

Planification de trajectoires 4D d'avions pour la résolution de conflits

Cyril Allignol
allignol@tls.cena.fr

DSNA/DTI/R&D POM

7 septembre 2010

1 Introduction

- Contexte
- Le problème

2 Résolution de conflits par allocation de créneaux

- Modèle
- Résultats
- Robustesse aux incertitudes

3 Perspectives

1 Introduction

- Contexte
- Le problème

2 Résolution de conflits par allocation de créneaux

- Modèle
- Résultats
- Robustesse aux incertitudes

3 Perspectives

Contexte opérationnel

Le trafic aérien en France

- Environ **9 000** vols quotidiens en 2008
- Trafic $\times 1.7$ d'ici à 2030 selon Eurocontrol

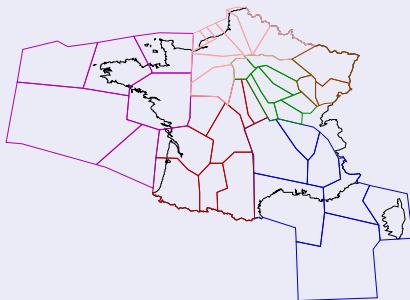
Contexte opérationnel

Le trafic aérien en France

- Environ **9 000** vols quotidiens en 2008
- Trafic $\times 1.7$ d'ici à 2030 selon Eurocontrol

L'espace aérien

- Découpé en **secteurs de contrôle**
- Chaque secteur a une **capacité** : nombre d'avions par heure
- **Régulation** des flux traversant les secteurs surchargés : **allocation de créneaux de décollage** par la CFMU, au niveau européen
- Coût : **entre 15 000 et 75 000 minutes** par jour (2008)



Le problème

Limites du modèle actuel

- **Pertinence** des capacités pour modéliser la **charge de travail** des contrôleurs ?
- Algorithme **glouton** (premier arrivé, premier servi) : optimalité, robustesse ?

Le problème

Limites du modèle actuel

- **Pertinence** des capacités pour modéliser la **charge de travail** des contrôleurs ?
- Algorithme **glouton** (premier arrivé, premier servi) : optimalité, robustesse ?

Résolution de conflits par allocation de créneaux

- Modèle **microscopique** opposé au modèle macroscopique (capacité)
- Même degré de liberté que la méthode actuelle : heure de décollage
- **Résolution de tous les conflits** au-dessus d'un niveau de vol donné, uniquement **en retardant** les vols
- Routes **standard** et **directes** considérées
- Hypothèse : les avions suivent leur trajectoire 4D de manière précise

1 Introduction

- Contexte
- Le problème

2 Résolution de conflits par allocation de créneaux

- Modèle
- Résultats
- Robustesse aux incertitudes

3 Perspectives

Modèle

Données

- **Plans de vol** et données de l'espace aérien pour une journée de trafic
- **Simulation** avec CATS [Alliot, Durand 97]
- **Trajectoires échantillonnées** avec un pas de 15 s
- Notation : vol i au point p_i^k à l'instant t_i^k (sans retard)

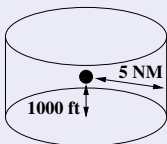
Modèle

Données

- **Plans de vol** et données de l'espace aérien pour une journée de trafic
- **Simulation** avec CATS [Alliot, Durand 97]
- **Trajectoires échantillonnées** avec un pas de 15 s
- Notation : vol i au point p_i^k à l'instant t_i^k (sans retard)

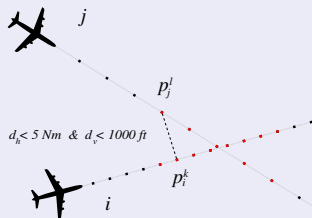
Variables et contraintes

- **Variables de décision** : retard δ_i pour le vol i , $\delta_i \in [0, \text{retard_max}]$
- **Contraintes** :



$$\forall i \neq j, \forall k, l \neg \text{sep}(p_i^k, p_j^l) :$$

$$t_i^k + \delta_i \neq t_j^l + \delta_j$$



Modèle

CSP

- **Variables** de décision : δ_i
- Variables auxiliaires : $d_{ij} = \delta_j - \delta_i$
- **Contraintes** : $\forall i \neq j, \forall k, l, \neg sep(p_i^k, p_j^l)$:

$$t_i^k + \delta_i \neq t_j^l + \delta_j$$

$$d_{ij} \neq t_i^k - t_j^l$$

- **Optimisation** : $\max_{i=1}^n \delta_i$

Modèle

CSP

- **Variables** de décision : δ_i
- Variables auxiliaires : $d_{ij} = \delta_j - \delta_i$
- **Contraintes** : $\forall i \neq j, \forall k, l | \neg sep(p_i^k, p_j^l) :$

