Université Bordeaux I **LaBRI - Bordeaux**

Gestion de flux du trafic aérien en intra et inter réseaux

Un modèle de graphes évolutifs

marché C20135E/DM/02 entre EUROCONTROL et ADERA

Rapport final

Richard Castanet, Cyril Gavoille, Mohamed Mosbah et Frédéric Ferchaud

LaBRI - Université Bordeaux 1
351 Cours de la libération 33405 - Talence.

{castanet,gavoille,mosbah,ferchaud}@labri.fr

- Novembre 2003 -

Table des matières

Introduction

L'encombrement de l'espace aérien est un problème auquel les organismes de régulation du trafic aérien européen (ATM, Air Traffic Management) doivent faire face. Les prévisions de croissance de ce trafic en Europe et le système de contrôle actuel laissent prévoir que l'ensemble du système chargé d'assurer la régulation du trafic est proche de la saturation. La perte financière due aux retards est évaluée par la Commission Européenne à plus du cinq milliards d'euros en 1999. Divers projets de recherche sont en cours afin d'essayer d'améliorer l'efficacité de la gestion de ce contrôle [1].

Actuellement, cette gestion est centralisée par Eurocontrol et se répartit ainsi :

- la phase stratégique et culturelle qui consiste à définir des plans d'orientation à long terme de l'espace aérien via des négociations entre les différents acteurs concernés (aviation civile, militaire. . .).
- la phase pré-tactique qui organise les journées de trafic un ou deux jours à l'avance.
- la phase tactique pendant laquelle on effectue les dernières mises à jour des créneaux de décollage quelques heures avant le vol.
- et la phase temps réel. Les avions sont désormais sous la responsabilité des contrôleurs aériens.

Les contrôleurs sont en charge d'un secteur (portion de l'espace aérien) et ne peuvent pas contrôler plus de quinze avions en même temps. La régulation du trafic est basée sur cette donnée, on doit garantir que les secteurs ne dépasseront jamais cette limite.

Problématique

Pour augmenter le débit, on a diminué la taille des secteurs, mais il semble qu'on soit arrivé à la taille minimale possible due aux relations à entretenir avec les secteurs voisins. On pense avoir atteint la capacité maximale théorique du ciel aérien. Cependant, elle n'est pas totalement exploitée, en particulier car $1/6$ du trafic passe par vingt routes.

Notion de débit et de retard La saturation de ces routes nécessite une régulation du trafic aérien. Si la régulation était respectée, alors les avions ne seraient pas retardés, malheureusement ils ne peuvent pas toujours décoller à l'heure prévue (embarquement retardé, problème mécanique, problème de piste, brouillard. . .) et donc doivent demander un autre créneau de décollage. Si aucun avion ne peut prendre sa place, alors ce créneau est "perdue". De plus, si cela a lieu durant une période de fort trafic, alors il y a de fortes chances qu'un avion soit à l'origine de toute une série de retard. En effet, le principe d'allocation de créneaux étant basé sur le premier arrivé sur un secteur premier servi, le fait de demander un autre créneau de décollage peut retarder d'autres avions. Nous cherchons à garantir qu'un avion ne décollant pas à l'heure n'en retarde pas d'autre.

Zones d'Absorption Le but de ce travail est d'améliorer le système en posant des zones d'absorption afin de garantir que les avions retardés au moment du décollage le soient le minimum possible. Une zone d'absorption consiste à réduire la capacité d'un secteur pendant l'allocation de créneaux (phase pré-tactique), soit durant toute la durée de fort trafic, soit par périodes. Cette méthode doit, dans la mesure du possible, ne pas réduire le débit, et avoir une bonne absorption des retards. Ce qui implique que les créneaux laissés libres par la mise en place des zones d'absorption doivent être pris par les avions subissant des aléas.

Modèle

Pour cela nous avons développé un modèle simulant le trafic aérien sur une zone de taille donnée, et nous l'avons testé à plein régime afin de connaître les conséquences des poses de zones d'absorption, selon un taux d'aléas donné. Les aléas représentent les avions ne décollant pas à l'heure prévue et demandant un autre créneau de décollage.

On considère que les routes sont toutes aussi empruntées, ce qui n'est pas le cas dans la réalité, mais comme les secteurs sont tous de même poids au niveau du trafic, les résultats obtenus peuvent y être appliqués. Comme nous cherchons à garantir que les contrôleurs aériens n'aient pas en charge plus d'un nombre donné d'avions, nous travaillons uniquement au niveau des secteurs pour la régulation du trafic et des retards impliqués.

Le modèle fonctionne en trois phases :

1. Construction de la zone : nous construisons une zone à partir d'une dimension donnée, du nombre d'aéroports, de routes entre les aéroports et de la quantité de secteurs que l'on désire. Un exemple de zone est donnée par la fig.2.8
2. Allocation de créneaux : nous donnons le nombre d'avions et l'affectation des zones d'absorption sur la zone désirée, puis le modèle renvoie l'ensemble des plans de vol théoriques (phase tactique et pré-tactique).
3. Temps réel : le modèle récupère l'allocation de créneaux et nous affecte un taux d'aléas sur l'ensemble des avions, puis à chaque aléa il regarde ce que cela implique. En cas de dépassement de capacité sur un secteur, il retarde l'avion devant arriver le dernier sur ce secteur et n'ayant pas encore décollé au moment de la détection du conflit. Puis le modèle renvoie entre autres la distribution des retards sur l'ensemble des avions et le débit moyen de la simulation.

Ainsi, nous pouvons tester l'effet de la mise en place de différentes zones d'absorption. Les résultats obtenus montre l'intérêt d'en poser.

Plan

Dans le premier chapitre, nous expliquons le fonctionnement de la gestion de flux aérien avec les principales solutions apportées (le fonctionnement actuel et le projet SHAMAN). Dans le deuxième chapitre, nous donnons l'évolution du modèle et ses propriétés afin de montrer qu'il se rapproche de la réalité au niveau de la distribution des retards et du débit. Enfin, nous l'utilisons afin de comparer différentes stratégies d'affecattion de zones d'absorption et de déterminer celles qui permettent d'optimiser le débit en fonction des aléas tout en minimisant la distribution des retards sur les avions. Cette exploitation du modèle fait l'objet du troisième chapitre. Cependant, ces résultats dépendent de l'importance que l'on accorde au débit par rapport à la distribution des retards et le coût de la mise en place de zones d'absorption.

Chapitre 1

Gestion de Flux du Trafic Aérien

Dans ce chapitre, nous expliquons comment est effectué la régulation du trafic aérien, en particulier l'allocation de créneaux qui répond aux exigences de sécurité pour les contrôleurs. On distingue deux types de contrôle du trafic aérien :

- **L'approche**, à proximité des aéroports qui gère les phases de décollage et atterrissage.
- **En route**, qui gère les avions entre les deux phases ci-dessus.

Dans ce rapport nous nous intéressons uniquement au contrôle en route, i.e. nous essayons de garantir qu'il n'y aura pas plus d'un certain nombre d'avions sur un secteur donné, afin de garantir les conditions de sécurité.

1 Concepts et Définitions

La régulation du trafic aérien ne concerne pas tous les avions et l'espace aérien est divisé en plusieurs classes. Les avions sont soumis à un contrôle selon les classes qu'ils utilisent.

1.1 Les Types d'Avions et les Différentes Catégories de l'Espace Aérien

- **Vol VFR :** Visual Flight Rules, ces avions n'ont pas de système de contrôle embarqué et peuvent voler à vue.
- **Vol IFR :** Instrument Flight Rules, ces avions sont équipés d'un matériel de radio navigation, doivent déposer un plan de vol et obtenir une autorisation de décollage ou de survol.

L'espace est divisé volumiquement par l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), en six catégories.

Classe	Contrôlés	Vols admis	Séparation	Info de circulation
A	IFR	IFR	IFR/IFR	
B	VFR et IFR	VFR et IFR	VFR/VFR VFR/IFR VFR/IFR	
C	VFR et IFR	VFR et IFR	IFR/IFR VFR/IFR	VFR/VFR
D	VFR et IFR	VFR et IFR	IFR/IFR	IFR/VFR
E	IFR	VFR et IFR	IFR/IFR	Tous les vols[1]
F[2]		VFR et IFR	IFR/IFR[1]	Tous les vols
G		VFR et IFR		Tous les vols[3]

Dans ce rapport, nous ne traitons que l'espace correspondant à la classe A, et les avions IFR.

1.2 Les Routes

Les avions suivent une suite de *waypoints* au sol. Lorsqu'un avion veut aller d'un aéroport à un autre, il doit donner la suite de *waypoints* qu'il compte suivre. Cependant, une route aérienne ne peut pas passer n'importe où : il faut respecter les contraintes d'environnement et les zones militaires. Les réseaux de routes sont relativement rigides et définis par des schémas de routage SRS (Standard Routing Scheme) utilisés par les pilotes lors du dépôt du plan de vol.

1.3 Découpage de l'Espace Aérien

En France, il existe cinq centres de contrôle en route : Aix, Bordeaux, Brest, Paris et Reims. Chacun de ces centres est responsable d'une zone de l'espace aérien, découpée en secteurs définis par une altitude plancher et plafond, un contour et une capacité.

Le nombre et la taille des secteurs varient au cours d'une même journée suivant un schéma d'ouverture quotidien. Ces changements consistent en un regroupement de plusieurs secteurs en un seul, lors des périodes de faible trafic afin de limiter l'utilisation des ressources humaines et de maintenir une certaine charge de travail pour chaque secteur (des études ont montré que les erreurs humaines sont plus importantes en-dessous d'un certain seuil de travail). Un secteur est géré par une équipe de deux contrôleurs, mais seul un décide des manoeuvres à effectuer.

Le découpage de l'espace aérien français à 7200m est donné par la fig.1.1. On constate que les délimitations des secteurs correspondent aux frontières réelles de la France ; d'où une sectorisation non fondée, car un paramètre n'influant pas sur le trafic est pris en compte (les frontières). Les organismes de contrôle désireraient une harmonisation du ciel afin d'avoir un espace aérien unique sur toute la zone controlée par la CFMU (Central Flow Management Unit), et ne plus avoir cette contrainte non fondée sur la délimitation des secteurs.

[1] dans la mesure du possible
[2] suggestion de manoeuvres, pas d'implication des contrôleurs
[3] SIV (Service d'Information de Vol) à la demande
[4] A part pour le centre de Maastricht qui contrôle le Benelux, et la mise en place d'un nouveau centre dans l'europe de l'est

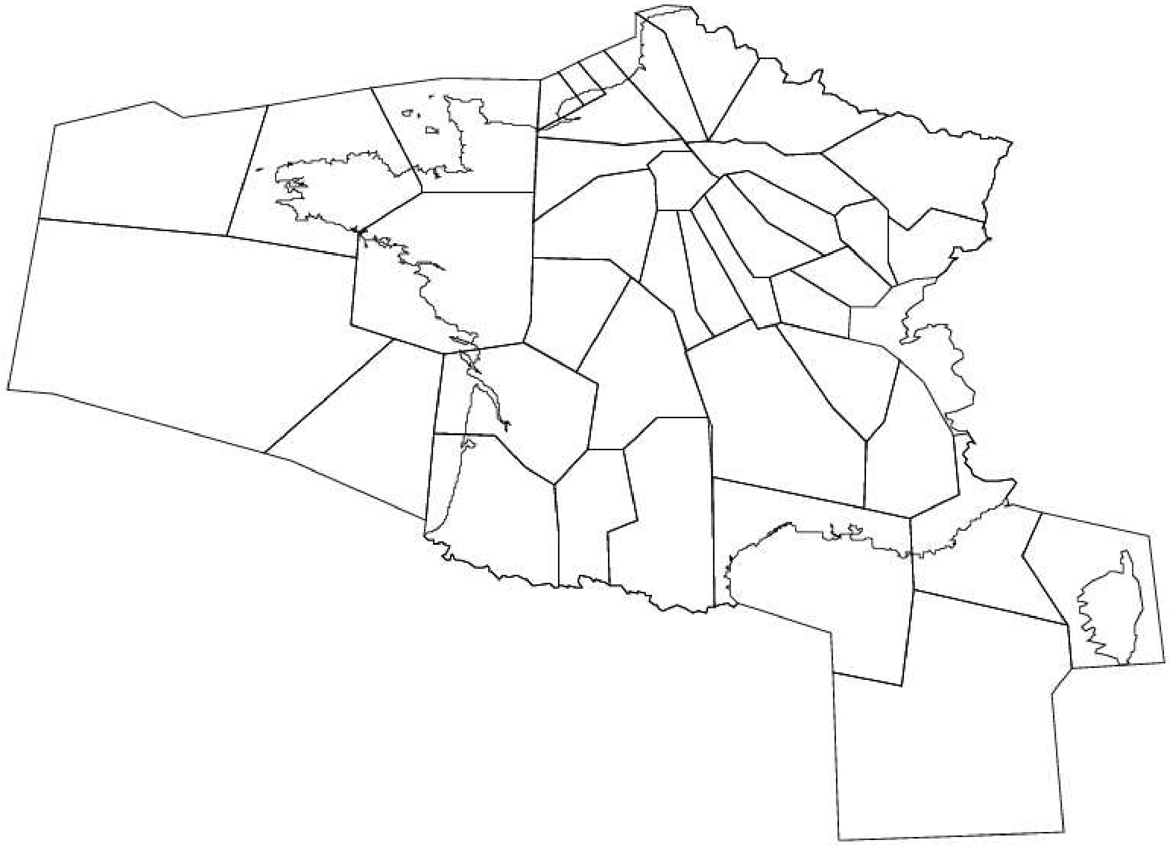

FIG. 1.1 – *Sectorisation de l'espace aérien à 7200m*

1.4 La Capacité

La capacité d'un secteur exprime le nombre maximal de vols pouvant entrer dans ce secteur pendant un intervalle de temps donné, correspondant à la charge maximale qu'un contrôleur peut supporter. Elle varie donc en fonction de nombreux paramètres (fonctionnement des appareils, disponibilité des routes aériennes. . .). On appelle secteur période un secteur dont la capacité est constante durant un temps donné.

On considère qu'un contrôleur ne peut contrôler plus de quinze aéronefs pendant une dizaine de minutes [2]. Sinon on considère que l'attention se réduit au-dessus de ce seuil, et les conditions de sécurité ne sont plus respectées. Il ne faut donc pas dépasser cette limite, ce qui implique des retards au décollage en cas de non respect des créneaux alloués en période de fort trafic.

Pour augmenter la capacité globale du trafic, on a pensé à diminuer la taille des secteurs, mais il semble que l'on soit arrivé à la limite de cette solution, car le gain de découpage d'un secteur est annihilé par l'augmentation de la charge des contrôleurs dans ses contacts avec ses homologues (charge de coordination).

