



**Université Bordeaux I**



**LaBRI - Bordeaux**

## **Utilisation des zones d'absorption pour améliorer la gestion de flux du trafic aérien**

marché C/1.291/CE/NB/03/ entre EUROCONTROL et ADERA

Rapport Intermédiaire.

Richard Castanet, Cyril Gavaille, Mohamed Mosbah et Frédéric Ferchaud

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

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

- 15 janvier 2004 -





# 1 Introduction

La nature stochastique du trafic aérien provient principalement de l'incertitude associée aux aléas des vols opérationnels. Les conditions météorologiques, l'attente de passagers en retard, les problèmes techniques au moment du décollage ... sont des exemples d'aléas. Ceux-ci perturbent le planning initial prévu par la CFMU<sup>1</sup> avec pour conséquences des retards propagés sur les différents secteurs régulés.

Une zone d'absorption correspond à un ou plusieurs créneaux de décollage laissés libres pendant l'affectation de créneaux par la CFMU afin de pouvoir absorber les aléas, sans modifier le planning initial.

Nous avons développé un simulateur de vol en route SIVOR<sup>2</sup>. Grâce à celui-ci, nous avons montré de façon expérimentale qu'on pouvait améliorer la gestion de flux du trafic aérien car les zones d'absorption permettent de diminuer les retards ATC<sup>3</sup> tout en augmentant le débit. D'où le double intérêt des zones d'absorption. Ensuite nous avons commencé à montrer de manière théorique les résultats obtenus.

Un autre intérêt des zones d'absorption est que si nous trouvons un algorithme qui donne la meilleure distribution selon les demandes des plans de vol, alors son implémentation dans le modèle actuel ne changera pas la physionomie des secteurs, ni le travail des contrôleurs aériens, ni le dépôt de plan de vol des compagnies aériennes.

## 2 Simulateur de vol en route (SIVOR)

### Résultats obtenus

SIVOR nous a permis de montrer expérimentalement que l'utilisation de zones d'absorption permet non seulement de diminuer les retards mais aussi d'augmenter le débit en présence d'aléas, ce qui est toujours le cas (cf. figure 0.1).

En effet, on constate que quel que soit le taux d'aléas, les zones d'absorption permettent de diminuer les retards ATC et, parfois, en augmentant le débit. Les résultats ont été obtenus pour une capacité de 15 avions en même temps sur un secteur pour tout le planning tactique de la CFMU. Sur l'axe des ordonnées du graphe du haut de la figure 0.1, la valeur 0 correspond à une capacité de 15 pour le planning pré-tactique, 1 à 14, 2 à 13 et 3 à 12. Nous avons uniquement utilisé SIVOR avec des zones d'absorption en continue, i.e. les capacités utilisées n'évoluent pas au cours de la simulation. Cependant, les résultats obtenus nous ont permis de montrer l'intérêt d'utiliser des zones d'absorption.

Dans un second temps, nous avons essayé de mettre en place des zones d'absorption de manière discontinue, mais les résultats obtenus n'ont pas été concluants, en particulier parce que nous n'avons pas pris en compte dépendance entre les secteurs voisins. En effet, si un avion subit un aléa, nous voulons lui donner un créneau libre d'une zone d'absorption, mais