$$t_i^k + \delta_i \neq t_j^l + \delta_j$$

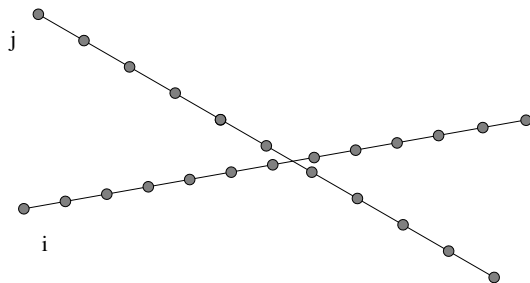
$$d_{ij} \neq t_i^k - t_j^l$$

- **Optimisation** : $\max_{i=1}^n \delta_i$

Algorithme génétique et Recuit simulé

- **Variables** : δ_i
- **Optimisation** : $\sum_{i=1}^n \delta_i + f(nbConflicts)$

Détection de conflits



$-2w$

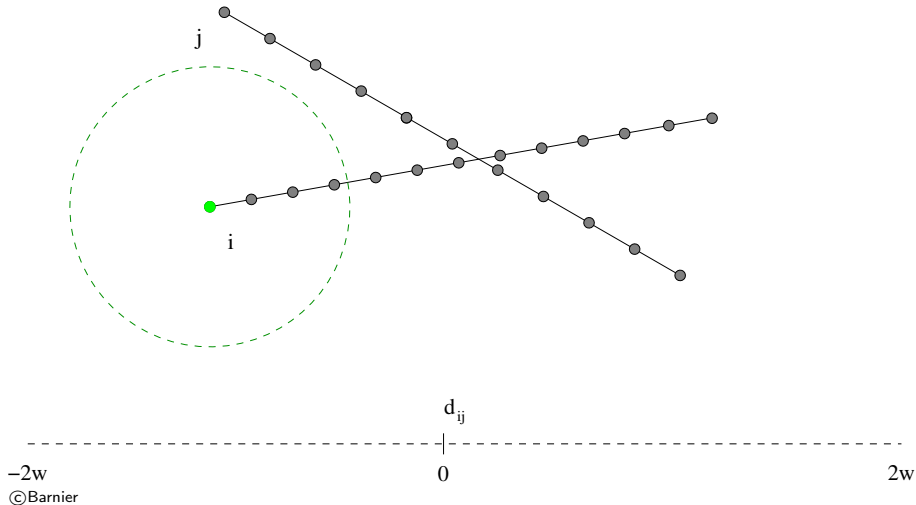
©Barnier

d_{ij}

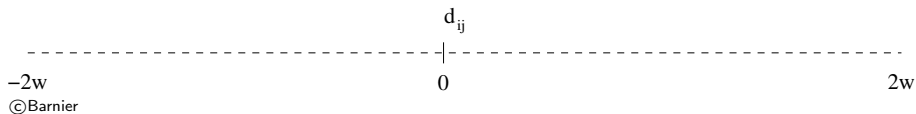
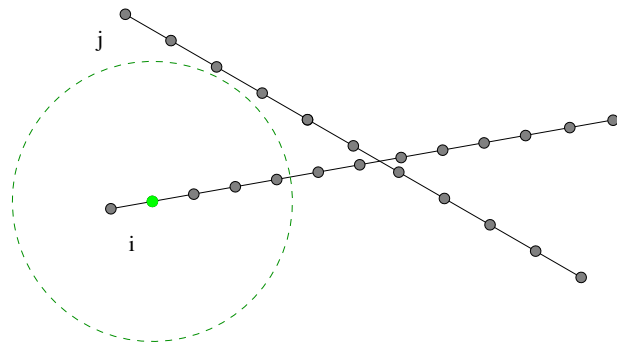
0

$2w$

Détection de conflits

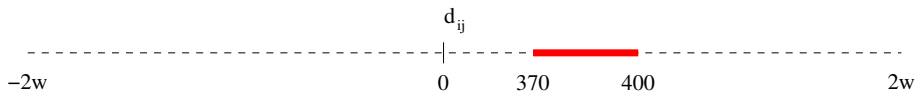
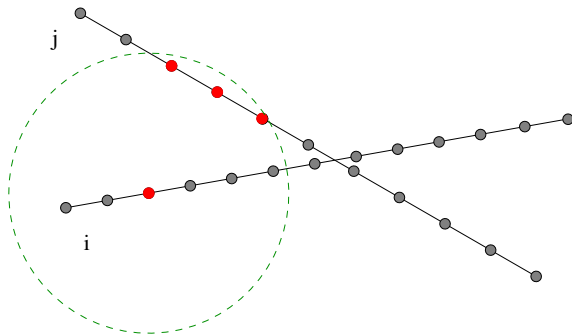