D'autres solutions comme le *free flight* (les avions volent librement, possédant des outils de contrôle autonomes embarqués, permettant une résolution des conflits et de ne pas suivre les *waypoints*), ne permettent pas d'affirmer que cela augmenterait le trafic, car les routes aériennes en Europe sont assez rigides.

Bien que le modèle de calcul actuel de la capacité soit inadapté, aucune meilleure solution n'a été trouvée pour l'instant.

1.5 Les Plans de Vol

Les compagnies déposent auprès des autorités compétentes un plan de vol pour chaque avion contenant :

- le type de l'avion.
- les aéroports de départ et d'arrivée.
- l'heure de départ souhaitée.
- la route suivie (liste des *waypoints*).
- le niveau de vol souhaité.

Le jour même, ces informations parviennent aux contrôleurs et leur permettent d'anticiper l'entrée d'un avion dans les secteurs qu'ils contrôlent.

2 Description du Problème d'Allocation de Créneaux

L'allocation de créneaux est un des problèmes principaux de ce travail. En effet, on cherche à obtenir la meilleure affectation de plans de vol des avions afin de garantir qu'un avion retardé ne le sera pas plus d'un temps donné. Il faut aussi que le nombre d'avions retardé soit le plus faible possible.

2.1 Les Créneaux

Pour éviter un dépassement de la capacité d'un secteur, on modifie l'heure de départ des avions. On parle de créneau de décollage, car une limite de cinq minutes avant et dix minutes après l'heure donnée est autorisée. Si un avion manque son créneau, il ne peut décoller avant d'en avoir obtenu un autre. Dans les faits, il arrive que les compagnies ne respectent pas les créneaux, entraînant une perturbation de la régulation, et des dépassements de capacité.

2.2 Problèmes et Solutions Envisagées

Ce sont les compagnies qui décident des plans de vol, et en général elles utilisent les routes directes, ce qui encombrent les routes aériennes (un sixième du trafic européen utilisent vingt routes). La capacité des secteurs étant limitée, et comme il est difficile de l'augmenter, il faut trouver des méthodes qui permettent de limiter le nombre d'avions présent dans un secteur. Pour cela, les acteurs de la gestion du trafic aérien travaillent en flux entrant (i.e. en nombre d'avions qui vont entrer dans un secteur pendant une période donnée), c'est la gestion des flux ou Air Traffic Flow Management (ATFM). Le système européen est centralisé par la Central Flow Management Unit (CFMU). Cependant chaque centre possède une Flow Management Position (FMP) qui sert d'interface avec la CFMU. Les FMP communiquent les informations nécessaires à la gestion du trafic comme les capacités, les regroupements… et sont en contact permanent avec la CFMU afin de suivre l'évolution en temps réel du trafic aérien.

2.3 La CFMU

On veut obtenir un trafic optimal à travers les zones, notamment durant les périodes où la demande excède la capacité. Le but de la CFMU est de satisfaire les demandes des compagnies, d'assurer une utilisation maximale de la capacité de contrôle, d'avoir le plus de flexibilité possible dans la gestion du trafic et d'ordonner les flux de trafic.

Les activités de la CFMU se répartissent en trois phases [3] :
– stratégique.
– pré-tactique.
– tactique.

La phase stratégique

Son but est d'identifier les principaux problèmes en termes de déséquilibre de l'offre et de la demande et de mettre en place les actions nécessaires à la correction de ces déséquilibres, ce qui se fait par la collecte, l'étude des données, la publication de comptes-rendus, une coordination internationale destinée à assurer la compatibilité et l'efficacité des efforts nationaux.

Cette phase permet de donner les éléments et les conseils nécessaires aux Etats pour faire des ajustements quant à l'organisation de l'espace aérien, aux procédures de contrôle et à la gestion des effectifs.

La phase pré-tactique

Elle commence deux jours avant le jour des opérations. Elle étudie la demande des plans de vol (réactualisée en continue), la compare avec les capacités données par les FMP, et met en place des mesure ATFM pour l'ensemble de la zone régulée par la CFMU, en accord avec chaque FMP.

La phase tactique

Elle se déroule le jour même des opérations. Elle met en place les mesures de gestion décidées, s'assure que les problèmes de surcapacité sont résolus et que les retards imposés sont utiles et minimaux.

L'allocation de créneaux avec CASA

CASA (Computer Assisted Slot Allocation) est un système automatique et centralisé qui a en charge l'attribution des créneaux de décollage. Pour chaque zone régulée, CASA génère une liste de créneaux de passage disponibles dont le nombre est égal à la plage horaire divisée par la capacité. La liste ainsi générée va se remplir au fur et à mesure de l'arrivée des plans de vol. Si un avion souhaite passer dans un créneau déjà alloué à un autre vol, c'est l'avion qui aurait dû passer en premier en l'absence de régulation qui obtient le créneau, l'autre avion est reclassé dans le créneau suivant, et s'il est déjà occupé, le processus se répète. L'allocation obtenue est évolutive puisque chaque nouveau plan de vol peut changer la liste. On ne parle que d'une pré-allocation de créneaux. Si un vol est annulé, le créneau qu'il occupe dans chaque liste est libéré, et les autres vols voient leur situation évoluée[4].

L'EOBT (Estimated Off-Block Time) est l'heure à laquelle un avion a prévu de quitter le parking. Elle diffère de l'heure de décollage par le temps mis par l'avion pour se rendre au seuil de la piste. Deux heures avant l'EOBT d'un avion, le créneau de l'avion concerné est communiqué à la compagnie et au service de contrôle. A ce moment, le créneau ne peut plus être pris par un autre vol. Cependant, si la compagnie est dans l'incapacité de prendre ce créneau, elle doit demander un changement. Dans notre modèle, nous considérons que les créneaux peuvent être changés jusqu'au moment du décollage.

CASA possède plusieurs défauts, en particulier lorsqu'un avion entre dans plusieurs zones régulées car l'allocation se fait par rapport à l'heure d'arrivée sans retard dans le secteur régulé et ne tient pas compte des autres zones régulées. Ainsi, il arrive qu'un effet boule de neige se produise. Par exemple si l'avion A doit être retardé à cause du secteur S, alors le faire décoller un quart d'heure plus tard peut engendrer un dépassement de capacité d'un autre secteur et faire retarder un autre avion et ainsi de suite.

De plus, quand de nouveaux plans de vol arrivent, l'affectation des créneaux est reconsidérée et les créneaux déjà alloués peuvent être décalés.

Un autre problèmes de CASA, est que lorsqu'un vol subit des régulations multiples, le créneau est calculé uniquement en fonction du secteur allouant le plus de retard, ce qui peut violer les contraintes de capacité des autres secteurs. Dans le modèle, nous allouons les créneaux que lorsque nous sommes sûr que les avions ne créerons pas de dépassements de capacité.

Cependant, c'est un outil opérationnel qui est bien intégré dans la chaîne complexe du processus d'ATM, et on estime que les régulations locales de la CFMU ont un impact très faible sur la surcharge globale des centres de contrôle [5].

Résolution grâce à la programmation par contraintes (PPC)

Le cadre des problèmes de satisfaction de contraintes (CSP) est très générique et concerne des domaines et relations entre variables quelconques.

Contraintes Une contrainte est une relation entre des inconnues ou variables d'un problème qui restreint les combinaisons de valeurs qu'elles peuvent prendre simultanément. Par exemple, une contrainte géométrique de non recouvrement entre deux rectangles spécifie simplement que les positions et dimensions de chaque rectangle sont reliées par les équations suivantes :

$$x_1 + l_1 \leq x_2 \; ou \; x_2 + l_2 \leq x_1$$

$$y_1 + h_1 \leq y_2 \; ou \; y_2 + l_2 \leq y_1$$

avec (x_1, y_1) et (x_2, y_2) les variables représentant les coordonnées du sommet inférieur gauche des deux rectangles, l_1 et l_2 leur largeur et h_1 et h_2 leur hauteur.

Les contraintes sont de trois types :

- déclaratives : les contraintes ne décrivent pas de procédure chargée de les faire respecter.
- non-directionnelles : une contrainte reste bien définie quelque soit l'ordre de modification apporté à ses variables.
- additives : toutes les contraintes d'un problème de satisfaction de contraintes doivent être satisfaites simultanément.

La résolution d'un CSP consiste à affecter des valeurs à toutes les variables du problème tel que l'ensemble des contraintes du problème soit respecté [6].

SHAMAN Pour pallier aux problèmes, aux inconvénients et au manque d'efficacité de CASA, le CENA[1] a développé un module basé sur la programmation par contraintes au sein de la plate-forme SHAMAN[2] [7]. Le projet SHAMAN, possède des fonctionnalités permettant :

---

[1]Centre d'Etudes de la Navigation Aérienne

[2]System to Help Analysis and Monitoring of Acc resources and Air Network

- la diffusion sélective d'informations selon différents niveaux de représentation (centres, secteurs, flux de trafic).
- l'évaluation rapide des effets d'un ensemble de mesures de régulation tels que les choix de la configuration d'un centre de contrôle ou l'affectation, à certains flux de trafic, de débit ou de délai maximal spécifique.

Ce projet développe des outils pouvant être utilisés en phase pré-tactique et pour l'analyse à posteriori. Il utilise la programmation par contraintes et les heuristiques de recherche utilisées sont multiples. Par exemple, premier arrivé sur la contrainte la plus chargée, premier servi, cette heuristique est très proche du mode de résolution utilisé par la CFMU. Quelque soit l'heuristique choisie, chaque avion possède une variable de retard au décollage (maximum de 240 minutes en général), et son plan de vol est parfaitement connu, ainsi que le schéma d'ouverture des six centres de contrôle en route. La stratégie de résolution est l'implémentation séquentielle des variables de retard, l'ordre étant défini par l'heuristique utilisée.

Fonctionnement Ce modèle pose des contraintes de capacité sur tous les secteurs, en divisant leur durée totale en tranches contiguës de trente minutes, et en restreignant le nombre de vols qui entrent dans les secteurs ouverts durant celles-ci. Par exemple, si le secteur S est ouvert de 12H00 à 13H30, avec une capacité de trente-deux vols par heure, alors on pose trois contraintes pour assurer qu'il n'entrera pas plus de seize avions de 12H00 à 12H30, puis de 12H30 à 13H00 et de 13H00 à 13H30. Ainsi, la PPC apporte une vue globale des contraintes de capacité, si bien que les solution existantes sont consistantes (toutes les contraintes sont satisfaites).

Problèmes Ce module d'allocation de créneaux n'empêche pas les dépassements de capacité sur les périodes dont le début n'est pas un multiple de trente minutes. De plus, la stratégie utilisée est guidée par la minimisation des retards, ce qui implique que les vols retardés ont tendance à s'accumuler au début de chaque tranche de trente minutes, ce qui génère également des pics de trafic dépassant les capacités. En outre, si l'implémentation échoue, on considère qu'il n'y a pas de solution.

Ces deux méthodes représentent les deux projets les plus aboutis, d'autres méthodes sont encore au stade expérimental. Dans ce travail nous essayons de définir un modèle basé sur les graphes évolutifs afin de voir si nous pouvons introduire des périodes d'absorption dans les secteurs régulés afin de pouvoir faire décoller les avions qui ne l'ont pas pu à l'heure demandée.

Chapitre 2

Le Modèle

Dans ce chapitre, nous expliquons la conception du modèle, les choix réalisés, puis les évolutions effectuées pour obtenir un modèle sur lequel on puisse travailler.

1 Les Graphes Evolutifs

Un graphe évolutif est un graphe dynamique dont les propriétés des arètes et/ou des sommets changent avec le temps.

1.1 Représentation

Le modèle est un graphe évolutif (cf fig. 2.1). Les sommets représentent les secteurs à un temps donné. Les arêtes sont les relations temporelles entre les secteurs,

Définition du graphe Soit G notre graphe orienté évolutif, avec V(G) l'ensemble de ses sommets et E(G) l'ensemble de ses arêtes, définit ainsi

- $v \in V(G)$ ssi v est un secteur à un temps donné.
- $(v_1, v_2) \in E(G)$ ssi
  - $v_1, v_2 \in V(G)$
  - v_1 et v_2 représentent des secteurs qui sont soit voisins et reliables par une route aérienne, soit identiques mais à des temps différents.
  - si v_1 représente un secteur au temps t, alors v_2 représente un secteur au temps $t+1$.

Notre graphe est évolutif car on peut changer les propriétés des sommets. Lors de la phase pré-tactique, nous travaillons avec des capacités différentes que lors de la phase tactique.

Taille du grahe Le graphe devient vite important. Par exemple, pour une carte composée de seize secteurs, chaque secteur ayant en moyenne quatre voisins (cas de la grille), on a donc par couche seize sommets, et par inter-couche $16*5 = 80$ arêtes (une pour chaque voisin, plus une restante sur le même secteur). Ce qui nous donne un graphe de taille au temps t composé de $16*(t+1)$ sommets et $(80*t)$ arêtes. pour une grille carrée de côté n on a environ :

$$n^2 * (t+1) \textit{ sommets et } 5*n*t \textit{ arêtes}$$

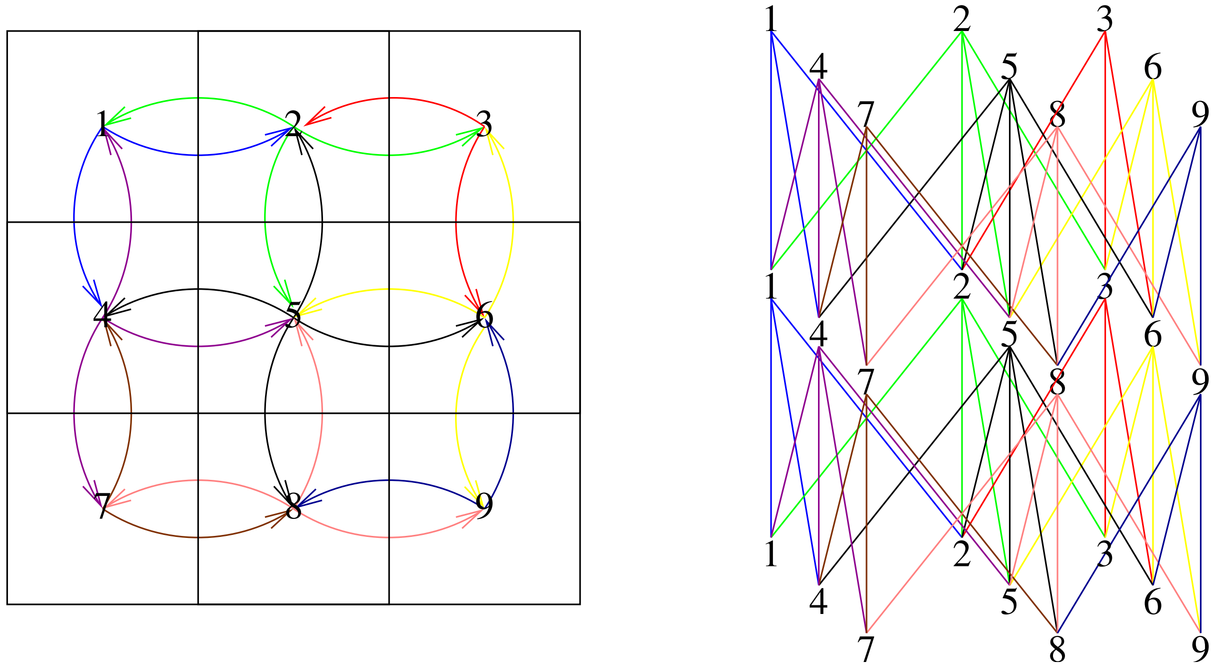

FIG. 2.1 – *Exemple de graphe généré à partir d'une zone recouverte par une grille* $3*3$*. Les couleurs des flèches correspondent aux voisins d'un même sommet. La figure de gauche représente une vue de dessus et la figure de droite une vue 3D pour trois couches successives. Les noms des sommets de notre graphe correspondent aux noms des secteurs de la figure de gauche.*

1.2 Graphe Utilisé

Nous commençons par construire notre graphe à partir des secteurs qui évoluent dans le temps (au niveau des capacités, pas de leurs dimensions), pour effectuer l'allocation de créneaux. Ensuite nous essayons de faire passer les mêmes avions en temps réel ayant subit ou non des aléas en utilisant la capcité maximale. Selon l'évolution de ce graphe, nous constatons que les avions passent plus ou moins bien selon le taux des aléas.

