

Respect des créneaux CFMU* par le contrôle au sol

Jean-Baptiste Gotteland
gotteland@recherche.enac.fr

Résumé

Sur les grandes plate-formes aéroportuaires, une partie souvent estimée trop importante des vols ne respecte pas les créneaux de décollage imposés par la régulation européenne (CFMU).

Dans cet article, un simulateur de trafic au roulage incluant des méthodes d'optimisation pour la résolution des conflits au sol est appliqué au problème du respect des créneaux de décollage à Roissy.

Une première partie étudie la précision avec laquelle le simulateur peut anticiper les temps de roulage à chaque étape de la simulation.

Cette prédiction est ensuite utilisée pour compléter le critère d'optimisation des méthodes de résolution, afin de minimiser les écarts au créneaux (et non plus uniquement les retards) pour les vols soumis à régulation.

1 Introduction

Dans le contexte de la régulation européenne du trafic aérien, des créneaux de décollage sont attribués aux vols qui traversent des espaces congestionnés. Ce créneau est défini par une heure de décollage souhaitée t autour de laquelle le vol concerné est censé décoller, la tolérance officiellement admise étant l'intervalle de temps $[t - 5; t + 10]$ minutes. Pour le contrôle au sol, la prise en compte de ces contraintes pose souvent de nombreux problèmes opérationnels. Pendant la phase de roulage, un vol au départ peut être retardé à différents endroits de l'aéroport : autour des parkings lorsqu'il croise le trafic à l'arrivée, devant les intersections lorsqu'il cède le passage à d'autres et enfin devant la piste, où les avions doivent souvent faire la queue pour respecter le temps de séparation nécessaire entre chaque décollage ou atterrissage. Cumulés à toutes les autres formes de perturbations opérationnelles, ces retards rendent la prédiction des temps de roulage extrêmement incertaine. Ceci explique pourquoi la séquence de piste n'est pas toujours optimale et les créneaux parfois manqués.

A titre d'exemple, la figure 1 donne la proportion des départs soumis à régulation qui décollent avant, pendant et après leur créneau. Ces données, issues directement des traces radar des avions à Roissy, montrent que trop

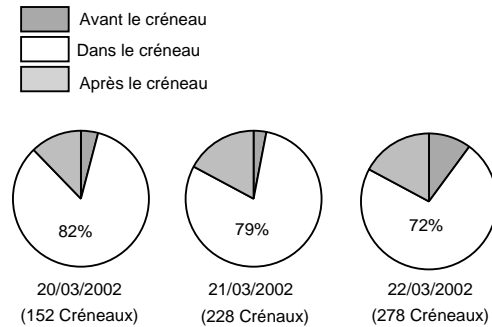


FIG. 1 – Respect réel des créneaux

d'avions (entre 20% et 30%) se voient attribué le décollage trop tôt ou trop tard.

Le but de cette étude est d'évaluer la capacité d'un simulateur de trafic au sol à fournir une prédiction des temps de roulage suffisamment précise pour inclure le respect des créneaux CFMU dans la gestion du trafic au sol.

2 Simulation du trafic

Une description détaillée du simulateur de trafic utilisé pour cette étude peut être trouvée dans [GDA01]. Cette partie en résume les principaux aspects.

2.1 Description générale

L'aéroport est modélisé par un graphe reliant ses parkings et ses pistes. Ce graphe est utilisé pour attribuer à chaque avion un ensemble de chemins admissibles, c'est-à-dire respectant les procédures de sens uniques et les limitations de vitesse.

Le trafic est décrit par les plans de vol d'une journée. Chaque plan de vol donne toutes les informations relatives à un mouvement : identifiant, type de l'avion, heure de début, parking et piste prévus. Pour les départs soumis à régulation, le plan de vol fournit également le créneau CFMU. La simulation s'effectue par fenêtres glissantes avec un horizon de prédiction T_w et une période de résolution $\Delta < T_w$. A chaque étape t de la simulation (toutes les Δ minutes), la prédiction de trafic est effectuée sur l'horizon $[t; t + T_w]$: un ensemble de chemins admissibles est attribué à chaque nouveau plan de vol et les futures positions

*Central Flow Management Unit

des avions sont calculées moyennant une incertitude sur la vitesse de déplacement. Cette incertitude transforme la position ponctuelle d'un avion en une ligne brisée de positions possibles.

