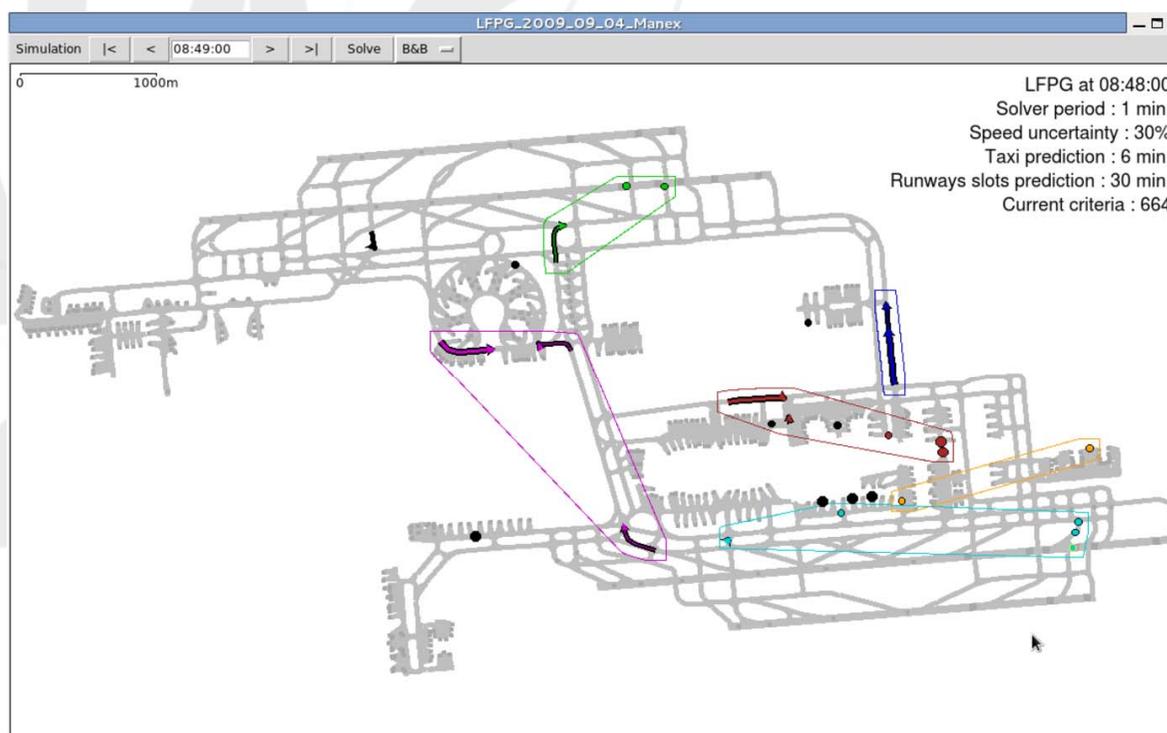




Optimisation du trafic au sol sur les grands aéroports





Plan

- Contexte
- Simulations accélérées du trafic au sol
- Optimisation des séquences d'avions sur les pistes
- Résolution des conflits au roulage
- Applications



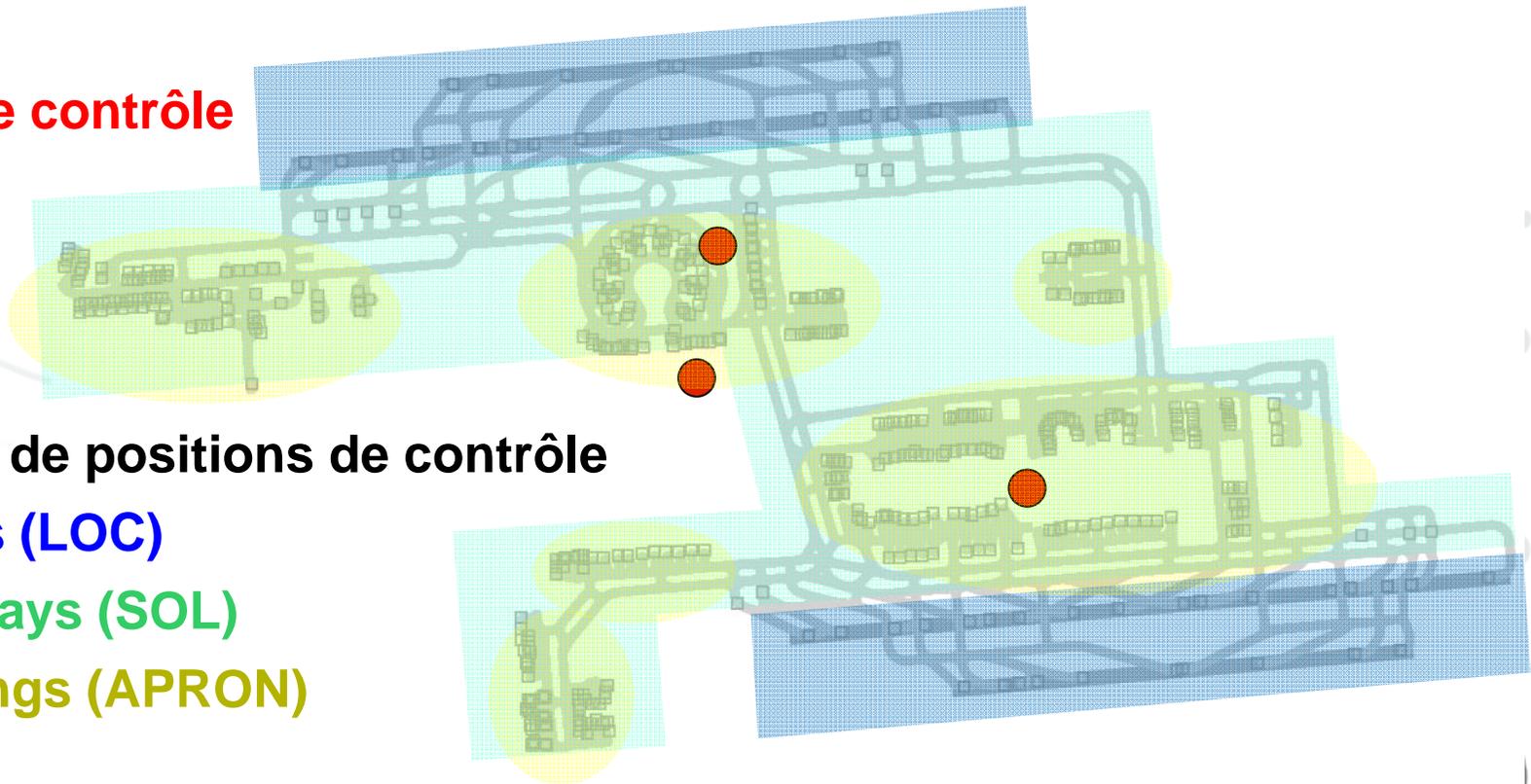


Contexte

Grands aéroports (ex : Roissy CDG)

