avions.....	39
Figure 17 : Les états d'un avion	40
Figure 18 : Leschemins possibles d'un avion	41
Figure 19 : L'incrémentatation de score du chemin dans un graphe.....	43

Liste des tableaux

Tableau 1 – Les classes de l'espace aérien	4
--------------------------------------------------	---

Liste des organigrammes

Organigramme de la méthode de recuit simulé	23
Organigramme de la méthode de recherche tabou.....	25
Schéma générale de l'algorithme génétique.....	33

Introduction générale

Le trafic aérien est un secteur en forte croissance depuis plusieurs décennies, malgré les quelques crises qui l'ont impacté (virus SRAS en 2003, crise économique en 2008). Face à cette évolution, les services du contrôle ont apporté des solutions humaines et techniques afin d'assurer un niveau de sécurité toujours plus élevé.

Dans ce contexte, il est nécessaire, afin de permettre la croissance future du trafic aérien, de remettre en cause la structure de l'espace aérien ainsi que les types de contrôle et de régulation du trafic.

Le contrôle de la circulation aérienne organise les flux aériens, afin d'assurer la sécurité des vols et d'améliorer la capacité du réseau de routes sur lequel les avions se déplacent. Suivant la nature du trafic, on distingue les trois types de contrôle :

Contrôle d'aérodrome : gestion des phases de roulage, de décollage et d'atterrissage.

Contrôle d'approche : gestion du trafic en étape préparatoire à l'atterrissage ou post-décollage dans une zone proche d'un aérodrome.

Contrôle en route : il concerne essentiellement le trafic en croisière entre les aérodromes. Dans la suite de ce rapport, nous nous limiterons au trafic en route.

Actuellement, on enregistre sur le territoire marocain plus de 2000 mouvement par jour, ce qui représente une charge de contrôle impossible à gérer par un seul contrôleur. On répartit alors cette charge de travail en divisant l'espace aérien en plusieurs secteurs. On affecte à chaque secteur une équipe de contrôleurs, afin d'éviter la collision. Le découpage de l'espace en secteur rend le contrôleur capable à détecter et à résoudre le conflit aérien.

Ce document est organisé de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous présentons un certain nombre d'éléments et de notions relatifs au domaine de l'aviation (trafic aérien, conflit, cluster, norme de séparation, sectorisation,...). Dans un premier temps, on propose les différents modes de vols, les types d'espace, types de contrôleur et leurs tâches. Dans un deuxième temps, on s'intéresse au problème de conflit aérien, on commence tout d'abord par donner quelques définitions : le conflit, le conflit potentiel, types de conflits ..., pour résoudre ce conflit les contrôleurs disposent de trois types de

manœuvres d'évitement : Les manœuvres en altitude, les manœuvres en cap et les manœuvres en vitesse. Dans cette étude, on se limite aux manœuvres en cap.

Dans le deuxième chapitre, on décrit les algorithmes utilisés pour résoudre le conflit aérien. Les problèmes de résolution de conflits aériens font partie de la famille des problèmes NP-complets. Les difficultés de résolution par méthodes d'optimisation classiques conduisent souvent à résoudre ce problème par des méta-heuristiques évolutionnaires. En particulier, les algorithmes génétiques permettent de traiter des problèmes combinatoires de grande taille. Il existe une autre grande classe de méta-heuristiques évolutionnaires, proposée à la fin des années 80 par Moysen et Manderick, et à laquelle Dorigo a fortement contribué dans les années 90 pour la recherche de chemins optimaux dans un graphe. Cette méta-heuristique s'inspire du comportement des fourmis recherchant un chemin depuis la fourmilière vers la source de nourriture la plus proche.

Dans le troisième chapitre, on se focalise sur la résolution d'un conflit aérien frontal simplifié de deux avions. Il s'agit d'appliquer l'algorithme de colonies de fourmis afin de déterminer une manœuvre d'évitement optimale, c'est à dire une déviation conduisant à un allongement minimal de la trajectoire initiale de l'avion. L'utilisation de cette méta-heuristique, pour autant que le problème considéré soit relativement simple, se justifie par le fait que la résolution du conflit aérien en toute sa complexité (sans hypothèses simplificatrices) est hautement combinatoire et que les algorithmes déterministes ne fournissent pas une solution en un temps acceptable. Donc, au lieu d'aborder le problème du trafic aérien complexe avec un algorithme qui n'est pas facile à mettre en œuvre, on a choisi, dans le cadre de cette étude, de simplifier suffisamment le problème pour mieux appréhender les difficultés de la modélisation avec l'algorithme de colonies de fourmis ainsi qu'à son adaptation à ce problème d'optimisation combinatoire. La résolution du problème simplifié sera d'une aide précieuse pour la résolution du problème du conflit aérien complexe, et ce en procédant simultanément à l'élimination des hypothèses simplificatrices et à l'adaptation de l'algorithme au problème ainsi obtenu.

CHAPITRE 1 :

LA GESTION DU TRAFIC AERIEN

I.1 Introduction

Le trafic aérien connaît une progression très importante. Cette progression est le problème majeur auquel les contrôleurs aériens doivent faire face. Pour bien gérer le trafic aérien, le contrôleur doit parfaitement connaître comment l'espace aérien à organiser ? Les différentes tâches qu'il doit maîtriser à partir le dépôt du plan de vol jusqu'au l'atterrissage.

Le trafic aérien enregistre énormément de mouvement par jour, ce qui représente une charge de contrôle impossible à gérer par un seul contrôleur. Cela nous amène à répartir cette charge de travail en divisant l'espace aérien en plusieurs secteur pour chacun desquels on affecte une équipe de contrôleurs, afin d'éviter la collision. Le découpage de l'espace en secteur rend le contrôleur capable à détecter et à résoudre le conflit aérien selon les manœuvres d'évitements et les types de conflits.

I.2 Gestion du trafic aérien

La gestion du trafic aérien est un terme générique désignant le système global en charge d'assurer la sûreté et une bonne performance du trafic aérien. Cette gestion engage différentes problématiques allant de la circulation des avions sur le tarmac à la planification de trajectoires. Elle vise à assurer la sûreté du trafic et à prévenir toute collision entre les avions durant leur vol dans l'espace aérien.

La gestion du trafic aérien est un système complexe qui permet de gérer l'ensemble du trafic aérien en assurant une bonne régulation de ce dernier, tout en respectant un grand nombre de normes de sécurité.

I.2.1 Organisation de l'espace aérien

1) Les modes de vol :

Les avions qui souhaitent traverser l'espace aérien d'un pays doivent obligatoirement respecter un des deux modes de vol suivants :

Le vol à vue (VFR) : est le plus libre, il se base sur le principe «voir et éviter».

Le vol aux instruments (IFR) : repose quant à lui sur les équipements de radionavigation de l'avion.

2) Les types d'espaces :

On distingue principalement deux types d'espace :

Les espaces aériens contrôlés : Pour ce type la séparation entre avions est assurée par un organisme de contrôle.

Les espaces aériens non contrôlés : pour lesquels seuls des services d'information et d'alerte sont fournis.

D'après l'organisation d'aviation civile internationale (OACI) chaque type d'espace contient un certain nombre de classes. Ces classes sont résumées dans le tableau suivant :

		Espace		Contact radio obligatoire	
		IFR-IFR	IFR-VFR		VFR-VFR
Contrôlés	Classe A	Oui	VFR non autorisé		Oui
	Classe B		Oui		
	Classe C		Oui	Non	
Non contrôlés	Classe D et E		Non		Non
	Classe F et G		Non		

Tableau 1 : les classes de l'espace aérien.

I.2.2 Tâches des contrôleurs aériens

1) Les types de contrôle :

Les types de contrôle varient selon la phase du vol, car les vitesses d'évaluation et les manœuvres possibles sont différentes. On distingue trois types de contrôle :

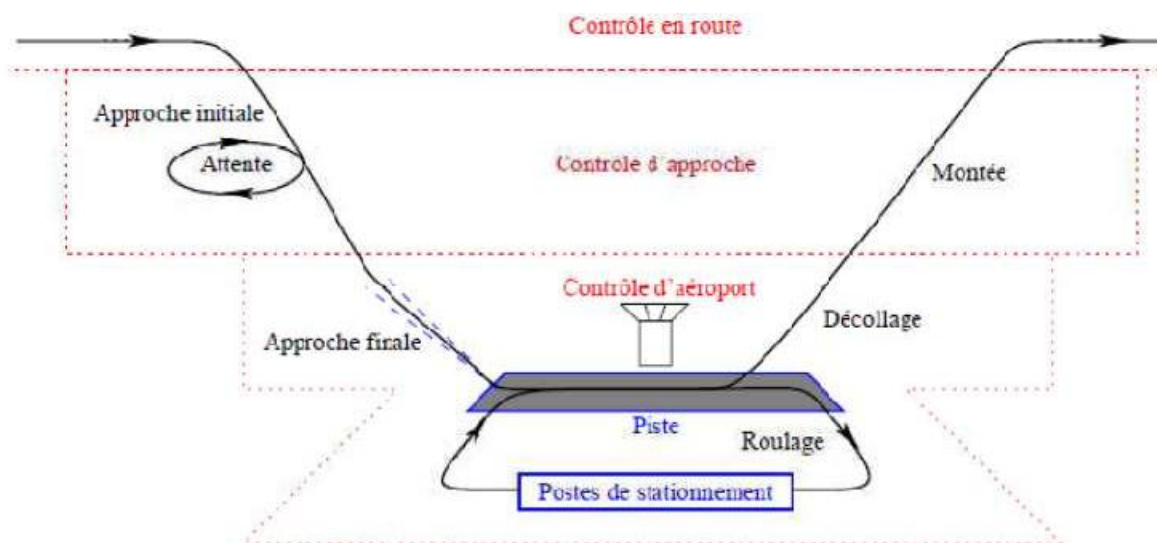


Figure1: contrôle de la circulation aérien.

Contrôle d'aérodrome : a la charge d'une zone restreinte autour de l'aérodrome. Ce type de contrôle concerne la gestion des pistes au décollage comme à l'atterrissage ainsi que la circulation des avions entre la piste et la zone de parking.

Contrôle d'approche : gère les phases de montée et de descente des vols. Les difficultés associées à ce contrôle résident dans une densité relativement élevée du trafic autour des aérodromes et dans le fait que les avions volent avec une vitesse réduite dans cette zone. Cela nécessite des procédures de contrôles très précises. D'autant plus que d'autres facteurs influencent la détermination des procédures à suivre, notamment les conditions météorologiques (le vent, la vision ...).

Contrôle en-route : gère la phase de croisière. Les procédures de ce contrôle doivent prendre en considération la vitesse élevée des avions. La détection d'un conflit potentiel doit être faite le plus tôt possible et éventuellement des manœuvres d'évitement doivent être proposées. Les manœuvres d'évitement consistent à proposer une modification des trajectoires initiales des avions en conflit potentiel. Il en résulte des allongements des trajectoires, qui doivent être les plus courts possibles.

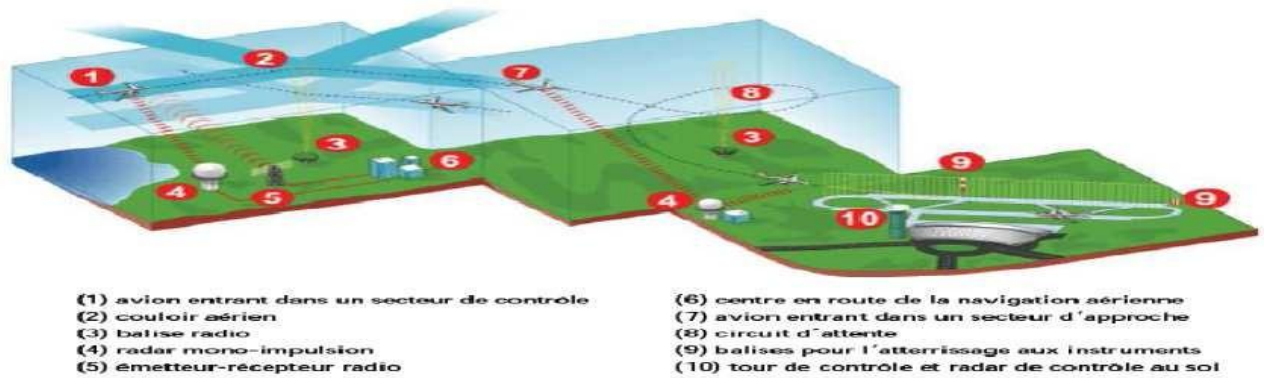


Figure 2: représente les trois catégories de contrôle lors des phases finales d'un aéronef.