Le problème à résoudre est de trouver la trajectoire que doit suivre chaque avion (c'est-à-dire son chemin et éventuellement ses attentes sur ce chemin) pour que les séparations soient respectées (cf. 2.2), et qu'un critère global (comme la somme des retards) soit minimisé.

Une fois ce problème résolu sur l'horizon de prédiction T_w , les trajectoires calculées sur les Δ premières minutes sont appliquées et fournissent la situation Δ minutes plus tard.

2.2 Séparation des avions

Les règles de séparation sont les suivantes :

- Les avions garés sont toujours séparés des autres.
- Lorsque deux avions circulent, leur distance doit toujours être supérieure à 60 mètres.
- Après chaque décollage, un temps de séparation de 1, 2 ou 3 minutes (selon le type d'avion) est nécessaire avant le décollage ou l'atterrissage suivant (pour éviter les problèmes dus aux turbulences de sillage).
- Lorsqu'un avion décolle ou atterrit sur une piste, les autres avions peuvent circuler sur cette piste à condition qu'ils soient derrière lui.

Lorsqu'une paire d'avions ne respecte pas ces règles, elle est dite "en conflit".

2.3 Résolution des conflits

2.3.1 Manœuvres possibles

Pour assurer les séparations, des ordres de contrôle peuvent être donnés aux avions. Un ordre de contrôle est modélisé comme suit :

- Le chemin que doit suivre l'avion (choisi parmi l'ensemble des chemins restant possibles pour cet avion) ;
- Éventuellement, des attentes imposées sur ce chemin, décrites par une position et une heure de fin d'attente (ceci permet de réduire l'incertitude sur la position de l'avion).

Les arrivées peuvent également être retardées ou avancées (on demande au pilote de ralentir ou d'accélérer avant l'atterrissage). Dans ce cas particulier, le décalage de l'heure d'atterrissage est limité à $\pm\lambda$ secondes (en pratique $\lambda = 30$ secondes pour une résolution effectuée 2 minutes en avance).

2.3.2 Résolution 1 contre n : BB

Cette méthode de résolution réduit le problème à celui du temps de roulage minimal d'un seul avion devant en éviter d'autres. Les avions prévus sur l'horizon sont classés et traités les uns après les autres. Chacun d'eux doit éviter ceux qui ont déjà été traités : les premiers ont priorité sur les derniers.

Le problème du temps de roulage minimal d'un seul avion devant en éviter d'autres peut être modélisé par un problème du plus court chemin dans un graphe et résolu par Branch and Bound [GDA01] [HT95] : l'algorithme trouve un meilleur chemin et les meilleures attentes si une telle solution existe. Dans la négative, l'algorithme détecte qu'il n'y a aucune solution et donne l'avion gênant.

Il est évident que l'efficacité de cette méthode de résolution est largement influencée par le classement initial effectué sur les avions (la plupart des classements aboutissant en outre à un problème sans solution).

Dans la version actuelle, les avions sont initialement classés par ordre croissant d'heure prévue à la piste (l'atterrissage pour une arrivée, le décollage pour un départ). Si un des avions n'a aucune solution, son rang est modifié : il est reclassé devant l'avion qui le gêne et le problème est de nouveau considéré.

2.3.3 Algorithmes génétiques : $GABB$

Cette méthode de résolution utilise les algorithmes génétiques tels que décrits dans la littérature [Gol89, Mic92] pour attribuer à chaque avion un chemin et un niveau de priorité.

Pour une situation comprenant N avions, un élément de la population (chromosome) est décrit par :

$$(n_i, p_i)_{1 \leq i \leq N}$$

où n_i est le chemin de l'avion i et p_i son niveau de priorité.

Le développement d'une solution décrite par un chromosome est effectuée par l'algorithme de Branch and Bound (BB) décrit dans la partie précédente, limité à un seul chemin par avion (celui indiqué par le chromosome).

La fonction d'évaluation est alors donnée par :

- S'il y a $n_c > 0$ avion(s) sans solution :

$$f = \frac{1}{1 + n_c}$$

- Si une solution est trouvée pour tous les avions :

$$f = \frac{1}{2} + \frac{1}{2 + \sum_{i=1}^N d_i + l_i}$$

où d_i est le retard pris par l'avion i et l_i la partie de ce retard dû au choix du chemin.