0 1000m

3 tours de contrôle



3 types de positions de contrôle

- Pistes (LOC)
- Taxiways (SOL)
- Parkings (APRON)





Contexte

Exemples de problèmes d'optimisation rencontrés

- Affectation des parkings
- Gestion des arrivées (AMAN : Arrival Management)
- Gestion des départs (DMAN : Departure Management)
- Cheminement des avions (SMAN : Surface Management)
- Prédiction des temps de roulage

Remarques

- Ces problèmes sont interdépendants
- Avec différents horizons de prédiction





Plan

- Contexte
- **Simulations accélérées du trafic au sol**
- Optimisation des séquences d'avions sur les pistes
- Résolution des conflits au roulage
- Applications





Simulations accélérées du trafic au sol

Objectifs

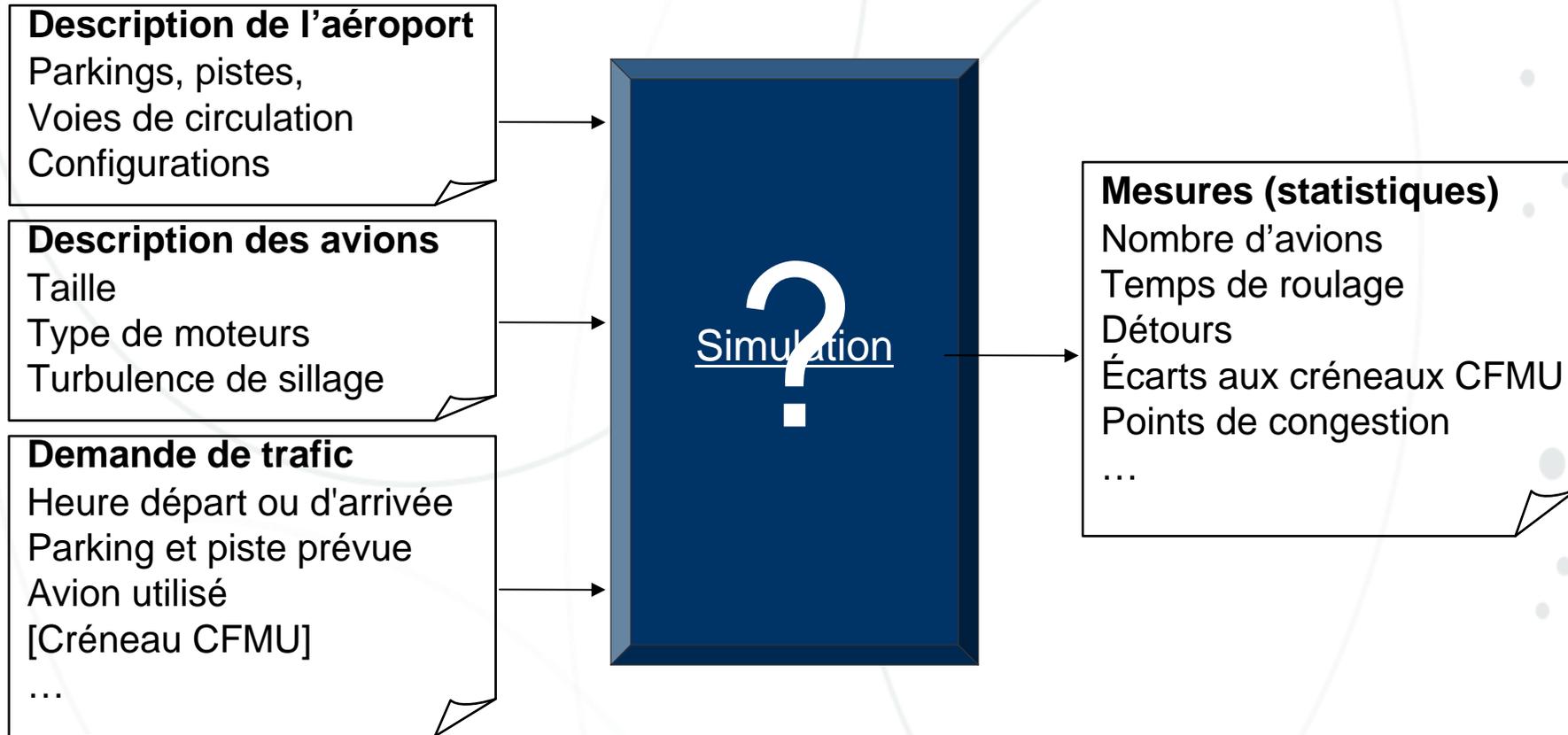
- Simuler le trafic de façon aussi « réaliste » que possible
- Estimer des grandeurs statistiques : retards, nombre d'avions, ...
- Tester de nouvelles stratégies d'exploitation
- Tester des concepts pour de nouveaux outils d'aide au contrôle