---

<sup>1</sup>Central Flow Management Unit

<sup>2</sup>Simulateur de VOI en Route

<sup>3</sup>Air Traffic Control

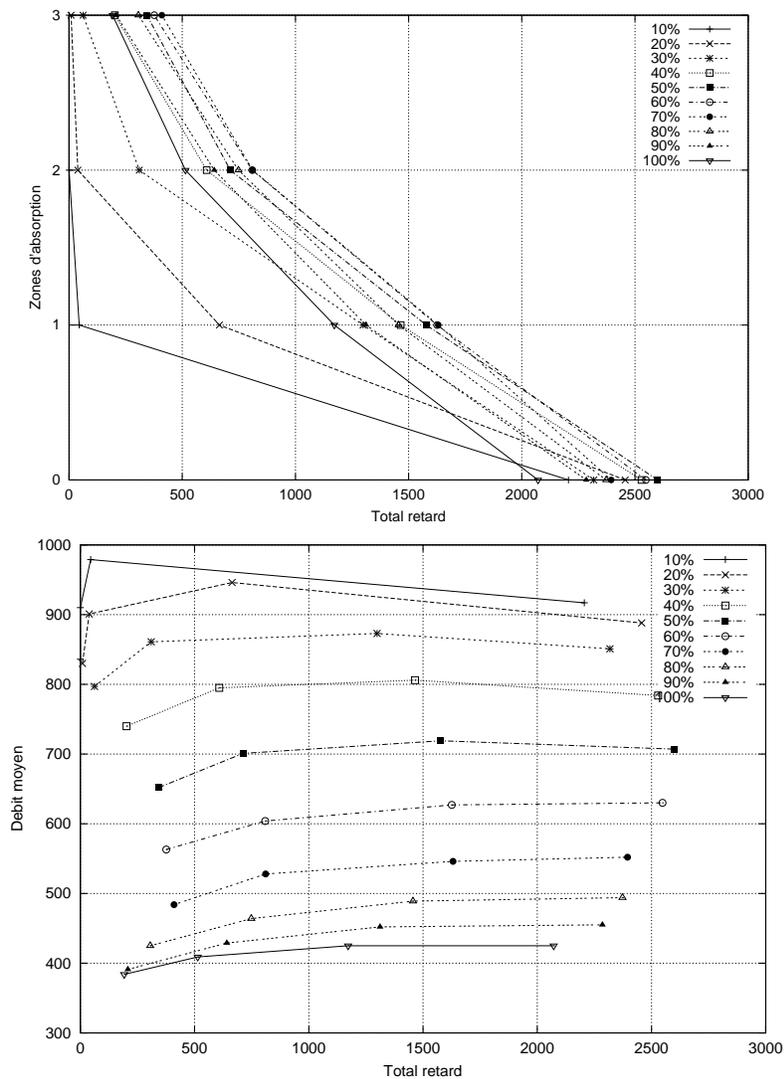


FIG. 0.1 – Résultats obtenus avec SIVOR montrant l'intérêt des zones d'absorption. Sur l'axe des abscisses nous avons le nombre de fois où nous avons du résoudre un conflit. L'axe des ordonnées du graphe du haut représente la taille de la zone d'absorption appliquée et sur celui du bas, le débit moyen obtenu. Par exemple, pour la courbe avec 10% d'aléas, nous avons une réduction du nombre de conflit à résoudre tout en augmentant le débit lorsque nous posons une zone d'absorption par secteur. Par contre, lorsque nous en mettons deux, le débit est fortement réduit sans pour autant qu'il y ait un gain sur les conflits, dans ce cas, on choisit la stratégie avec une zone d'absorption.

les créneaux libres de tous les secteurs régulés que traverse le vol doivent être mis en relation, sinon les créneaux laissés libres risqueront d'être inutilisables dès le planning pré-tactique.

C'est pourquoi nous utilisons un modèle basé sur la théorie des graphes. Si nous arrivons à définir une bonne représentation du trafic aérien en-route, alors les algorithmes connus des graphes nous permettront de prendre en compte les relations de voisinage entre les secteurs régulés, et nous serons probablement en mesure de trouver la meilleure distribution des zones d'absorption dans le planning pré-tactique, et ainsi réduire la perte de charge.

Ce travail a fait l'objet d'une présentation au sein du deuxième Innovative Workshop qui s'est déroulé les 11 et 12 décembre 2003 à l'ERC.

## **Développement initial**

Lorsque nous avons développé SIVOR, nous n'avions pas implémenté d'interface graphique et nous voulions le rendre évolutif et suffisamment général de façon à pouvoir tester différentes stratégies d'affectation des créneaux libres. Cependant certains défauts subsistaient. Par exemple, les aléas avaient lieu de manière uniforme alors que dans la réalité ils sont plus fréquents en milieu de journée qu'en début ou en fin.

### **Présentation d'« IFI Solution »**

IFI Solution est une équipe d'ingénieurs d'informatique de haute qualification et des managers compétents, riches d'expériences dans toutes plates-formes pointues, les applications et langages de programmation. IFI Solution est forte de son activité de Recherche et Développement, due à son équipe de Docteurs et Chercheurs ès Sciences d'Informatique qui sont coopérants auprès des Instituts et Laboratoires européens prestigieux en la matière.

### **Travail effectué**

IFI Solution a enrichi et développé SIVOR et permis de nombreuses évolutions, entre autres de pouvoir manipuler des créneaux de décollage plutôt que des heures précises. L'utilisation en est simplifiée et la simulation optimisée. Le développement effectué va nous permettre de tester plus facilement les résultats théoriques que l'on obtiendra, mais aussi de les intuer.