Cette fonction d'évaluation assure qu'un chromosome décrivant une situation résolue est toujours meilleur ($f > 0.5$) qu'un chromosome ne permettant pas de résoudre la situation et elle pénalise deux fois plus les détours que les attentes.

Cette fonction d'évaluation est partiellement séparable comme défini dans [DA98, DAN96], ce qui permet d'utiliser des opérateurs de croisement et de mutation adaptés.

3 Estimation des temps de roulage

3.1 Temps d'anticipation nécessaire

Le problème est ici d'évaluer le temps de roulage des départs à chaque étape t_0 de la simulation, dans le but de les faire arriver à la piste au moment de leur créneau.

Appliquées à la minimisation des temps de roulage, les simulations passées [GDA01] ont montré qu'un horizon réduit ($T_w \leq 10$ minutes) augmentait l'efficacité des méthodes de résolution. Lorsque l'incertitude sur la vitesse des avions atteint $\pm 10\%$, il devient même difficilement concevable de résoudre la situation avec un horizon supérieur à 5 minutes (l'ensemble des positions possibles d'un avion pouvant alors s'étendre sur plus de 600 mètres pour une vitesse de 10 m/s).

Cependant, un horizon limité à 5 minutes est insuffisant pour prévoir avec précision les temps de roulage des avions. Il est donc nécessaire de prendre en compte les futurs plans de vol, planifiés dans un horizon augmenté de α minutes : $[t_0 + T_w; t_0 + \alpha]$. Ce nouveau paramètre α , appelé **anticipation**, ne sera utilisé que pour l'estimation des temps de roulage.

Dans les parties suivantes, deux méthodes d'estimation des temps de roulage sont développées et comparées.

Afin de mesurer la précision de chaque estimation, les temps de roulage estimés à chaque étape de la simulation sont comparés aux temps de roulage effectifs, issus de la simulation classique avec incertitude sur la vitesse et résolution des conflits par la méthode *GABB* sur l'horizon initial T_w .

3.2 Estimation par la séquence de piste

3.2.1 Principe

Cette approche consiste à anticiper les séquences de piste (une file d'attente d'avions par piste) et d'en déduire les heures de décollage de chaque départ, en considérant que l'occupation de la piste sera maximale.

3.2.2 Réalisation

Le but est de former les files d'attente d'avions et/ou de plans de vol pour chaque piste, puis de leur attribuer séquentiellement (dans l'ordre de la file) une créneau de décollage ou d'atterrissage.

Cependant, les arrivées ne peuvent être retardées de plus de λ secondes et doivent donc être différenciées des départs. Les créneaux sur chaque piste sont alors attribués en trois étapes :

1. Une première estimation (Γ_i^0) des heures de décollage est calculée pour les départs, en fonction du temps qui les sépare de la piste (sans attente).
2. Un premier créneau (Γ_i^1) est alors attribué séquentiellement aux départs, dans l'ordre donné par (Γ_i^0)

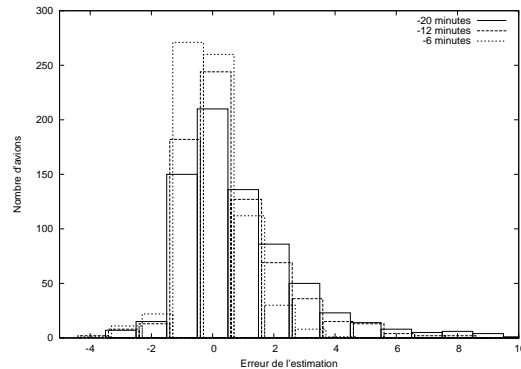


FIG. 2 – Estimation par la séquence de piste

en respectant les temps de séparation imposés entre les décollages.

3. Les arrivées (si il y en a) sont insérées séquentiellement dans la file décrite par (Γ_i^1), en fonction de leur heure d'atterrissage prévue, en respectant les temps de séparation et le retard maximal autorisé λ . Ceci donne la suite définitive de créneaux (Γ_i).

La suite des créneaux (Γ_i) ainsi formée permet de calculer un temps de roulage pour chaque décollage ou plan de vol prévu sur l'horizon temporel $[t_0; t_0 + \alpha]$.