Simulations accélérées du trafic au sol

Principes

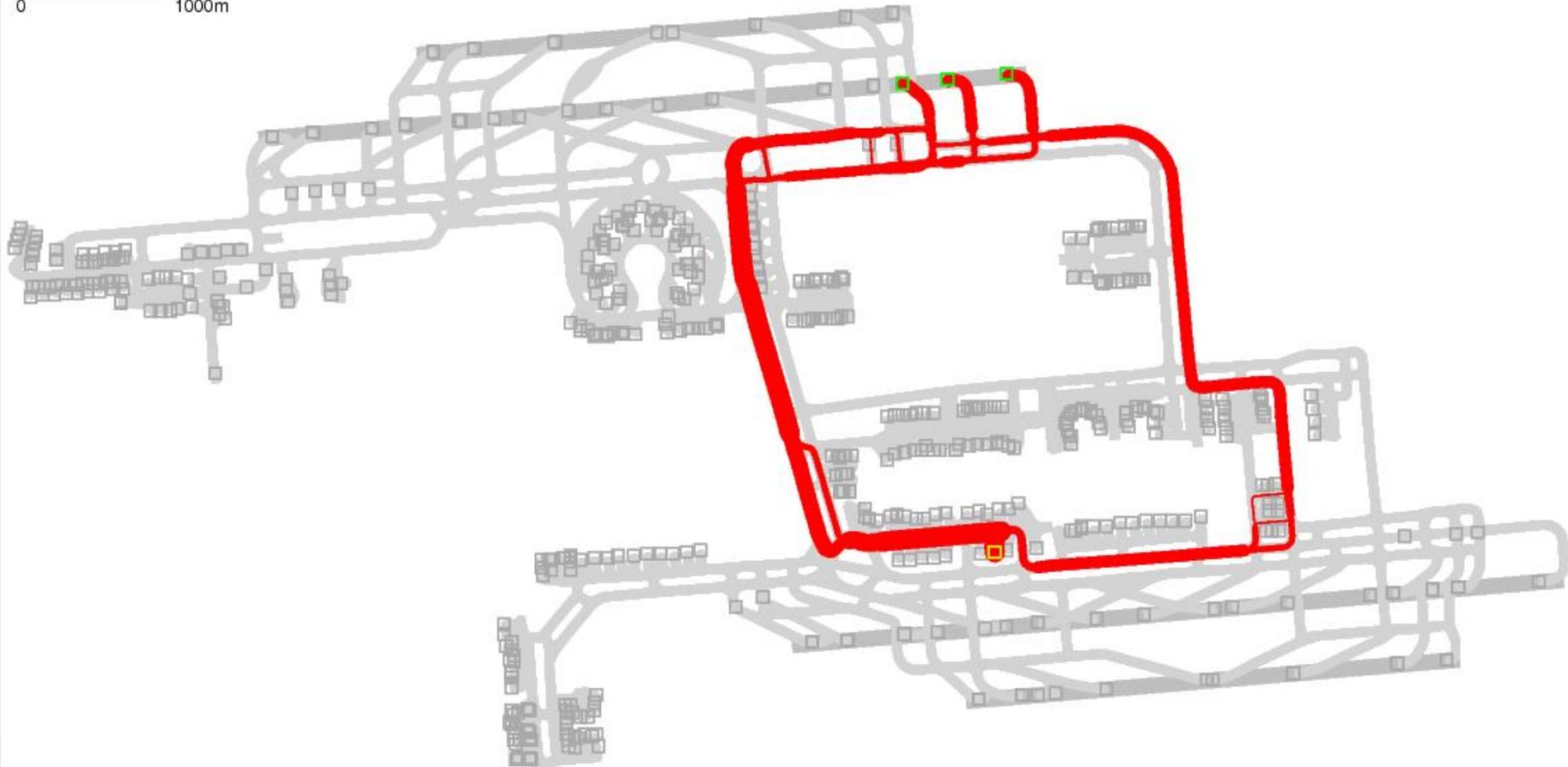




Simulations accélérées du trafic au sol Aéroport = un graphe orienté



0 1000m



Permettant de relier les parkings aux pistes





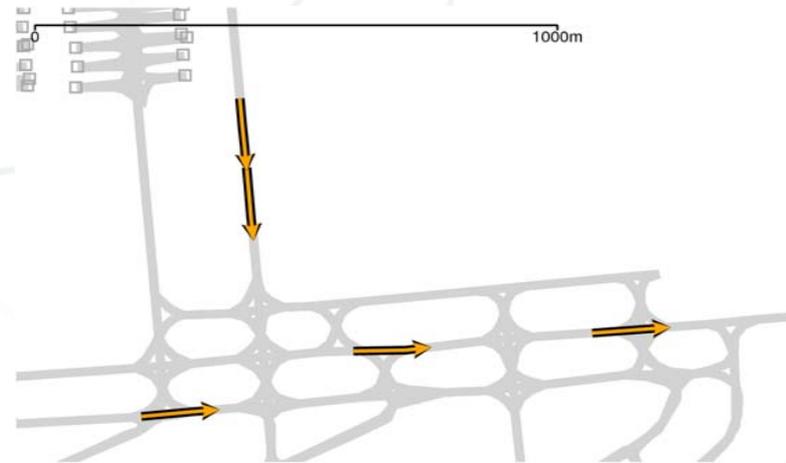
Simulations accélérées du trafic au sol

Gestion de chaque situation de trafic

Prévision des trajectoires des avions :

- À partir de leur position courante
- En envisageant différents chemins pour chaque avion
- En prenant en compte les incertitudes sur les vitesses de roulage

⇒ **Positions futures des avions non ponctuelles**



⇒ **Prévision sur un horizon nécessairement limité**





Simulations accélérées du trafic au sol

Résolution des conflits entre avions

Détection des conflits en fonction des règles de séparation

- Distance minimale entre chaque avion (~60m)
- Temps de séparation minimaux entre les mouvements sur les pistes

Possibilités pour résoudre les conflits

- Choix de chemins alternatifs
- Choix de positions d'attente / de priorités entre avions
- Pour assurer les séparations tout en optimisant la fluidité du trafic

⇒ **Modélisé comme un problème d'optimisation**





Simulations accélérées du trafic au sol

Boucle de simulation

Objectifs

- Affecter des trajectoires aux avions
- Dans un cadre représentatif du temps réel

⇒ Simulation par fenêtres glissantes



- Détection et résolution des conflits sur $[t ; t + H_p]$
- Application de la solution sur $[t ; t + \Delta]$
- $t \leftarrow t + \Delta$



H_p : horizon de prédiction

Δ : pas de rafraîchissement du système ($\Delta < H_p$)

