

Optimisation des séquences de pistes et des mouvements au sol sur grand aéroport

Raphaël Deau



DSNA

Direction
de la Technique
et de l'Innovation

8 sept. 2009

Plan

- 1 Introduction
- 2 Travaux précédents
 - Le simulateur de trafic d'aéroport
 - Optimisation des séquences de pistes
 - Résolution des conflits au sol
- 3 Calcul de la séquence de piste sur une journée
 - Définition du problème
 - Résultats
- 4 La nouvelle méthode hybride
 - Définition du problème
 - Résolution
- 5 Résultats
- 6 Conclusion et travaux futurs

1 Introduction

2 Travaux précédents

- Le simulateur de trafic d'aéroport
- Optimisation des séquences de pistes
- Résolution des conflits au sol

3 Calcul de la séquence de piste sur une journée

- Définition du problème
- Résultats

4 La nouvelle méthode hybride

- Définition du problème
- Résolution

5 Résultats

6 Conclusion et travaux futurs

- La congestion des aéroports est toujours à l'étude
- Objets de l'étude :
 - Les séquences de pistes
 - Le roulage au sol (résolution des conflits)
 - Le lien entre les séquences de pistes et les trajectoires des avions au sol
- Étude menée sur l'aéroport Roissy Charles de Gaulle

- 1 Introduction
- 2 Travaux précédents
 - Le simulateur de trafic d'aéroport
 - Optimisation des séquences de pistes
 - Résolution des conflits au sol
- 3 Calcul de la séquence de piste sur une journée
 - Définition du problème
 - Résultats
- 4 La nouvelle méthode hybride
 - Définition du problème
 - Résolution
- 5 Résultats
- 6 Conclusion et travaux futurs

Objectifs

Résultats précédents :

- Réduction du délai au sol avec une méthode de résolution par AG : environ 40%
(en comparaison avec une méthode séquentielle basique)
- Le respect des créneaux CFMU a été améliorée par le processus d'optimisation mis en place

Objectifs

Résultats précédents :

- Réduction du délai au sol avec une méthode de résolution par AG : environ 40%
(en comparaison avec une méthode séquentielle basique)
- Le respect des créneaux CFMU a été améliorée par le processus d'optimisation mis en place

Mais :

- Horizon de prédiction pour la résolution des conflits au sol ≤ 10 min
- La prédiction des séquences de piste doit être ≥ 20 min

Objectifs

Résultats précédents :

- Réduction du délai au sol avec une méthode de résolution par AG : environ 40%
(en comparaison avec une méthode séquentielle basique)
- Le respect des créneaux CFMU a été améliorée par le processus d'optimisation mis en place

Mais :

- Horizon de prédiction pour la résolution des conflits au sol ≤ 10 min
- La prédiction des séquences de piste doit être ≥ 20 min

Conséquences :

- Deux horizons de prédiction sont nécessaires
- Adaptation du simulateur :
 - Calcule les meilleures séquences de pistes
 - Optimise les trajectoires des avions pour respecter l'ordre des séquences

Le simulateur de trafic d'aéroport : Roissy

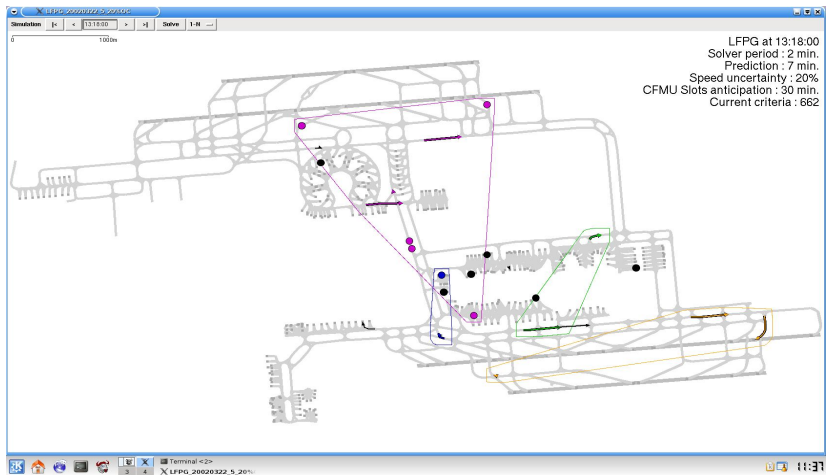


Figure: ATOS (Airport Traffic Optimisation Simulator)

Données utilisées

- Description détaillée de l'aéroport
- Plans de vol réels
- Ensemble de chemins possibles calculés pour chaque avion