3.2.3 Résultats

La simulation est réalisée à partir des plans de vol réels déposés le 22/03/2002 à Roissy, avec les paramètres suivants :

- Trafic : 1433 plans de vol, 695 départs.
- Méthode de résolution : *GABB*
- Horizon de prédiction : $T_w = 5$ minutes
- Anticipation : $\alpha = 30$ minutes
- Période de résolution : $\Delta = 2$ minutes
- Incertitudes sur la vitesse : $\delta_s = \pm 10\%$

La figure 2 donne la distribution des différences entre les temps de roulage effectifs et les estimations calculées 6, 12 et 20 minutes avant.

Il apparaît que l'intervalle des écarts est restreint à $[-4; +10]$ minutes, mais que seules 30% des estimations faites 20 minutes en avance ont moins de 30 secondes d'erreur.

3.3 Estimation par simulation

3.3.1 Description

Dans cette approche, l'idée est de négliger l'incertitude sur la vitesse dans le but d'appliquer directement une méthode de résolution simplifiée sur l'horizon étendu $[t_0; t_0 + \alpha]$.

3.3.2 Réalisation

A chaque étape t_0 de la simulation (toutes les Δ minutes), tout plan de vol commençant avant $t_0 + \alpha$ est activé : un

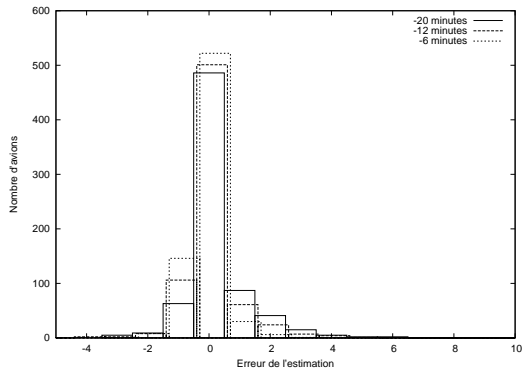


FIG. 3 – Évaluation par simulation

ensemble de chemins lui est attribué et sa trajectoire directe (sans attente) est insérée dans la prédiction de trafic.

La méthode de résolution 1 contre n (BB) est appliquée sur l'horizon étendu $[t_0; t_0 + \alpha]$ en considérant que l'incertitude sur la vitesse est nulle.

Les temps de roulage des avions en mouvement dans l'horizon de prédiction initial $[t_0; t_0 + T_w]$ sont alors pris directement comme estimation.

Bien évidemment, le passage à l'étape suivante de la simulation (Δ minutes plus tard) s'effectue toujours en appliquant la méthode de résolution initiale ($GABB$) sur l'horizon de prédiction réduit $[t_0; t_0 + T_w]$ et en considérant l'incertitude nominale sur la vitesse.

3.3.3 Résultats

La simulation est effectuée avec les mêmes plans de vol et les mêmes paramètres que dans la partie précédente.

La figure 3 donne les différentes distributions des erreurs de chaque estimation. On peut observer que l'intervalle des écarts est réduit à $[-4; +6]$ minutes et que 71% des estimations faites 20 minutes en avance sont exactes à 30 secondes près.

3.4 Conclusions

La première conclusion est que l'intervalle des erreurs des deux méthodes d'estimation des temps de roulage est inclus dans l'intervalle de tolérance pour les créneaux CFMU ($[-5; +10]$ minutes). Cela signifie qu'il semble possible de prévoir les temps de roulage 20 minutes en avance, avec une précision compatible avec celle demandée par la régulation européenne.

Ce résultat est intéressant car la méthode de résolution appliquée dans la simulation n'était en rien corrélée aux estimations effectuées (le critère global à minimiser étant la somme des retards et non l'erreur des estimations).

La seconde observation est que la deuxième méthode d'évaluation donne des résultats beaucoup plus précis : comme beaucoup d'études le démontrent ([IDA98] par exemple), les temps de roulage ne sont pas simplement

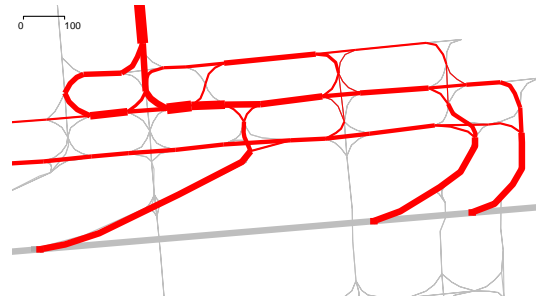


FIG. 4 – Aires d'attente

fonction des files d'attente au décollage, mais sont aussi largement influencés par le trafic à l'arrivée près des terminaux et à chaque intersection de taxiways.