2) Archétype de la « vie d'un vol » :

Afin de mieux appréhender la façon dont s'effectue la mise en relation entre pilotes et contrôleurs ainsi que les différentes phases de vol, nous proposons ici de procéder à la chronologie d'un vol type tel que prescrit par la réglementation. Le schéma ci-dessous illustre le déroulement d'un vol en partant du moment du dépôt du plan de vol jusqu'à l'atterrissage de l'avion.

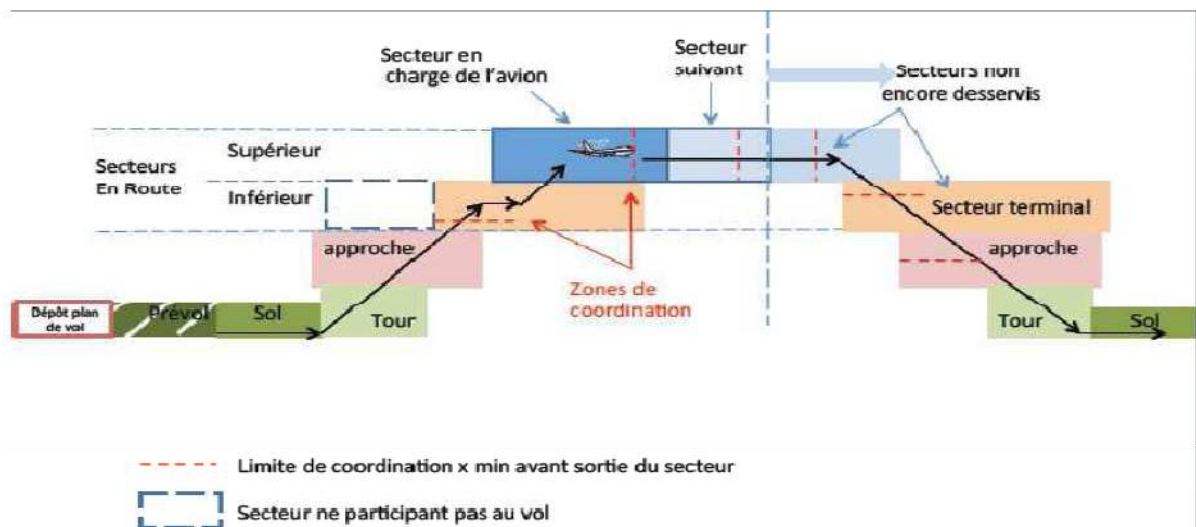


Figure3 : archétype de la « vie en vol ».

1ère étape : le dépôt du plan de vol

Un plan de vol doit être déposé par le pilote auprès des services de la circulation aérienne. Ce plan de vol contient les renseignements sur les caractéristiques de l'appareil, le type de vol et la trajectoire prévue...

2ème étape : la phase d'activation du vol

La phase d'activation du plan de vol s'effectue par le « contrôle d'aéroport ». Une subdivision des tâches au sein du contrôle d'aéroport est effectuée entre : le « pré-vol », le « sol » et le « local ».

3ème étape : la phase de montée

Pendant la montée, le pilote contacte le contrôleur d'approche afin de prendre les instructions de montée.

4ème étape : la phase de croisière

Le contrôleur d'approche transfère ensuite l'avion au secteur « terminal » où les avions prennent de la vitesse. Ensuite, l'avion sera transféré au secteur « en route » pour sa phase de croisière. Durant cette phase, le pilote devra effectuer des reports de positions.

5ème étape : phase de descente et d'atterrissage

Durant la phase de descente, le pilote devra effectuer les mêmes actions que celles effectuées pour sa phase de montée mais en sens inverse.

L'objectif des organismes chargés de gérer la circulation aérienne est d'assurer la sûreté et l'efficacité de l'écoulement du trafic aérien. La gestion du trafic aérien est souvent décrite comme une imbrication de filtres dont le but est d'éviter la collision des avions circulant dans l'espace aérien, cela nous amène à parler sur la planification.

I.3 La planification

Le trafic est organisé à différents horizons temporels ou filtres de planification du trafic. L'ensemble de ces filtres génère les plans de vol et en assure le suivi. La planification de trajectoire est structurée suivant trois étapes principales :

La planification stratégique : cette planification est effectuée avant le décollage des avions, elle consiste à construire l'ensemble des trajectoires d'une journée de trafic à l'échelle d'un pays.

La planification pré-tactique : une fois que l'avion est décollé, on doit mettre à jour le résultat de la planification stratégique en fonction des nouvelles informations disponibles.

La planification tactique : représente l'action du contrôleur sur son secteur.

La planification du vol est déterminée suivant plusieurs critères. Ces critères, qui forment les paramètres d'une fonction coût à optimiser, dépendent des préférences de l'utilisateur telles que les niveaux de vol, les routes aériens empruntées, les conditions météorologiques. L'optimisation de la fonction se fait généralement par rapport à la consommation du carburant et/ou la durée du vol. De façon plus spécifique, la planification délivre les consignes pour tout le vol.

I.4 La sectorisation

L'espace aérien civil est découpé en entités fonctionnelles (secteur), ce qui permet de répartir la charge de travail en plaçant chacun de ses secteurs sous la responsabilité d'une unité de contrôle d'espace. Cette dernière est chargée, entre autres, de régler les conflits de trajectoire entre les avions qui suivent des routes traversant le secteur, ou le groupe de secteurs, à sa charge.

L'espace aérien est découpé en plusieurs centres de contrôle délimités géographiquement, ces centres sont divisés en secteurs qui seront alors chacun sous la charge de deux contrôleurs :

Le contrôleur organique : qui a une relation avec les autres contrôleurs est chargé d'organiser le trafic du secteur à moyen terme, c'est-à-dire fournir les informations importants du vol lors de la sortie (resp.de l'entrée) du secteur.

Le contrôleur radar ou tactique : qui est une relation directe avec le pilote et s'assure de la sécurité des vols, c'est-à-dire respecte la norme de séparation.

I.4.1 Centres de contrôle

La gestion des secteurs de contrôle est répartie entre plusieurs centres de contrôle, qui ont pour mission de définir les secteurs de contrôle ouverts et d'affecter des contrôleurs à la gestion de chacun de ces secteurs.

La figure 4 montre un exemple de découpage de l'espace aérien en secteurs de contrôle.

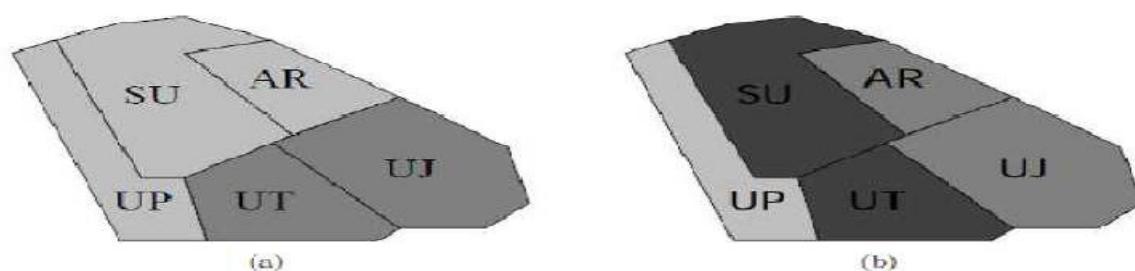


Figure4 : le découpage de l'espace aérien en secteurs de contrôle.

Opérations de regroupement/dégroupement de secteurs : chaque intensité de gris représente un secteur de contrôle. La configuration (a) est adaptée à des flux est-ouest tandis que la configuration (b) est adaptée à des flux nord-sud.

À chaque secteur de contrôle est associée une certaine capacité qui ne doit jamais être dépassée et qui est attribuée par le centre de contrôle en charge du secteur.

Définition (Capacité) : La capacité d'un secteur de contrôle est définie en Europe comme le nombre maximum d'avions entrant en une heure.

La capacité d'un secteur de contrôle est définie en fonction d'un certain nombre de critères empiriques, parmi lesquels :

- la taille du secteur ;
- la nature des flux, un flux d'avions évolutifs (en montée ou en descente) est plus difficile à contrôler qu'un flux stable ;
- le nombre d'intersections de flux ;
- la présence de zones militaires ;
- l'expérience du trafic passé.

Dans la plupart des projets cherchant à augmenter la capacité du réseau du trafic aérien, que ce soit en modifiant le système ou en optimisant l'utilisation du système. Il faut alors une méthode de sectorisation globale de ce réseau de telle façon que la charge de travail des contrôleurs soit équilibrée entre les secteurs et que la charge de travail globale soit minimisée.

Dans le cadre opérationnel actuel, la détection, et surtout la résolution des conflits ne sont pas automatisées. C'est pour cela les contrôleurs doivent maîtriser des mécanismes pour éviter le conflit, en jouant sur la trajectoire des avions.

I.5 Description d'un problème de conflits aériens

Le but principale du Contrôle du Trafic Aérien (ATC) est d'assurer la séparation entre les aéronefs afin d'éviter les abordages en l'air ou au sol. Dans un deuxième temps le contrôle du trafic aérien doit gérer efficacement le trafic afin de limiter la congestion et les retards pour prévenir les conflits aérien.

Afin d'éviter les collisions entre les avions, il existe des espacements de sécurité à respecter. Ainsi, deux avions doivent être séparés verticalement de 1000 pieds, ce qui correspond à la distance entre deux niveaux de vol. S'ils ne le sont pas, une séparation horizontale de 5NM est nécessaire en cas de vols IFR. Lorsque les deux avions ne respectent pas ces distances de sécurité, on dit qu'ils sont en conflit.

Avec : 1NM= 1852m et 1ft= 30,48cm.

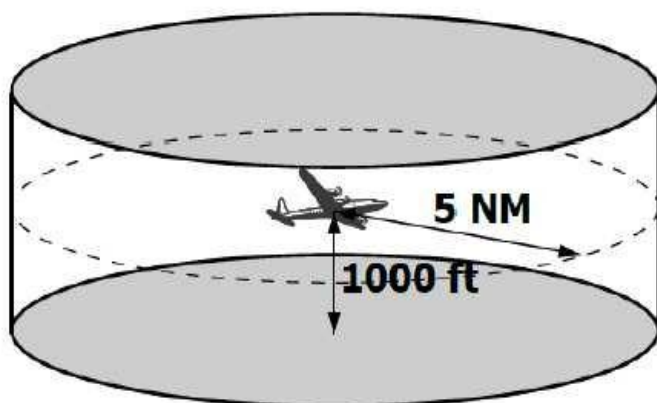


Figure 5 : norme de sécurité.

On parle souvent de quelques termes comme « conflit », « cluster »... que représentent ces termes au domaine aéronautique?

I.5.1 Définitions :

Conflit : deux aéronefs sont en conflit sur un intervalle de temps lorsque la séparation entre leurs trajectoires de référence n'est pas maintenue à chaque instant de l'intervalle.

Conflit potentiel : Pour une fenêtre temporelle de prévision de trajectoire donnée, on appelle conflit potentiel entre deux avions tout conflit détecté pendant la durée de la prévision, et c'en tenant compte des incertitudes sur les trajectoires.

Trajectoire de référence : la trajectoire de référence d'un aéronef est la trajectoire qu'il est prévu qu'il suive lorsque la présence d'autres aéronefs n'est pas prise en compte.

Cluster : un cluster d'avions est une fermeture transitive d'avions en conflits potentiels. Si l'avion A est en conflit potentiel avec l'avion B et si l'avion B est en conflit potentiel avec les avions C et D, alors on dit que les avions A, B, C et D appartiennent au même cluster.

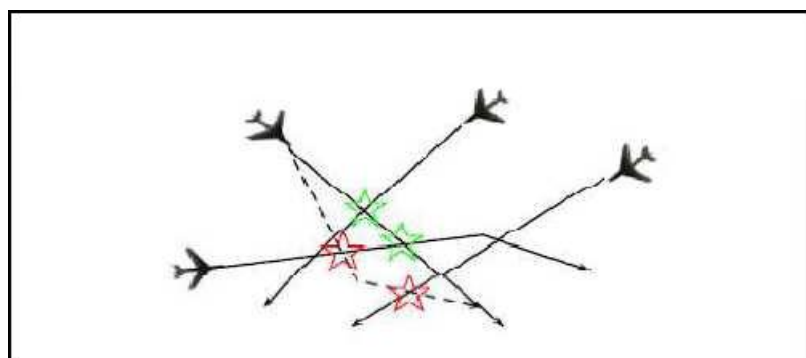


Figure6 : avion en conflit

La résolution des conflits aériens est un cas particulier de planification de trajectoire de mobiles multiples avec évitement de collision, Pour résoudre un conflit les contrôleurs disposent de trois types de manœuvres d'évitement :

Les manœuvres en altitude : sont demandées aux aéronefs en descente ou en montée.

Les manœuvres en cap : l'aéronef reçoit l'instruction de modifier sa donnée, afin d'éviter le conflit.

Les manœuvres en vitesse : consiste à modifier la vitesse d'un aéronef, en général, à le ralentir car les marges laisser à l'accélération sont faibles pour les vols en route.