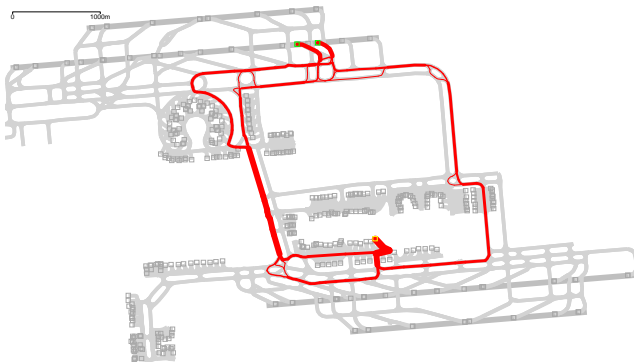


Figure: Plan de Roissy

Optimisation des séquences de pistes

Définition du problème :

- Variables : créneaux horaires de décollage à affecter à chaque avion
- Principales contraintes :
 - Heures d'atterrissage : les arrivées ne peuvent pas être retardées de plus d'une minute
 - Temps minimal restant de roulage
 - Règles de séparation de piste : 3 types d'avions (léger, moyen, lourd)
 - Tolérance pour les créneaux CFMU : $[-5min.; +10min.]$
- Critère : délais et écarts aux créneaux CFMU

Optimisation des séquences de pistes

Définition du problème :

- Variables : créneaux horaires de décollage à affecter à chaque avion
- Principales contraintes :
 - Heures d'atterrissage : les arrivées ne peuvent pas être retardées de plus d'une minute
 - Temps minimal restant de roulage
 - Règles de séparation de piste : 3 types d'avions (léger, moyen, lourd)
 - Tolérance pour les créneaux CFMU : $[-5min.; +10min.]$
- Critère : délais et écarts aux créneaux CFMU
- Problème classique d'ordonnancement
- Méthode de résolution déterministe (Branch & Bound)
- Combinatoire avec le nombre d'avions

Résolution des conflits au sol

But de cette partie :

- Considérer la séquence précédemment calculée comme l'objectif pour la résolution des conflits au sol
- Horizon de prédiction pour les séquences de pistes : 30 minutes
- Adapter les algorithmes de résolution pour respecter ces séquences

Résolution des conflits au sol

But de cette partie :

- Considérer la séquence précédemment calculée comme l'objectif pour la résolution des conflits au sol
- Horizon de prédiction pour les séquences de pistes : 30 minutes
- Adapter les algorithmes de résolution pour respecter ces séquences

Deux méthodes sont comparées :

- Résolution séquentielle
- Résolution par algorithme génétique

Les méthodes de résolution de conflit

Méthode de résolution séquentielle :

- Chaque avion a une priorité définie
- On considère les avions les uns après les autres dans l'ordre de priorité
- On optimise la $n + 1$ ^{ième} trajectoire en résolvant les conflits avec les n déjà résolues

Les méthodes de résolution de conflit

Méthode de résolution séquentielle :

- Chaque avion a une priorité définie
- On considère les avions les uns après les autres dans l'ordre de priorité
- On optimise la $n + 1$ ème trajectoire en résolvant les conflits avec les n déjà résolues

Résolution par algorithme génétique :

- On considère la situation de façon globale
- Pas de classement des avions
- Critère : somme de chaque critère spécifique par avion
- Critère partiellement séparable \Rightarrow opérateurs de mutation et de croisement plus adaptés

- 1 Introduction
- 2 Travaux précédents
 - Le simulateur de trafic d'aéroport
 - Optimisation des séquences de pistes
 - Résolution des conflits au sol
- 3 Calcul de la séquence de piste sur une journée
 - Définition du problème
 - Résultats
- 4 La nouvelle méthode hybride
 - Définition du problème
 - Résolution
- 5 Résultats
- 6 Conclusion et travaux futurs

Définition du problème

Objectifs :

- Obtenir une borne inférieure du délai moyen due à la séquence de piste sur une journée complète
- S'assurer de la possibilité d'amélioration des résultats
- Quantifier l'influence des paramètres

Définition du problème

Objectifs :

- Obtenir une borne inférieur du délai moyen due à la séquence de piste sur une journée complète
- S'assurer de la possibilité d'amélioration des résultats
- Quantifier l'influence des paramètres

Principe :

- Calculer une séquence sur une journée pour chaque piste
- En prenant en compte le temps de roulage minimal de chaque avion
- Mais sans prendre en compte les conflits au roulage

Définition du problème

Objectifs :