En effet, la stratégie d'utiliser des zones d'absorption en continue nous a permis d'obtenir de bons résultats sans avoir à développer de théorie, seulement, il est difficile de trouver la meilleure distribution de ces créneaux sans une étude approfondie du trafic aérien, et des relations de voisinage en particulier. Ainsi, les nouveaux algorithmes d'affectation des zones d'absorption pourront être aisément testés grâce à SIVOR.

SIVOR fonctionne en deux phases. Une phase de construction de la zone considérée avec les aéroports, routes, secteurs (cf. figure 0.2) sur laquelle la simulation va avoir lieu, et une phase de tests que l'on veut effectuer sur cette zone (cf. figure 0.3).

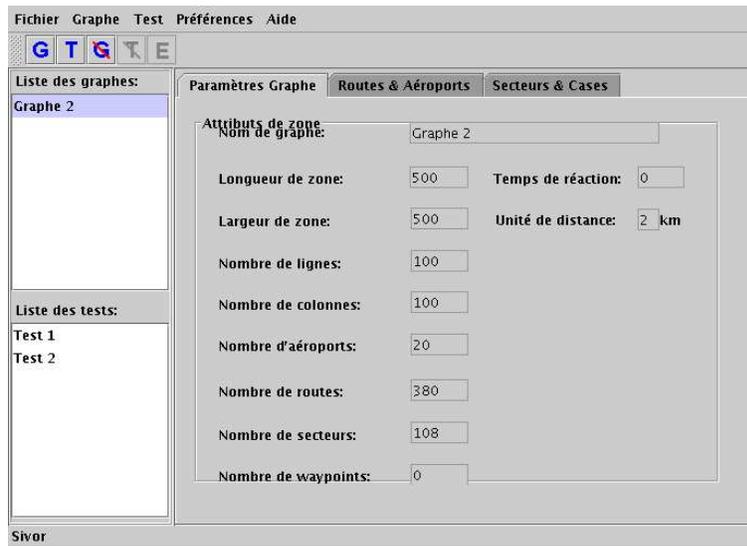


FIG. 0.2 – Paramétrisation de la zone (ensemble de secteurs) sur laquelle on veut effectuer la simulation.

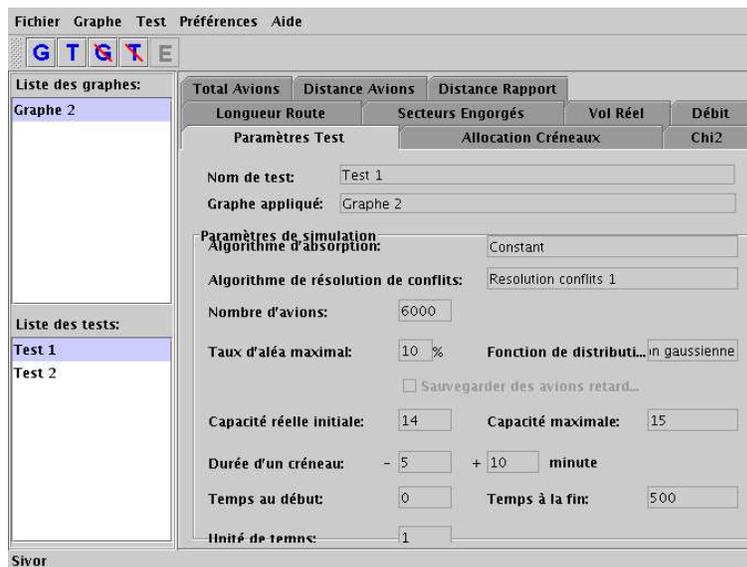


FIG. 0.3 – Paramétrisation de la simulation que l'on désire effectuée.

### 3 Approche théorique

Une zone d'absorption est un ou plusieurs créneaux laissés libres lors de l'affectation du planning de décollage des avions. Bien qu'a priori la pose de zone d'absorption diminue le nombre total possible de vols, nous allons montrer, cette fois de manière plus théorique, qu'il n'en est rien lorsque les heures effectives de départ des vols sont soumises à des aléas.

Pour cela on considère le nombre total de  $N$  créneaux disponibles. Puis on va définir différentes valeurs, fonctions de  $N$  notées débit<sub>1</sub>, débit<sub>2</sub>, ... débit <sub>$i$</sub> , représentant la valeur du débit moyen observé lors d'expériences mettant en jeu diverses stratégies numérotées respectivement 1, 2, ...  $i$ .

