

# Optimisation des séquences de pistes et des mouvements au sol sur les grands aéroports

Raphaël Deau



Direction  
de la Technique  
et de l'Innovation

07 septembre 2010

# Plan

- 1 Introduction
- 2 Contexte de simulation
  - Boucle de simulation
  - Optimisation des séquences de pistes
  - Résolution des conflits au sol
- 3 Résultats
  - Comparaison des méthodes
  - Respect des séquences visées
- 4 Influence des principaux paramètres
  - Horizon de prédiction
  - Incertitude sur la vitesse et pas de rafraîchissement
- 5 Conclusion

## 1 Introduction

## 2 Contexte de simulation

- Boucle de simulation
- Optimisation des séquences de pistes
- Résolution des conflits au sol

## 3 Résultats

- Comparaison des méthodes
- Respect des séquences visées

## 4 Influence des principaux paramètres

- Horizon de prédiction
- Incertitude sur la vitesse et pas de rafraîchissement

## 5 Conclusion

# Introduction

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

## 1 Introduction

## 2 Contexte de simulation

- Boucle de simulation
- Optimisation des séquences de pistes
- Résolution des conflits au sol

## 3 Résultats

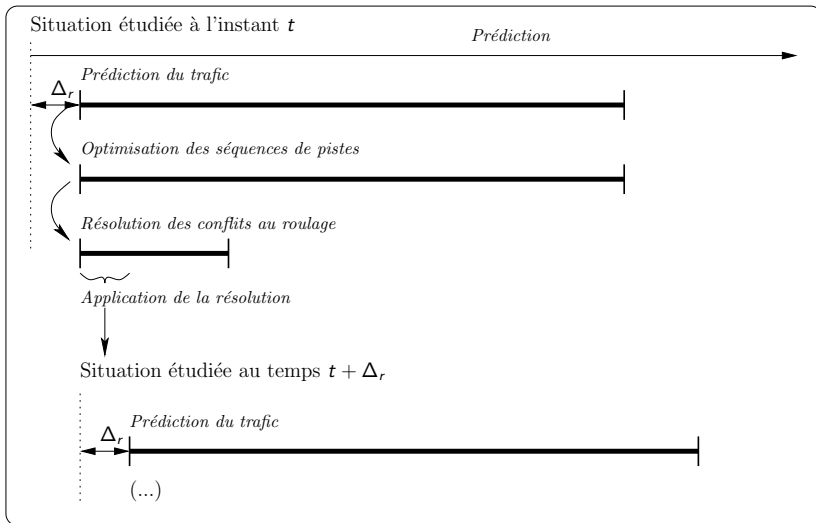
- Comparaison des méthodes
- Respect des séquences visées

## 4 Influence des principaux paramètres

- Horizon de prédiction
- Incertitude sur la vitesse et pas de rafraîchissement

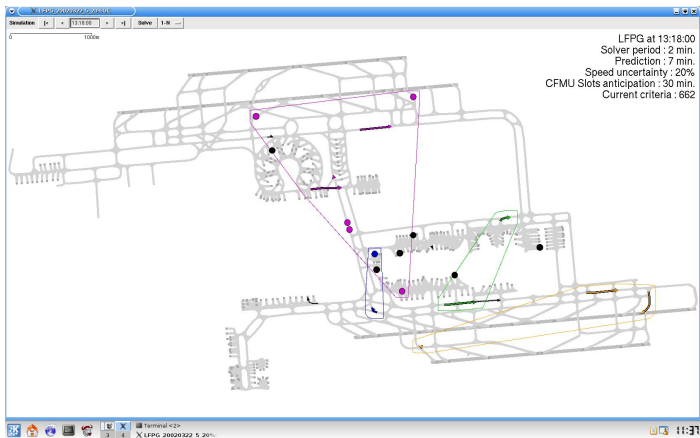
## 5 Conclusion

# Boucle de simulation



# Prédiction du trafic

- Calcul des chemins possibles pour chaque avion
- Préviation des trajectoires de chaque avion avec les incertitudes
- Détection des conflits et extraction des groupes d'avions en conflit



# Optimisation des séquences de pistes

- Variables : heure d'accès à la piste à affecter à chaque avion
- Contraintes :
  - Heures minimales d'accès à la piste
  - Règles de séparation de piste : 3 catégories (léger, moyen, lourd)
  - Tolérance pour les créneaux CFMU :  $[-5min.; +10min.]$
- Critère : délais et écarts aux créneaux CFMU



# Optimisation des séquences de pistes

- Variables : heure d'accès à la piste à affecter à chaque avion
- Contraintes :
  - Heures minimales d'accès à la piste
  - Règles de séparation de piste : 3 catégories (léger, moyen, lourd)
  - Tolérance pour les créneaux CFMU :  $[-5min.; +10min.]$
- Critère : délais et écarts aux créneaux CFMU
  - Soit en évitant les programmations tardives des décollages régulés ( $C_r$ )
  - Soit en privilégiant la réduction des délais des départs non régulés ( $C_d$ )
  - Soit en ne privilégiant ni l'un ni l'autre ( $C_e$ )