- Obtenir une borne inférieure du délai moyen due à la séquence de piste sur une journée complète
- S'assurer de la possibilité d'amélioration des résultats
- Quantifier l'influence des paramètres

Principe :

- Calculer une séquence sur une journée pour chaque piste
- En prenant en compte le temps de roulage minimal de chaque avion
- Mais sans prendre en compte les conflits au roulage

Méthode :

- Application du Branch & Bound à des fenêtres de temps successives sur la journée complète

Définition du problème

Objectifs :

- Obtenir une borne inférieure du délai moyen due à la séquence de piste sur une journée complète
- S'assurer de la possibilité d'amélioration des résultats
- Quantifier l'influence des paramètres

Principe :

- Calculer une séquence sur une journée pour chaque piste
- En prenant en compte le temps de roulage minimal de chaque avion
- Mais sans prendre en compte les conflits au roulage

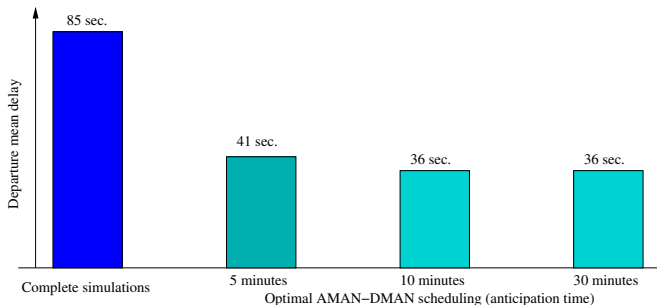
Méthode :

- Application du Branch & Bound à des fenêtres de temps successives sur la journée complète

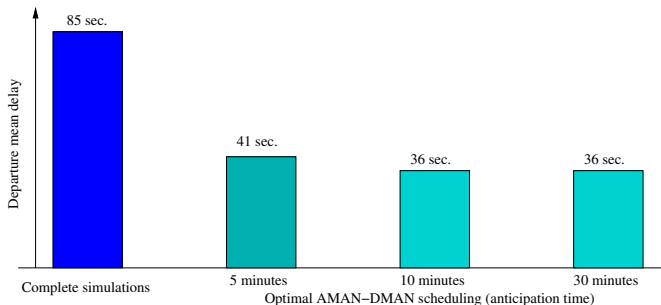
Paramètres étudiés :

- Horizon de prédiction, flexibilité des heures d'arrivée, marge dans la séquence prévue

Influence du changement d'horizon de prédiction

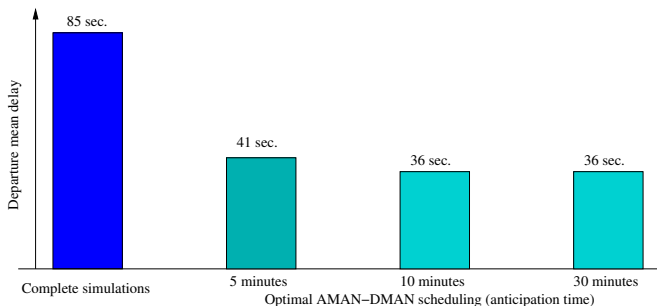


Influence du changement d'horizon de prédiction



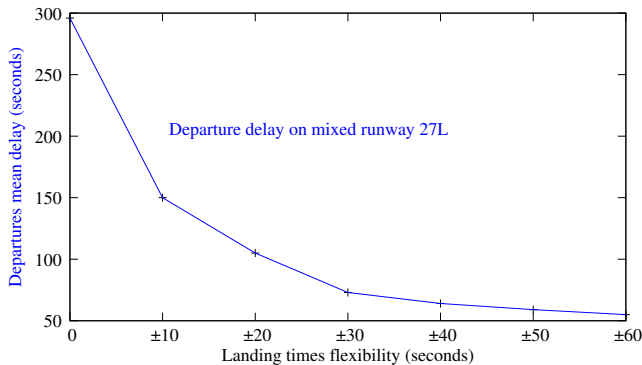
- La séquence de piste calculée est deux fois moins pénalisante sans considérer les conflits au sol.
→ La gestion du roulage peut être améliorée

Influence du changement d'horizon de prédiction

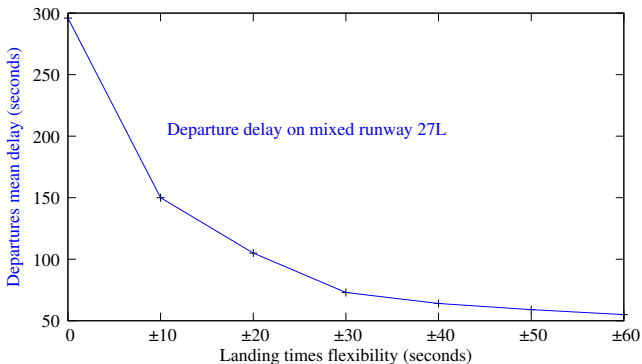


- La séquence de piste calculée est deux fois moins pénalisante sans considérer les conflits au sol.
→ La gestion du roulage peut être améliorée
- Un horizon de prédiction de 10 minutes semble suffisante mais elle ne l'est pas pour les autres systèmes ATM (secteurs d'approche, Collaborative Decision Making (CDM), etc.)