I.5.2 Les types de conflits aériens

On a quatre types de conflits :

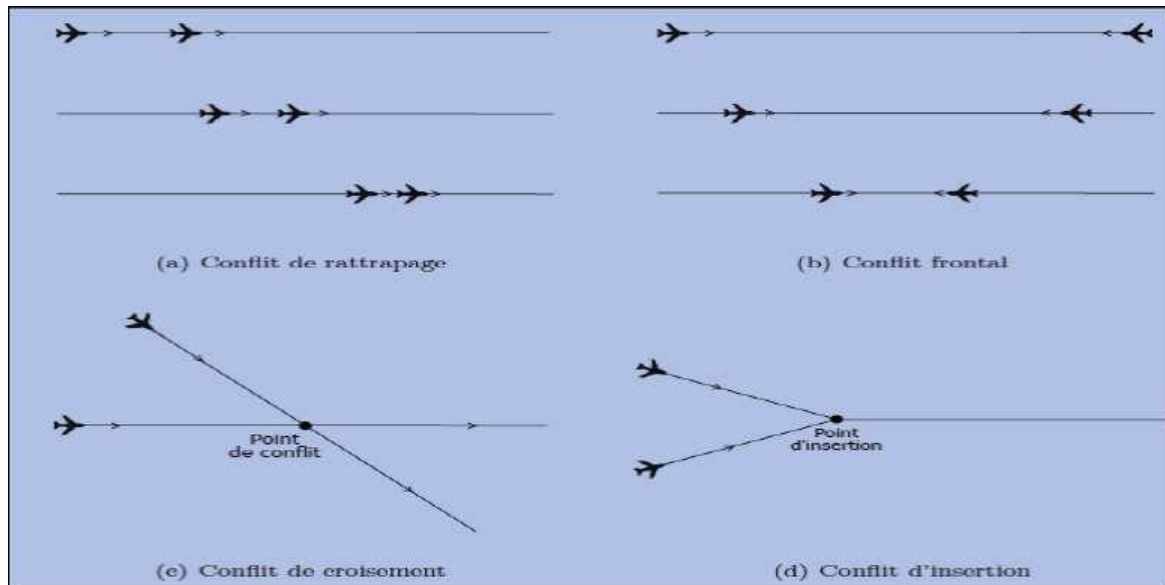


FIGURE 7 : types de conflits aériens rencontrés dans le trafic en route.

Conflit de croisement : Si $\theta = 0$ et θ est le nœud associé au point de conflit correspondant, alors θ sont en conflit de croisement et ce conflit potentiel est désigné par le triplet (θ, θ, θ) l'ensemble de ces triplets est noté \mathcal{C} .

Conflit de rattrapage : Si $\theta = 0, 2$, θ sont en conflit de rattrapage pour tout nœud θ parcouru par θ , le triplet (θ, θ, θ) désigne un conflit potentiel, l'ensemble de ces triplets est noté \mathcal{C} , l'ensemble de ces triplets est noté \mathcal{C} .

Conflit frontal : Si $\theta = 2$, et θ est le nœud associé au point de conflit correspondant, alors θ sont en conflit frontal et ce conflit potentiel est désigné par le triplet (θ, θ, θ) l'ensemble de ces triplets est noté \mathcal{C} .

I.6 Conclusion

Le trafic aéroportuaire est constitué des différents appareils utilisant les voies de circulation et les pistes de l'aéroport. L'importance du trafic aérien engendre une grande complexité du trafic sur l'aéroport.

Dans le ciel cohabitent plusieurs types d'aéronefs : des avions de tourisme, de lignes, des appareils militaires, des appareils en essais ou encore des appareils utilisés pour des activités sportives telles que le vol à voile, l'aéromodélisme, etc. Les avions ne peuvent pas voler sans respecter certaines règles, et sont soumis un contrôle afin d'assurer une sécurité absolue.

Cet espace est divisé en un certain nombre de secteurs, chacun étant sous la responsabilité d'une équipe de contrôleurs. Ces contrôleurs sont chargés du suivi du bon déroulement des vols dans leur secteur, de la détection de conflits potentiels entre avions, de la résolution des conflits et de la coordination avec les secteurs adjacents.

CHAPITRE 2 :

OPTIMISATION COMBINATOIRE

II.1 Introduction

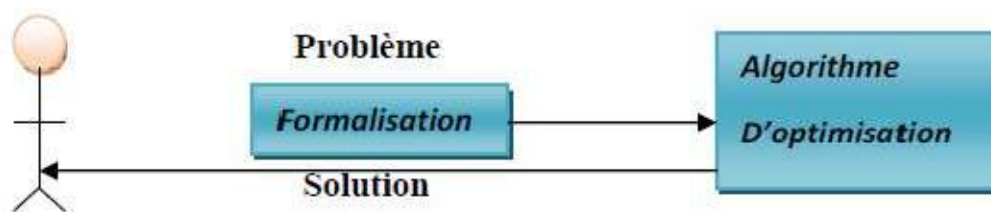
L'optimisation combinatoire occupe une place très importante en recherche opérationnelle, en mathématiques discrètes et en informatique. Son importance se justifie d'une part par la grande difficulté des problèmes d'optimisations et d'autre part par de nombreuses applications pratiques, les problèmes d'optimisation combinatoires souvent faciles à définir mais généralement difficiles à résoudre.

Dans ce chapitre on va donner quelques définitions des notions de l'optimisation combinatoire et présenter les différentes méthodes de résolution des problèmes d'optimisation.

II.2 Notion d'optimisation combinatoire

Avant d'aborder les différentes méthodes de résolution des problèmes d'optimisation combinatoires, nous introduisons quelques notions :

« Optimisation » ou « programmation mathématique » : sont des termes utilisés pour recouvrir toutes les méthodes qui servent à déterminer l'optimum d'une fonction avec ou sans contraintes, autrement dit, Optimisation = modélisation + résolution



« Combinatoire » : désigne la discipline des mathématiques concernée par les structures finies.

« Optimisation combinatoire » : consiste à trouver le meilleur choix entre un nombre fini de choix, c'est-à-dire, minimiser une fonction avec ou sans contraintes sur un ensemble fini.

II.2.1 Exemple :

Exemple des problèmes d'optimisation combinatoire est :

- 1- Plus court chemin.
- 2- Voyageur de commerce.
- 3- Réseaux de transports.
- 4- méthode de coloration de graphe.

II.3 Les méthodes d'optimisation combinatoire

Les méthodes d'optimisation combinatoire sont très nombreuses. Il existe plusieurs classifications possibles, la plus évidente est celle qui divise les méthodes en deux catégories : les méthodes exactes, et les méthodes approchées. Ces deux classes d'algorithmes de résolution des problèmes d'optimisation combinatoire sont décrites dans la figure suivante :

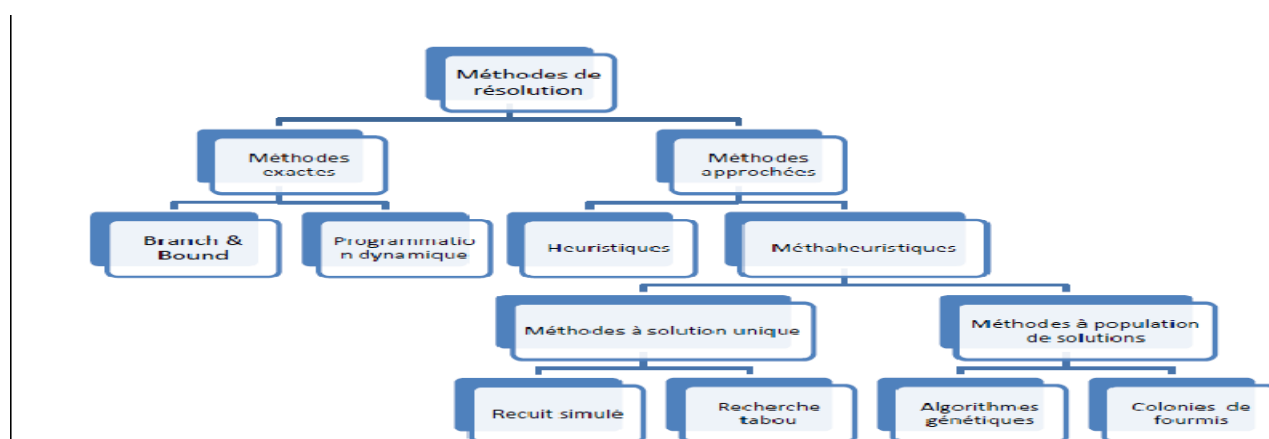


Figure 8 : Les méthodes de recherche de solutions.

On va présenter tout d'abord quelques méthodes de la classe des algorithmes complets ou exactes.

II.3.1 Les méthodes de résolution exactes

Les méthodes exactes donnent une garantie de trouver la solution optimale pour une instance de taille finie dans un temps limité et de trouver son optimalité, comme le temps de calcul nécessaire pour trouver une solution risque d'augmenter exponentiellement avec la taille du problème, les méthodes peuvent rencontrer des difficultés face aux applications concrètes.

Le principe essentiel d'une méthode exacte consiste généralement à énumérer, souvent de manière implicite, l'ensemble des solutions de l'espace de recherche ou l'ensemble des solutions réalisables possibles.

II.3.1.1 La méthode de séparation et évaluation

1)- Le principe de la méthode B&B :

Cette méthode largement utilisée par les chercheurs pour résoudre plusieurs problèmes d'optimisation combinatoires, en particulier les problèmes en nombres entiers. L'algorithme de séparation et évaluation (B&B) repose sur une méthode arborescente de recherche d'une solution optimale par séparations et évaluations, le B&B est basé sur trois axes principaux :

L'évaluation.

La séparation.

La stratégie de parcours.

A- L'évaluation :

L'évaluation permet de réduire l'espace de recherche en éliminant quelques sous-ensembles qui ne contiennent pas la solution optimale. Le B&B utilise une élimination de branches dans l'arborescence de recherche de la manière suivante : La recherche d'une solution de coût minimal consiste à mémoriser la solution de plus bas coût rencontré pendant l'exploration et à comparer le coût de chaque nœud parcouru à celui de la meilleure solution. Si le coût du nœud considéré est supérieur au meilleur coût, on arrête l'exploration de la branche et toutes les solutions de cette branche seront nécessairement de coût plus élevé que la meilleure solution déjà trouvée.

B- La séparation :

La séparation consiste à diviser le problème en sous-problèmes. Ainsi, en résolvant tous les sous-problèmes et en gardant la meilleure solution trouvée. Cette méthode s'appuie la construction d'un arbre permettant énumérer toutes les solutions.

C- La stratégie de parcours :

La largeur d'abord : Cette stratégie favorise les sommets les plus proches de la racine en faisant moins de séparations du problème initial. Elle est moins efficace que les deux autres stratégies présentées.

La profondeur d'abord : Cette stratégie avantage les sommets les plus éloignés de la racine (de profondeur la plus élevée) en appliquant plus de séparations au problème initial. Cette voie mène rapidement à une solution optimale en économisant la mémoire.

Le meilleur d'abord : Cette stratégie consiste à explorer des sous-problèmes possédant la meilleure borne. Elle permet aussi d'éviter l'exploration de tous les sous-problèmes qui possèdent une mauvaise évaluation par rapport à la valeur optimale.

2)- Algorithme de Branch and Bound:

Prenons le problème linéaire en nombre entiers (PLE) et le problème linéaire continu correspondant (PLC) :

$$\begin{array}{l} \text{PLE} \quad \text{Min } z \cdot x \\ \quad \quad x \in F \\ \quad \quad x \text{ entier} \end{array} \quad \text{et} \quad \begin{array}{l} \text{PLC} \quad \text{Min } z \cdot x \\ \quad \quad \text{sujet à} \\ \quad \quad x \in F \end{array}$$

Avec F est le domaine réalisable de la fonction objective et $z \cdot x$ est la fonction objective. Alors l'algorithme est le suivant :

Initialisation: Au départ, la liste contient un seul problème candidat (PLE).

Résoudre le (PLC) associé.

Si cette solution est réalisable pour (PLE), alors la procédure s'arrête, et cette solution est optimale pour le (PLE).

Sinon, identifier une borne supérieure z_u de la fonction économique de (PLE).

1. Séparation :

Choisir l'une des composantes non-entières x_i de la solution du problème combinatoire (PC). Partitionner le sous-ensemble en deux sous-ensembles en ajoutant l'une des contraintes :

$x_i \leq x_i^*$ ou $x_i \geq x_i^* + 1$, nous plaçons les deux nouveaux sous-problèmes dans la liste.

2. Tests et Choix du Problème Combinatoire (PC) :

Si la liste est vide, alors nous arrêtons la procédure.