# Optimisation des séquences de pistes

- Variables : heure d'accès à la piste à affecter à chaque avion
- Contraintes :
  - Heures minimales d'accès à la piste
  - Règles de séparation de piste : 3 catégories (léger, moyen, lourd)
  - Tolérance pour les créneaux CFMU :  $[-5min.; +10min.]$
- Critère : délais et écarts aux créneaux CFMU
  - Soit en évitant les programmations tardives des décollages régulés ( $C_r$ )
  - Soit en privilégiant la réduction des délais des départs non régulés ( $C_d$ )
  - Soit en ne privilégiant ni l'un ni l'autre ( $C_e$ )
- Différents paramètres :
  - Horizon de prédiction
  - Flexibilité : temps de décalage possible des heures d'atterrissage
  - Marge : attente supplémentaire derrière un atterrissage

# Optimisation des séquences de pistes

- Variables : heure d'accès à la piste à affecter à chaque avion
- Contraintes :
  - Heures minimales d'accès à la piste
  - Règles de séparation de piste : 3 catégories (léger, moyen, lourd)
  - Tolérance pour les créneaux CFMU :  $[-5min.; +10min.]$
- Critère : délais et écarts aux créneaux CFMU
  - Soit en évitant les programmations tardives des décollages régulés ( $C_r$ )
  - Soit en privilégiant la réduction des délais des départs non régulés ( $C_d$ )
  - Soit en ne privilégiant ni l'un ni l'autre ( $C_e$ )
- Différents paramètres :
  - Horizon de prédiction
  - Flexibilité : temps de décalage possible des heures d'atterrissage
  - Marge : attente supplémentaire derrière un atterrissage
- Résolution par ordonnancement (Branch & Bound)

# Résolution des conflits au sol

Objectifs :

- Résoudre les conflits
- En minimisant les délais
- En respectant les créneaux imposés par le CFMU
- En réalisant les séquences optimales calculées

# Résolution des conflits au sol

Objectifs :

- Résoudre les conflits
- En minimisant les délais
- En respectant les créneaux imposés par le CFMU
- En réalisant les séquences optimales calculées

Deux méthodes sont comparées :

- Résolution par classement des avions  
(avec un algorithme déterministe de type branch & bound)
- Résolution par algorithme génétique

# Attente stratégique

- Objectif : Ordonnancer les départs dès la phase de roulage
- Avions concernés :
  - Les départs au parking
  - Les départs régulés au roulage (car avance possible sur le créneau)
- Faire attendre le plus tôt possible

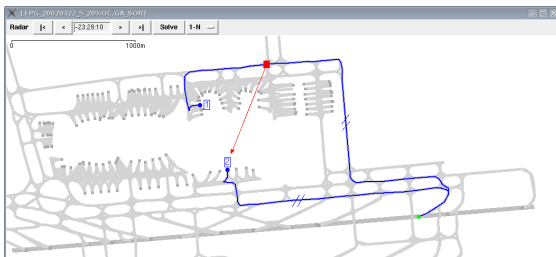
# Attente stratégique

- Objectif : Ordonnancer les départs dès la phase de roulage
- Avions concernés :
  - Les départs au parking
  - Les départs régulés au roulage (car avance possible sur le créneau)
- Faire attendre le plus tôt possible
- Définition de l'attente stratégique :
  - Si un départ 1 est prévu avant un départ 2 dans la séquence de piste
  - On souhaite que l'avion 2 ne soit pas devant l'avion 1 au roulage
  - En infligeant une attente à l'avion 2 si nécessaire



# Attente stratégique

- Objectif : Ordonnancer les départs dès la phase de roulage
- Avions concernés :
  - Les départs au parking
  - Les départs régulés au roulage (car avance possible sur le créneau)
- Faire attendre le plus tôt possible
- Définition de l'attente stratégique :
  - Si un départ 1 est prévu avant un départ 2 dans la séquence de piste
  - On souhaite que l'avion 2 ne soit pas devant l'avion 1 au roulage
  - En infligeant une attente à l'avion 2 si nécessaire





# Les méthodes de résolution de conflit

Méthode déterministe par classement :

- Chaque avion a un niveau de priorité défini
- Les avions sont considérés les uns après les autres
- $n + 1$ ème trajectoire optimisée  
en résolvant les conflits avec les  $n$  précédentes

# Les méthodes de résolution de conflit

Méthode déterministe par classement :