Par conséquent, la méthode d'estimation des temps de roulage par simulation sera retenue pour la partie suivante. Les estimations seront cette fois-ci corrélées à la méthode de résolution pour prendre en compte les contraintes des créneaux de décollage imposés par la régulation européenne.

4 Respect des créneaux CFMU

4.1 Introduction

4.1.1 Concepts opérationnels

Deux principales difficultés en rapport avec le respect des créneaux CFMU doivent être soulignées :

- Le créneau CFMU est une heure de décollage retardée (parfois plus d'une heure après le départ demandé par la compagnie). Il faut donc trouver une position et un temps d'attente appropriés pour l'avion concerné. Pour l'équipage et les passagers, la position d'attente la plus intéressante est bien évidemment le parking. Cependant, une telle occupation de parking n'est pas toujours possible et de toutes façons, l'avion doit rester prêt au départ, donc les passagers sont rarement débarqués.
- Pendant les pointes de trafic, l'accès aux pistes se fait via une file d'attente. Chaque avion soumis à régulation doit donc être positionné stratégiquement dans cette file : si l'avion atteint la piste trop tôt, il devra attendre au seuil de piste, bloquant tout accès à cette piste. S'il l'atteint trop tard, le créneau est manqué et il doit théoriquement en attendre un nouveau. Les deux cas se produisent fréquemment et sont très dommageables pour la régulation du trafic.

Pour gérer ces problèmes, les aéroports comme Roissy se sont équipés d'aires d'attente près des pistes (cf. figure 4). Ces aires permettent de modifier dynamiquement la séquence de piste de façon à respecter les contraintes des secteurs d'approche et les créneaux CFMU.

Une autre façon de faciliter la gestion des vols à créneaux est de leur réserver certains accès à la piste, lorsque l'infrastructure de l'aéroport le permet.

4.1.2 Modifications du simulateur

Le but est de résoudre les problèmes précédemment décrits avec des méthodes d'optimisation.

Les aires d'attente font partie intégrante de la description de l'aéroport et sont donc directement prises en compte dans l'ensemble des chemins proposés aux avions (cf. figure 4). Les méthodes de résolution peuvent donc déjà donner des ordres d'attente dans ces aires si cela contribue à optimiser le critère global.

Le problème du respect des créneaux CFMU sera alors intégré au simulateur comme suit :

- Le premier point est d'utiliser l'estimation des temps de roulage pour calculer une *attente initiale* pour chaque avion régulé.
- Ensuite, une modification de l'algorithme 1 contre n (BB) doit être effectuée car l'intérêt de certains avions, soumis à créneau, sera d'attendre.
- La fonction d'évaluation pour les algorithmes génétiques ($GABB$) devra également être modifiée pour prendre en compte la minimisation des écarts aux créneaux.
- Enfin, une stratégie d'affectation de bretelles d'accès à la piste sera élaborée, en conformité avec l'infrastructure de Roissy.

4.2 Attente initiale

4.2.1 Définition

Il s'agit d'évaluer à chaque étape de la simulation et pour chaque départ i soumis à un créneau CFMU T_i , le temps τ_i que doit attendre l'avion i avant de chercher à rejoindre la piste. Cette attente devra avoir lieu dès que possible (au parking si celui-ci est libre). τ_i sera appelé l'**attente initiale** pour l'avion i .

Une approximation de ce temps d'attente est donnée par :

$$\tau_i = \max(0, T_i - t - \rho_i)$$

Où t est l'heure courante de la simulation et ρ_i le temps de roulage restant, estimé dans la partie 3.