Si au moins une solution réalisable de (P) a été rencontrée, alors nous concluons que le problème (P) est non réalisable.

Sinon, choisir un (PC) dans la liste et considérer le Problème Combinatoire Continue (PCR), le problème candidat relaxé des contraintes d'intégrité.

3. Evaluation : déterminer une borne inférieure z_s de la fonction économique du (PCR).

4. Stérilisation :

a) Si le (PCR) n'est pas réalisable alors retourner en 2.

b) Sinon, si $z_5 \leq z_6$, alors retourner en 2.

c) Sinon ($z_5 > z_6$), si z_5 est atteinte en un point entier réalisable. Poser $z_5 = z_6$ et retourner en 2.

Dans chacun de ces trois cas on dira que le (PC) est stérilisé.

5. Test : Retourner en 1.

Remarque 1:

Pour effectuer un choix, il faut avoir un des critères suivants :

Choix arbitraire : consiste à choisir arbitrairement l'une des composantes non entières comme variable de séparation.

Critère du plus petit indice : ce critère consiste à choisir comme variable de séparation celle, parmi les variables ayant une valeur non entière, ayant le plus petit indice.

Critère de la variable la plus distante : ce critère consiste à choisir parmi les variables ayant une valeur non entière celle dont la valeur s'écarte le plus de l'entier le plus près.

Critère du meilleur c_j : ce critère consiste à choisir comme variable de séparation celle dont le coefficient dans la fonction objectif est le moins élevé pour un problème de minimisation et le plus élevé pour un problème de maximisation.

II.3.1.2 La programmation dynamique :

La programmation dynamique est une méthode d'optimisation opérant par phases dont l'efficacité repose sur le principe d'optimalité de Bellman: "toute politique optimale est composée de sous politiques optimales". Cette unité met l'accent sur la diversité des domaines et des problèmes d'apparence très éloignés qui, lorsqu'ils sont correctement modélisés, relèvent de la même technique. Elle permet de mettre en pratique sur des problèmes de traitement du signal, de contrôle et d'informatique...etc.

La programmation dynamique est une méthode d'énumération basée sur le principe de dominance de solutions.

II.3.2 Les méthodes de résolution approchées :

Les méthodes approchées ont comme principe d'effectuer des recherches guidées à l'intérieur de l'espace de recherche afin de caractériser rapidement les solutions de bonne qualité. Ces méthodes fournissent des solutions qui ne sont pas forcément optimales, mais leur efficacité n'est pas très sensible à la taille du problème.

II.3.2.1 Méthodes de résolution heuristiques :

En optimisation combinatoire, une heuristique est un algorithme approché qui permet d'identifier en temps polynomial au moins une solution réalisable rapide, pas obligatoirement optimale. L'usage d'une heuristique est efficace pour calculer une solution approchée d'un problème et ainsi accélérer le processus de résolution exacte.

Méthode de trajectoire :

Les méthodes de recherche locale passent d'une solution à une autre dans l'espace des solutions candidates (l'espace de recherche) qu'on note S , jusqu'à ce qu'une solution considérée comme optimale soit trouvée ou que le temps imparti soit dépassé. La méthode de recherche locale la plus élémentaire est la méthode de descente.

1)- Méthode de descente :

Le principe de la méthode de descente consiste, à partir d'une solution s , on choisit une solution s' qui appartient au voisinage de s , telle que s' améliore la recherche. La méthode de descente recherche du meilleur voisin jusqu'au moment où aucune amélioration n'est possible.

L'inconvénient majeur de la méthode de descente est son arrêt au premier minimum local rencontré. Pour améliorer les résultats, on peut lancer plusieurs fois l'algorithme en partant d'un jeu de solutions initiales différentes, mais la performance de cette technique décroît rapidement.

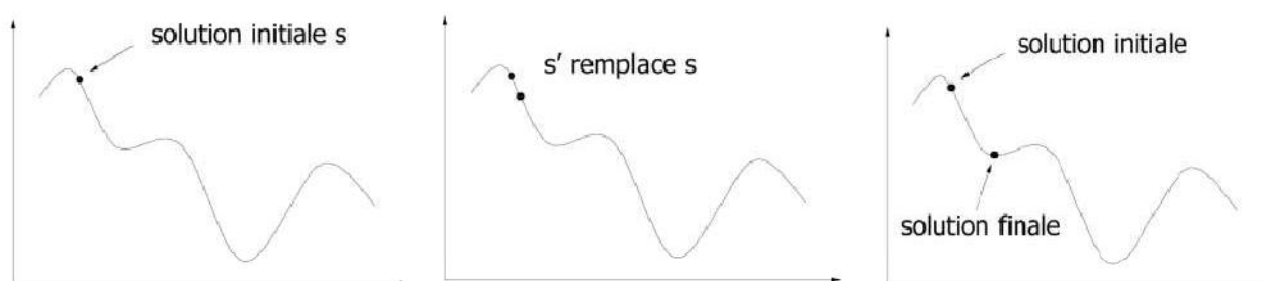


Figure 9 : Evolution d'une solution dans la méthode de descente.

II.3.2.1 Méthodes de résolution méta-heuristiques

Une méta-heuristique est une heuristique généraliste, pouvant s'appliquer à plusieurs problèmes d'optimisation. Les méta-heuristiques :

Sont en général stochastiques.

Inspirées par une analogie avec d'autres sciences (physique, biologie,...).

Visent à résoudre une large classe de problèmes d'optimisation.

Contiennent des mécanismes permettant d'éviter d'être bloqué dans des régions de l'espace de recherche. Ces mécanismes sont : Intensification, Diversification, Apprentissage.

Définitions :

Intensification : L'intensification ou l'exploitation se fonde sur l'idée d'apprentissage de propriétés favorables. Les propriétés communes souvent rencontrées dans les meilleures configurations visitées sont mémorisées au cours de la recherche, puis favorisées pendant la période d'intensification.

Diversification : La diversification ou l'exploration a un objectif inverse de l'intensification, elle cherche à diriger la recherche vers des zones inexplorées, il s'agit de choisir où et quand injecter de l'aléatoire dans la procédure de résolution.

Apprentissage : La mémoire est le support de l'apprentissage, qui permet à l'algorithme de ne tenir compte que des zones où l'optimum global est susceptible de se trouver.

Parmi les méthodes de résolution approchées méta-heuristique, on distingue deux classes : celles se basant sur une solution unique et celles faisant évoluer une population de solutions.

II.A. Les méthodes à solution unique :

Les méthodes approchées à solution unique sont généralement basées sur un algorithme de recherche de voisinage, qui commence avec une solution initiale, puis l'améliore pas à pas en choisissant une nouvelle solution de son voisinage. Les plus classiques sont : le recuit simulé et la recherche tabou.

II.A.a Le recuit simulé :

Introduction :

Le recuit simulé a été introduit par KIKPATRIK en 1983 et CERNY en 1985. Inspirée du processus de recuit physique, ce processus utilisé en métallurgie pour améliorer la qualité d'un

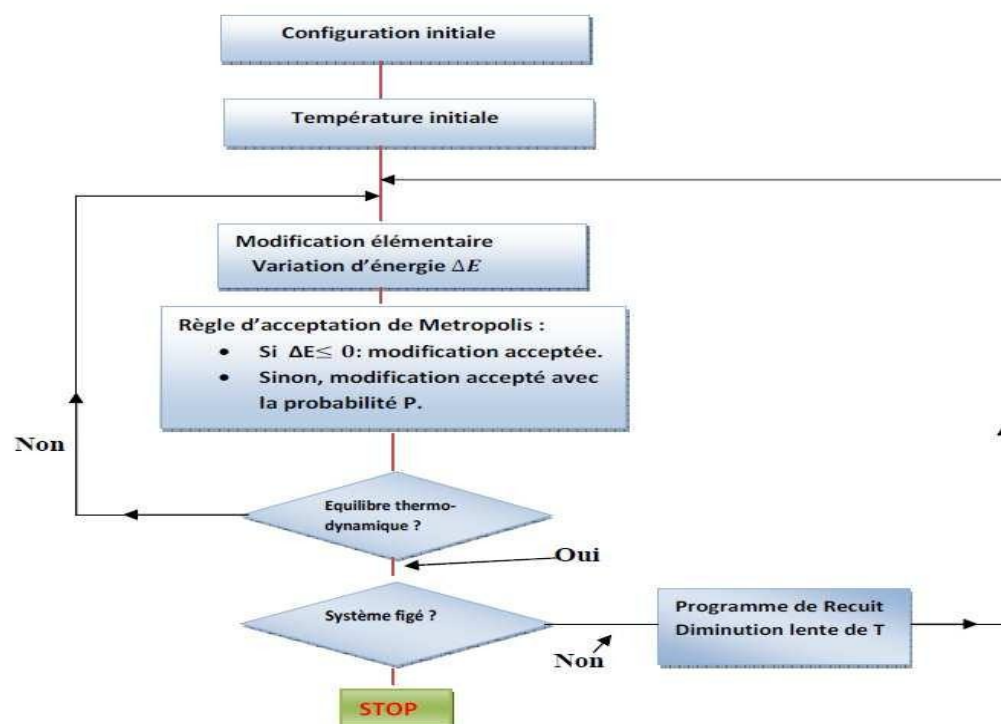
solide en cherchant un état d'énergie minimale, qui correspond à une structure stable ou bien ordonnée du solide.

Le principe du recuit simulé :

Le principe du recuit simulé est de parcourir de manière itérative l'espace des solutions, soit s_0 la solution initialement générée de manière aléatoire, dont correspondent une énergie initiale E_0 et une température initiale T_0 généralement élevée, ce choix est dépend de la qualité de la solution initiale s_0 . A chaque itération de l'algorithme conduit à un changement de la solution, ce changement fait varier l'énergie du système ΔE avec une probabilité P ($\Delta E, T$ calculé suivant la distribution de Boltzmann).

L'algorithme du recuit simulé part d'une solution donnée, et la modifie itérativement jusqu'au refroidissement du Système. Les solutions trouvées peuvent améliorer le critère que l'on cherche à optimiser, on dit alors qu'on a fait baisser l'énergie du système, comme elles peuvent le dégrader. Si on accepte une solution qui améliore le critère, on tend ainsi à chercher l'optimum dans le voisinage de la solution de départ.

L'organigramme de la méthode de recuit simulé :



Le pseudo code de la méthode de recuit simulé :

- 1- Donner une solution initiale s_0 de $S : S \leftarrow s_0$
- 2- Initialiser la température T en fonction de refroidissement
- 3- Répéter
- 4- Engendrer un voisin aléatoire s' de s
- 5- Calculer $\Delta E = f(s') - f(s)$
- 6- **Si** $\Delta E \leq 0$ Alors $s \leftarrow s'$
- 7- **Sinon** accepter s' comme nouvelle solution avec la probabilité :
$$P(E, T) = e^{-\frac{\Delta E}{T}}$$
- 8- **Fin si**
- 9- Mettre T à jour en fonction du schéma de refroidissement
- 10- Jusqu'à la condition d'arrêt
- 11- Retourner la meilleure configuration trouvée.

Le choix de la température est primordial pour garantir l'équilibre entre l'intensification et la diversification des solutions dans l'espace de recherche. Premièrement, le choix de la température initiale dépend de la qualité de la solution de départ. Si cette solution est choisie aléatoirement, il faut prendre une température relativement élevée.

On utilise souvent la règle suivante : $T_{k+1} = T_k - \alpha$ où $\alpha \in]0,1[$, un paramètre qui exprime la diminution de la température de l'itération k à $k + 1$.

La décroissance de la température peut également être réalisée par paliers (en d'autres termes, elle ne change qu'après un certain nombre d'itérations). Certains préconisent l'utilisation de stratégies non monotones. On peut ainsi rehausser la température lorsque la recherche semble bloquée dans une région de l'espace de recherche. On peut alors considérer une grande augmentation de la température comme un processus de diversification alors que la décroissance de la température correspond à un processus d'intensification.

Avantage :

La méthode du recuit simulé a l'avantage d'être souple vis-à-vis des évolutions du problème et facile à implémenter.

Excellents résultats pour un nombre de problèmes complexes.

Inconvénients :

Nombreux tests nécessaires pour trouver les bons paramètres.

II.A.b La recherche Tabou :

Introduction :

La méthode taboue est introduite par Glover en 1986. Cette méthode fait appel à un ensemble de règles et de mécanismes généraux pour guider la recherche de manière intelligente au travers de l'espace des solutions. La principale particularité de la méthode Tabou tient dans la mise en œuvre de mécanisme inspiré de la mémoire humaine.

Le principe de la recherche Tabou :

Le principe de la recherche Tabou est de choisir à chaque itération la meilleure solution, noté s' , dans $N(s)$ qui est l'ensemble des voisinages d'une solution s . Lorsqu'on atteint un minimum local s par rapport au voisinage N , la recherche tabou va donc se déplacer vers une solution s' plus mauvaise que s .