#### Sans réaffectation des créneaux perdus par les aléas

On pose débit<sub>1</sub> =  $N$ . Un débit de  $N$  correspondrait au cas où aucune zone d'absorption n'est planifiée et que de plus tous les créneaux sont pris comme prévus. Cependant, ce cas idéal n'existe pas. Il y a, en présence d'aléa, un nombre conséquent de créneaux qui ne sont pas pris utilisés, et donc on doit en réaffecter d'autres. Donc en présence d'aléa, le débit sera toujours inférieur à débit<sub>1</sub>.

On mesure par une probabilité  $p$  l'aléa d'un vol. Plus précisément, un vol a une probabilité  $p$  de subir un aléa et de ne pas utiliser le créneau qui lui a été affecté par le planning initial.

Dans cette partie on se place dans l'hypothèse où l'aléa sur un vol n'est connu qu'au moment du départ de ce vol, si bien que le créneau affecté à un vol subissant un aléa est automatiquement perdu. Dans ce cas, le vol est réaffecté à un créneau libre ultérieur s'il en existe un, sinon le vol est purement annulé. Bien sûr, il s'agit d'une analyse de stratégie dans un cas d'école. Nous verrons plus tard comment prendre en compte les vols non réaffectés.

Soit débit<sub>2</sub> le débit obtenu sans zone d'absorption et débit<sub>3</sub> avec zones d'absorption. Enfin, on note  $\delta$  la proportion de zones d'absorption appliquée par rapport au nombre de créneaux. On a :

$$\begin{aligned} \text{débit}_1 &= N \\ \text{débit}_2 &= pN \\ \text{débit}_3 &= p(1 - \delta)N + \min\{\delta, (1 - p)(1 - \delta)\}N \\ \text{débit}_3 &= \begin{cases} (1 - \delta)N & \text{si } \delta \geq \frac{1-p}{2-p} \\ (p + \delta - p\delta)N & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned}$$

On ne peut pas rajouter plus de créneaux que de créneaux laissés libres soit le taux d'aléas  $(1 - p)$  sur le total de créneaux laissés libres  $(1 - \delta)$ .

On cherche à déterminer le meilleur  $\delta$  en fonction de  $p$  de sorte à ce que l'on ait le meilleur débit pour débit<sub>3</sub>. Le débit maximum est obtenu lorsque tous les avions subissant des aléas

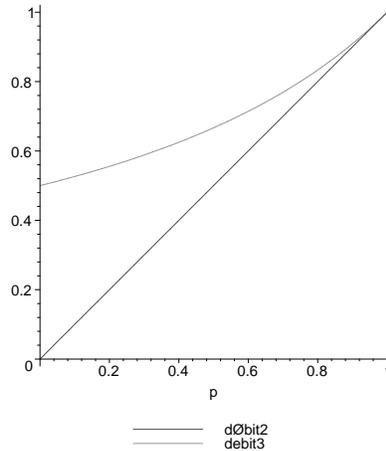


FIG. 0.4 – Représentation de débit<sub>2</sub>/N et débit<sub>3</sub>/N en fonction de p.

prennent des créneaux laissés libres par le  $\delta$  optimal. Plus précisément :

$$\begin{aligned}
 1 - \delta &= p + \delta - p\delta \\
 \delta &= \frac{1-p}{2-p} \\
 \text{d'où débit}_3 &= (1 - \delta)N \text{ avec un tel } \delta
 \end{aligned}$$

Pour montrer l'intérêt des zones d'absorption, il faut qu'on ait  $\text{débit}_3 - \text{débit}_2 > 0$ .

On a :

$$\begin{aligned}
 \delta &= \frac{1-p}{2-p} \\
 \text{débit}_3 - \text{débit}_2 &= N(1 - \delta - p) \\
 \text{débit}_3 - \text{débit}_2 &= N\left(1 - \frac{1-p}{2-p} - p\right) \\
 \text{débit}_3 - \text{débit}_2 &= N\frac{(p-1)^2}{2-p}
 \end{aligned}$$

La différence est toujours positive pour tout  $p \in [0, 1[$  donc  $\text{débit}_3$  est toujours supérieur à  $\text{débit}_2$  lorsqu'il y a des aléas ( $p < 1$ ) d'où l'intérêt de poser des zones d'absorption !