2 Le Modèle de Base

Le graphe représente les secteurs d'une zone de taille $X*Y$. Nous voulons éviter les dépassements des capacités sur les secteurs de cette zone. Pour avoir une représentation réaliste du trafic, nous construisons ce graphe "dynamique" à partir d'un graphe "statique" composé des aéroports et des routes de la zone. Sur la fig.2.2, nous avons la représentation d'une zone avec ses aéroports et les différentes routes possibles.

2.1 Graphe Statique et Graphe Dynamique

Les aéroports et les routes définissent le graphe statique (les aéroports représentant les sommets et les routes les arêtes) de notre modèle. Ce graphe représente l'ensemble des aéroports de la zone ainsi que toutes les routes existantes entre les aéroports. Un avion ne peut se déplacer que sur une route du graphe

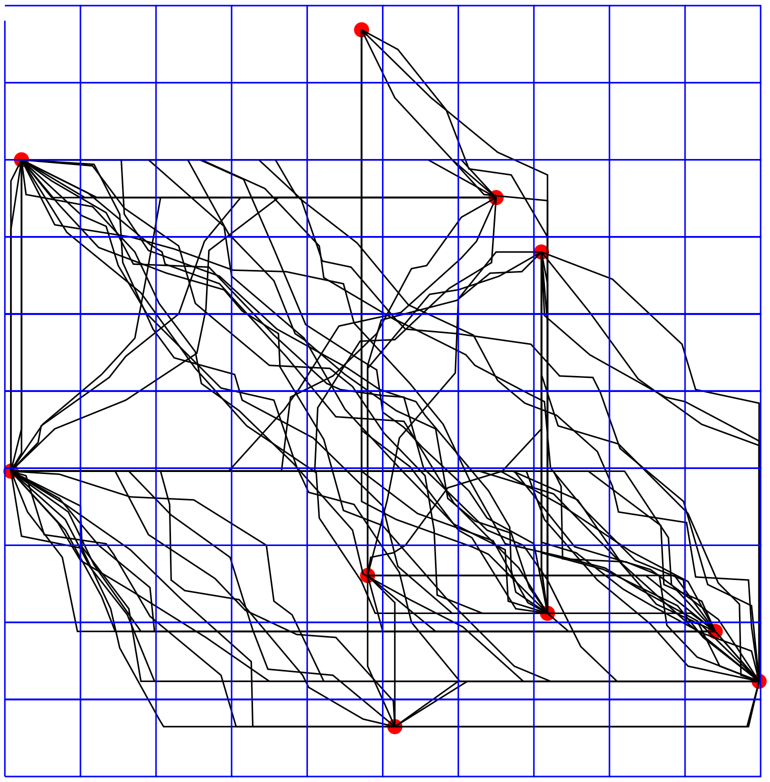

FIG. 2.2 – *Exemple de zone, en rouge les aéroports, en noir les routes et en bleu les délimitations de secteurs.*

statique.

La zone et les secteurs représentent le graphe dynamique (car évolutif). Les sommets sont les secteurs et les arêtes les relations de voisinage entre les secteurs de la zone entre les temps t et $t+1$.

2.2 Les Aéroports

Les aéroports ont une position dans la zone donnée par ses coordonnées cartésiennes, permettant de les situer dans le plan. Un aéroport a un ensemble de destinations (des aéroports). S'il existe une route aérienne allant de l'aéroport A à l'aéroport B, alors il en existe une allant de B à A (le trajet inverse existe). On s'assure qu'il n'y a pas d'aéroport isolé, et que, via des escales, chaque aéroport peut relier tout les autres (on a un graphe statique connexe).

2.3 Les Routes

Les routes relient les aéroports de la zone. Elles sont en sens unique, i.e. sur une route tous les avions vont dans le même sens, ce qui correspond à la réalité. Les routes sont composées d'une suite de *way-points* (les positions intermédiaires) que suivent les avions. Afin de savoir combien de temps passe un avion dans un secteur, nous cherchons aussi les secteurs traversés par celle-ci ainsi que la portion leur appartenant. La vitesse d'un avion étant constante durant tout son trajet, nous savons précisément combien de temps passe un avion dans chaque secteur traversé. Les routes sont empruntées de façon équiprobable. Dans la réalité, un sixième du trafic européen utilise vingt routes. Le modèle n'est cependant pas en désaccord avec la réalité, il suffit juste de mettre un poids sur les routes pour s'y retrouver. Elles sont calculées aléatoirement à partir des aéroports de départ et d'arrivée, avec l'algorithme suivant :

```
Ax = position x de l'aéroport de départ
Ay = position y de l'aéroport de départ
Bx = position x de l'aéroport destination
By = position y de l'aéroport destination
Px = Ax;
Py = Ay
TANTQUE (Px != Bx)&(Py!=By) FAIRE
  SI (|Px - Bx| > 50 kms) & (|Py - By| > 50 kms) ALORS
    //(Ix, Iy) position intermédiaire
    Ix = Px + random(50/unité de distance de la zone)
    Iy = Py + random(50/unité de distance de la zone)
    On rejoint (Px, Py) à (Ix, Iy) par un plus court chemin
    Px = Ix
    Py = Iy
  SINON
    on rejoint (Px, Py) à (Ix, Iy) par un plus court chemin.
  FINSI
FINTANTQUE
```

La fonction `random(n)` tire un nombre aléatoirement entre 0 et $n-1$. Cet algorithme nous donne les positions intermédiaires des routes, que l'on peut assimiler aux *waypoints* empruntés par les avions lors de leurs vols.

2.4 Les Secteurs

Les sommets du graphe dynamique représentent les secteurs minimaux à un temps donné. Un secteur minimal possède des données statiques :

- ses coordonnées.
- la somme des routes le traversant.

et dynamiques :

- ses capacités réelles et maximales, permettant de définir les zones d'absorption.
- le nombre et le nom des avions présents à chaque moment t.

La capacité réelle d'un secteur correspond à la capacité utilisée pour l'allocation de créneaux. Nous l'utilisons pour déterminer l'heure théorique de décollage des avions. Un avion dépose un plan de vol contenant la route qu'il veut emprunter et l'heure à laquelle il désire décoller. Nous vérifions s'il est valide en regardant si à chaque temps t il ne provoque pas un dépassement de capacité réelle, sinon nous le retardons. Ainsi, nous obtenons un plan de vol valide (en théorie). Puis lors de la simulation (en temps réel), nous utilisons la capacité maximale pour absorber les retards dus aux aléas. La différence entre ses deux capacités représentent ce que nous appelons une zone d'absorption.

2.5 La Zone

La zone est définie à partir de ses dimensions (longueur et largeur), une unité de distance, une unité temporelle et possède routes, aéroports, secteurs et avions. On découpe la zone en une grille, ce qui implique que les couches du graphe “dynamique” soient des grilles, et que chaque secteur au temps t à trois, quatre ou cinq voisins au temps $t+1$ (cf fig.2.1).

Les unités servent à calculer le temps que mettent les avions à effectuer leur parcours et à affiner les résultats. Par exemple, si nous voulons travailler sur une zone de 1000km sur 1000km (à peu près le ciel aérien français), il ne sert à rien de définir une précision de la zone au km près car un avion fait environ du $10km/min$, nous pouvons donc prendre une unité plus grande.

2.6 Les Avions

Les avions, qui parcourent la zone, choisissent une route de celle-ci et une vitesse de croisière. A chaque unité de temps, on projette sa position sur le graphe des secteurs. Par exemple, si au moment t, l’avion A se trouve sur le secteur S, alors nous ajoutons l’avion A sur le sommet du graphe correspondant au secteur S au temps t.

Les avions possèdent une heure de décollage, une route et une vitesse qu’ils respectent. Ils peuvent subir deux types de retard : les aléas et les retards dus à l’engorgement d’un secteur (dépassement de sa capacité) en cas de décollage. Les aléas décrivent le fait qu’un avion, au moment du décollage, pour une raison quelconque (ne dépendant pas de l’allocation de créneaux), ne décolle pas. Il demande donc un autre créneau, à partir du moment où il est prêt. Le modèle ne sait pas quels avions subissent un aléa et combien de temps il dure.

3 Hypothèses et Stratégie

Pour les expérimentations, nous considérons un ensemble d’avions qui est valide mais dont certains secteurs ont atteint leur capacité réelle (capacité d’un secteur utilisée lors d’une allocation de créneaux). Puis nous affectons une proportion donnée d’aléas (qui consiste à retarder des avions au décollage) et nous vérifions qu’aucun secteur ne dépasse sa capacité maximale.

Le seul paramètre modifiable au cours de l’exécution, c’est l’heure de décollage des avions. Nous considérons qu’on ne peut modifier leur trajectoire. Donc lorsqu’un conflit est détecté, nous retardons un avion du secteur concerné pour le résoudre.

Ce qui amène au calcul d’un premier graphe de sorte à ce que le calcul des plans de vol ne viole pas l’intégrité du système. Nous pouvons retarder n’importe quel avion du secteur au décollage, ce qui garantit qu’aucun secteur ne sera en surcapacité. Ce graphe correspond à l’allocation de créneaux des avions, nous utilisons pour la calculer la capacité réelle.

Comme nous cherchons à déterminer les meilleures zones d’absorption, nous travaillons uniquement sur le temps réel, la stratégie utilisée pour l’allocation de créneaux n’est pas importante.

3.1 Les Aléas

Les avions ne décollent pas toujours à l’heure. Lorsqu’un avion décolle avec un retard, nous calculons ce que cela implique, et si un secteur dépasse sa capacité, nous résolvons le conflit en retardant les avions n’ayant pas encore décollé. Les aléas représentent ces retards. Nous supposons qu’on connaît la proportion d’aléas qu’il y aura sur un ensemble de plans de vol. De plus, si un avion ne décolle pas dans son créneau, nous supposons qu’il sera bientôt prêt, i.e. il y aura beaucoup plus d’aléas courts que longs. La durée de l’aléa décroît exponentiellement lorsque nous les affectons. Les aléas représentent des pannes dues aux aéronefs et aux compagnies, indépendamment du centre en charge de la gestion du flux aérien. C'est pourquoi les centres de contrôle sont au courant d'un aléa uniquement au moment du décollage prévu de l'avion. On suppose que les aléas ont lieu par tranche de quinze minutes. L'affectation des aléas suit l'algorithme suivant :

```
Alea = pourcentage des aléas
nbAvions = nombre d'avions de notre simulation

POUR i ALLANT DE 0 à (nbAvions * aleas / 100) - 1 FAIRE
  ret = (10 - ln(random(e^9 + 1))) * (15 / unite de temps de la zone)
  retarder le décollage d'un avion n'ayant pas encore subit d'aléa de ret
FINPOUR
```

Lorsque nous parlons de 10% d'aléas, cela signifie qu'on remplace `Alea` dans notre algorithme par 10, i.e. dix pour cent des avions de notre simulation n'ont pas décollé à l'heure prévue par l'allocation de créneaux.

3.2 Obtention des Plans de Vol

Afin d'avoir un ensemble d'avions valide (i.e. tous les secteurs ne dépassent pas la capacité réelle), nous effectuons un premier calcul. A chaque avion ajouté, nous vérifions qu'il n'engendre pas un dépassement de capacité de secteur, si c'est le cas, nous retardons son heure de décollage, nous vérifions s'il passe et ainsi de suite. Nous obtenons ainsi un ensemble de plans de vol qui ne viole pas l'intégrité du modèle, donné par l'algorithme suivant :

```
nbAvions = nombre d'avions que l'on veut

POUR i ALLANT DE 0 à nbAvions - 1 FAIRE
  A = avion ajouté
  t = heure de décollage de l'avion A
  posDest = position de l'aéroport d'arrivée de A

  TANTQUE l'avion A n'est pas sur posDest FAIRE
    Ajouter A dans le secteur où il doit se trouver au temps t
    S = secteur dans lequel se trouve A au temps t
    nbAvionsS = nombre d'avion(s) dans le secteur S au temps t
    capR = capacité réelle de S au temps t

    SI nbAvionsS > capR ALORS
      enlever A depuis son décollage de la zone
      repousser l'heure de décollage de A d'une unité de temps
      t = heure de décollage de A
    SINON
      t = t + 1
    FINSI
  FINTANTQUE
FINPOUR
```

3.3 Déroulement de l'Expérimentation

Nous partons d'un plan de vol valide et nous appliquons, sur un nombre donné d'avions, un aléa qui consiste à retarder l'heure de décollage de l'avion.

A chaque temps t nous avons donc trois types d'avions :

– le type A : l'avion doit décoller au temps t et n'a pas subit d'aléa.
– le type B : l'avion doit décoller au temps t mais a subit un aléa. Nous l'enlevons de notre graphe, et nous affectons son temps de décollage au temps t plus le temps de l'aléa.
– le type C : l'avion a subit un aléa et sa nouvelle heure de décollage est au temps t.