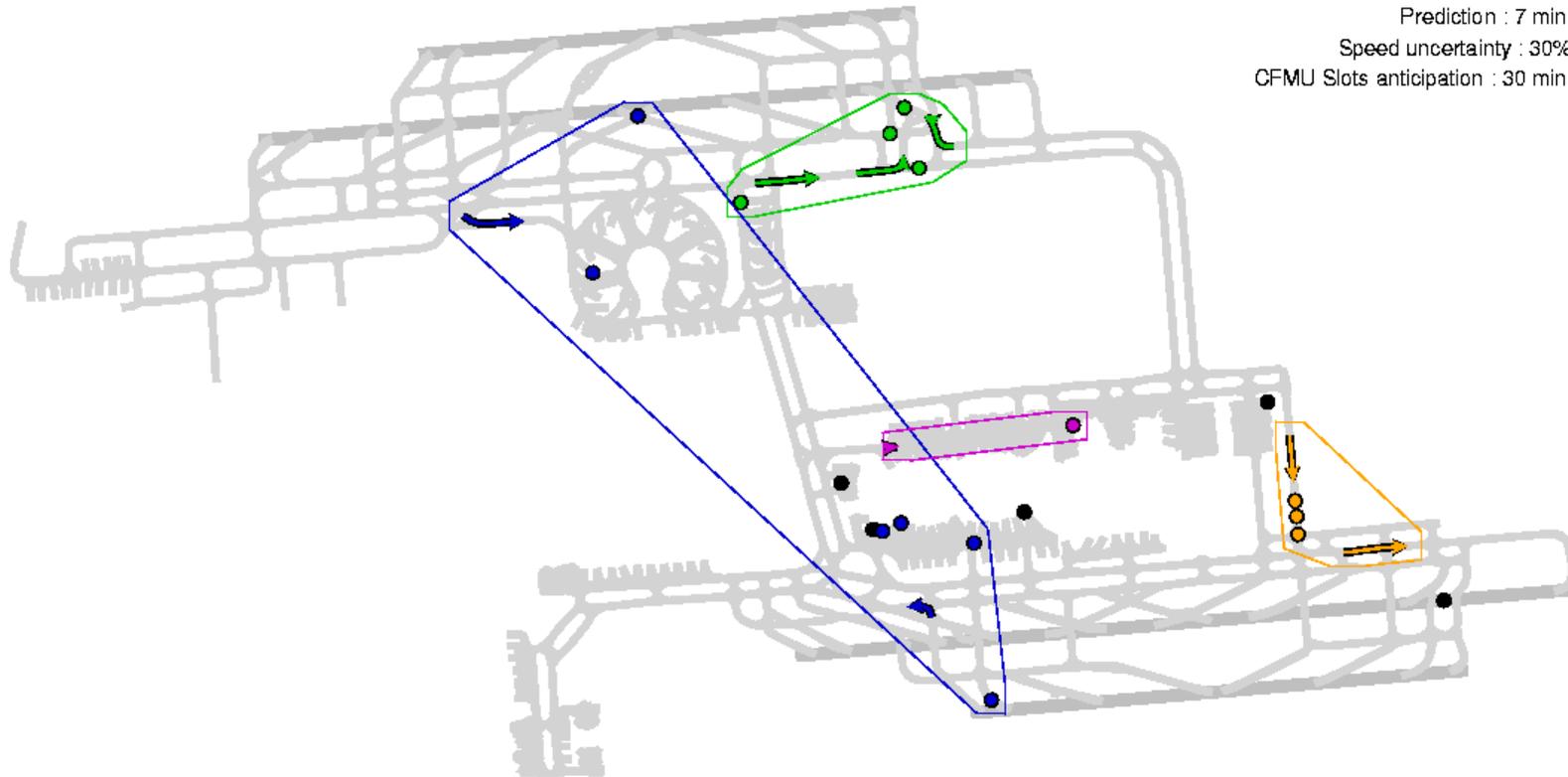




Simulations accélérées du trafic au sol



0 1000m



LFGP at 13:10:00
Solver period : 2 min.
Prediction : 7 min.
Speed uncertainty : 30%
CFMU Slots anticipation : 30 min.



Plan

- Contexte
- Simulations accélérées du trafic au sol
- Optimisation des séquences d'avions sur les pistes
- Résolution des conflits au roulage
- Applications





Optimisation des séquences de piste



Objectifs (AMAN + DMAN)

- Réaliser les séquences d'atterrissages prévues en amont (approche)
- Respecter les créneaux de décollage imposés par la CFMU
- Minimiser le retard des autres départs

Sur un horizon de l'ordre de 30 minutes





Optimisation des séquences de piste

Formulation

Variables

- Heures d'atterrissage et de décollage à affecter aux avions

Contraintes

- Heures d'atterrissage prévues : à respecter à ± 1 minute
- Créneaux CFMU : à respecter entre -5 et +10 minutes
- Heures minimales de décollage des autres départs
- Temps de séparation minimaux entre chaque mouvement

Critère à minimiser : pondération entre

- la somme des écarts aux créneaux CFMU
- la somme des retards imposés aux autres départs





Optimisation des séquences de piste

Résolution



Problème d'ordonnancement classique

- Combinatoire
- Mais sur des instances moyennes (30 minutes, moins de 100 avions)
- Avec de nombreuses symétries (avions « équivalents »)
- Avec des preuves de sous-optimalité de certaines sous-séquences

⇒ Résolution exacte par Branch & Bound

- Avec une stratégie d'exploration en profondeur d'abord
- Et une heuristique du type premier arrivé premier servi





Exemple sur la piste 27L « banalisée »

Séquence 1^{er} arrivé 1^{er} servi

Séquence optimale

SLOT	CFMU	TYPE	CAT	IDENT	SLOT	CFMU	Type	CAT	IDENT
12:59:50		ARR	M	AFR1763	12:59:50		ARR	M	AFR1763
13:00:50		DEP	M	BMA176	13:00:50		ARR	M	EWG362
13:01:50		ARR	M	EWG362	13:01:50		DEP	M	AFR006
13:02:50	12:53	DEP	M	AFR006	13:02:50		ARR	M	BRU865
13:03:50		ARR	M	BRU865	13:03:50		DEP	M	DLH5827
13:04:50	13:09	DEP	M	DLH5827	13:04:50		ARR	M	DLH4114
13:05:50		ARR	M	DLH4114	13:05:50		DEP	M	BMA176
13:07:25		ARR	M	BEE3023	13:07:25		ARR	M	BEE3023
13:09:10		ARR	M	DLH5827	13:09:10		DEP	M	DLH5827
13:10:10	13:02	DEP	H	BAW312	13:10:10		ARR	M	BAW312
13:12:10		DEP	M	BAW315	13:12:10		DEP	H	AFR062
13:13:10		ARR	M	AFR1161	13:13:10		ARR	M	AFR1161
13:14:10		ARR	M	AFR1711	13:14:10		ARR	M	AFR1711
13:15:10		DEP	H	COA57	13:15:10		DEP	H	AFR438
13:17:10		ARR	M	DLH5792	13:17:10		ARR	M	DLH5792
13:18:10	13:09	DEP	H	AFR062	13:18:10		DEP	M	BAW315
13:20:10		ARR	M	EIN524	13:20:10		DEP	M	CES0554
13:21:10		ARR	H	AFR439	13:21:10		ARR	M	EIN524
13:22:40	13:15	DEP	H	AFR439	13:22:40		ARR	H	AFR439
13:24:40		ARR	M	BMA177	13:24:40		DEP	H	COA57
13:25:40		DEP	H	DAL21	13:25:40		ARR	M	BMA177
13:27:40		ARR	M	AIJ2531	13:27:40		DEP	M	AIJ2531
13:28:40	13:22	DEP	M	BRY85A	13:28:40		DEP	M	BRY85A
13:29:40	13:26	DEP	H	AFR1735	13:29:40		ARR	M	AFR1735
13:31:40	13:21	DEP	M	NWA49	13:31:40		DEP	H	NWA49
13:32:40		DEP	M	BRY85A	13:32:40		DEP	H	DAL21