4.2.2 Adaptation de la méthode 1 contre n

Pour un avion i soumis à un créneau CFMU, l'objectif doit être modifié : parmi l'ensemble Ω_i des trajectoires sans conflit, la meilleure trajectoire θ_i n'est plus celle qui minimise le retard $\pi(\theta)$, mais celle qui minimise $|\tau_i - \pi(\theta)|$:

$$\theta_i = \text{Argmin}_{(\theta \in \Omega_i)} \{|\tau_i - \pi(\theta)|\}$$

Le graphe sur lequel est appliqué l'algorithme de Branch and Bound est alors modifié :

- Un nœud du graphe décrit un retard π sur le n^{eme} chemin à l'heure t .
- Si un nœud représente une position conflictuelle avec un avion déjà traité, il n'a aucun fils.
- Chaque nœud non conflictuel a deux fils :

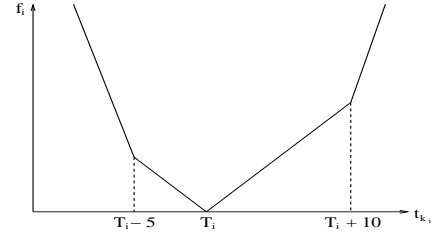


FIG. 5 – Evaluation partielle pour un avion soumis à régulation

- Le premier est le même retard π sur le même chemin n à l'heure $t + 1$ (l'avion avance à t). Si $\pi < \tau_i$, le coût pour aller à ce nœud est 1, sinon 0.
 - Le deuxième fils est le retard $\pi + 1$ sur le même chemin n à l'heure $t + 1$ (l'avion s'arrête à t). Si $\pi < \tau_i$, le coût pour aller à ce nœud est 0, sinon 1.
 - Les nœuds racines sont un retard nul à $t = t_0$, sur chacun des chemins possibles pour l'avion.
 - Les nœuds terminaux sont ceux décrivant une position non conflictuelle de l'avion à la fin de l'horizon $t_0 + T_w$.
- La meilleure trajectoire pour l'avion i est alors décrite par un plus court chemin allant d'un nœud racine à un nœud terminal de ce graphe.

L'ordre dans lequel les avions sont traités est tout naturellement donné par le créneau pour les avions soumis à régulation, et l'heure prévue à la piste pour les autres.

4.3 Critère global pour $GABB$

Cette partie décrit l'adaptation de la méthode $GABB$ (cf. 2.3.3 et [GDA01]) au problème du respect des créneaux CFMU.

Un chromosome est toujours constitué des ordres de priorités et des chemins proposés aux avions, mais le développement de la solution est effectué par l'algorithme de Branch and Bound adapté (réduit à un seul chemin par avion) décrit dans la partie précédente.

La fonction d'évaluation à maximiser (*fitness*) est également modifiée, afin d'être compatible avec l'objectif de minimiser l'écart aux créneaux pour les avions soumis à régulation.

Pour un chromosome décrivant une solution (une solution est trouvée pour chaque avion), la fonction d'évaluation s'exprime comme suit :

$$f = \frac{1}{2} + \frac{1}{2 + \sum_{i=1}^N f_i}$$

Où f_i est l'évaluation partielle (à minimiser), relative à l'avion i .

Pour prendre en compte les créneaux CFMU, il suffit donc de modifier f_i pour chaque avion i soumis à régulation, en fonction de son créneau T_i et de l'heure de décollage t_{ki} induite par le chromosome, comme précisé figure 5.