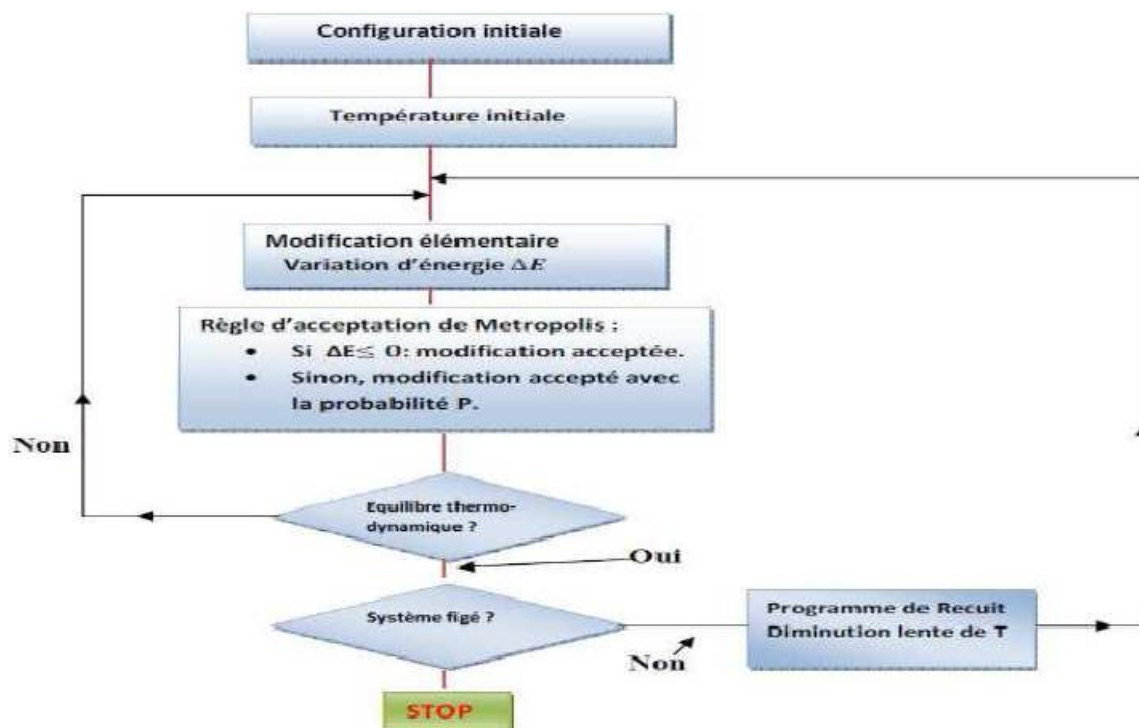
Le danger est alors de revenir à s immédiatement si s est dans $N(s')$, puisque s est meilleure que s' . Pour éviter de tourner ainsi en rond, on crée une liste T qui mémorise les dernières solutions visitées et interdit tout déplacement vers une solution de cette liste, cette liste est appelée liste taboue.

Les solutions ne demeurent dans la liste T que pour un nombre limité d'itération, la liste T est donc une mémoire à court terme. Si une solution s' est dans T on dit que s' est une solution taboue. De même, tout mouvement qui nous mène de la solution courante à une solution de T est appelé mouvement tabou.

L'algorithme accepte parfois des solutions qui n'améliorent pas toujours la solution courante. Nous mettons en œuvre une liste taboue T de longueur k contenant les k dernières solutions visitées, ce qui ne donne pas la possibilité à une solution déjà trouvée d'être acceptée et stockée dans la liste taboue. Alors le choix de la prochaine solution est effectué sur un ensemble des solutions voisines en dehors des éléments de cette liste tabou.

Quand le nombre k est atteint, chaque nouvelle solution sélectionnée remplace la plus ancienne dans la liste. La construction de la liste taboue est basée sur le principe FIFO (First In, First Out). Comme critère d'arrêt, on peut par exemple fixer un nombre maximum d'itérations sans amélioration de s^* , ou bien fixer un temps limite après lequel la recherche doit s'arrêter.

L'organigramme de la méthode de recherche tabou :



 **Avantages :**

Même avantages que la méthode de recuit simulé.

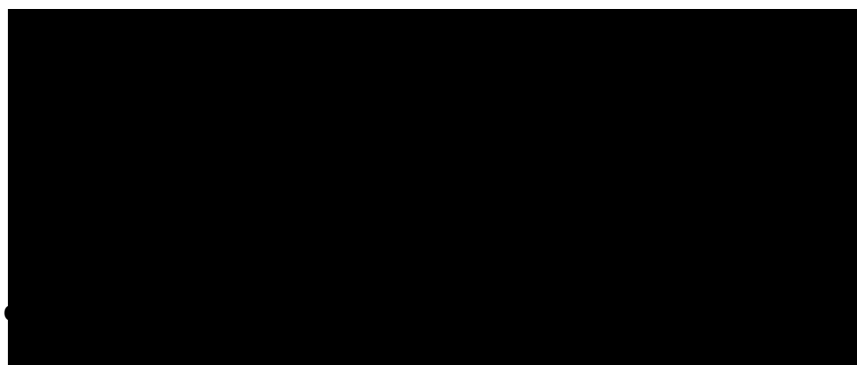
Avoir un paramétrage simplifié : le paramétrage consistera d'abord à trouver une valeur indicative t d'itérations pendant lesquelles les mouvements sont interdits.

Inconvénients :

La méthode taboue exige une gestion de la mémoire de plus en plus lourde en mettant des stratégies de mémorisation complexe.

II.B Les méthodes à base de population :

Les méthodes basées sur des populations de solutions sont souvent appelées méthodes évolutives parce qu'elles font évoluer une population d'individus selon des règles bien déterminées. Ces méthodes alternent entre des périodes d'adaptation individuelle et des périodes de coopération durant lesquelles les individus peuvent échanger de l'information. Les méthodes évolutives peuvent être décrites comme suit :



Les caractéristiques des méthodes à base de population :

Les principales caractéristiques qui permettent de faire la différence entre diverses méthodes à base de population sont :

- Type d'individus.
- Type d'évolution.
- Structure de voisinage.
- Sources d'information.

A- Type d'individus : Les individus qui évoluent dans une méthode basée sur les populations ne sont pas nécessairement des solutions. Il peut aussi s'agir de morceaux de solutions ou tout simplement d'objets que l'on peut facilement transformer en solutions.

B- Type d'évolution : A chaque itération d'une méthode évolutive, de nouveaux individus sont créés et la population de l'itération suivante sera ainsi constituée d'anciens individus et de nouveaux individus. La méthode évolutive doit indiquer comment choisir les nouveaux individus qui vont entrer dans la population.

C- Structure de voisinage : A chaque individu on associe un sous-ensemble des autres individus avec lesquels il peut échanger de l'information. Si chaque individu peut communiquer avec la totalité des autres individus de la population, on parle de population non structurée, par contre, si chaque individu ne peut communiquer qu'avec un sous-ensemble d'individus, on parle de population structurée.

D- Source d'information : Certaines méthodes évolutives utilisent l'information contenue dans toute la population pour créer un nouvel individu. D'autres méthodes utilisent même toutes les populations de toutes les itérations précédentes pour créer des enfants. On dit que la source d'information est l'historique de la recherche.

II.B.a Les algorithmes Génétiques :

Introduction :

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils ont été adaptés à l'optimisation

par John Holland (Holland 1975), également les travaux de David Goldberg ont largement contribué à les enrichir (Goldberg 1989a), (Goldberg 1989b).

Le vocabulaire utilisé est le même que celui de la théorie de l'évolution et de la génétique, on emploie le terme individu (solution potentielle), population (ensemble de solutions), génotype (une représentation de la solution), gène (une partie du génotype), parent, enfant, reproduction, croisement, mutation, génération, etc.

Le fonctionnement des algorithmes génétiques :

Leur fonctionnement est extrêmement simple, on part d'une population de solutions potentielles (chromosomes) initiales, arbitrairement choisies. On évalue leur performance (Fitness) relative. Sur la base de ces performances on crée une nouvelle population de solutions potentielles en utilisant des opérateurs évolutionnaires simples : la sélection, le croisement et la mutation. Quelques individus se reproduisent, d'autres disparaissent et seuls les individus les mieux adaptés sont supposés survivre. On recommence ce cycle jusqu'à ce qu'on trouve une solution satisfaisante.

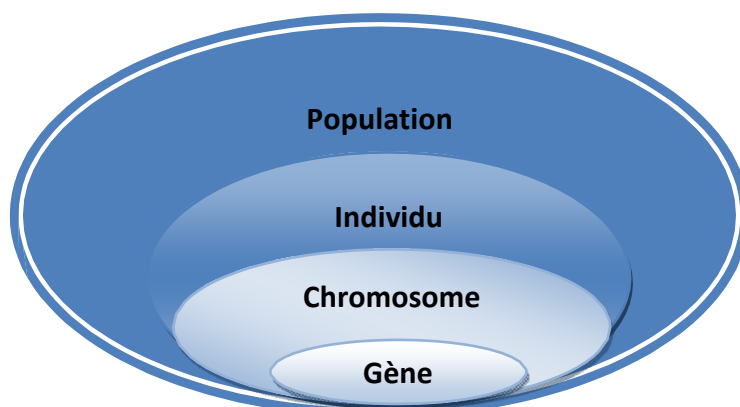


Figure 10 : les composantes de l'algorithme génétique.

Les étapes d'un algorithme génétique :

Pour appliquer un algorithme génétique, il faut suivre les étapes suivantes :

- ✚ Codage des solutions.
- ✚ Génération de la population initiale.
- ✚ Evaluation des individus.
- ✚ Tant que le critère d'arrêt n'est pas atteint :
 - Sélection.
 - Croisement.

Mutation.

Remplacement.

1- Codage des solutions : La première étape est de définir et coder convenablement le problème. Cette étape associe à chaque point de l'espace de recherche une structure de données spécifique, appelée génotype ou ensemble de chromosomes, qui caractérisera chaque individu de la population.

Le codage de chaque individu en séquence est essentielle dans l'élaboration d'un algorithme génétique dont dépend notamment l'implémentation des opérateurs de transformations. Ainsi, cette phase détermine la structure de données qui sera utilisée pour coder le génotype des individus de la population. Le codage doit donc être adapté au problème traité. Plusieurs types de codages sont utilisés (codage binaire, codage réel) dans la littérature et l'efficacité de l'algorithme génétique dépend donc du choix convenable du type de codage.

2- Génération de la population initiale : La génération de la population initiale, c'est-à-dire le choix des dispositifs de départ que nous allons faire évoluer, ce choix de la population initiale d'individus conditionne fortement la rapidité de l'algorithme.

Néanmoins, une initialisation aléatoire est plus simple à réaliser : les valeurs des gènes sont tirées au hasard selon une distribution uniforme. Toutefois, il peut être utile de guider la génération initiale vers des sous domaines intéressants de l'espace de recherche.

3- Evaluation des individus : Cette étape consiste à associer à chaque individu une valeur numérique calculée par une fonction appelée « Fonction Fitness».

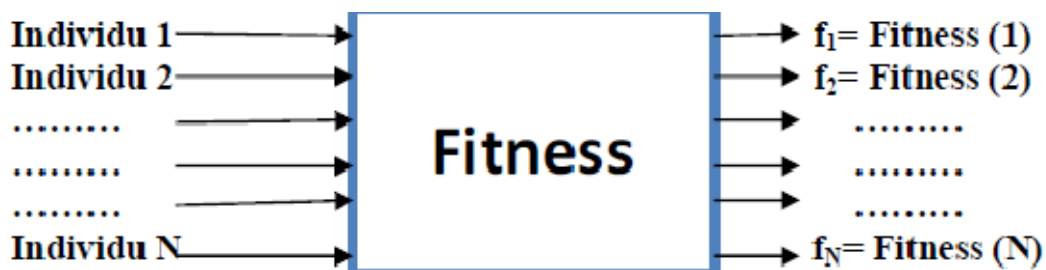


Figure 11 : fonction fitness

L'évaluation de la Fitness est généralement l'étape dans laquelle on mesure la performance de chaque individu. Pour pouvoir juger la qualité d'un individu et ainsi le comparer aux autres, il faut établir une mesure commune d'évaluation. Aucune règle n'existe pour définir cette fonction,

son calcul peut ainsi être quelconque, que ce soit une simple équation ou une fonction affine. La manière la plus simple est de poser la fonction d'adaptation comme la formalisation du critère d'optimisation.

4- Sélection : La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais, pendant le passage d'une génération à une autre, ce processus est basé sur la performance de l'individu. L'opérateur de sélection doit être conçu pour donner également une chance aux mauvais éléments, car ces éléments peuvent, par croisement ou mutation, engendrer une descendance pertinente par rapport au critère d'optimisation. Il existe différentes techniques de sélection, on propose quelques unes.