Écarts aux créneaux CFMU : 62' 00" → 24' 55"
 Retards des autres départs : 10' 40" → 24' 20"





Plan

- Contexte
- Simulations accélérées du trafic au sol
- Optimisation des séquences d'avions sur les pistes
- **Résolution des conflits au roulage**
- Applications





Résolution des conflits au roulage



Objectifs (SMAN)

- Affecter des trajectoires aux avions (chemins + attentes)
- Qui respectent les règles de séparation
- Qui minimisent la pénalisation induite sur le trafic

Sur un horizon de prédiction réduit entre 5 et 10 minutes

- A cause des incertitudes importantes sur les heures de départ et les vitesses
- En prenant en compte les séquences de pistes « visées » à 30 minutes





Résolution des conflits au roulage

Formulation

Variables : doivent décrire les trajectoires des avions

- Chemins à suivre (parmi un ensemble de chemins alternatifs)
- Points d'attente sur ces chemins
- Ou : ordre de priorité entre les avions

Contraintes

- Règles de séparation, au roulage et sur les pistes

Critère : pondération entre

- Les retards causés
- Les écarts aux séquences visées sur les pistes
- Les écarts aux créneaux CFMU





Résolution des conflits au roulage

Méthodes de résolution



Taille de l'espace de recherche exponentielle par rapport

- Au nombre d'avions
- Au nombre de chemins alternatifs par avions
- A la taille de l'horizon de prédiction

Méthodes de résolution envisagées

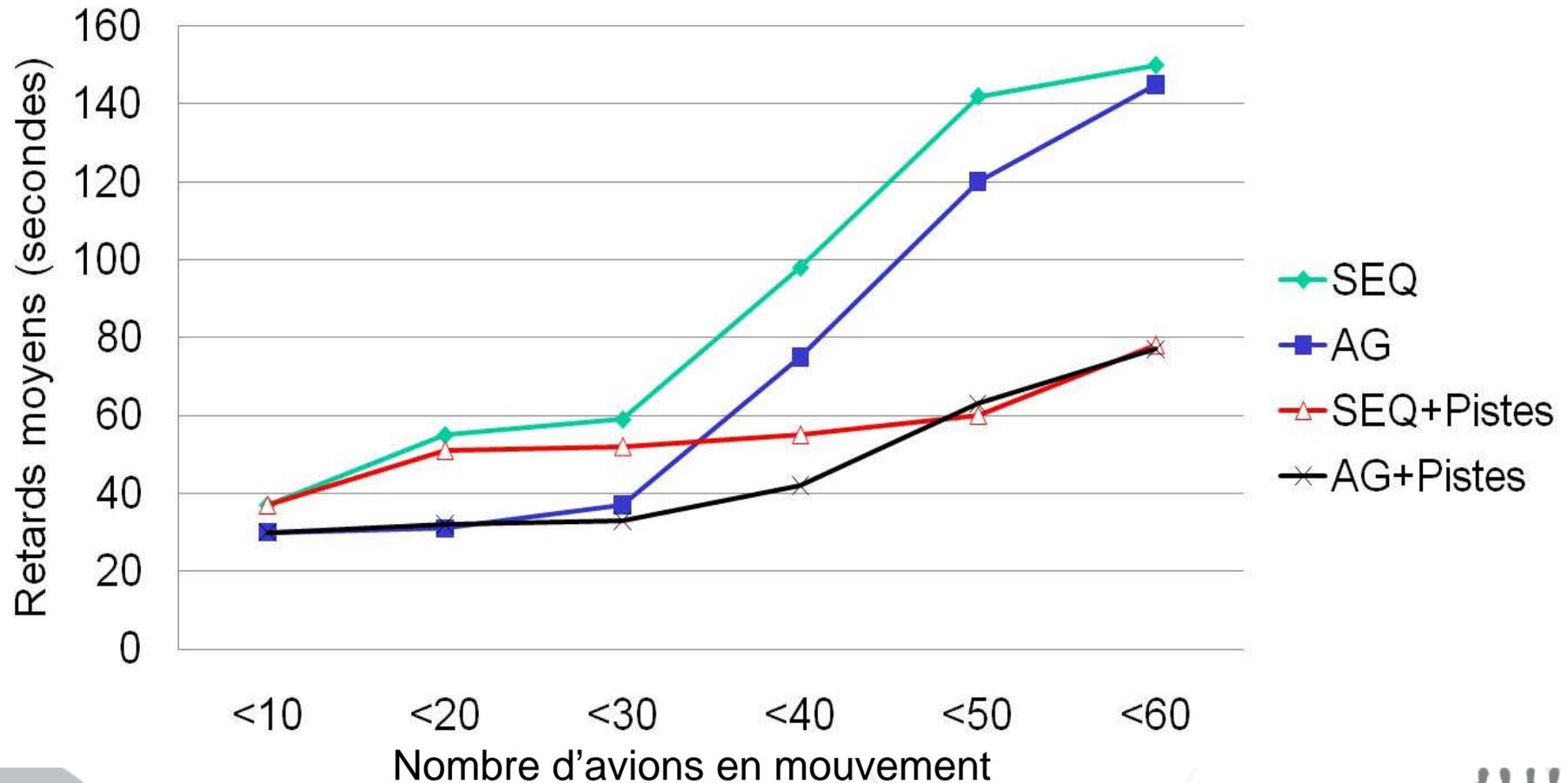
- **SEQ** : méthode exacte sur une simplification du problème
= classement préemptif des avions (par niveau de priorité statique)
- **SEQ+Pistes** : SEQ avec classement basé sur les séquences de pistes optimales
- **GA** : algorithme génétique appliqué au problème initial
- **GA+Pistes** : GA avec critère visant les séquences de pistes optimales