Dans le cas A, nous ne changeons pas le trajet dans notre graphe ; dans le cas B, nous l'enlevons, et dans le cas C nous l'ajoutons. Ainsi tous les avions de type C ont déjà été enlevés de notre graphe car ils ont été de type B plus tôt.

Le problème réside dans le fait que nous savons à peu près combien il y a d'aléas sur l'ensemble des avions, mais pas sur quels avions ils ont lieu. Pour rester fidèle à la réalité, nous supposons qu'on est au courant des aléas uniquement à l'heure de décollage des avions, mais nous ne savons pas pour combien de temps. Nous enlevons un avion subissant un aléa au moment du décollage, et nous essaierons de le rajouter lorsqu'il sera de nouveau prêt. Les créneaux qu'il laisse libres dans chaque secteur "profitent" si possible à d'autres avions de type B.

3.4 Algorithme Appliqué

Le modèle suit l'algorithme suivant :

```
POUR t1 ALLANT DE début à fin FAIRE
  enlever les avions de type B de G
  ajouter les avions de type C sur G
  t2 = t1

  TANTQUE t2 < fin FAIRE
    s = premier secteur engorgé (dans le temps)
    a = dernier avion arrivé dans s et n'ayant pas encore décollé

    SI a existe ALORS
      enlever a de G
      retarder de 15 min le décollage de a
      ajouter a sur G
      t2 = t1
    SINON
      t2++
    FINSI
  FINTANTQUE
FINPOUR
```

A chaque temps t, nous enlevons, de notre graphe G obtenu par les allocations de créneaux, les avions de type B, et nous ajoutons ceux qui ont été retardés au temps t (de type C). Nous faisons une simulation de tous les avions qui doivent décoller au temps t, sans se soucier des capacités, puis nous parcourons notre graphe. Nous regardons couche par couche en commençant par celle correspondant au temps t jusqu'à la fin de notre simulation. Sur chaque couche, nous regardons chaque secteur, et si le nombre d'avions est supérieur à la capacité maximale, nous enlevons l'avion arrivant normalement le dernier dans le secteur, n'ayant pas encore décollé au temps t, et nous le retardons au décollage. Puis nous recommençons à chercher les conflits à partir de la couche t, jusqu'à ce que l'on n'en ait plus. Nous faisons alors décoller tous les avions n'ayant pas été retardés par la résolution de conflits et nous considèrons qu'on ne peut plus y toucher. Puis nous ajoutons les avions au temps $t+1$.

A chaque fois que nous détectons un conflit, nous retardons un avion et nous incrémentons sa variable de retard. Une fois notre simulation terminée, nous récupérons la distribution des retards sur les avions.

4 Propriétés du Modèle de Base

Le but du modèle est d'aider à déterminer les meilleures zones d'absorptions pour un taux d'aléas donné, avoir le meilleur débit possible sans dépassement des capacités (minimisation des retards). Nous commençons par effectuer une série de tests pour essayer de tirer les propriétés de notre modèle. Chaque résultat donné par des figures a été vérifié plusieurs fois sur des zones différentes, et à chaque fois nous obtenons le même type de données.

La stratégie a été essayée sur la zone de la fig.2.2. Sa taille est de $500 * 500$, son unité de distance est de deux kms et son unité de temps de cinq minutes. Les avions vont de 500 à 700 km/h et un sur deux subit un aléa impliquant un retard allant de 1 à 9 (un retard de 1 correspond à 15min, 2 à 30 min...). On considère un temps total de simulation d'environ deux cents unités (soit plus de mille minutes) avec 1500 avions et des capacités réelles et maximales de dix et dix, nous travaillons donc sans zone d'absorption.

4.1 Relation entre la Longueur des Routes et les Avions

Nous commençons par extraire la distance des routes présente sur un secteur et le nombre d'avions ayant passé par un secteur. Les résultats sont donnés par la fig.2.3.

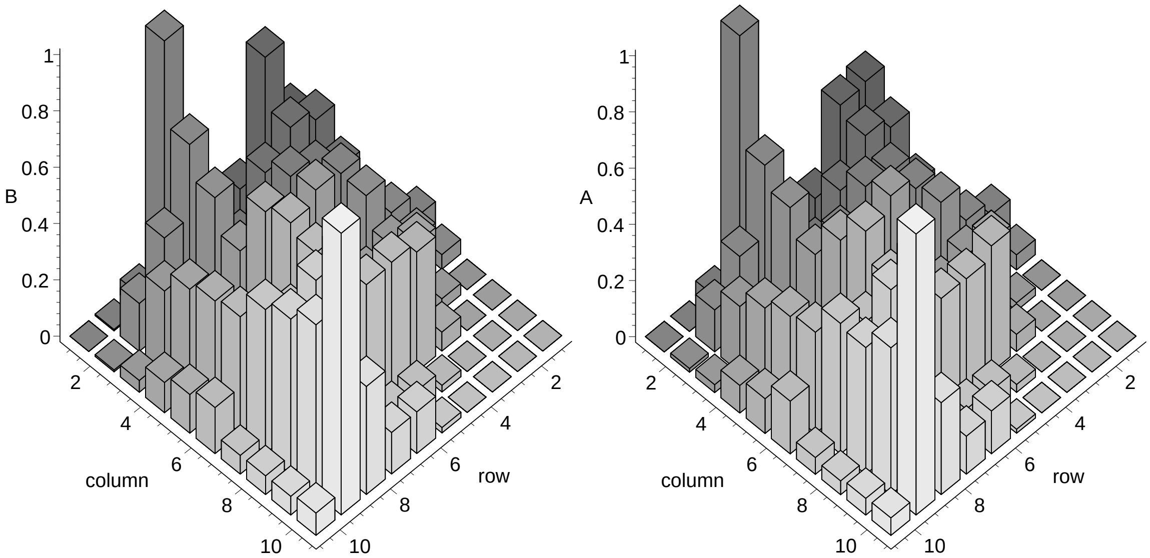

FIG. 2.3 – *Relation longueur de routes-nombre d'avions sur un secteur. La figure B représente la longueurs des routes des secteurs avec la valeur 1 pour le secteur en ayant le plus, et la figure A le nombre d'avions ayant passé sur un secteur, avec la valeur 1 pour le secteur en ayant eu le plus. Chaque histogramme représente un secteur, l'histogramme en position (i,j) correspond au secteur $j*10+i$ dans notre exemple, avec i pour le numéro de la colonne et j pour celui de la ligne de notre grille.*

Nous remarquons que les deux figures sont très similaires, nous en déduisons qu'il doit exister une relation entre la distance de route présente sur un secteur et le nombre d'avions y passant.

Comme les avions choisissent de façon équiprobable leur route, nous avons un nombre d'avions au kilomètre qui reste constant. Ce qui explique cette relation. Dans la réalite, nous savons que ce n'est pas le cas, mais pour s'y ramener, il suffit de mettre un poids sur les routes selon le nombre d'avions qui choisissent chaque route. Puis nous multiplions le nombre de kilomètres de routes dans chaque secteur par leur poids, et nous nous ramenons au modèle, où toutes les routes ont le même poids.

Nous avons utilisé un outil statistique pour prouver cette relation : le test du χ^2.

4.2 Test du χ^2

Pour démontrer expérimentalement que le nombre d'avions présent sur un secteur est proportionnel à la longueur des routes du secteur, nous effectuons un test du χ^2 [8].

Le test du χ^2 est un outil statistique dont le but est de pouvoir dire si oui ou non une variable aléatoire X' (ayant k résultats possibles $x_1, x_2, \ldots, x_k$) a pour loi celle de la variable aléatoire X prenant les k valeurs x_i avec $P(X = x_i) = p_i$ pour i variant de 1 à k.

Les k résultats possibles sont les secteurs ayant une longueur de route non nulle, et les x_i sont donnés par la longueur des routes présentes sur un secteur. Soit L_{S_i} la longueur de route présente sur le secteur S_i, on a :

$$p_i = \frac{L_{S_i}}{\sum_{j=0}^{n} L_{S_j}}$$

Avec n le nombre de secteurs.

Nous voulons vérifier par l'expérimentation que notre modèle suit cette loi. Nous travaille sur le temps de passage des avions dans un secteur et nous faisons leur somme sur tous les secteurs. Grâce aux p_i, nous obtenons les valeurs attendues et nous les comparons avec celles obtenues en calculant le χ^2 correspondant :

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^{n} \frac{(A_i - E_i)^2}{A_i}$$

Avec les A_i les valeurs attendues et les E_i les valeurs obtenues par l'expérimentation. Pour que le χ^2 soit valide, il faut que chaque A_i et E_i soient supérieurs à 5. Nous enlevons de la formule tous les secteurs dont les A_i (et donc E_i) sont nulles.

Puis nous utilisons une table du χ^2 [9] qui donne la probabilité P que la variable aléatoire X' ait pour loi X.

Les tableaux suivants donnent les résultats obtenus sur différentes zones selon le nombre d'avions.

Nombre d'avions	100	100	100	200	200	200	400	400	400
χ^2	114.58	102.32	106.9	63.32	71.42	73.21	45.178	27.331	42.57
P	0	0.0001	0	0.2062	0.0675	0.8249	0.8249	0.9993	0.8894

χ^2 sur la zone 1 avec un degré de liberté de 55

Nombre d'avions	800	800	800	1600	1600	1600
χ^2	14.38	9.05	14.65	13.97	18.48	11.475
P	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999

χ^2 sur la zone 1 avec un degré de liberté de 55 (suite)

Nombre d'avions	200	500	500	500	500	500	500
χ^2	non valide	70.175	55.259	51.493	38.14	64.377	48.439
P	non valide	0.8921	0.9959	0.9988	0.9999	0.9607	0.9996

χ^2 sur la zone 2 avec un degré de liberté de 86

Nombre d'avions	1000	1000	1000	1000	1000	1000
χ^2	37.386	38.079	31.142	58.469	25.837	41.335
P	0.9999	0.9999	0.9999	0.9899	0.9999	0.9999

χ^2 sur la zone 1 avec un degré de liberté de 86 (suite)

Nombre d'avions	1500	1500	1500	1500	1500	1500
χ^2	10.668	10.805	5.309	10.472	10.463	6.51
P	1	1	1	1	1	1

χ^2 sur la zone 1 avec un degré de liberté de 86 (suite)

Nombre d'avions	300	300	300	600	600	1200	2400	4800
χ^2	95	84	103	83	81	56	10	13
P	0.1834	0.4794	0.078	0.5103	0.5724	0.9939	1	0.9999

χ^2 sur la zone de la fig. 2.2 avec un degré de liberté de 84

Les degrés de libertés correspondent au nombre minimal de L_{S_i} nécessaire pour connaître toutes leurs valeurs (théoriques et expérimentales). Sur la zone de la fig.2.2, on a 15 secteurs qui ne sont pas traversés par des routes. Nous considérons uniquement 85 secteurs. Or pour connaître tous les L_{S_i} il nous faut connaître la valeur de 84 secteurs car on connaît $\sum_i L_{S_i}$. Pour cette zone, le degré de liberté pour le calcul du χ^2 est donc de 84.

Les valeurs "non valide" des tableaux correspondent à des tests où il existait des secteurs avec moins de cinq passages d'avions, non exploitables du point de vue du χ^2.

Nous remarquons que le test du χ^2 fonctionne dans toutes les configurations à partir d'un certain nombre d'avions. Nous pouvons en conclure que le nombre d'avions au km sur les routes est constant.

4.3 Exploitation du Résultat

Puisque le nombre d'avions au kilomètre est constant, nous avons une relation directe entre le graphe statique et le graphe dynamique. Le nombre d'avions présent sur un secteur est proportionnel à la longueur des routes d'un secteur.

Nous voulons optimiser le débit aérien, c'est à dire minimiser les zones d'absorption. Nous constatons que tous les secteurs ne posent pas de problèmes. Nous avons vu que le trafic dépendait de la longueur de routes présente sur chaque secteur. Nos secteurs n'ayant pas tous la même longueur de route, on a des secteurs qui ont plus de risques d'être engorgés que d'autres. Nous essayons de travailler sur les capacités de ces secteurs afin de garantir qu'il n'y ait pas d'avion retardé plus d'un temps t pour un taux d'aléas donné.

5 Résultats avec le Modèle de Base

Malheureusement, notre modèle possède un faible débit et les zones d'absorptions sont quasiment inutiles, car sans les mettre, nous obtenons une très bonne distribution des retards. La marge de travail sur les zones d'absorption est donc très faible, nous ne pouvons donc pas utiliser notre modèle pour résoudre le problème.

En effet sur le tableau de la fig.2.4, sans mettre de zones d'absorption, nous constatons que même avec la pire distribution des retards possible (en l'occurrence avec un taux d'aléas de 50%), nous obtenons seulement 4% d'avions retardés, avec un retard maximal d'une heure.

Retards / Aléas	0	1	2	3	4
0%	5000	0	0	0	0
10%	4999	1	0	0	0
25%	4924	67	7	1	1
50%	4798	188	13	1	0
75%	4875	119	6	0	0
100%	4948	50	2	0	0

FIG. 2.4 – *Distribution des retards dans le modèle de base sans zone d'absorption*

Le tableau de la fig.2.5 confirme le fait que le modèle de base n'est pas adapté. En effet, en mettant une capacité réelle de 14 pour l'allocation de créneaux et une capacité maximale de 15 pour la simulation, nous obtenons des résultats quasiment identiques en ce qui concerne la distribution des retards. Le gain par rapport à une affectation sans zone d'absorption est nul. Le coût d'une zone d'absorption ne justifie donc pas sa mise en place.

Retards / Aléas	0	1	2	3	4
0%	5000	0	0	0	0
10%	4999	1	0	0	0
25%	4859	128	9	4	0
50%	4818	169	12	1	0
75%	4844	148	8	0	0
100%	4963	36	1	0	0

FIG. 2.5 – *Distribution des retards avec une capacité réelle de 14, et une capacité maximale de 15*

Les courbes de la fig.2.6 représentent le débit moyen d'avions en fonction du temps durant la simulation, sans aléa. La courbe 15-15 correspondant à une simulation sans zone d'absorption (cas du premier tableau), donc le meilleur débit moyen possible, est au-dessus de la 14-15 (cas du deuxième tableau). Comme la distribution des retards est similaire dans les deux cas, nous en concluons que pour le modèle de base, la meilleure affectation des zones d'absorption est de ne pas en mettre.

De plus nous remarquons que le débit moyen est inférieur à 500, sur un débit théorique de 1500 (100 secteurs de capacité maximale 15), ce qui est peu. A titre de comparaison, le nombre d'avions passant dans le ciel français en une journée, sur environ 140 secteurs est d'environ 8000, avec des regroupements de secteurs car le débit n'est pas toujours au maximum (les vols de nuit sont moins nombreux). Le modèle en absorbe avec difficulté 5000 sur les deux tiers d'une journée, correspondant à un plein débit toute la journée, donc toutes les capacités du modèle sont déjà exploitées.