On considère que toutes les zones d'absorption posées sont utilisées, normalement on a une « perte de charge ». Mais dans cette partie nous la considérons nulle, car le but est justement de faire tendre cette « perte de charge » vers 0.

On voit sur la figure 0.4 que  $\text{débit}_3$  offre un meilleur débit que  $\text{débit}_2$ .

Nous avons donc un gain à poser des zones d'absorption pour l'allocation de créneaux. Cependant, ce gain ne vaut que si l'on considère que tous les créneaux laissés libres sont pris. On cherche à garantir que les créneaux laissés libres seront utilisés.

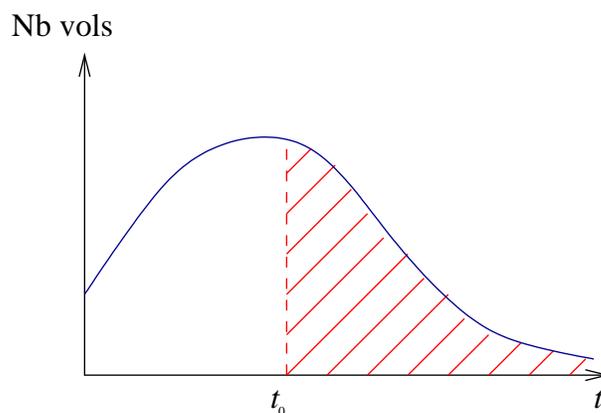


FIG. 0.5 – Nombre de vols dont l'aléa est connu à un temps  $t$  avant le décollage. La zone hachurée en rouge représente les créneaux récupérables car l'aléa est signalé à  $t \geq t_0$  avant le créneau de décollage. On note  $q$  la proportion de la zone hachurée en rouge par rapport à l'intégrale de cette courbe.

### Avec réaffectation des créneaux perdus à cause des aléas

On a vu qu'on avait un gain à poser des zones d'absorption. On considère maintenant que l'on peut anticiper certain aléa et donc que l'on peut réaffecter certains créneaux perdus à cause des aléas.

On note  $t_0$  le temps minimal nécessaire pour pouvoir réaffecter un créneau laissé libre par un avion subissant un aléa. Plus le système est réactif, plus ce  $t_0$  sera faible (cf. figure 0.5).

On cherche à déterminer le meilleur  $t_0$  selon la fonction  $f(t)$  représentant le nombre d'aléas connus au temps  $t$  avant le créneau de décollage. Cette détermination correspond à l'étude d'une phase « temps réel », projet en cours au sein d'EUROCONTROL.

Les calculs sont effectués pour le cas optimal, le cas que l'on désire atteindre. On considère qu'à chaque fois qu'on a connaissance d'un aléa à un temps supérieur à  $t_0$ , alors il existe un avion (tant qu'il reste des avions subissant des aléas) qui peut prendre sa place.

Dans ce cas, nous avons trois types d'avions, ceux ne subissant pas d'aléas ( $pN$ ), et ceux en subissant ( $(1-p)N$ ) séparés en deux :

- Ceux dont on sait à un temps supérieur à  $t_0$  qu'ils ne décolleront pas, créneaux que l'on peut récupérer  $(1-p)qN$ .
- Ceux ne décollant pas et dont on ne le sait pas assez de temps à l'avance pour récupérer leurs créneaux  $(1-p)(1-q)N$ .

0	non	oui
$t_0$	$(1-p)q$	X
non	$(1-p)(1-q)$	p

Tableau représentant la proportion d'avion selon leur type, selon qu'ils répondent « oui » ou « non » au temps  $t_0$  et au temps 0 à la question : « allez-vous décoller à l'heure prévue ? »

On obtient ainsi comme nouveaux débits :

$$\begin{aligned} \text{débit}_4 &= N(p + (1-p)q) \\ \text{débit}_5 &= N(\underbrace{p(1-\delta)}_{\text{planning}} + \underbrace{(1-p)(1-\delta)q}_{\text{créneaux récupérés}} + \underbrace{\min\{\delta, (1-p)(1-q)(1-\delta)\}}_{\text{zones d'absorption}}) \end{aligned}$$

Avec  $\text{débit}_4$  le débit obtenu avec la nouvelle stratégie sans zones d'absorption, et  $\text{débit}_5$  avec zones d'absorption.