Résolution des conflits au roulage

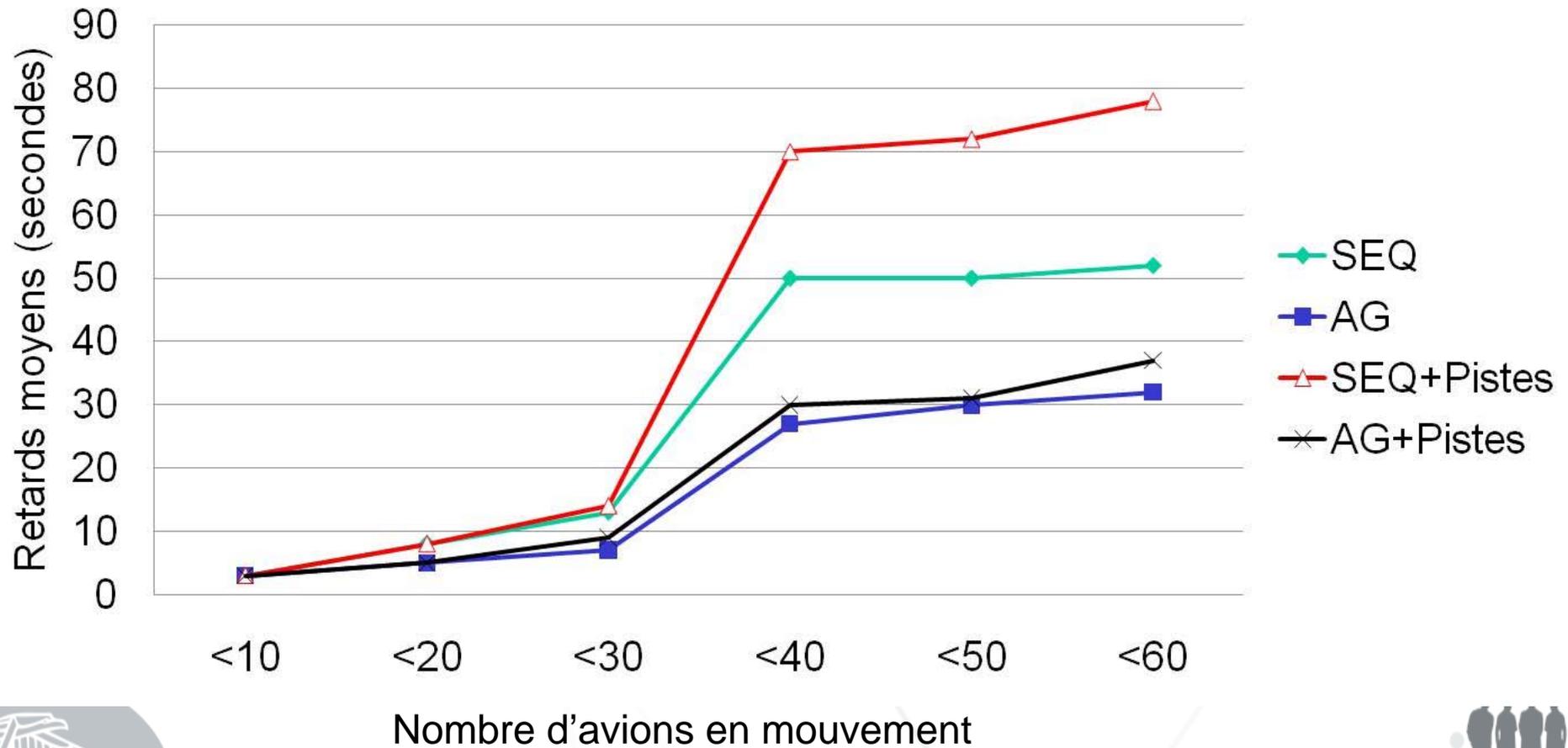
Retards des départs sans créneau CFMU





Résolution des conflits au roulage

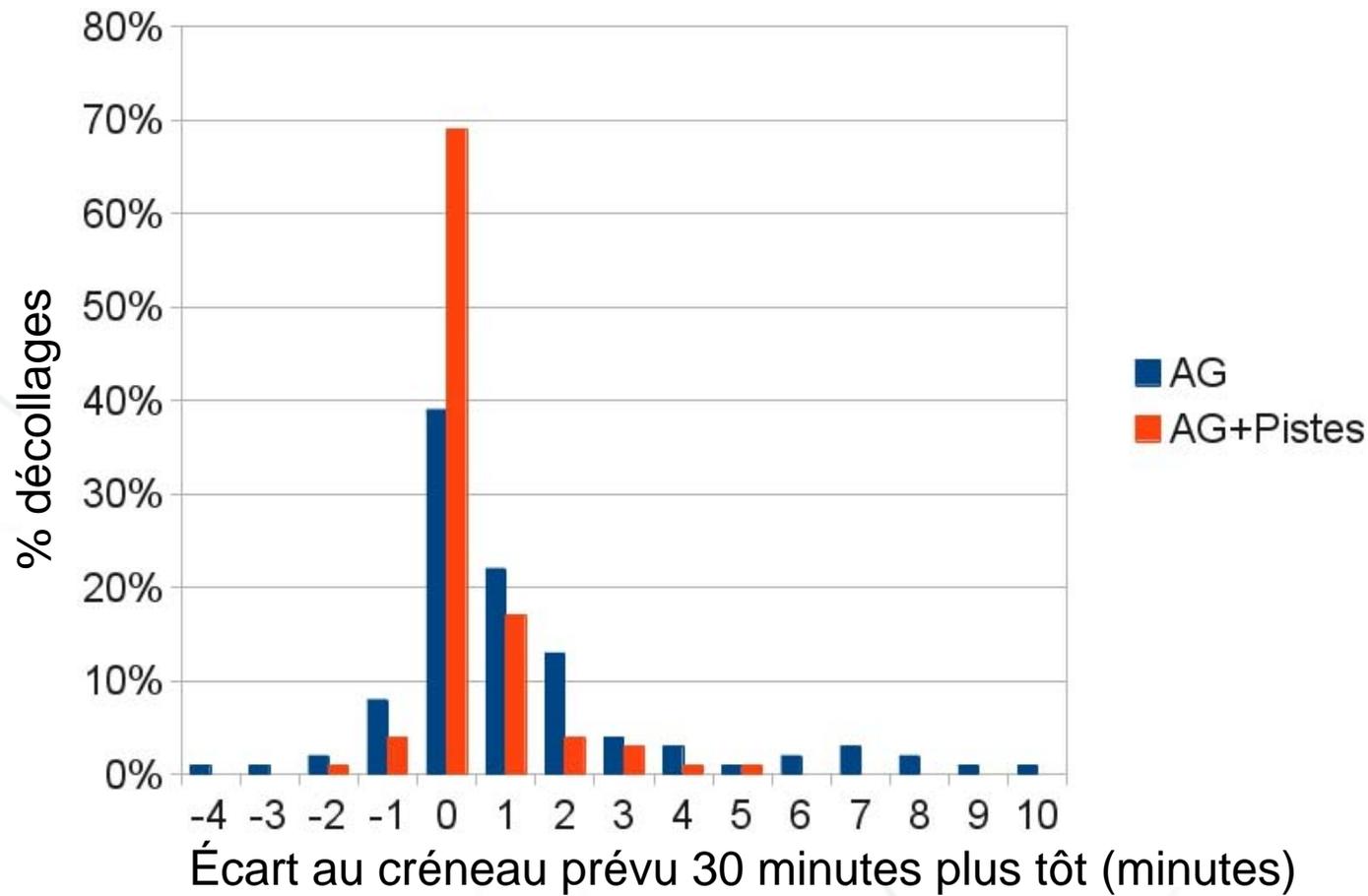
Retards des arrivées





Résolution des conflits au roulage

Respect des séquences prévues





Plan

- Contexte
- Simulations accélérées du trafic au sol
- Optimisation des séquences d'avions sur les pistes
- Résolution des conflits au roulage
- Applications





Applications : SESAR WP 6.7.2

Surface Planning & Routing Function



Principes : outil d'aide à la planification des mouvements