Influence de la flexibilité des heures d'arrivée

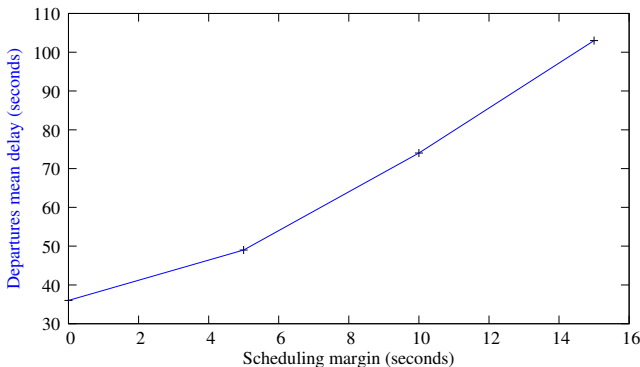


Influence de la flexibilité des heures d'arrivée

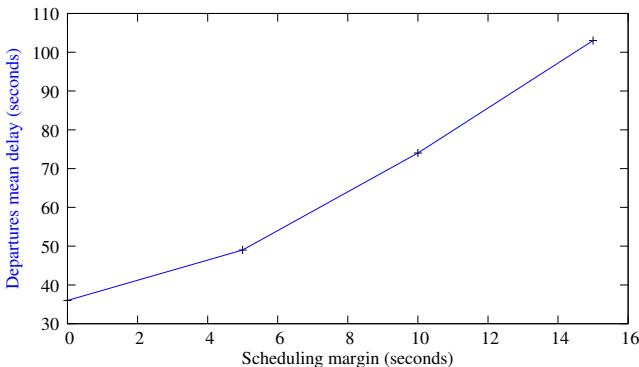


- Nécessité de la flexibilité pour les pistes banalisées (partagées entre départs et arrivées)
- ± 30 sec. semble une valeur correcte

Influence de la marge de manoeuvre dans la séquence



Influence de la marge de manoeuvre dans la séquence



- Augmentation du délai avec la marge
- → Aucun gain lorsque la marge est supérieur à 10 secondes
- → Compromis difficile : pertinence de la séquence vs délai des départs

Premières conclusions

- Les conflits au sol peuvent doubler le délai des départs
- La flexibilité des heures d'arrivée (± 30 sec.) est nécessaire pour les pistes banalisées
- Ajouter une marge de manoeuvre au séquençement de piste semble contraignant

Premières conclusions

- Les conflits au sol peuvent doubler le délai des départs
- La flexibilité des heures d'arrivée (± 30 sec.) est nécessaire pour les pistes banalisées
- Ajouter une marge de manoeuvre au séquençement de piste semble contraignant

⇒ Le système de séquençement doit garder une certaine flexibilité

⇒ Le lien “séquences de piste - roulage” est le point important à améliorer

- 1 Introduction
- 2 Travaux précédents
 - Le simulateur de trafic d'aéroport
 - Optimisation des séquences de pistes
 - Résolution des conflits au sol
- 3 Calcul de la séquence de piste sur une journée
 - Définition du problème
 - Résultats
- 4 La nouvelle méthode hybride
 - Définition du problème
 - Résolution
- 5 Résultats
- 6 Conclusion et travaux futurs

Définition du problème

Constatations sur les méthodes précédentes :

- La méthode séquentielle est performante dans le respect des séquences lorsque les avions sont proches de la piste
- L'algorithme génétique est performant dans le choix des chemins et de points d'attente des avions en dehors de la piste

⇒ Objectif : Coupler les avantages des deux méthodes.

Définition du problème

Constatations sur les méthodes précédentes :

- La méthode séquentielle est performante dans le respect des séquences lorsque les avions sont proches de la piste
- L'algorithme génétique est performant dans le choix des chemins et de points d'attente des avions en dehors de la piste

⇒ Objectif : Coupler les avantages des deux méthodes.