- Chaque avion a un niveau de priorité défini
- Les avions sont considérés les uns après les autres
- $n + 1$ ème trajectoire optimisée  
en résolvant les conflits avec les  $n$  précédentes

Résolution par algorithme génétique :

- La situation est considérée de façon globale
- Variables : couple (niveau de priorité, chemin) pour chaque avion
- Attentes déterminées par méthode déterministe
- Critère : somme des critères de chaque avion

## 1 Introduction

## 2 Contexte de simulation

- Boucle de simulation
- Optimisation des séquences de pistes
- Résolution des conflits au sol

## 3 Résultats

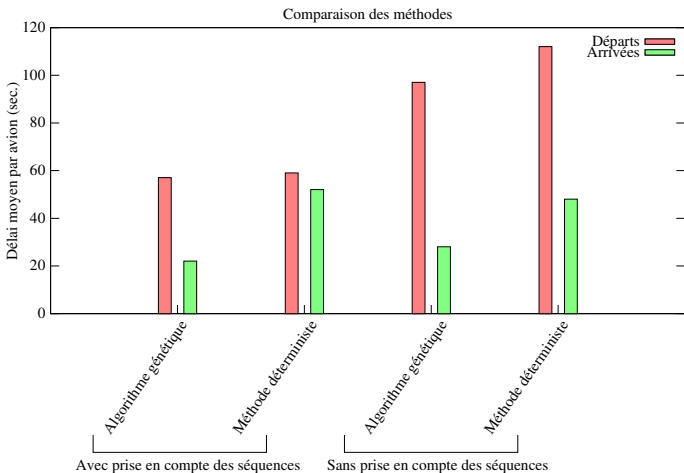
- Comparaison des méthodes
- Respect des séquences visées

## 4 Influence des principaux paramètres

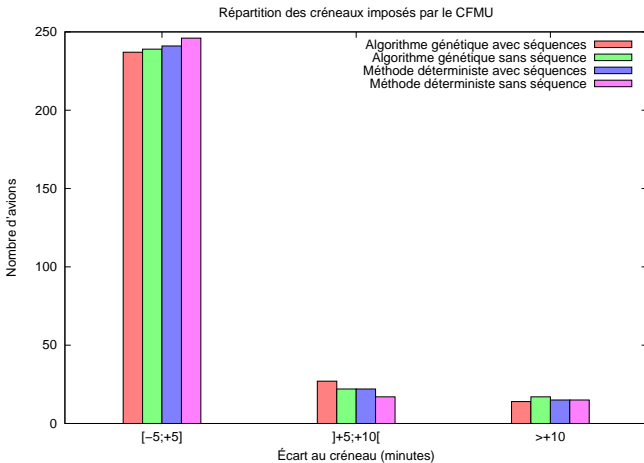
- Horizon de prédiction
- Incertitude sur la vitesse et pas de rafraîchissement

## 5 Conclusion

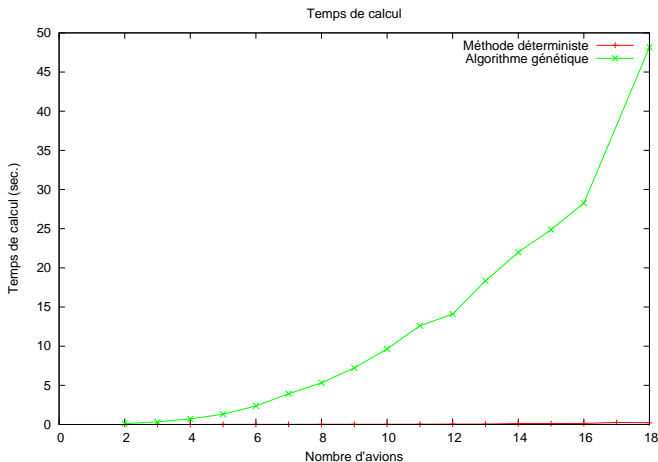
# Délais moyens par avion



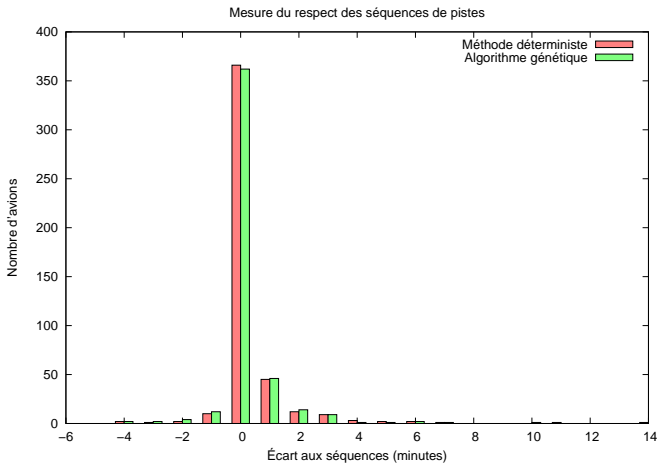
# Programmation des décollages



# Comparaison des temps de calcul



# Mesure du respect des séquences



## 1 Introduction

## 2 Contexte de simulation

- Boucle de simulation
- Optimisation des séquences de pistes
- Résolution des conflits au sol