Sélection uniforme : on ne s'intéresse pas à la valeur d'adaptation fitness et la sélection s'effectue d'une manière aléatoire et uniforme telle que chaque individu i a la même probabilité $\text{Proba } i = \frac{1}{C_{DEB}}$

Sélection par tournoi : Deux individus sont choisis au hasard, on compare leurs fonctions d'adaptation et le mieux adapté est sélectionné.

Élitisme : Cette méthode de sélection permet de favoriser les meilleurs individus de la population. Ce sont donc les individus les plus prometteurs qui vont participer à l'amélioration de notre population. Dans la pratique cette méthode peut induire une convergence prématurée de l'algorithme.

Sélection par roulette : La sélection des individus par la méthode de la roulette s'inspire de la roue de loterie sur laquelle chaque individu est représenté par un secteur proportionnel à sa fitness. On fait tourner la roue et on sélectionne un individu. Les individus les mieux évalués ont statistiquement plus de chance d'être sélectionnés, mais donne aussi une possibilité aux individus mal adaptés d'être choisis. À chaque individu i une probabilité est associée, d'être choisi proportionnelle à son adaptation, est associée, f_i : $\text{prob}(i) = \frac{F_i}{\sum_{j \in G} F_j}$, où $\sum_{j \in G} F_j$ désigne la somme des adaptations de la population.

Reste stochastique sans remplacement : Cette sélection associe la sélection par roulette et la sélection déterministe. Un nombre minimal de représentants de chaque individu parmi les futurs parents est déterminé par avance en fonction de son adaptation, puis la population sera complétée par un tirage aléatoire. Pour un individu i , le nombre de représentation dans la future génération est donné par $E(f_i)$, où E désigne la partie entière et f_i désigne l'adaptation de i rapportée à la

moyenne des adaptations de tous les individus. La génération suivante est alors complétée par la méthode de sélection par roulette telle que l'évaluation d'un individu est donnée par le reste stochastique $r_i \geq f_i \text{ ME } f_i$.

5- Croisement :

Définition :

L'opérateur de croisement favorise l'exploration de l'espace de recherche et enrichit la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes, le croisement se fait avec deux parents et génère deux enfants, en espérant qu'un des deux enfants au moins héritera de bons gènes des deux parents et sera mieux adapté qu'eux.

Il existe plusieurs méthodes de croisement par exemple le croisement en un point, ou en multiples points voir les figures 12 et 13 :

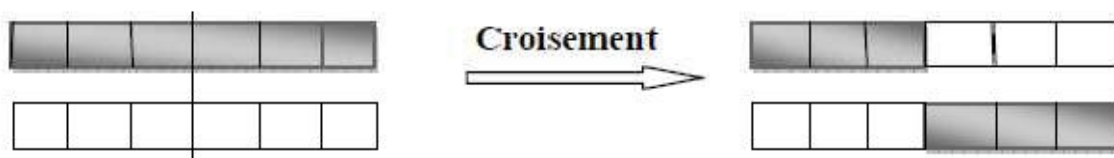


Figure11 : Croisement en un point.

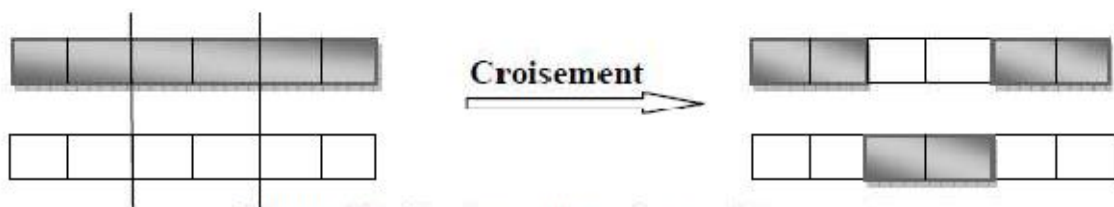


Figure12 : Croisement en deux points.

Les types de croisement :

Il existe différentes techniques de croisement, on propose quelques unes.

Croisement uniforme : Il constitue la généralisation du principe d'échange introduit par le croisement en un point. Il procède en effet à l'échange de chaque élément selon une probabilité fixée. Le jeu de paramètres se réduit donc à la donnée de cette probabilité.

Croisement MPX : Le croisement MPX (Maximal Préservative X), a été proposé par (Mülhenbein 1993) pour résoudre le problème du voyageur de commerce. L'idée de cet opérateur est d'insérer une partie du chromosome d'un parent dans le chromosome de l'autre parent de telle

façon que le chromosome résultant soit le plus proche possible de ses parents tout en évitant les doublons.

Exemple :

Nous considérons par exemple les deux parents :

$$P1 = (34/165/27) \text{ et } P2 = (12/356/47)$$

Après le croisement les deux parents vont produire deux enfants en échangeant tout d'abord les deux parties à l'intérieure de chaque parent comme suit :

$$E1 = (xx/356/xx) \text{ et } E2 = (xx/165/xx)$$

L'échange définit ainsi une série de permutations : 1 O3, 6 O 5, 5 O6.

Certaines valeurs de gènes sont donc inchangées (car elles sont différentes aux valeurs du bloc intérieur) :

$E1 = (x4/356/27)$ et $E2 = (x2/165/47)$. Finalement, le premier x de l'enfant E1 est remplacé par 1 en raison de la permutation $1 \leftrightarrow 3$. De la même manière, on réalise les permutations pour les autres x. Les individus enfants finaux sont donc de la forme : $E1 = (14/356/27)$ et $E2 = (32/165/47)$.

6- Mutation :

Définition :

L'opérateur de mutation est un processus où un changement mineur du code génétique appliqué à un individu pour introduire de la diversité et ainsi d'éviter de tomber dans des optimums locaux. Cet opérateur est appliqué avec une probabilité P_m (probabilité de mutation) généralement inférieure à celle du croisement P_c (probabilité de croisement).

L'étape de mutation permet d'assurer la diversité des solutions pour sortir des minima locaux, elle consiste à modifier un ou plusieurs gènes d'un individu sélectionné par l'étape de sélection.

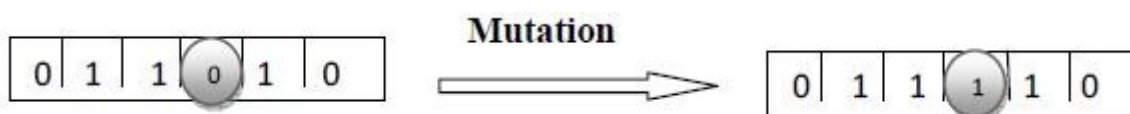


Figure14 : Représentation schématique d'une mutation dans le cas d'un codage binaire.

Types de mutation :

- ✚ Modifier les valeurs de plusieurs gènes de l'individu.
- ✚ Permutation de deux gènes successifs dans un individu.
- ✚ Permutation de deux gènes quelconque dans un individu.
- ✚ Inversement de l'ordre des gènes d'un individu.

7- Le remplacement :

Définition :

Après les opérateurs de croisement et de mutation, plusieurs nouveaux individus sont créés. Or, la population d'une itération à une autre, doit garder le même nombre d'individus. Le rôle de l'étape de remplacement est de choisir parmi l'ensemble des individus, ceux qui vont rester dans la population.

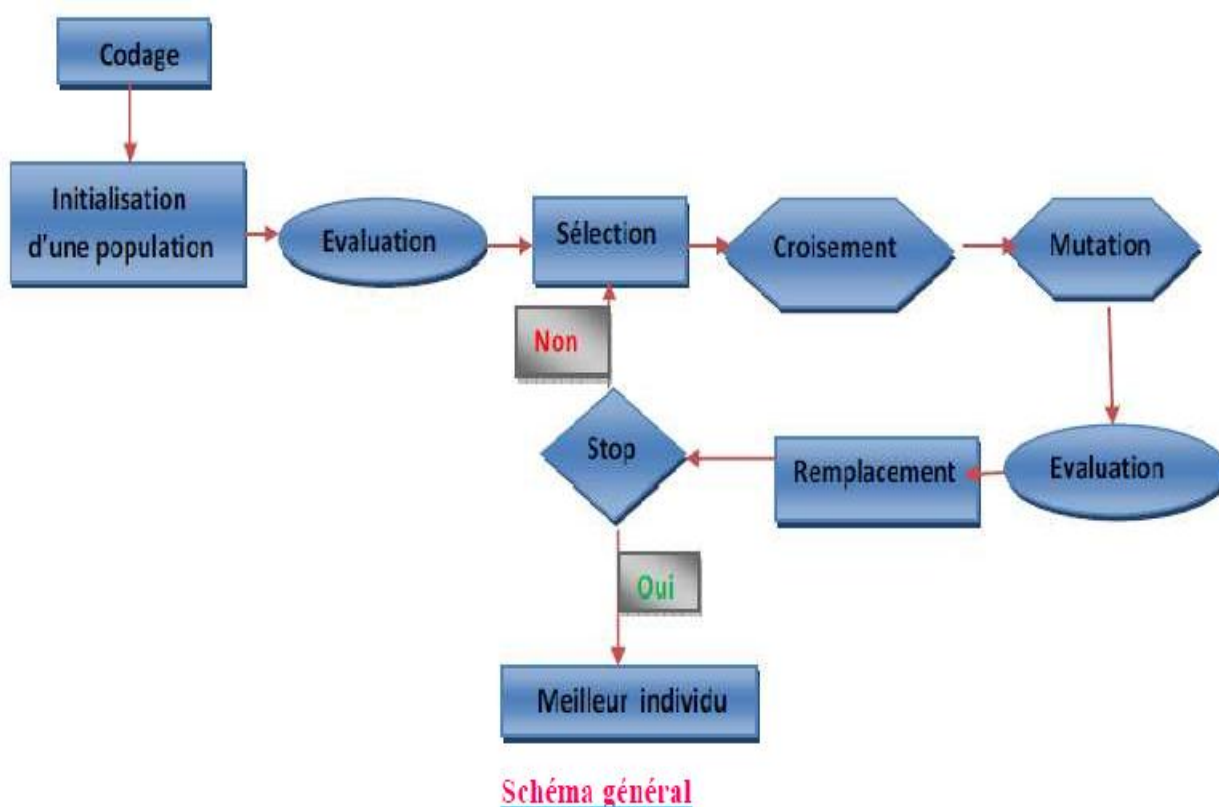
Types de remplacement :

- ✚ Les enfants remplacent leur parents même s'ils sont de qualité inférieure.
- ✚ Les meilleurs individus sont gardés dans la population.

Critère d'arrêt :

Les critères d'arrêt usuels :

- ✚ Nombre maximal d'itérations.
- ✚ Nombre maximal de générations sans amélioration.
- ✚ Résultat satisfaisante.



II.B.b Les algorithmes de colonies de fourmis :

Introduction

Les algorithmes de colonies de fourmis ont été proposés par Colorni, Dorigo et Maniezzo en 1992 . Ils ont été appliqués la première fois au problème du voyageur de commerce. Ce sont des algorithmes itératifs à population où tous les individus partagent un savoir commun qui leur permet d'orienter leurs futurs choix et d'indiquer aux autres individus des choix à suivre ou à éviter.

Le principe des algorithmes de colonies de fourmis :

Une colonie comporte un certain nombre de fourmis dont le but est de rechercher collectivement des bonnes solutions à un problème donnée. Pour bien comprendre comment fonctionne l'optimisation par colonie de fourmis, on va retourner vers l'algorithme « ANT SYSTEM ».

A- L'algorithme de base : AS.

Origine biologique :

- 1)- une fourmi parcourt plus ou moins au hasard l'environnement autour de la colonie ;
- 2)- si celle-ci découvre de nourriture, elle rentre plus ou moins directement au nid, en laissant sur son chemin une piste de phéromones ;
- 3)- ces phéromones étant attractives, les fourmis passant à proximité vont avoir tendance à suivre, de façon plus ou moins directe cette piste ;
- 4)- en revenant au nid, ces mêmes fourmis vont renforcer la piste ;
- 5)- si deux pistes sont possibles, pour atteindre le même temps, parcouru par plus de fourmis que la longue piste ;
- 6)- la piste courte sera donc de plus en plus renforcée et donc de plus en plus attractive ;

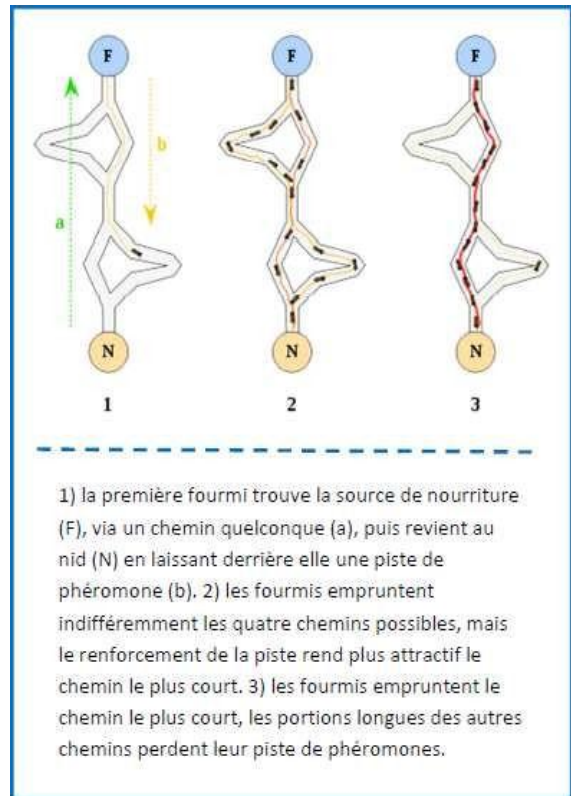


Figure 15 : origine biologique d'AS.