Méthode :

- Utilisation d'un algorithme génétique couplé avec une résolution séquentielle
- L'AG affecte les chemins et les positions d'attente des avions
- Lors de l'évaluation, la méthode séquentielle résout les conflits au sol en respectant l'attente imposée par l'AG

Le nouvel algorithme génétique

- Chromosome : $[(chemin_0, posAttente_0); \dots ; (chemin_n, posAttente_n)]$

Le nouvel algorithme génétique

- Chromosome : $[(chemin_0, posAttente_0); \dots ; (chemin_n, posAttente_n)]$
- Fitness :
 - Appliquer la méthode séquentielle en imposant l'attente et en respectant le chemin du chromosome
 - Si la méthode séquentielle ne trouve pas de solution
→ Fitness = fonction du nombre d'avion non résolu
 - Sinon, fitness = fonction du délai total & des écarts aux créneaux

Le nouvel algorithme génétique

- Chromosome : $[(chemin_0, posAttente_0); \dots ; (chemin_n, posAttente_n)]$
- Fitness :
 - Appliquer la méthode séquentielle en imposant l'attente et en respectant le chemin du chromosome
 - Si la méthode séquentielle ne trouve pas de solution
→ Fitness = fonction du nombre d'avion non résolu
 - Sinon, fitness = fonction du délai total & des écarts aux créneaux
- Accélération de la convergence :
 - Le problème reste partiellement séparable

- 1 Introduction
- 2 Travaux précédents
 - Le simulateur de trafic d'aéroport
 - Optimisation des séquences de pistes
 - Résolution des conflits au sol
- 3 Calcul de la séquence de piste sur une journée
 - Définition du problème
 - Résultats
- 4 La nouvelle méthode hybride
 - Définition du problème
 - Résolution
- 5 Résultats
- 6 Conclusion et travaux futurs

Délais sur la journée complète

	Départs	Arrivées
Méthode séquentielle	7h34 55sec./avion	10h21 50sec./avion
Ancien AG	7h44 1min./avion	5h31 25sec./avion
Nouvel AG	7h46 1min./avion	6h31 30sec./avion

⇒ Délai des départs équivalent pour chaque méthode

⇒ Délai des arrivées bien meilleurs avec les AG

Respect de la séquence

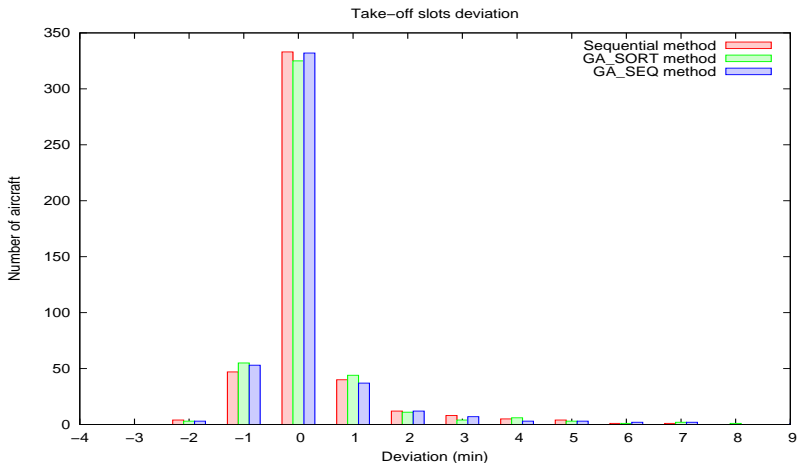


Figure: Respect de la séquence de piste

1 Introduction

2 Travaux précédents

- Le simulateur de trafic d'aéroport
- Optimisation des séquences de pistes
- Résolution des conflits au sol

3 Calcul de la séquence de piste sur une journée

- Définition du problème
- Résultats

4 La nouvelle méthode hybride

- Définition du problème
- Résolution

5 Résultats

6 Conclusion et travaux futurs

Conclusion & travaux futurs

Conclusions :

- Le délai dû aux pistes correspond à la moitié du délai total
- La méthode séquentielle a été améliorée par la gestion des heures de départs du parking

Conclusion & travaux futurs

Conclusions :

- Le délai dû aux pistes correspond à la moitié du délai total
- La méthode séquentielle a été améliorée par la gestion des heures de départs du parking

Travaux futurs :

- Améliorer la seconde méthode hybride
- Affiner la mesure des écarts entre les séquences pré-calculées et réalisées
- Comparer les méthodes de résolution par type de situation
- Étudier la corrélation entre nombre d'avions et délais