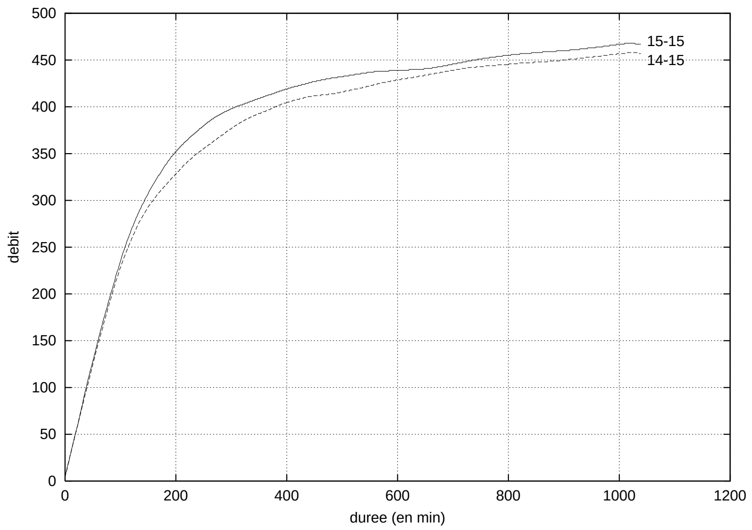

FIG. 2.6 – *Débit moyen pour le modèle de base sans aléa*

6 Le Modèle Avancé

Nous faisons évoluer notre modèle de sorte à augmenter le débit et à avoir une utilité à poser des zones d'absorption. Le problème du modèle de base résidait dans le fait que seuls les secteurs ayant le plus de routes se trouvaient engorgés. Comme ces secteurs sont en petit nombre, lorsque nous résolvons un conflit, alors il y a peu de risque de retarder un avion en cascade, cas loin d'être isolé dans la réalité, car les secteurs sont délimités d'après le trafic attendu, et ce trafic est le plus homogène possible sur les secteurs.

Comme nous avons vu que la longueur des routes sur un secteur permet de déterminer le nombre d'avions attendus, en mettant la même sur chaque secteur, nous nous rapprocherons du modèle réel.

Dans le modèle de base, la grille nous donnait la délimitation des secteurs. Dans ce modèle nous affinons la grille et elle nous donne la délimitation des "cases", que nous regroupons selon la longueur des routes pour obtenir nos nouveaux secteurs. Les secteurs ne sont plus rectangulaires.

6.1 Délimitation des Secteurs

Nous cherchons à avoir la même longueur de route sur chaque secteur. La carte des secteurs ne ressemblera plus à une grille.

Cependant, nous allons tout de même partir d'une grille pour notre délimitation, mais avec un affinage beaucoup plus grand. Ce qui implique quelques changements sur notre modèle de base.

Les Cases

Nous ajoutons les cases à notre modèle, qui correspondent aux éléments de la grille. Chaque case est un rectangle de la grille et possède une longueur de route la traversant, ainsi qu'un paramètre de marquage servant pour la délimitation, permettant de dire si elle est déja affectée ou non à un secteur précédemment créé.

Les Secteurs

Les secteurs ont les mêmes propriétés que dans notre modèle de base, auquels on ajoute l'ensemble des cases les constituant en remplacement de leurs coordonnées (si on sait dans quelle case on est, alors on sait dans quel secteur on est). En effet, une case ne peut appartenir qu'à un et un seul secteur.

Les autres éléments du modèle avancé ne subissent pas de changements importants par rapport au modèle de base. Il s'agit uniquement de l'intégration des cases dans ceux-ci.

Regroupement des cases

C'est le regroupement des cases en un secteur qui définissent le secteur. Ce regroupement s'effectue selon la méthode du grossissement en diamant (cf fig.2.7). Nous regardons toutes les cases voisines du secteur (sur les cotés, pas en diagonale), et si elles ne sont pas marquées (elles n'appartiennent pas à un autre secteur), nous les ajoutons au secteur. Tant que nous n'avons pas atteint la longueur de route voulue sur le secteur, nous recommençons, à moins de ne plus avoir de cases voisines non marquées. Nous obtenons cette longueur à partir du nombre de secteurs désirés. En effet, nous connaissons la longueur de route totale, nous la divisons donc par le nombre de secteurs désirés et nous obtenons la longueur de route moyenne que nous voulons sur chaque secteur.

Sur la fig.2.7, les numéros correspondent aux étapes de création des secteurs. Ainsi à l'étape 1, on a une seule case, puis à l'étape 2 on en rajoute quatre...

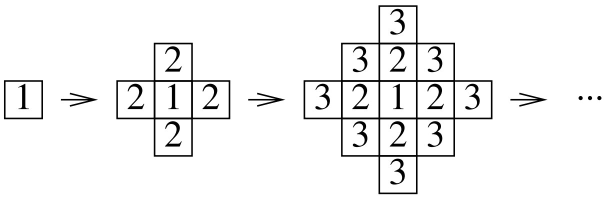

FIG. 2.7 – *Regroupement des cases en "diamant". Les numéros correspondent aux étapes. Ici, nous considèrons que tous les voisins ne sont pas marqués. Nous commençons par choisir une case, puis à l'étape 2 nous ajoutons tous les voisins de 1, à l'étape 3, tous les voisins de 2 et ainsi de suite.*

Au début, aucune case n'est marquée, et à chaque fois que l'une d'entre elles est ajoutée à un secteur, nous la marquons. Tant qu'il reste des cases non marquées, nous continuons à créer de nouveaux secteurs. Si une case est isolée (tous ses voisins sont marqués), nous l'ajoutons à un de ses secteurs voisins.

6.2 Zone Obtenue

Par cette méthode de délimitation de secteurs nous obtenons des secteurs de tailles différentes mais quasiment de même poids (au niveau trafic). Un exemple de résultats obtenus est donnée sur la fig.2.8. Sur cette zone, nous avons une grille carrée de côté 250 (ce qui nous donne 62500 cases), et elle a les mêmes caractéristiques que la zone de la fig.2.2. Nous avons demandé de délimiter 100 secteurs. Nous en obtenons un peu plus, mais nous avons plus de 90 secteurs de même poids, ce qui permet de mieux répartir le trafic sur les secteurs.

Nous avons effectué un test du χ^2 sur ce nouveau modèle pour comparer la longueur des routes avec le trafic, et nous obtenons les mêmes résultats que pour le modèle de base. La relation entre trafic et longueur des routes est toujours valable.

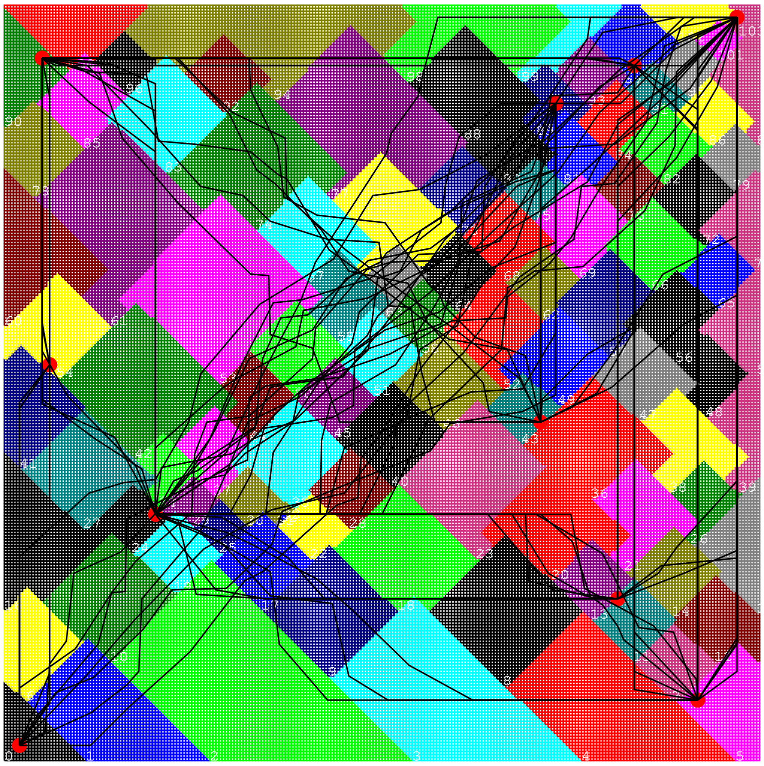

FIG. 2.8 – *Zone obtenue pour le modèle avancée*

6.3 Débit et Distribution des Retards

Cette nouvelle délimitation donne de meilleurs résultats au niveau du débit moyen (cf fig2.10) et “colle” plus à la réalité du point de vue de la distribution des retards. Nous avons un débit moyen de plus de 1000 avions, et un débit réel de 1200 sans aléa, ce qui représente deux fois plus que dans le modèle de base.

Retards	0	1	2	3	4	5	6	Total
nb Avions	10232	1425	268	59	13	2	1	2206

FIG. 2.9 – *Distribution des retards pour un taux d'aléas de* 10%

Nous avons fait passer 12000 avions sur un temps correspondant aux deux tiers d'une journée (un peu plus de 1000 minutes). La distribution des retards est plus importante que dans le premier modèle, car au lieu d'avoir uniquement certains secteurs qui posent problèmes, presque tous les secteurs peuvent être engorgés.

La colonne “Total” correspond à la somme pondérée par le nombre de fois ou un avion a été retardé de la distribution des retards. Nous constatons que même avec seulement 10% d'aléas, nous obtenons presque 15% d'avions retardés, et la somme du nombre de fois qu'un avion a été retardé, nombre de fois où nous avons du résoudre un problème, est de plus de 18% (cf fig.2.9).

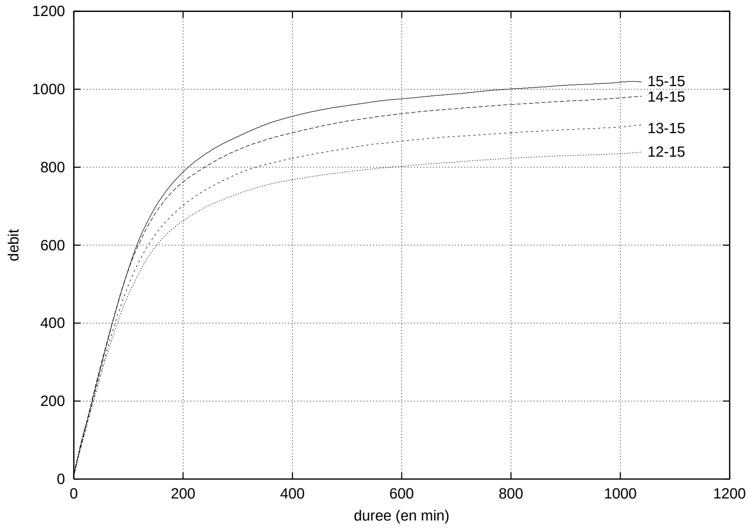

FIG. 2.10 – *Débit moyen maximal (0% d'aléas) selon les zones d'absorption.*

6.4 Vers les Zones d'absorption

Les premiers résultats obtenus sur le modèle avancé permettent de travailler sur les zones d'absorption, car selon la quantité que nous en mettons, nous n'obtenons pas les mêmes résultats. Dans le chapitre suivant, nous essayons de déterminer quelles sont les meilleures affectations selon que l'on préfère privilégier les débits, ou la distribution des retards ou les deux à la fois.

Chapitre 3

Affectation des Zones d'Absorption

Nous cherchons à trouver le meilleur compromis entre le débit d'une zone et la distribution des retards sur les avions. Pour cela, nous utilisons le modèle avancé prédéfini et nous effectuons une série de tests. Lorsque nous obtenons des résultats intéressants, nous essayons de les expliquer.

Pour la mise en place de telles zones, nous comparons deux types d'affectation de zones d'absorption :
- de façon continue, i.e. nous mettons une zone d'absorption durant toute la simulation sur tous les secteurs.
- de façon temporelle, i.e. nous mettons des zones d'absorption qui évoluent dans le temps. Les secteurs n'ont pas en permanence la même zone d'absorption. Cette méthode permet d'affecter sur chaque secteur des zones de taille plus grande mais de durée plus courte, ou bien de mettre moins de zones d'absorption.

Nous commençons par traiter le cas des zones d'absorption en continue et nous définissons pour cette méthode les meilleures affectations possibles selon le taux d'aléas.

Les données obtenues correspondent à un test particulier, mais les tests effectués renvoient toujours le même type de résultats. En outre le nombre de résultats permet de faire une correction sur les données obtenues.

1 Mise en Place d'une Zone d'Absorption en Continue

Les secteurs du modèle sont presque tous de même poids, nous mettons donc les mêmes zones d'absorption sur chaque secteur durant toute la simulation, car chaque secteur a le même risque d'être engorgé. Nous essayons de trouver une relation entre le débit moyen et la distribution des retards selon la taille de la zone d'absorption. Les résultats sont obtenus à partir de la zone de la fig.2.8 avec 12000 avions sur un temps de 1040 minutes. Les avions vont de 500 à 700 km/h et décollent à n'importe quel moment. Si un avion doit décoller après la durée de la simulation (car retardé pendant l'allocation de créneaux), il n'est pas pris en compte.

En fait nous essayons de faire passer 12000 avions sur notre zone durant le temps de la simulation, mais selon les capacités réelles affectées, nous avons plus ou moins d'avions qui passent.

Nous parlons de zone d'absorption en X-Y, ou de stratégie en X-Y, pour dire que nous avons une capacité réelle de X lors de notre allocation de créneaux et une capacité maximale de Y lors de notre simulation pour tous les secteurs.

Dans un premier temps, nous nous intéressons à la distribution des retards selon les zones d'absorption et le taux d'aléas, puis nous regardons le débit moyen obtenu et enfin nous résumons ces deux types de données pour définir quelle est la meilleure stratégie à adopter selon le taux d'aléas.

1.1 Distribution des Retards selon les Zones d'Absorption

La colonne "Total" des tableaux de distribution des retards correspond à la somme pondérée des avions retardés. Cette somme représente le nombre de fois où un secteur a été engorgé durant notre simulation.

Stratégie en 15-15

Le tableau de la fig.3.1 montre que les retards sont déjà importants pour 10% d'aléas et que c'est aux alentours de 50% que nous avons le plus de retards, puis après nous avons une diminution de ceux-ci avec l'augmentation des aléas.