- En cohérence avec les informations du DMAN (séquences de pistes visées)
- Anticiper les conflits au roulage pour choisir les meilleurs cheminements
- Prédire les temps de roulage (ARR/DEP) avec précision

Problèmes posés

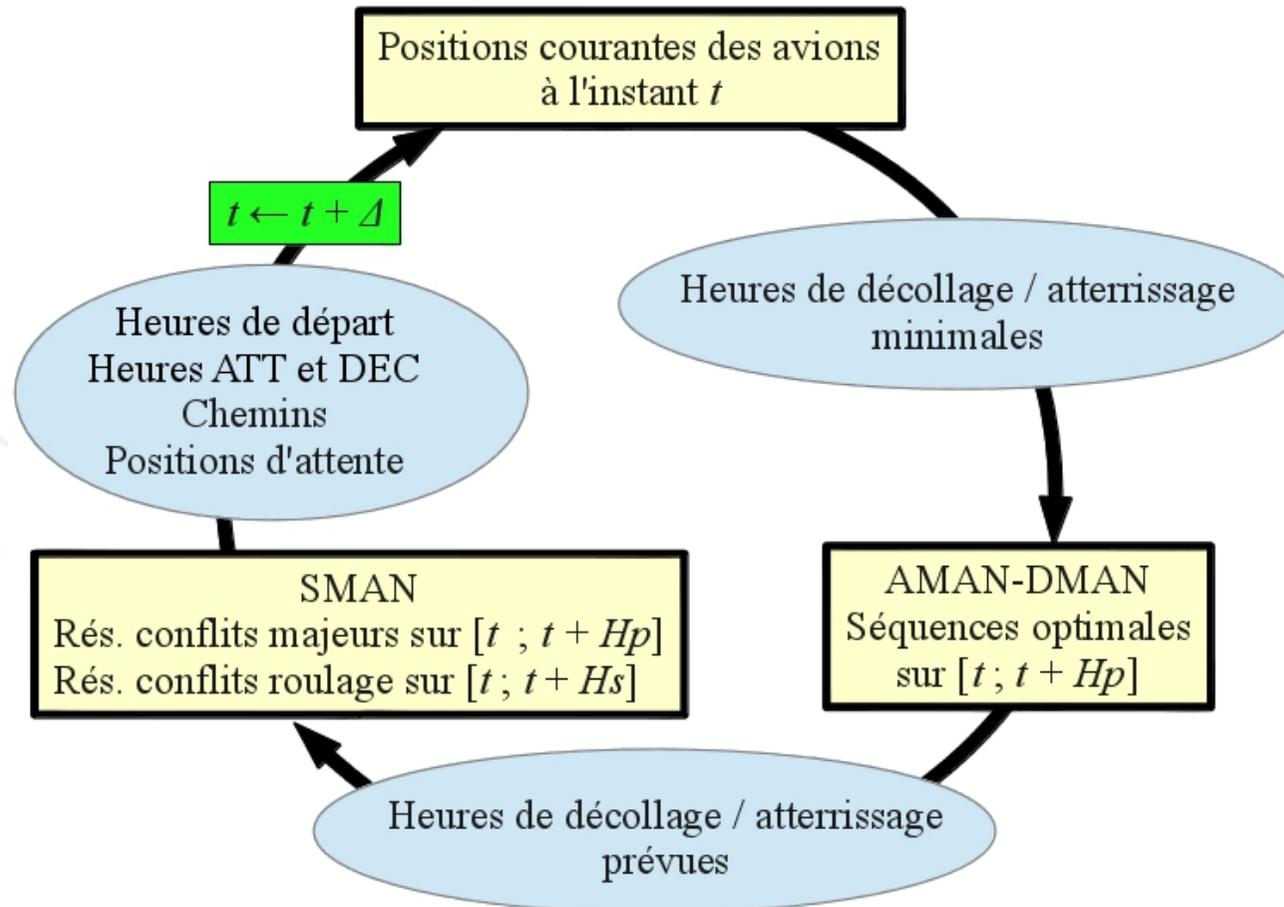
- Horizon de prédiction nécessaire au DMAN : ~ 30 minutes
- Impossibilité de prévoir précisément les conflits au roulage sur cet horizon
- ⇒ Restriction aux conflits « majeurs » uniquement :
 - Face-à-face
 - Impliquant des avions en push-back
 - Dans les aires de piste (mouvements, traversées)