On obtient le débit maximal pour  $\text{débit}_5$  lorsqu'on utilise les créneaux récupérés et les zones d'absorption à leur maximal. On obtient ainsi :

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{(1-p)(1-q)}{1 + (1-p)(1-q)} \\ \text{débit}_5 &= 1 - \delta = \frac{1}{1 + (1-p)(1-q)} \end{aligned}$$

et

$$\text{débit}_5 - \text{débit}_4 = \frac{(p-1)^2(q-1)^2}{1 + (p-1)(q-1)}$$

qui est toujours supérieur à 0 pour tout  $(p, q) \in [0, 1]^2$ . Donc on a encore un gain à poser des zones d'absorption.

Nous avons démontré que pour les deux stratégies on a augmenté le débit théorique en posant des zones d'absorption. On obtient :

$$\begin{aligned} \text{débit}_3 &= \frac{1}{1 + (1-p)} \\ \text{débit}_5 &= \frac{1}{1 + (1-p)(1-q)} \end{aligned}$$

On voit que la deuxième stratégie est plus performante que la première, et qu'on a aussi intérêt à laisser des créneaux libres dans le planning pré-tactique.

## 4 Perspectives pour l'année 2004

Les résultats que nous avons obtenus de manière expérimentale et théorique se recoupent ; ils montrent l'intérêt des zones d'absorption pour améliorer la gestion de flux du trafic aérien. Cependant, nous n'avons pas recherché la meilleure distribution des créneaux libres dans le planning pré-tactique. Le but de ce travail est de déterminer cette distribution qui garantit une perte de charge minimale. Pour cela, nous devons tout d'abord trouver les meilleures stratégies d'affectation dans les secteurs, puis déterminer les interactions existantes entre ceux-ci afin de minimiser cette perte de charge, et ce sans modifier le planning. Ainsi, tous les avions subissant

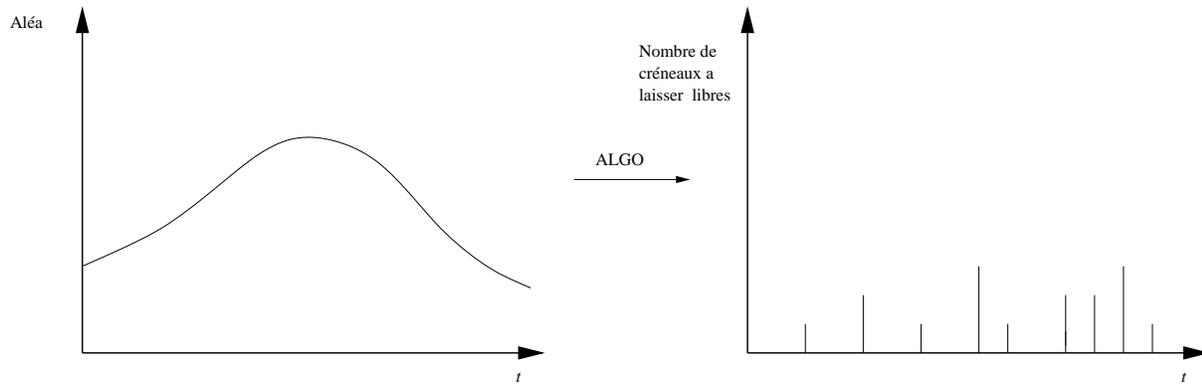


FIG. 0.6 – Exemple de résultats que l’on souhaite obtenir par un algorithme d’affectation des créneaux libres par secteur (graphe de gauche) à partir d’une distribution d’aléas donnée (graphe de droite).

un aléa doivent passer par les créneaux laissés libres pour ne pas perturber les autres avions et le planning initial.

La probabilité qu’un avion subisse un aléa, notée précédemment  $p$ , n’a pas de raison d’être uniforme. Elle est variable suivant les heures de la journée, et elle peut être évaluée d’après des statistiques, l’établissement de cette variation n’étant pas le sujet de cette étude. Nous projetons de trouver un algorithme qui nous donne la meilleure distribution des créneaux libres sur un secteur pour toute distribution de  $p$ . On commencera par un cas simple, par exemple  $p$  uniforme, puis pour n’importe quel  $p$  donné (voir la figure 0.6).

Dans un second temps, nous essaierons de modéliser les interactions entre secteurs (diffusions et répercussion des aléas ...) afin de poser les bases d’un modèle, basé sur la théorie des graphes, qui nous permettra de prendre en compte les relations de voisinage entre les secteurs et ainsi de déterminer la meilleure affectation possible des zones d’absorption.