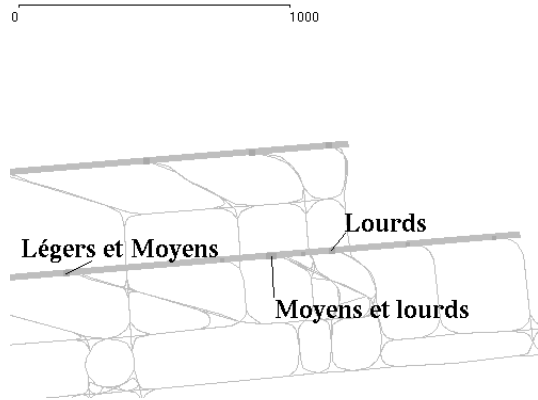


FIG. 6 – Stratégie *CAT*

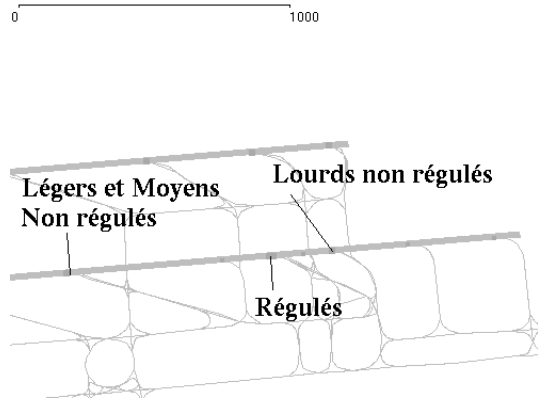


FIG. 7 – Stratégie *SLOT*

4.4 Affectation de bretelles d'entrée de piste

Opérationnellement, l'affectation des bretelles d'entrée de piste est souvent effectuée en fonction de la catégorie de turbulence de sillage des avions. Ceci permet d'insérer facilement un avion "léger" (ne mobilisant la piste qu'une minute) avant un "lourd" (pouvant la mobiliser trois minutes) dans la séquence de piste.

Il semble de même intéressant de réserver certaines bretelles d'accès aux départs soumis à régulation, pour pouvoir leur imposer une attente sans gêner le reste du trafic.

Deux stratégies d'affectation de bretelles d'accès seront comparées par simulation :

- *CAT* : les bretelles sont affectées uniquement en fonction des catégories de turbulence de sillage (voir figure 6) ;
- *SLOT* : pour chaque piste, une des bretelles est réservée aux vols ayant un créneau, et les autres sont affectées en fonction des catégories de turbulences de sillage (voir figure 7).

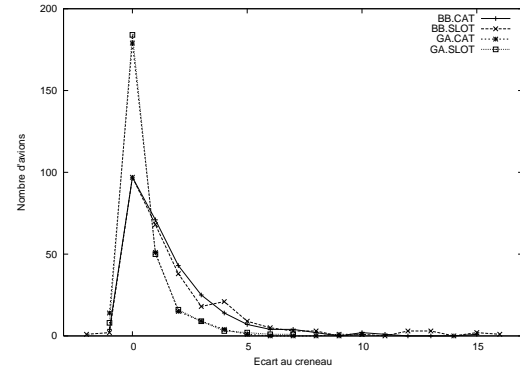


FIG. 8 – Distributions des écarts aux créneaux

4.5 Simulations

4.5.1 Stratégies

Les quatre stratégies suivantes sont comparées par simulation :

- *BB.CAT* et *BB.SLOT* : résolution 1 contre n avec chacune des deux stratégies d'affectation de bretelle d'entrée *CAT* et *SLOT* définies ci-dessus.
- *GA.CAT* et *GA.SLOT* : algorithmes génétiques (*GABB*) avec les stratégies d'affectation *CAT* et *SLOT*.

4.5.2 Paramètres

Les simulations sont effectuées à partir de la même journée de trafic (22/03/2002) et avec les paramètres suivants :

- 1433 vols, 695 départs, 278 créneaux
- Horizon : $T_w = 5$ minutes
- Anticipation : $\alpha = 30$ minutes
- Période de résolution : $\Delta = 2$ minutes
- Incertitudes sur la vitesse : $\delta_s = \pm 10\%$

4.5.3 Résultats

La figure 8 donne la distribution des écarts aux créneaux pour chaque stratégie.

Un premier résultat intéressant est la similitude entre les deux stratégies d'affectation de bretelles *CAT* et *SLOT* : pour les deux méthodes de résolution (1 contre n ou algorithmes génétiques), réserver des bretelles d'entrée aux avions soumis à régulation ne diminue pas les écarts aux créneaux. Cela signifie que les écarts aux créneaux sont plus influencés par l'organisation du trafic en amont (avant les bretelles d'accès) et par la précision de la prédiction des temps de roulage que par la répartition du trafic devant les pistes.

Un second résultat important est la supériorité de la méthode *GABB* sur la méthode *BB* : la méthode utilisant les algorithmes génétiques donne un intervalle des écarts aux créneaux de $[-1; +9]$ minutes avec plus de 80% des vols dans la tranche $[-1; +1]$ minute.