Applications : SESAR WP 6.7.2

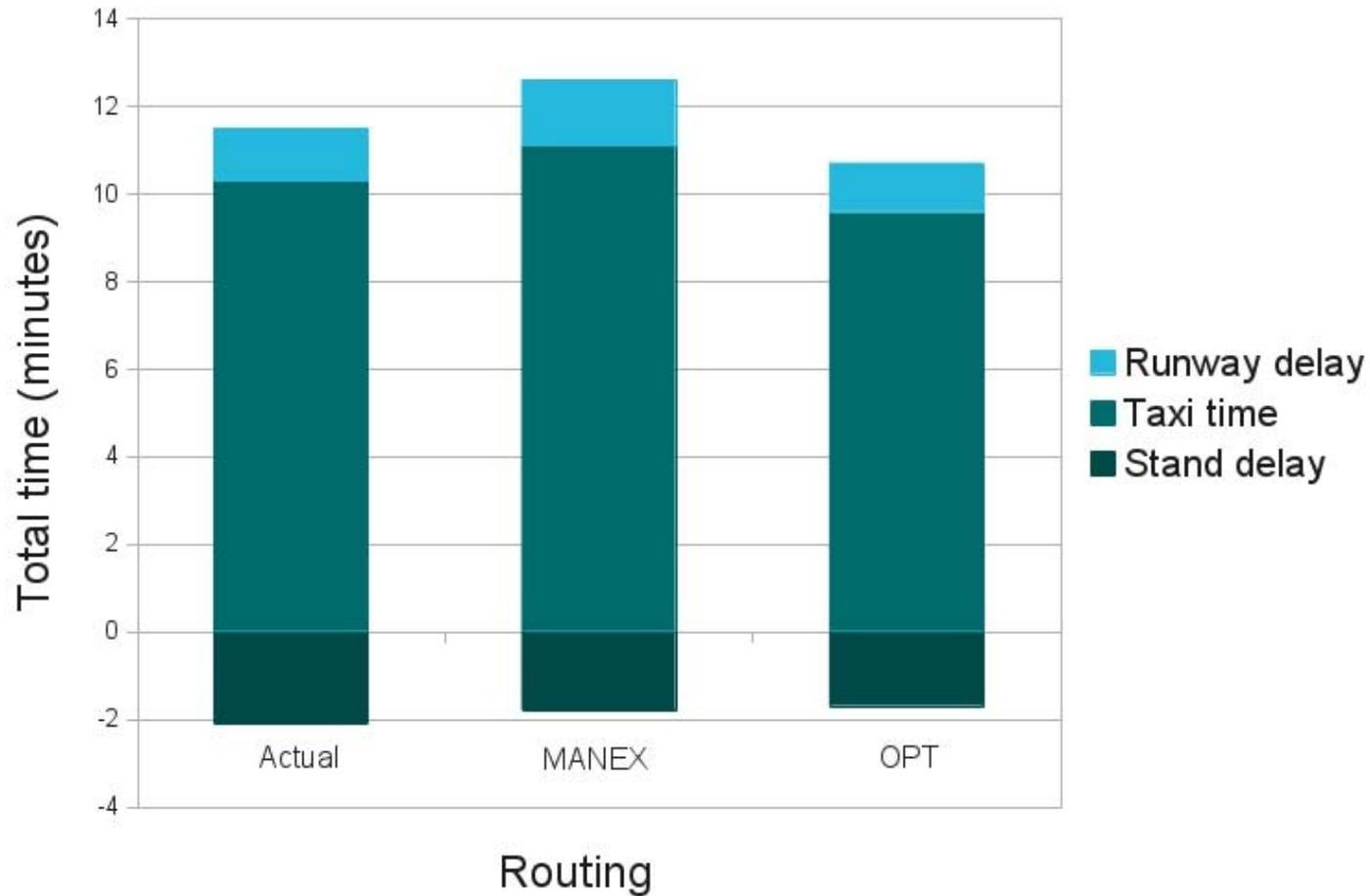
Simulations accélérées sur Roissy-CDG





Applications : SESAR WP 6.7.2

Simulations accélérées sur Roissy-CDG





Conclusions

Sensibilité des retards pendant la phase de roulage

- Cercle vicieux de la congestion
- Importance de viser des séquences à long terme
- Importance de la réactivité du système

Intérêts d'outils d'aide au contrôle au sol

- Pour une meilleure anticipation des situations
- Pour la gestion des créneaux CFMU
- Pour la coordination des systèmes AMAN – DMAN - SMAN
- Pour l'optimisation des séquences de pistes

Perspectives

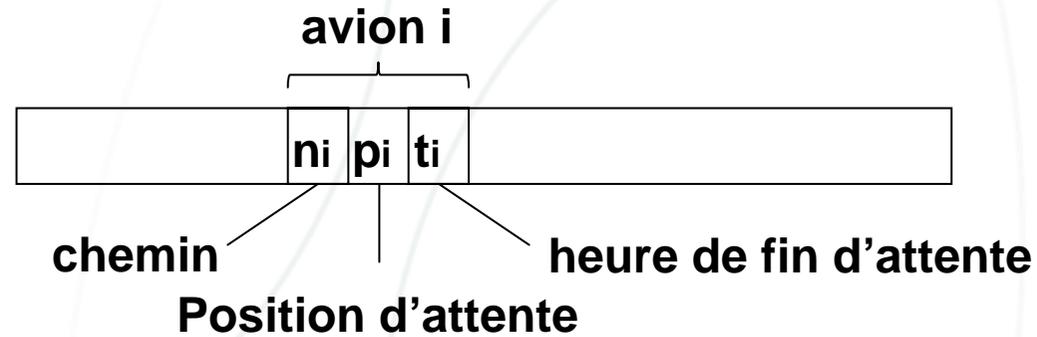
- Maximisation de l'attente au parking
- Étude de la stabilité des séquences de pistes





Codage de l'algorithme génétique

Version par attentes



Version par priorités