## 3 Résultats

- Comparaison des méthodes
- Respect des séquences visées

## 4 Influence des principaux paramètres

- Horizon de prédiction
- Incertitude sur la vitesse et pas de rafraîchissement

## 5 Conclusion



# Horizon de prédiction

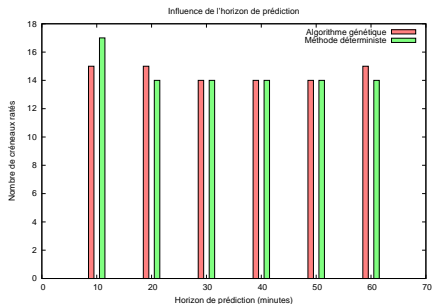
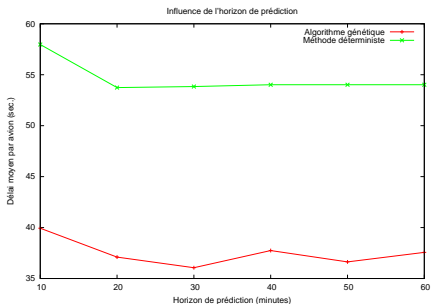
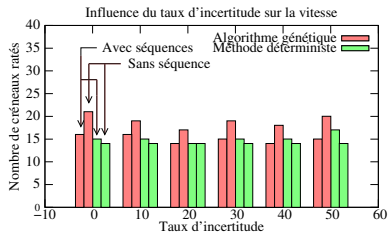
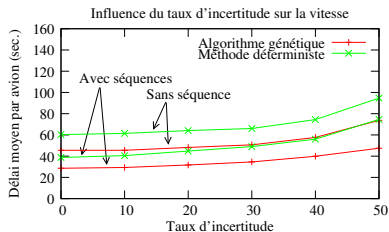
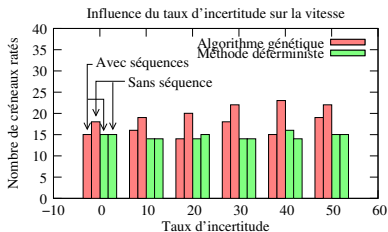
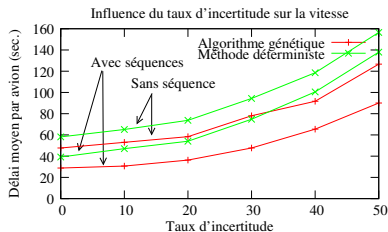


FIG.: Délais et respect des créneaux sur la journée en fonction de l'horizon

# Incertitude sur les vitesses & pas de rafraîchissement (1/2)



$$\Delta_r = 1$$



$$\Delta_r = 2$$

# Incertitude sur les vitesses & pas de rafraîchissement (2/2)

		Taux d'incertitude (%)					
		0	10	20	30	40	50
$\Delta_r = 1$	Avec séquences						
	Sans séquence						3
$\Delta_r = 2$	Avec séquences					1	4
	Sans séquence	2			2	2	1

FIG.: Cas d'échecs de la résolution de conflits avec la méthode déterministe

## 1 Introduction

## 2 Contexte de simulation

- Boucle de simulation
- Optimisation des séquences de pistes
- Résolution des conflits au sol

## 3 Résultats

- Comparaison des méthodes
- Respect des séquences visées

## 4 Influence des principaux paramètres

- Horizon de prédiction
- Incertitude sur la vitesse et pas de rafraîchissement

## 5 Conclusion

# Conclusion

Calcul des séquences d'avions sur les pistes :

- Prédiction des séquences à plus long terme (30 minutes)
- Délai dû aux pistes équivaut à la moitié du délai total  
⇒ La phase de roulage doit pouvoir être améliorée

# Conclusion

Calcul des séquences d'avions sur les pistes :

- Prédiction des séquences à plus long terme (30 minutes)
- Délai dû aux pistes équivaut à la moitié du délai total  
⇒ La phase de roulage doit pouvoir être améliorée

Gestion de la phase de roulage :

- L'attente stratégique permet d'ordonnancer les avions  
⇒ Permet de respecter les séquences et fluidifier le trafic
- Résolution par méthode déterministe :
  - Exécution rapide et délai satisfaisant pour les départs
  - Délai des arrivées plus élevé
- Résolution par algorithme génétique :
  - Délai minimisé pour les départs et les arrivées
  - Plus robuste (aucun cas d'échec)
  - Exécution plus lente