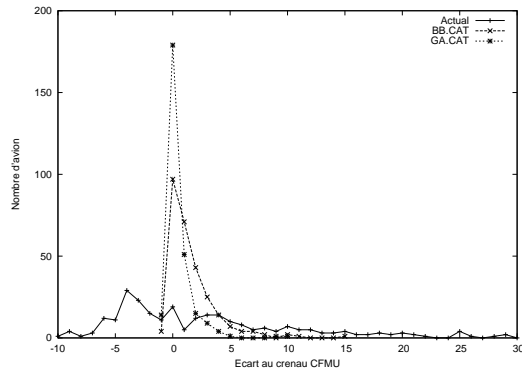


FIG. 9 – Comparaison avec la réalité

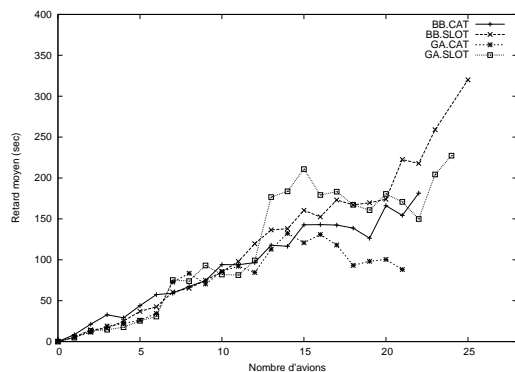


FIG. 10 – Retards des avions non soumis à créneau

A titre d'information, la figure 9 donne la distribution réelle, observée sur les traces radar de la même journée de trafic.

Enfin, la figure 10 donne les corrélations entre le nombre d'avions au roulage et le retard des avions non soumis à régulation, pour chaque stratégie. Ces corrélations montrent l'importance de la pénalisation induite sur le reste du trafic par la stratégie d'affectation de bretelles *SLOT* : la diminution du nombre de bretelles d'accès disponible pour les avions non soumis à créneaux (la majorité du trafic) lui cause des retards beaucoup plus importants.

5 Conclusions

Les premières simulations effectuées pour cette étude montrent que pendant les pointes de trafic, les séquences de pistes (et par conséquent les temps de roulage) sont grandement influencés par l'organisation du trafic dans les zones de parking et sur les taxiways. Un simulateur peut donc s'avérer très utile pour anticiper avec précision les temps de roulage à chaque période de la journée.

De plus, les dernières simulations montrent qu'un tel simulateur peut organiser efficacement le trafic et minimiser les écarts aux créneaux, en donnant une attente stratégique à chaque vol régulé. Sur ce problème, l'utilisation des algorithmes génétiques donne des solutions intéressantes, compatibles avec l'optimisation d'un critère global

incluant aussi bien l'écart aux créneaux des vols régulés que le retard des autres vols.

Références

- [AMO93] Ravindra K. Ahuja, Thomas L. Magnanti, and James B. Orlin. *Network Flows, Theory, Algorithms and Applications*. Prentice Hall, 1993.
- [DA98] N. Durand and J. M. Alliot. Genetic crossover operator for partially separable functions. In *Proceedings of the third annual Genetic Programming Conference*, 1998.
- [DAN96] Nicolas Durand, Jean-Marc Alliot, and Joseph Noailles. Automatic aircraft conflict resolution using genetic algorithms. In *Proceedings of the Symposium on Applied Computing, Philadelphia*. ACM, 1996.
- [GDA01] Jean-Baptiste Gotteland, Nicolas Durand, Jean-Marc Alliot, and Erwan Page. *Ground Traffic Optimization*. In Air Traffic Management R & D Seminar, December 2001
- [Gol89] D.E Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading MA Addison Wesley, 1989.
- [Gro99] The Preston Group. *TAAM Reference Manual*. The Preston Group, 1999.
- [HT95] Reiner Horst and Hoang Tuy. *Global Optimization, Deterministic Approaches*. Springer, 1995.
- [IDA98] A.H Idris, B Delcaire, I Anagnostakis, W.D Hall, J.P Clarke, R.J Hansman, E Feron, and A.R Odoni. *Observations of Departure Processes at Logan Airport to Support the Development of Departure Planning Tools*. In Air Traffic Management R & D Seminar, Orlando, December 1998.
- [Mic92] Z Michalewicz. *Genetic algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Springer-verlag, 1992.
- [Mj96] Victor M. Jimenez and Andres Marzal. *Computing the K Shortest Paths : A New Algorithm and an Experimental Comparison*.
- [Pea84] Judea Pearl. *Heuristics*. Addison-Wesley, 1984. ISBN : 0-201-05594-5.
- [YG93] Xiaodong Yin and Noel Germy. A fast genetic algorithm with sharing scheme using cluster analysis methods in multimodal function optimization.