- 7)- la longue piste, elle, finira par disparaître, les phéromones étant volatils ;
- 8)- à terme, l'ensemble des fourmis a donc déterminé collectivement la piste la plus courte ;

DESCRIPTION DE L'ALGORITHME: Problème de voyageur de commerce.

On peut modéliser ce problème par un graphe où tous les sommets sont des villes, toutes reliées entre elles par des arêtes pour lesquelles on associe des poids égaux aux distances qui séparent les villes. A chaque itération, chaque fourmi parcourt le graphe et construit un trajet complet de N étapes. Le choix de la prochaine ville dépend alors de :

La liste des villes déjà visitées J_k^i , quand la fourmi k est sur la ville i ;

La visibilité ou l'information heuristique $\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$ est l'inverse de la distance entre deux villes.

L'intensité de la piste ou la quantité de phéromone τ_{ij} déposée sur la piste.

Au début chaque fourmi est mise aléatoirement sur une ville, à partir de sa ville de début, une fourmi se déplace itérativement d'une ville vers une autre, mais avec une règle de probabilité. Etant donnée à une ville i , une fourmi k choisit d'aller à la ville j avec une probabilité donnée par :

$$P_{ij}^k(t) = \frac{V_{ij}^k \cdot \tau_{ij}^k}{\sum_{l \in J^k} V_{il}^k \cdot \tau_{il}^k} \quad \text{si } j \in J^k$$

Où : N_i^e est l'ensemble de villes que la fourmi k n'a pas encore visité.

Remarque

α et β sont deux paramètres qui déterminent le degré d'influence de la densité de phéromone et de τ_{ij} sur le choix de la prochaine ville.

- Si $\alpha=0$, les probabilités de choix sont proportionnelles à $\beta \cdot \tau$ et les villes les plus proches seront plus probablement choisies.
- Si $\beta=0$, seulement l'amplification de phéromone est au travail.

α et β sont les paramètres qui donnent plus ou moins d'importance à la distance ou à la quantité de phéromone, il est préférable de les prendre supérieures à 1, pour après un faible nombre d'itérations, les résultats soient corrects.

Lorsque chaque fourmi termine la construction d'un chemin complet on passera à la phase de mise à jour de la phéromone. La mise à jour se décompose en deux parties :

1ère partie : consiste à baisser la densité de phéromone.

2ème partie : permet à chaque fourmi k de déposer la phéromone sur les arcs qui appartiennent à son excursion :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t) \quad \forall (i,j)$$

Avec :

- ρ est le taux d'évaporation de la phéromone, ce paramètre est employé pour éviter l'accumulation illimitée de phéromone et permet à l'algorithme d'oublier les mauvaises décisions faites précédemment.
- m est le nombre de fourmis.
- h Varie suivant la qualité de la solution trouvée :

$$h = Q / L^k \quad \text{si } (i, j) \in T^k$$

Avec :

- h (t) : est le trajet effectué par la fourmi à l'itération t .
- L (t) : est la longueur du tour.
- Q : est un paramètre fixé.

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = h \cdot \tau_{ij}^k(t) \quad \text{si } (i, j) \in T^k$$



Remarque Si $Q=0$, toute phéromone s'évapore après chaque déplacement d'une fourmi.

Si $Q=1$, la phéromone ne s'évapore jamais.

On va arrêter si la meilleure solution n'a pas été améliorée depuis un certain nombre d'itérations.

B- L'amélioration d'AS est ACS :

Cette algorithme ASC introduit un nouveau paramètre $q_8 \in [0,1]$, après avoir choisi un paramètre aléatoire uniformément distribué q .

$$j = \underset{J}{\operatorname{argmax}}_{n \neq 0} p_{5n} \cdot \eta_{5,q} \quad \begin{matrix} \text{si } q < q_8 \\ \text{si } q < r \end{matrix}$$

Avec : J choisi suivant p_{5n}^k .

Si $t < t_8$, l'algorithme tend vers une diversification, c'est-à-dire l'algorithme cherche à diriger la recherche vers des zones inexplorées.

Si $t > t_8$, l'algorithme tend vers une intensification ou l'exploitation se fonde sur l'idée d'apprentissage de propriétés favorables.

Niveaux de gestion des pistes :

L'ACS propose deux niveaux de mise à jour des pistes :

Locale : effectuée par chaque fourmi individuellement, chaque fourmi dépose une piste lors de la mise à jour locale.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) * \tau_{ij}(t) + \rho * \tau_0$$

Avec τ_0 la valeur initiale de la piste.

Globale : qui principe à une intensification par sélection de la meilleure solution, on a la formule suivante :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) * \tau_{ij}(t) + \rho * \Delta \tau_{ij}(t) \quad \text{où } \Delta \tau_{ij}(t) = \frac{1}{L}$$

Le pseudo code de l'algorithme de colonies de fourmis :

Initialisation : placer aléatoirement les fourmis sur les villes
Initialiser la phéromone à une quantité

Pour $t=1, \dots, t_{max}$

Pour chaque fourmi $k=1, \dots, m$

Pour chaque ville non visitée τ_0

Choisir une ville j , dans la liste J_1^k des villes restantes, selon
La formule :

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{i \in J_1^k} [\tau_{iu}(t) \cdot \eta_{ij}^\beta] & \text{si } q \leq q_0 \\ J & \text{si } q > q_0 \end{cases}$$

Où J est choisi selon la loi :

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^{-\alpha} \cdot (\eta_{ij}(t))^{-\beta}}{\sum_{i \in J_1^k} ((\tau_{i1}(t))^{-\alpha}) \cdot ((\eta_{i1}(t))^{-\beta})} & \text{si } j \in J_1^k \\ 0 & \text{si } j \notin J_1^k \end{cases}$$

Une mise à jour locale :

$$\tau_{ij}(t+1) \leftarrow (1 - \rho) * \tau_{ij}(t) + \rho * \tau_0$$

Fin Pour

Une mise à jour globale :

$$\tau_{ij}(t+1) \leftarrow (1 - \rho) * \tau_{ij}(t) + \rho * \Delta\tau_{ij}(t) \quad \text{Où}$$

$$\Delta\tau_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{L_{ij}} & \text{si } (i, j) \in \text{global best - tour} \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

Fin Pour
Fin Pour
Fin

 **Avantage :**

Rapidité de la méthode.

Nouvelle méthode à trouver des solutions acceptables tout en évitant des convergences prématurées.

Robuste et basée sur une population d'individus.

Inconvénient :

Complexe à mettre en place et son paramétrage est subtile.

Coût relativement élevé de la génération des solutions.

Conclusion :

Différentes méthodes de résolution de problème d'optimisation combinatoire ont été exposées. Les méta-heuristiques, qui peuvent être adaptés à divers problèmes d'optimisation combinatoire, présentent une bonne alternative aux algorithmes d'optimisation combinatoire classiques pour la résolution du problème difficile du conflit aérien.

CHAPITRE 3 :

LA RESOLUTION DE CONFLITS AERIENS PAR COLONIES DE FOURMIS

III.1 Introduction

Les problèmes de résolution de conflit aérien étant fortement combinatoires et les méthodes déterministes sont incapables de résoudre ce genre de problèmes en un temps acceptable dans un contexte réaliste, et ce à cause du fait qu'une solution doit prendre en compte des modèles de prévision de trajectoires complexes, mais également les variables en jeu sont discrètes et leur nombre peut être élevé.

La résolution des conflits aériens doit être suffisamment rapide afin de proposer une solution en un temps utile. Les méthodes classiques sont d'une efficacité non garantie pour ce type de problème, les méta-heuristiques permettent de pallier cet éventuel manque d'efficacité. Ces méthodes sont inspirées par une analogie avec d'autres sciences et visent à résoudre une large classe de problème d'optimisation combinatoire, et ils peuvent être adaptés à plusieurs types de problème.

Dans ce chapitre, nous allons adapter la méta-heuristique, colonies de fourmis, à la résolution d'un problème de conflit aérien simplifié. La simplification du problème tient aux faits que la durée de cette étude est très courte pour traiter de tel problème, et que nous avons voulu concentrer nos efforts sur la compréhension de la modélisation d'un problème d'optimisation combinatoire par l'algorithme de colonies de fourmis ainsi que sur sa mise en œuvre informatique.

Dans ce chapitre, on va décrire tout d'abord notre problème qui concerne le conflit aérien, puis on va préciser des hypothèses simplificatrices de notre étude, ensuite on s'intéresse à la modélisation du problème par un graphe. Ce graphe sera une donnée d'entrée pour l'algorithme de colonies de fourmis. La dernière section est consacrée à l'adaptation de l'algorithme de colonies de fourmis à la résolution du conflit aérien et enfin on va traiter l'adaptation ou l'application de colonies de fourmis à la résolution de conflit aérien.

III.2 Description de problème :

On considère une paire d'avions en conflit potentiel, comme décrit sur la figure suivante :



Figure 16 : conflit entre deux avions.

Pour simplifier la complexité du problème traité, on va supposer qu'une des deux avions va conserver son cap et sa vitesse et l'autre va opérer une déviation latérale pour éviter la collision, qui en suite reprendra sa trajectoire vers sa destination.

III.2.1 Les hypothèses de travail :

- ✚ Quand l'avion a changé une fois de cap, il n'a que la possibilité revenir vers sa destination.
- ✚ On prend seulement trois angle de déviations, 10°, 20°, 30°.
- ✚ Le temps est discrétisé par un pas de temps constant.
- ✚ Les vitesses des avions sont égales et constantes.

La résolution du conflit revient à déterminer une trajectoire optimale et libre de conflit pour l'avion qui effectue la déviation. L'espace des solutions est décrit par trois variables, lère déviation de l'avion, la 2ème déviation où l'avion reprend sa trajectoire initiale et la modification de trajectoire, cette dernière consiste en un angle de déviation $\alpha \in \{10, 20, 30\}$ degré.

L'avion peut alors passer par quatre états successifs :

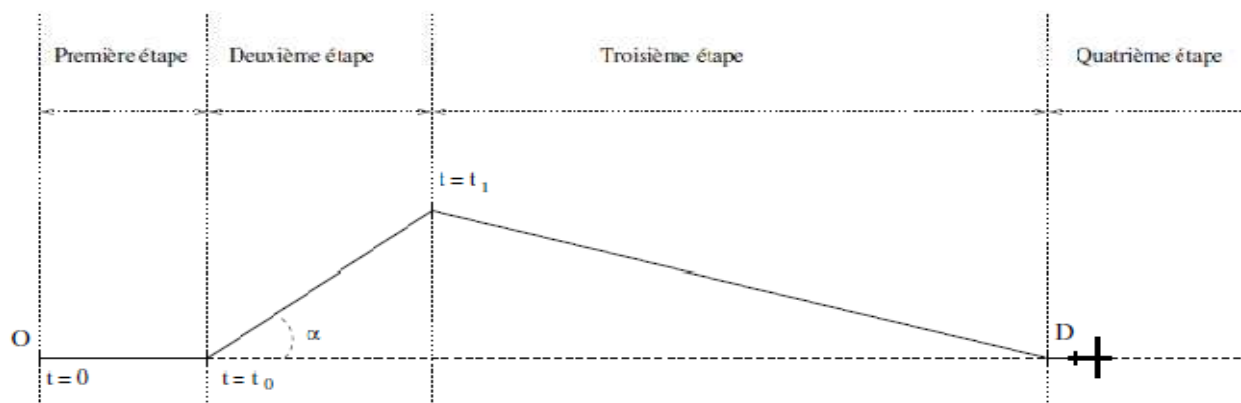


Figure 17: les états d'un avion

- Dans le premier état (v_0), l'avion suit sa trajectoire prévue jusqu'au temps t_0 .
- Dans le deuxième état (v_1), à partir de t_0 , l'avion est dévié de sa trajectoire d'origine de
- Dans le troisième état (v_2 , au temps t_1) l'avion prend le cap qui lui permet de rejoindre directement sa position finale.