Cette diminution s'explique car de 0% à 60-70% nous augmentons le décalage entre avions décollant à l'heure et ceux ayant subit des aléas, tandis que de 60-70% à 100% nous le diminuons. Plus clairement, dans le cas de 100%, tous les avions sont retardés d'au moins quinze minutes ; tous les créneaux de décollage sont libérés et donc réaffectés. L'allocation de créneaux se trouve en fait décalée de quinze minutes, donc la distribution des retards est plus faible.

La distribution des retards pour une stratégie en 15-15 montre que les avions sont retardés au plus de deux heures ($8*15$ minutes), et dans le cas de 50% d'aléas, nous obtenons un total de retard de 2600, ce qui, pour 12000 avions, est assez important. Si chaque avion était retardé de un, nous aurions plus de 20% de retard du aux aléas.

Aléas \ Retards	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
0%	12000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10%	10232	1425	268	59	13	2	1	0	0	2206
20%	10136	1455	302	79	20	6	7	0	1	2457
30%	10128	1528	267	56	17	4	0	0	0	2318
40%	9942	1670	315	63	10	0	0	0	0	2529
50%	9924	1692	289	67	24	2	1	0	1	2600
60%	9929	1704	283	64	15	0	3	0	1	2548
70%	10041	1617	270	55	14	2	0	1	0	2395
80%	10061	1585	285	59	9	1	0	0	0	2373
90%	10141	1520	274	46	17	1	1	0	0	2285
100%	10250	1493	213	30	10	2	1	1	0	2072

FIG. 3.1 – *Distribution des retards selon le taux d'aléas en 15-15*

Stratégie en 14-15

Avec cette stratégie, nous obtenons une meilleure distribution des retards (fig.3.2) et un plus fort contraste entre le total des retards selon le taux d'aléas. Nous voyons clairement, que lors du cas de 10% d'aléas, nous préfèrerons la stratégie en 14-15 à 15-15.

Aléas \ Retards	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
0%	12000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10%	11963	30	6	1	0	0	0	0	0	45
20%	11436	486	63	9	5	1	0	0	0	664
30%	10926	896	138	34	5	1	0	0	0	1299
40%	10781	1020	159	35	3	2	0	0	0	1465
50%	10663	1134	169	30	4	0	0	0	0	1578
60%	10599	1217	146	35	3	0	0	0	0	1626
70%	10579	1239	155	26	1	0	0	0	0	1631
80%	10753	1077	141	24	3	1	0	0	1	1456
90%	10833	1038	114	11	3	1	0	0	0	1312
100%	10947	952	87	10	4	0	0	0	0	1172

FIG. 3.2 – *Distribution des retards selon le taux d'aléas en 14-15*

Aléas \ Retards	0	1	2	3	4	Total
0%	12000	0	0	0	0	0
10%	12000	0	0	0	0	0
20%	11961	39	0	0	0	39
30%	11716	263	17	3	1	310
40%	11460	485	43	11	1	608
50%	11352	589	54	5	0	712
60%	11281	644	63	9	3	809
70%	11269	660	64	5	2	811
80%	11314	632	46	8	0	748
90%	11408	549	38	4	1	641
100%	11512	463	24	1	0	514

FIG. 3.3 – *Distribution des retards selon le taux d'aléas en 13-15*

La mise en place d'une zone d'absorption change les données, influant sur la distribution des retards. Ces zones portent bien leur nom car elles permettent de faire diminuer sensiblement les retards. Au lieu d'avoir un total de 2600 au maximum, nous ne sommes plus qu'à 1631, soit une baisse d'environ 40% pour une zone de taille 1. Le maximum de retard absorbé l'est pour un taux d'aléas de 10% avec 2161 retards de moins et le minimum (hors 0%) pour 60% avec 922 retards.

De plus, bien que nous ayons un avion retardé de deux heures comme dans le premier cas, nous constatons que les cases correspondantes aux retards 6, 7 et 8 sont égales a zéro (à une exception près). En moyenne, un avion retardé l'est moins qu'avec la stratégie 15-15.

Stratégie en 13-15

Cette fois, le total des retards est en moyenne divisé par deux (fig.3.3) par rapport à la stratégie précédente. Le maximum de retard alloué à un avion est d'une heure. Le maximum de retard absorbé par

Aléas \ Retards	0	1	2	3	Total
0%	12000	0	0	0	0
10%	12000	0	0	0	0
20%	11991	9	0	0	9
30%	11942	55	2	1	62
40%	11808	182	10	0	202
50%	11680	299	18	3	344
60%	11651	326	19	4	376
70%	11617	358	23	2	410
80%	11704	287	8	1	306
90%	11803	183	11	1	208
100%	11814	180	6	0	192

FIG. 3.4 – *Distribution des retards selon le taux d'aléas en 12-15*

rapport à 14-15 est de 989 pour 30% d'aléas.

Nous augmentons l'absorption des retards avec cette stratégie, mais désormais, la distribution des retards est assez faible (à peine 7% d'avions retardés au maximum d'une heure), pour supposer qu'il ne sert à rien d'augmenter la zone d'absorption. Cependant, nous l'avons quand même testé pour le démontrer, et ainsi arriver à la limite des possibilités d'affectation de zones d'absorption pour notre modèle.

Stratégie en 12-15

Bien que tableau de la fig.3.4 montre une très bonne distribution des retards, si nous la comparons à la stratégie en 13-15, le gain est assez faible. Du coup on obtient un maximum de retard de seulement 442 (pour 80% d'aléas).

Si nous comparons la somme des retards absorbés selon les différentes stratégies, nous constatons qu'elle décroît exponentiellement des stratégies en 15-15 aux stratégies en 12-15, donc le gain entre chaque augmentation de zone d'absorption diminue de façon exponentielle. Par rapport à l'absorption obtenue à chaque augmentation de zones d'absorption, la stratégie en 12-15 semble être en dessous de la limite inférieure par rapport au gain obtenu.

1.2 Choix de la Meilleure Stratégie selon le Taux d'Aléas

Intuitivement, nous voyons que le débit dépend de la capacité réelle (utilisée pour l'allocation de créneaux) et du taux d'aléas. Plus la capacité réelle (toujours inférieure ou égale à la capacité maximale utilisée pour la simulation) est importante, plus le débit est élevé, ce qui n'est pas forcément vrai avec des aléas, d'où l'intérêt de voir l'effet des différentes stratégies.

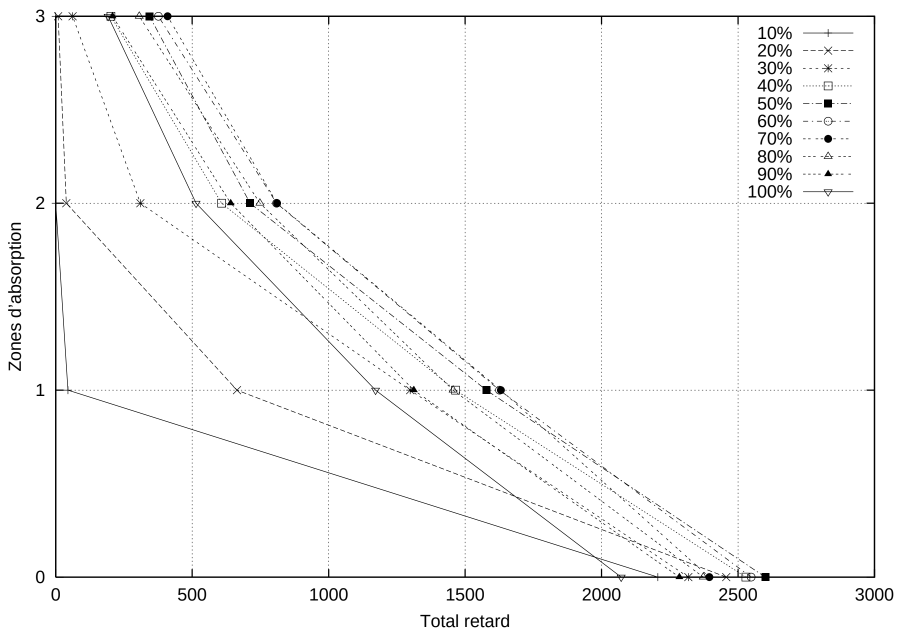

FIG. 3.5 – *Représentation du total de retard en fonction des zones d'absorption*

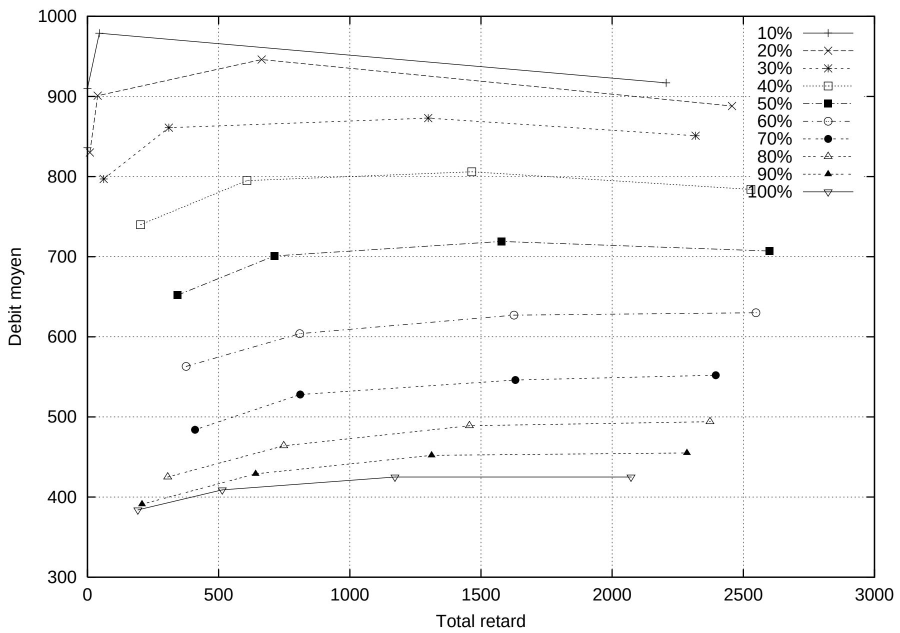

FIG. 3.6 – *Représentation du total de retard en fonction du débit moyen*

Comme nous venons de traiter la distribution des retards, nous allons essayer de mettre en relation le débit moyen et la distribution des retards d'après les zones d'absorption et le taux d'aléas ; soit quatre paramètres à prendre en compte. Nous fixons le taux d'aléas et nous regardons le total des retards en fonction des zones d'absorption (fig.3.5) et le total des retards en fonction du débit moyen (fig.3.6).

Pour la fig.3.5, les zones d'absorption 0, 1, 2 et 3 correspondent respectivement à une zone d'absorption en 12-15, 13-15, 14-15 et 15-15. Les courbes, selon le taux d'aléas, confirment de façon visuelle le fait que le gain entre zones d'absorptions décroît de façon exponentielle.

Nous allons traiter les courbes une à une sur les deux figures. Quand nous parlons de débit, nous nous référons à la fig.3.6, quand nous parlons de zones d'absorption, à la fig.3.5, et de débit pour une zone d'absorption des deux à la fois, en faisant le lien grâce à l'axe des retards.

Pour avoir une meilleure visualisation du débit moyen, on peut se référer aux figures de l'annexe A.

Sans aléa

Sans aléa, nous sommes dans le modèle idéal. Il n'y a pas de conflit, alors il ne sert à rien de mettre des zones d'absorption.

Les stratégies qui consisteraient à mettre une zone d'absorption dans ce cas seraient mauvaises, car elles n'absorberaient aucun retard (car il n'y en a pas à l'origine) tout en diminuant le débit.

Avec un taux d'aléas de 10%

Nous avons un gain très net pour une zone d'absorption entre 15-15 et 14-15, puis très faible entre 14-15 et 13-15. De plus, le débit augmente entre la stratégie 15-15 et 14-15.

Nous voyons que les retards sont importants en 15-15 et très faibles en 14-15 donc, bien que l'allocation de créneaux nous ait donné un moins bon débit théorique, les zones d'absorption ont permis de l'augmenter par rapport à 15-15 car tous les avions retardés ont pu passer sans engendrer de retard, contrairement à la stratégie 15-15.

D'où le double intérêt de mettre des zones d'absorption pour un taux d'aléas de 10%, car non seulement nous absorbons les retards, mais nous augmentons aussi le débit. Cependant, mettre une zone d'absorption en 13-15 ne serait pas judicieux car le débit est fortement réduit et la distribution des retards est déjà très bonne en 14-15.

Avec un taux d'aléas de 20%

Dans ce cas, la meilleure affectation dépend de l'importance que nous accordons au débit par rapport aux retards. Le meilleur débit est obtenu avec une zone d'absorption en 14-15, mais nous avons un total de retards non négligeable tandis que la zone d'absorption en 13-15 nous donne un débit inférieur mais avec un total de retard du coup négligeable.

Si nous privilégions le débit, la meilleure stratégie semble être en 14-15, et si nous voulons minimiser les retards, alors il vaut mieux choisir la 13-15. D'où la difficulté de choisir une bonne zone d'absorption, tout dépend de ce que l'on recherche et des coûts des différentes stratégies.

Avec un taux d'aléas de 30% et 40%

Si nous suivons l'évolution générale des courbes sur la fig.3.5, nous remarquons que la valeur du total des retards en 1 (zones d'absorption en 14-15) devrait être un peu moins élevée, ceci dit, l'exploitation des résultats ne s'en trouve pas changée.

En effet les débits moyen en zone d'absorption 13-15, 14-15, et 15-15 sont à peu près au même niveau. Etant donné que les retards dus aux aléas sont mieux absorbés en 13-15 qu'en 14-15 et 15-15, la meilleure stratégie consiste donc à mettre des zones d'absorption en 13-15 lorsque nous savons que l'on aura environ 30% d'aléas.

Avec un taux d'aléas de 50% à 100%

Le débit moyen est meilleur pour des zones d'absorption en 14-15 et 15-15, mais celle en 13-15 n'est pas beaucoup plus faible.

Dans tous ces cas de figures, il est clair qu'il ne faut pas prendre la stratégie en 15-15 (car plus de retard qu'en 14-15 pour un débit moyen quasi identique). Cependant, le choix devra se faire entre 13-15 et 14-15, car la différence de débit est de moins de 50 avions par minute et le total des retards est environ deux fois supérieur en 14-15 par rapport à la stratégie 13-15. Cela dépend du coût des retards induits par les aléas par rapport au coût de retarder un avion pendant l'allocation de créneaux (mise en place de zones d'absorption).

En clair, il vaut mieux utiliser la stratégie 14-15 si on favorise le débit, et la stratégie 13-15 pour la distribution des retards.

1.3 Résumé

Le problème de l'affectation des zones d'absorption est donc complexe. Elles dépendent du taux d'aléas, du coût de leur mise en place, de l'importance du débit et de la distribution des retards. Cependant, nous pouvons essayer de résumer quelle stratégie adopter selon le taux d'aléas, si nous préférons favoriser le débit ou la minimisation des retards (MR). Le tableau de la fig.3.7 nous donne ces résultats d'après l'exploitation des fig.3.5 et 3.6.

Aléas	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
débit	15-15	14-15	14-15	13-15	13-15	14-15	14-15	14-15	14-15	14-15	14-15
MR	15-15	14-15	13-15	13-15	13-15	13-15	13-15	13-15	13-15	13-15	13-15

FIG. 3.7 – *Résumé des stratégies à choisir*

Les valeurs peuvent changées si nous prenons en compte les retards lors de l'allocation de créneaux, ce qui correspondrait à mettre un coût sur les zones d'absorption. Et ce coût augmenterait de façon exponentielle avec le nombre d'avions, donc il faudrait aussi considérer le nombre d'avions.

Nous remarquons que l'affectation en 12-15, bien qu'absorbant très bien les retards, est loin d'être satisfaisante du point de vue du débit. Pour tous les taux, elle se trouve bien inférieure. Et comme la stratégie en 13-15 donne des résultats satisfaisants au niveau des retards, nous ne sélectionnons jamais la stratégie en 12-15, ce qui confirme ce que nous avions dit dans la section précédente, i.e. que vu que le débit en 12-15 se retrouve divisé par 2 par rapport au maximum possible, ce n'est pas une bonne stratégie.

2 Mise en Place d'une Zone d'Absorption Temporelle

Nous essayons une nouvelle stratégie qui consiste à mettre des capacités réelles sur les secteurs qui évoluent dans le temps. Le trafic aérien n'est pas constant, il y a des périodes où des zones sont à leur débit maximal, tandis que d'autres sont en période de faible trafic. La nuit est une période de faible trafic, c'est une période où il n'est pas nécessaire d'affecter des zones d'absorption.

Nous travaillons sur deux paramètres des zones d'absorption dans ce cas là, leur durée et leur taille (différence entre capacité réelle et capacité maximale). Nous pourrions essayer de les affecter de la façon la plus judicieuse possible, malheureusement il faudrait faire beaucoup d'heuristiques car nous devons prendre en compte le voisinage de la zone, déterminer les moments précis où chaque secteur serait engorgeable. Travail qui s'avèrerait fastidieux et à renouveler fréquemment, car bien que certaines journées de trafic se ressemblent au niveau macroscopique, les différences au niveau microscopique peuvent impliquer beaucoup de bouleversements pour la mise en place de ces zones.

Nous allons donc affecter des zones d'absorption un peu aléatoirement sur les secteurs les plus engorgés et exploiter les résultats ainsi obtenus, selon le nombre d'aléas.

2.1 Affectations de Zones d'Absorption en même Temps

Nous supposons que mettre des zones d'absorption à intervalles de temps régulier en même temps sur tous les secteurs peut améliorer l'absorption des retards.

Aléas \ Retards	0	1	2	3	4	5	Total	Débit moyen
0%	12000	0	0	0	0	0	0	917
10%	11809	171	17	3	0	0	214	905
20%	11572	389	35	3	1	0	472	883
30%	11327	597	69	6	1	0	757	842
40%	11181	731	71	17	0	0	924	776
50%	11094	788	100	14	3	1	1047	687
60%	11063	841	85	10	1	0	1045	599
70%	11101	811	78	9	1	0	998	522
80%	11143	780	75	2	0	0	936	469
90%	11243	697	54	6	0	0	820	421
100%	11277	667	51	4	1	0	785	405

FIG. 3.8 – *Distribution des retards selon le taux d'aléas en 14-15 temporelle*

Nous avons appliqué l'algorithme suivant : sur chaque période de quinze minutes, nous metttons les dix premières minutes à quinze en capacité réelle, et les cinq dernières à douze, ce qui fait un total de zones d'absorption équivalent à la stratégie en 14-15 continue.

Nous comparons les résultats obtenus (cf fig.3.8) avec la stratégie en 14-15 continue. La distribution des retards est bien plus faible (exceptée pour 10% d'aléas), et plus le taux d'aléas augmente, plus la différence de débit entre les deux stratégies diminue. Cette stratégie s'avère donc plus efficace à partir d'un taux d'aléa de 70% à 80%, car la distribution des retards est meilleure, et le débit juste un peu plus faible. Cependant, on arrive dans des débits d'une valeur deux fois inférieure à celui sans aléas, ce qui laisse supposer qu'il reste une grande marge de travail en ce qui concerne l'affectation des zones d'absorption.

Comme nous avons mis les zones d'absorption en même temps sur tous les secteurs, à intervalle de temps régulier, les résultats obtenus ne sont pas bons pour un taux d'aléas allant de 0% à 60%, s'expliquant par le fait que notre zone passe d'un débit maximal théorique d'environ 1500 à 1200, bloquant tout le graphe pendant la durée d'affectation des zones.

Il faut donc affecter ces zones de sorte à ce que le débit maximal théorique du graphe ne varie pas, tout en faisant fluctuer les capacités sur les secteurs.

Cependant, les premiers résultats confortent l'idée que la mise en place de zones d'absorptions temporelles est une meilleure stratégie. En effet, on voit que l'absorption des retards est meilleure, malheureusement, comme on les a mises toutes aux mêmes moments dans le temps, le débit se trouve fortement diminué durant l'allocation de créneaux. Il faut donc trouver les meilleures emplacements afin de ne pas défavoriser l'allocation de créneaux tout en optimisant l'absorption des retards.

2.2 Vers une Meilleure Affectation des Zones d'Absorption ?

Pour cela, nous devrions prendre en compte la géographie de la zone (position des aéroports, tracé des routes, relation de voisinage entre secteurs...), la vitesse des avions, le nombre de secteurs, le taux d'aléas, les anciens problèmes... ce qui implique une longue recherche avant de pouvoir commencer à les déterminer.

C'est pourquoi, nous continuons les tests sur les zones d'absorption temporelles sans tenir compte de tous ces paramètres. Les seules contraintes que nous nous donnons, c'est d'affecter le même nombre de zones d'absorption, et que le débit théorique durant l'allocation de créneaux soit constant.

Période de quinze minutes

Nous affectons sur chaque secteur une période de quinze minutes : cinq minutes de mise en place d'une zone d'absorption en 12-15, puis dix minutes sans. Les périodes ne commencent pas toutes en même temps, nous les répartissons de façon à ce que l'on ait en permanence le même débit théorique.

Les résultats obtenus (fig.3.9) avec cette stratégie sont moins bons, que pour toutes les autres stratégies effectuées avant. Par exemple, pour 20% d'aléas, nous obtenons un débit moyen de 895, tandis que le total de retards est de 586, pour 70% un débit moyen de 521 pour un total de retards de 1244. Donc un débit trop faible pour 20% d'aléas, et pas de gain significatif pour les aléas importants.

Cependant, nous constatons que malgré une distribution des retards plus importante que par rapport à la stratégie qui consiste à mettre toutes les zones en même temps, nous obtenons un meilleur débit, ce qui signifie que l'allocation de créneaux offre un meilleur débit théorique. On confirme qu'une meilleure pose des zones d'absorption peut améliorer le débit.

En effet, plus nous avons de retards, plus le débit se trouve diminué car moins d'avions décollent à l'heure initialement prévue.

Période de trente minutes

Cette fois, nous appliquons le même algorithme que précédemment avec une période de trente minutes. Nous mettons dix minutes une zone d'absorption en 12-15, puis vingt minutes sans.

Les résultats obtenus (cf fig.3.10) montrent que nous obtenons globalement les mêmes résultats que

Aléas \ Retard	0	1	2	3	4	Total	Débit moyen
0%	12000	0	0	0	0	0	927
10%	11650	319	23	7	1	390	917
20%	11484	459	51	7	1	586	895
30%	11082	806	93	16	3	1052	838
40%	10979	894	106	18	3	1170	770
50%	10894	960	124	19	3	1277	690
60%	10828	1047	97	26	2	1327	602
70%	10900	973	111	15	1	1244	521
80%	10816	1061	100	20	3	1333	463
90%	11016	889	84	9	2	1092	428
100%	11092	830	72	5	0	989	412

FIG. 3.9 – *Distribution des retards selon le taux d'aléas en 14-15 temporelle à débit théorique constant et période de 15 min*

lors d'une période de quinze minutes avec cependant une distribution des retards plus importante. Ce qui veut dire, que comme le débit est plus ou moins identique, alors l'allocation de créneaux offre un meilleur débit que lorsque nous mettons une période de quinze minutes.

Aléas \ Retard	0	1	2	3	4	5	Total	Débit moyen
0%	12000	0	0	0	0	0	0	932
10%	11574	372	43	8	2	1	495	916
20%	11296	606	81	14	2	1	823	889
30%	11036	845	96	17	5	1	1113	845
40%	10840	1002	131	19	8	0	1353	768
50%	10755	1074	144	25	2	0	1447	689
60%	10820	1045	116	17	2	0	1336	603
70%	10787	1053	137	20	1	2	1401	528
80%	10818	1067	105	9	1	0	1308	466
90%	10915	978	96	9	2	0	1205	426
100%	10971	917	96	14	1	1	1160	410

FIG. 3.10 – *Distribution des retards selon le taux d'aléas en 14-15 temporelle à débit théorique constant et période de 30 min*

2.3 Résumé

En fait, comme nous mettons les zones d'absorption un peu au hasard sur les secteurs, alors elles réduisent le débit sans pour autant être efficaces au niveau des retards, car elles ne "s'aident" pas entre elles, i.e. si un avion cause deux retards sur deux secteurs différents, alors il faut une zone d'absorption en correspondance sur ces deux secteurs. Si l'avion met trente minutes à parcourir les deux secteurs, il faudrait que les zones d'absorption aient lieu en même temps sur ses deux secteurs (si on a une période de quinze ou de trente minutes comme dans nos tests). Sinon la pose de l'une empêche l'absorption du retard à cause de la non pose de l'autre en même temps.

Nous voyons clairement que le fait de mettre au hasard ces zones d'absorption n'améliore pas la régulation du trafic aérien. Cependant, nous avons pu mettre en évidence le fait qu'il doit exister une solution optimale pour augmenter le débit et minimiser les retards selon le taux d'aléas. Nous avons constaté qu'il ne suffisait pas, à même nombre de zones d'absorption, d'améliorer le débit pendant l'allocation de créneaux (période de trente minutes par rapport à la période de quinze minutes) pour obtenir de meilleurs résultats lors du temps réel. Il faut mettre en relation les données de l'allocation de créneaux et du temps réel, augmenter le débit de l'allocation de créneaux sans pour autant augmenter la distribution des retards en temps réel.

D'où l'intérêt d'utiliser les propriétés des graphes évolutifs pour résoudre problème. Il faut chercher à déterminer celles qui permettront de mieux définir l'endroit où poser les zones d'absorption. En effet, nous n'utilisons pas une caractéristique importante pour la pose de ces zones, c'est la relation de voisinage. En utilisant les graphes, nous pouvons essayer de déterminer s'il existe une solution permettant de mettre en relation les zones d'absorption des différents secteurs d'un espace aérien. On cherche à faire "glisser" les zones d'absorption par rapport aux routes afin que si un avion ne peut pas décoller à cause de plusieurs secteurs de sa route, alors cette pose permet de libérer des créneaux par rapport à ses temps de passage sur ceux-ci. Le problème est de savoir s'il existe un "glissement" pour toutes les routes qui se recoupe, ou de trouver, le cas échéant, le meilleur. L'utilisation des graphes permet de faciliter ce problème.

Conclusion et Perspectives

Le pourcentage d'avions retardés traversant le ciel français, était compris entre 26% et 39% ces quatres dernière années, dont 23% dus à la congestion aérienne en 2001 (les autres raisons sont multiples : conditions météorologiques, attente d'un passager perdu dans un aéroport, problème technique).

Le modèle montre que nous obtenons de bons résultats avec la mise en place de zones d'absorption, et donc permettrait de diminuer les retards sans pour autant diminuer le débit.

Eléments de Résolution du Problème des Zones d'Absorption

Principe et but La résolution du problème de l'affectation de zones d'absorption consiste tout d'abord à déterminer quel est le meilleur débit théorique, qui est obtenu sans zone d'absorption et sans aléa, puis de se rapprocher le plus possible de cette valeur selon le taux d'aléas en affectant le mieux possible les zones d'absorption. Si nous atteignons cette limite, alors cela implique qu'il n'y a plus d'avions retardés. Pour résoudre ce problème et voir l'effet de l'affectation des zones d'absorption, nous avons construit un modèle simple qui représente le trafic au niveau des secteurs et qui le régule.

Conception du modèle de base Nous avons commencé par élaborer un système permettant de faire circuler des avions sur une zone et pouvoir déterminer où se trouvent les avions à chaque instant. Ce modèle nous a permis de remarquer que le trafic sur un secteur était proportionnel à la longueur des routes présente sur celui-ci. Ce résultat a été démontré à l'aide d'un test du χ^2. Mais le modèle n'était pas assez performant pour voir l'effet de l'affectation des zones d'absorption, car sans, nous obtenions une faible distribution des retards, et le débit était bien meilleur qu'avec. Nous avons donc décidé de faire évoluer le modèle afin d'avoir un intérêt à affecter des zones d'absorption.

Le modèle avancé Comme la longueur des routes sur un secteur défini le trafic attendu, nous avons redéfini les secteurs à partir de cette longueur. Le modèle avancé possède donc un poids équivalent sur chaque secteur (en ce qui concerne la longueur des routes, et donc du trafic le traversant). Ainsi, nous obtenons un modèle qui potentiellement possède le même risque sur chaque secteur d'être engorgé, et qui augmente le débit moyen (multiplié par deux par rapport au modèle de base). Ce modèle nous permet de voir l'effet de l'affectation de différentes zones d'absorption. L'étude s'est ensuite essentiellement portée sur l'affectation de zones d'absorption en continue. Les résultats obtenus permettent de dire qu'il s'agit d'une bonne stratégie et décrivent quelle est la meilleure zone d'absorption en continue à utiliser selon le taux d'aléas prévu. On voit qu'elles sont utiles dès 10% d'aléas car elles donnent un meilleur débit et minimisent la distribution des retards.

Contributions

Relation longueur des routes-Trafic Le *free-flight* n'existant pas en Europe, les avions suivent des balises aériennes. On a réussi à déterminer que si les avions prenaient de façon équiprobable les routes possibles, alors le trafic aérien de chaque secteur dépendrait de la longueur de routes le traversant. Quelle que soit la délimitation des secteurs, alors le nombre d'avions passant par ceux-ci est constant. Du coup, on pourrait redélimiter les secteurs pour les avoir de taille plus homogène (au niveau du volume), et ainsi augmenter le débit de l'espace aérien.