- Dans le troisième état (v_w , au temps t_3)l'avion prend le cap qui lui permet de rejoindre directement sa position finale.

- Enfin, dans le dernier état (v_x), l'avion a atteint sa position finale.

III.2.2 La modélisation de problème sous forme d'un graphe :

La résolution d'un problème d'optimisation combinatoire par l'algorithme de colonies de fourmis nécessite une modélisation de ce problème par un graphe valué. On donne ci-dessous le graphe associé à notre problème de conflit aérien.

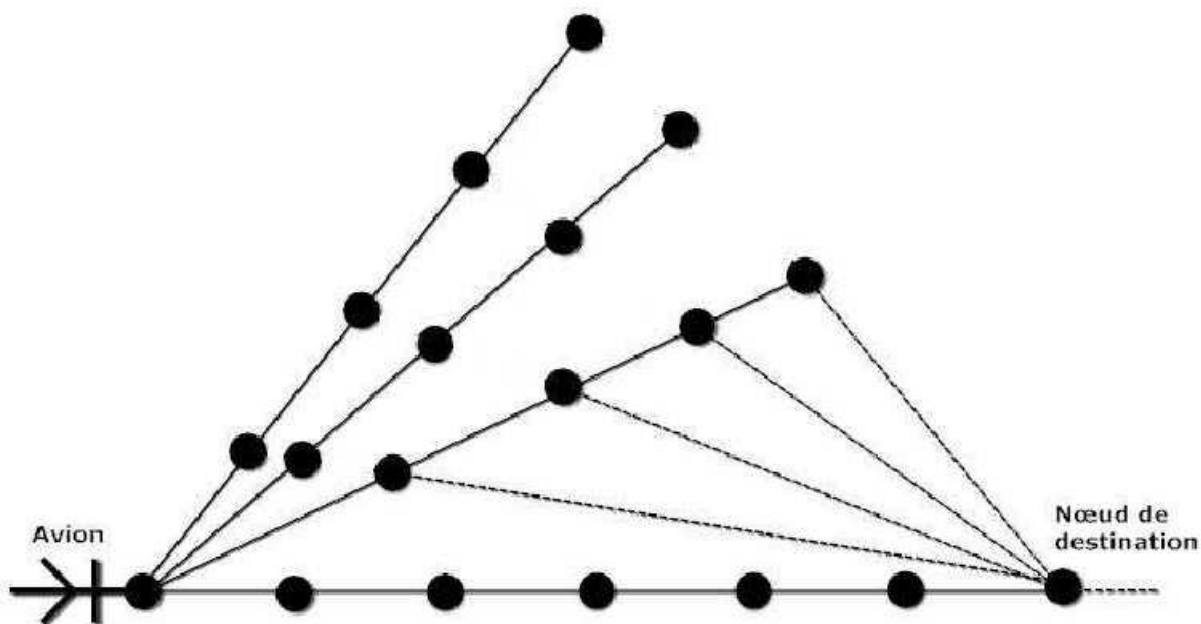


Figure 18 : les chemins possibles d'un avion

Le graphe qui modélise le problème va servir à la recherche de plus court chemin, ce graphe a les caractéristiques suivantes :

- Le début du graphe correspond à l'état initial de l'évitement.
- Chaque arc représente un éventuel déplacement de l'avion entre deux incréments de temps successifs.
- Le coût d'un chemin dans le graphe est la longueur de la trajectoire.
- Les nœuds représentent les différentes positions possibles de l'avion à chaque pas de temps.

Distance entre les deux avions :

Nous allons exprimer la distance entre les deux avions en fonction de certains paramètres connus du problème. Nous avons appliqué des relations de la trigonométrie sur la figure 19 pour déterminer l'expression de cette distance.

On fixe l'angle de déviation γ et on pose h le pas d'espace qui désigne la distance entre deux nœud de discrétisations successives, alors le graphe suivant décrit le problème simplifié.

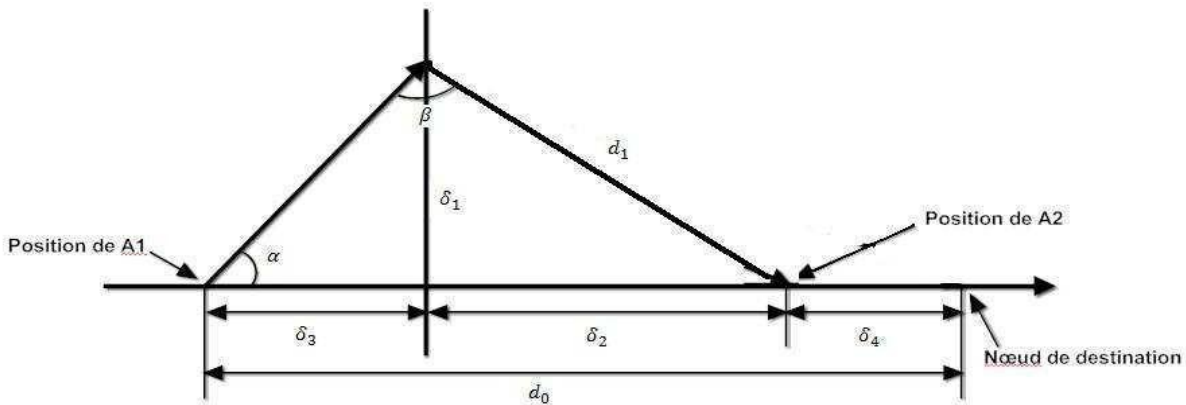


Figure 19 : représentation de plus court chemin

- d_0 : La distance entre les deux avions juste au moment où l'un commence la déviation.
- h : est le pas de discrétisations = distance entre deux nœuds successives.
- α : est l'angle de déviation.
- β : est l'angle de reprendre la trajectoire de référence.
- δ_3 : est la distance entre le nœud de discrétisation et sa projection sur la trajectoire initiale.
- d_1 : la distance entre deux avions au début de la deuxième déviation d'une des deux avions.

On a : pour $i=1$

$$\begin{aligned} f_w^2 &= \delta_3^2 + 3 \delta_w^2 \\ \text{avec : } \delta_3 &= h \cdot \sin \alpha & \delta_w &= h \cdot \cos \alpha \\ \delta_w &= h \cdot \cos \alpha \end{aligned}$$

Alors

$$d_0^2 = \delta_3^2 + \delta_w^2 + \dots + \delta_3^2 + 3 \delta_w^2 + \dots + \delta_3^2 + \delta_w^2 = \delta_3^2 + 3 \delta_w^2$$

Pour $i=1$ on pose $\delta_3 = 3 \delta_w$ avec

Fonction coût : La ligne droite est le trajet qui ne conduit à aucun rallongement de la trajectoire initiale, donc elle est la trajectoire optimale sauf qu'elle conduit sûrement à une collision, c'est à dire une fourmi qui continue à progresser sur ce chemin violera forcément la contrainte de distance critique, qui est la principale contrainte de notre problème d'optimisation. La manœuvre de déviation est inévitable, néanmoins il faut la retarder le plus possible. On associe donc à l'état E0 la valeur 0. En phase de changement de cap, la fourmi s'écarte de la trajectoire droite, qui est optimale mais sûrement conduit à une collision, on pénalise cet écart en incrémentant de la fonction coût +2 par pas de temps. Cette incrémentation est baissée à +1 lors de la phase de retour vers la trajectoire initiale. La pénalisation plus faible pour cette phase vise à favoriser le retour de l'appareil vers sa trajectoire initiale et de ne pas la laisser trop s'éloigner de celle-ci.

Lorsqu'une fourmi viole la contrainte de distance, elle arrêtera son voyage et sera considérée comme perdue. Le nombre de fourmis perdues est noté μ .
 A chaque itération, une fourmi choisit son chemin en fonction de la quantité de phéromones qu'il y a sur les arêtes suivantes.

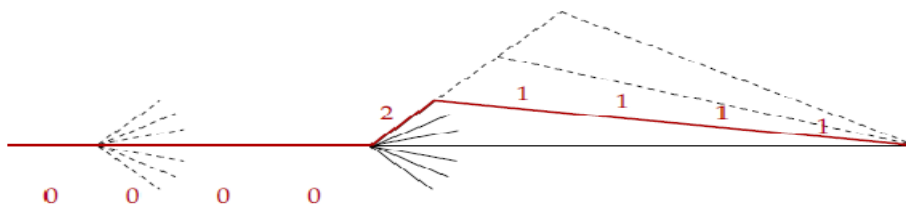


Figure 20 : l'incrémentation de score du chemin dans un graphe.

Dépôt de phéromones : on considère que le phéromone est initialement réparti uniformément sur tous les chemins possibles (conduisant ou non à une collision). L'avion est représenté par un groupe de fourmis et chaque fourmi qui arrive à récupérer sa trajectoire initiale sans rencontrer de conflit (sans que la distance entre les deux avions n'atteignent la distance critique d_c qui est donnée par les normes de l'aviation) déposera une quantité de phéromones supplémentaire sur son chemin. Cette quantité est inversement proportionnelle à la longueur du chemin suivi, plus précisément la quantité de phéromone τ laissée sur une arête est déterminée comme suit :

$$\Delta\tau \propto \frac{S_{E0}^a}{S_{E0}^b} \cdot \frac{V_c}{D_{E0}^c}$$

Où $n_{\bullet nX}$ est le nombre de fourmis « perdues », τ_0 la quantité de phéromones initiale, et $C_{\bullet n^o}$, la somme des coûts des états empruntés par la fourmi.

Pour éviter qu'un chemin ne soit inondé de phéromones et par conséquent suivi par toutes les fourmis, on considère une valeur que la quantité de phéromones sur chaque chemin ne doit pas la dépasser.

L'évaporation : on procède à l'évaporation de phéromones sur chaque piste à la fin de chaque itération. Un chemin sans phéromone ne sera jamais emprunter par aucune fourmi, c'est à dire qu'il sera totalement invisible par toutes les fourmis. Pour éviter qu'une telle situation ne se produise, on conserve une quantité minimum de phéromones sur chacun des chemins. Autrement, à partir d'une valeur minimum de phéromones, noté τ_{\pm} , on effectue plus son évaporation.

Test d'arrêt : L'algorithme s'arrête lorsque le score obtenu par l'ensemble des fourmis ne diminue plus ou lorsqu'un temps maximal de résolution est atteint. Les phéromones déposées s'évaporent au fur et à mesure des générations selon une loi d'évaporation déterminée à l'avance par l'utilisateur pour éviter une convergence prématurée de l'optimisation, en considérant notamment un seuil de phéromones en dessous duquel l'évaporation ne s'effectue plus.

CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'adaptation de la méta-heuristique, colonies de fourmis, à la résolution d'un problème de colonie de fourmis simplifié. Une expression explicite de la distance entre les deux avions a été donnée, elle est utilisée pour satisfaire la contrainte de distance tout au long de l'exploration d'un chemin par une fourmi. La fonction objective, le dépôt et l'évaporation de phéromones sont également donnés.

Conclusion générale

Durant cette étude, je me suis familiarisée aux concepts de l'aéronautique, surtout ceux qui sont utilisés pour la gestion du trafic aérien qui tend à devenir de plus en plus dense. Ensuite, mon étude s'est focalisée sur les algorithmes de résolution de conflit aérien, qui est un problème combinatoire difficile à résoudre, en plus une solution de ce problème n'a d'intérêt que si elle est fournie en un temps utile. Nous avons donné des algorithmes exacts tels que les méthodes de Branch & Bound et la programmation dynamique ainsi que des méthodes approchées, à savoir les algorithmes de colonies de fourmis, la recherche taboue, le recuit simulé et les algorithmes génétiques.

La partie essentielle de mon travail a concerné l'adaptation de la méta-heuristique, colonies de fourmis, à un problème de résolution de conflit aérien simplifié. Malgré qu'elle ne soit complètement aboutie, cette adaptation m'a permise de comprendre, que grâce à la modélisation mathématique des phénomènes ou des comportements observés dans la nature (dépôt et évaporation du phéromone ainsi son utilisation par les fourmis pour choisir tel ou tel chemin,...), on peut faire émerger un système ou un algorithme sophistiqué (colonies de fourmis) capable de résoudre un problème difficile, pour lequel les algorithmes classiques échouent ou sont d'une garantie non assurée.

WEBOGRAPHIE :

- **M. Ettaouil, M. Lazaar, K. Haddouch, R. Kaidi :**
« Artificial Neural Network hybrid by Ant Colony for Air traffic conflict optimization resolutions ».
- **Méta-heuristiques pour l'optimisation difficile.**
- **Thèse de doctorat de l'institut national POLYTECHNIQUE de Grenoble.**
- **Thèse de doctorat de l'université Paris 12-VAL DE MARNE.**
- **Thèses de doctorat de l'université de TOULOUSE.**