Intérêt des zones d'absorption Le modèle a permis de démontrer que l'utilisation de zones d'absorption permet non seulement de diminuer les retards mais aussi d'augmenter le débit dans le cas où il y a des aléas, ce qui est toujours le cas. Une façon d'augmenter les capacités du modèle actuel serait donc d'affecter judicieusement des zones d'absorption sur les secteurs.

Perspectives

Zones d'absorption temporelles Bien que nous ayons effectué des tests sur des zones d'absorptions temporelles avec des résultats non satisfaisants, l'étude de cette affectation doit aller dans cette direction. Il faut pouvoir déterminer les meilleurs endroits dans le temps pour poser une zone d'absorption et de quelle taille. C'est une recherche qui demande d'étudier une multitude de paramètres : nombre d'avions passant par le secteur, vitesse des avions, taux et durée des aléas, répercussions sur les secteurs voisins... mais qui permet de minimiser le nombre et la taille des zones d'absorptions, et donc augmenter le débit tout en gardant une faible distribution des retards. Pour aider à cette résolution, nous pouvons nous ramener à utiliser les propriétés des graphes, en particulier des graphes évolutifs, comme utilisés dans notre modèle.

Reroutage des avions Une autre solution pour augmenter les capacités du système actuel serait d'étudier le reroutage des avions, en travaillant sur le choix des routes. Il faudrait que toutes les routes soient prises de façon équivalente. Ainsi, nous pourrions délimiter les secteurs en fonction de la longueur des routes et donc avoir un nombre de secteurs plus important sans pour autant augmenter les charges de coordination des contrôleurs. En effet, les secteurs ont atteint leur taille minimale, mais uniquement pour ceux où passe le plus de trafic (cf fig.1.1). Si on découpe l'espace en fonction de la taille de ses secteurs, alors on se trouverait dans le cas du modèle de base, où uniquement les secteurs les plus chargés posent problèmes et réduisent le débit. Le fait d'avoir redélimité les secteurs nous a fait multiplier le débit par deux. Cependant, le reroutage a un coût important, donc pour implémenter cette méthode, il faudrait voir à ce que toutes les routes empruntées est le même coût (trouver un compromis entre la consommation d'essence, le temps de trajet et le prix de la route empruntée).

Implémentation d'autres stratégies pour la résolution des conflits Au lieu de travailler sur la stratégie employée pour résoudre les conflits, nous pouvons changer les stratégies et voir ce qu'elles impliquent. Le problème est de rester équitable dans la stratégie. Cependant, vaut-il mieux retarder longtemps qu'un seul avion, ou retarder peu beaucoup d'avions ? Nous pouvons aussi essayer la stratégie du dernier avion à avoir déposer son plan de vol, dernier servi...

Distribution entre les centres de contrôle Un autre paramètre que nous avons écarté dans ce travail est la gestion décentralisée de la régulation. Ce sont les centres de contrôle (FMP) qui régulent en temps réel les avions devant passer par les secteurs qu'ils contrôlent. Nous avons considéré que tout était centralisé, donc il faudrait essayer d'implémenter un aspect distribué sur chaque centre de contrôle. Dans la régulation, c'est un paramètre qui réduit le débit, car les contrôleurs sont obligés d'échanger des informations entre eux pour suivre les avions. Si nous distribuons de manière efficace les positions des avions, alors la capacité maximale de chaque secteur pourra être augmentée car le contrôleur aura moins d'échanges à effectuer pour obtenir les informations.

Table des figures

Bibliographie

[1] *Fifteen countries, a single european sky*. Commission Européenne, 1999.

[2] H. Hering. *Les différents types de stress professionnel appliqués au contrôle aérien*. Manuel technique EEC Note No. 01/02, EUROCONTROL, janvier 2002.

[3] Thomas Rivière. *Robustesse des solutions du problème d'allocation de créneaux*. Technical report, ENAC, juillet 2001.

[4] EUROCONTROL. *Basic CFMU handbook, general & CFMU systems*, mars 2002. 8.0 edition.

[5] Serge Manchon, Christine Plusquellec, Jean-Baptiste Gotteland et Philippe Kerlirzin. *Building and evaluating a minimal regulation scheme, avril 2001*. 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar.

[6] Nicolas Barnier. *Application de la programmation par contraintes à des problèmes de gestion du trafic aérien*. Thèse de doctorat, ENSEEIHT, 2002.

[7] Christine Plusquellec et Serge Manchon. *Description du module d'allocation de créneaux utilisant la programmation par contraintes implantée dans SHAMAN*. Manuel technique, CENA, 1998.

[8] William Feller. *An Introduction to Probability Theory and its Applications*, volume II. John Wiley and sons, Inc., novembre 1966.

[9] John Walker. *Chi-Square Calculator*.
http ://www.fourmilab.ch/rpkp/experiments/analysis/chiCalc.html

[10] François Laroussinie, Antoine Petit, Philippe Schnoebelen, Béatrice Bérard et Michel Bidoit. *Vérification de logiciels : techniques et outils de model-checking*. Vuibert, 1999.

[11] Franck Chatton. *Etudes de nouvelles métriques de complexité de la circulation aérienne*. Manuel technique, ENAC, août 2001.

[12] Mô Van Dang. *Classification de Données Spatiales : Modèles Probabilistes et Critères de Partitionnement*. Thèse de doctorat, UTC, 1998.

[13] *The PRC's european ATM performance measurement system*. juin 1999.

[14] L. Box et B. Kerstenne F. Ballerini. *Simulation temps réel Paris départ sud*. Manuel technique EEC Report No. 377, EUROCONTROL, novembre 2002.

[15] Xavier Fron. *Dealing with airport and airspace congestion in Europe*, Mars 2001. Présentation.

[16] Géraud Granger. *Détection et résolution de conflits aérien : modélisation et analyse*, octobre 2002.

Annexe A

Débit Moyen Selon le Taux d’Aléas

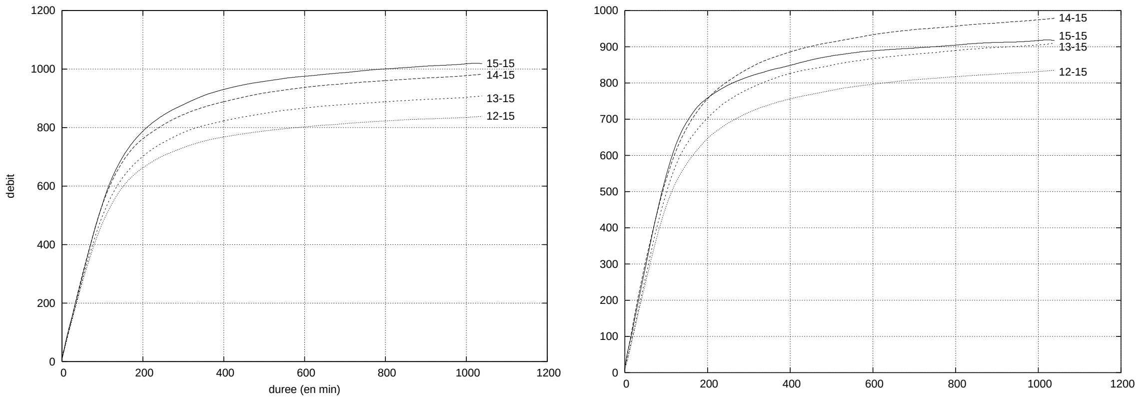

FIG. 1.1 – *Débit moyen avec un taux d’aléas de 0% et 10%*

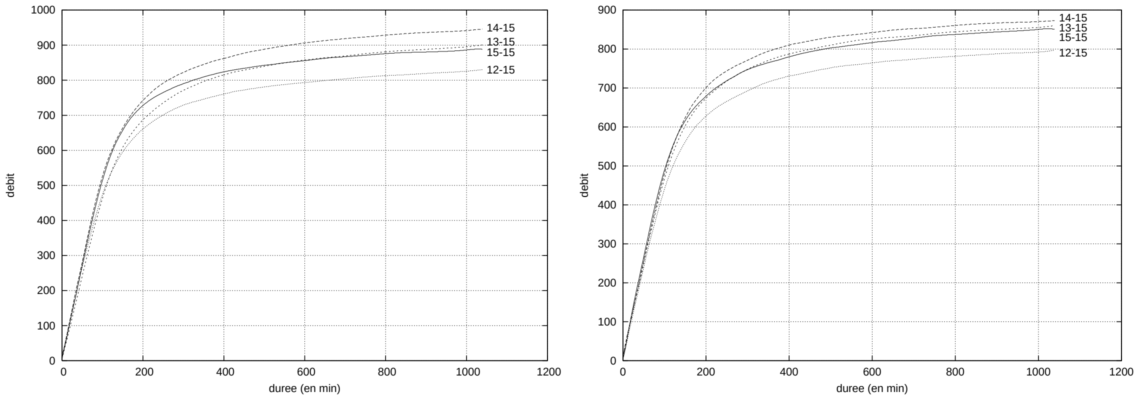

FIG. 1.2 – *Débit moyen avec un taux de d’aléas de 20% et 30%*

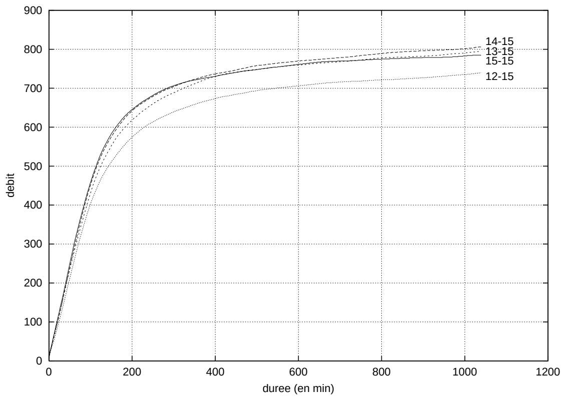

FIG. 1.3 – *Débit moyen avec un taux de 40% d'aléas*

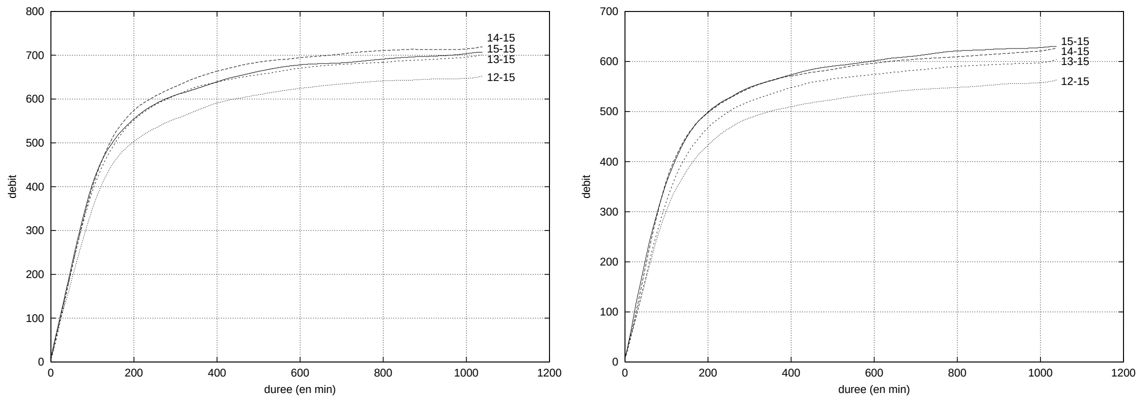

FIG. 1.4 – *Débit moyen avec un taux de 50% et 60% d'aléas*

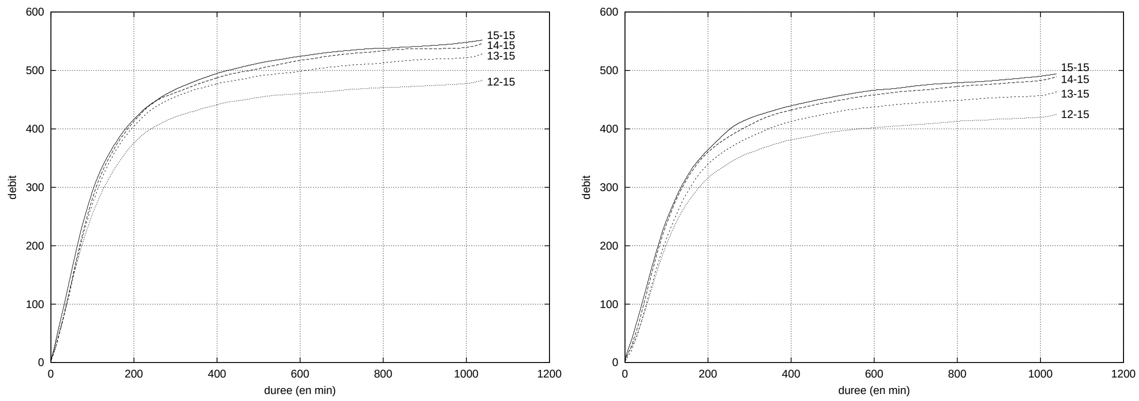

FIG. 1.5 – *Débit moyen avec un taux de 70% et 80% d'aléas*

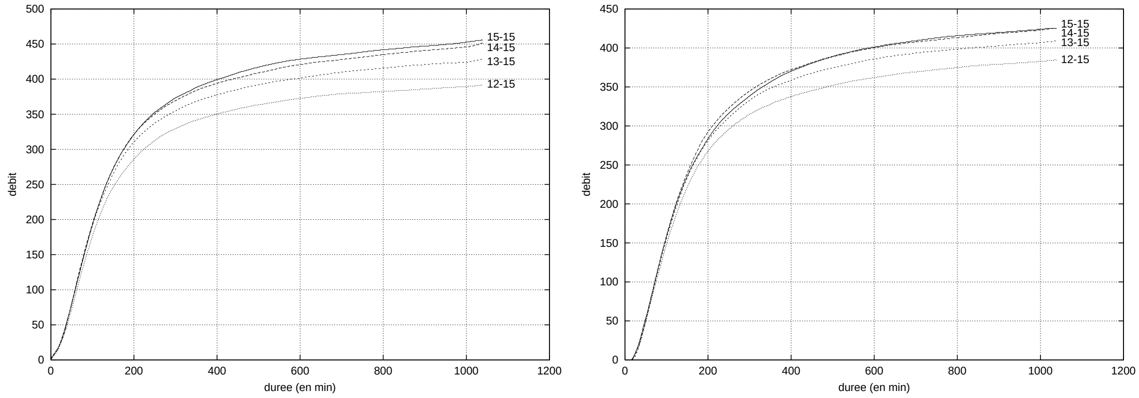

FIG. 1.6 – *Débit moyen avec un taux de 90% et 100% d'aléas*