Détection de conflits

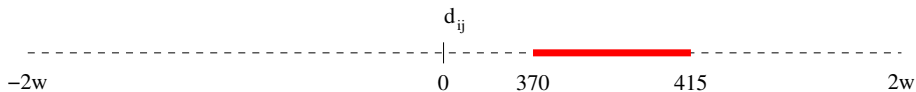
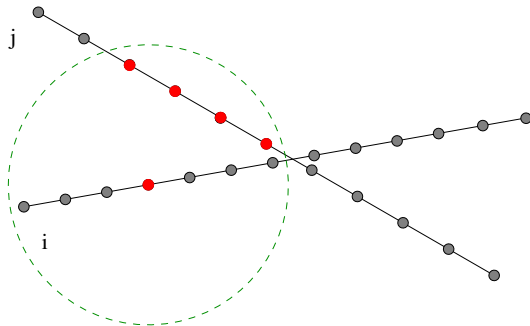


©Barnier

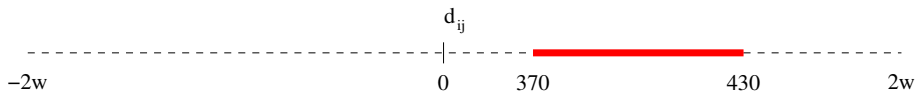
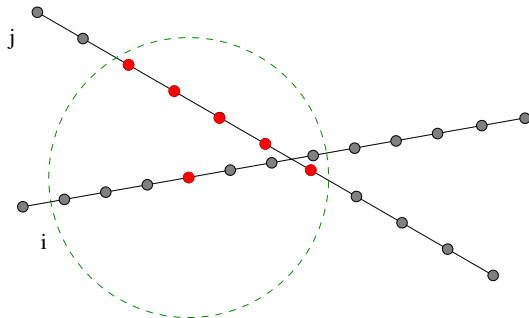
Détection de conflits



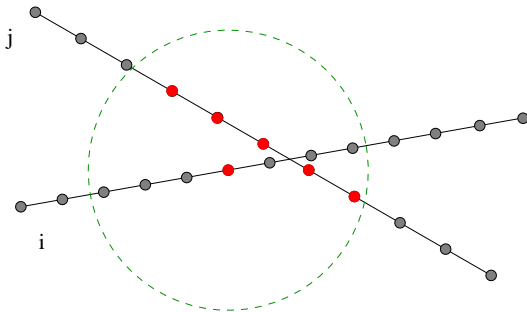
Détection de conflits



Détection de conflits



Détection de conflits



$-2w$

©Barnier

d_{ij}

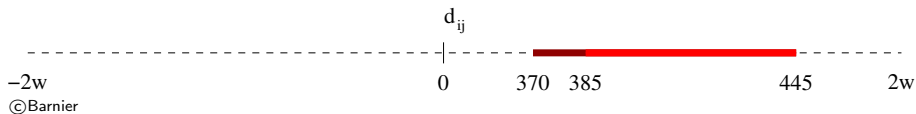
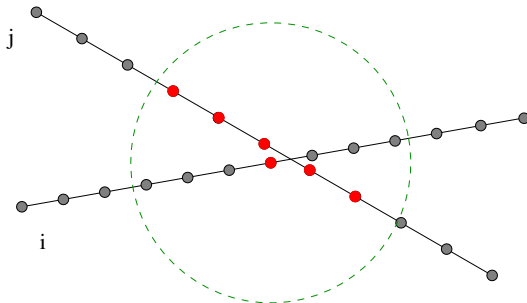
0

370

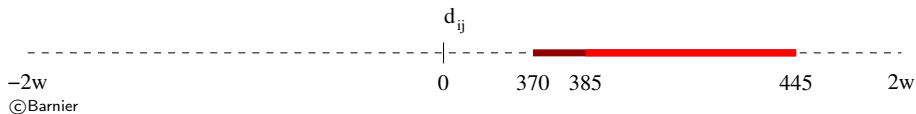
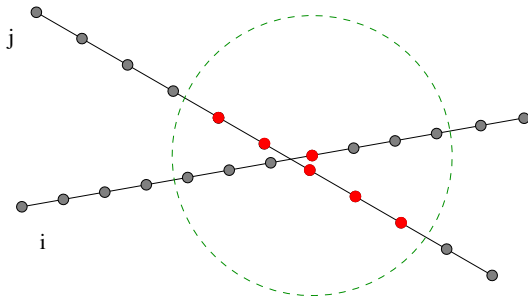
430

$2w$

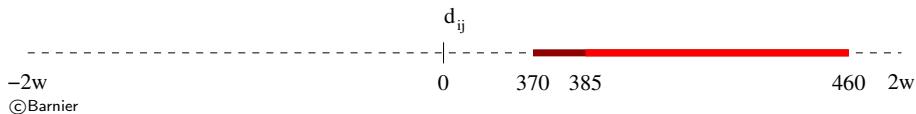
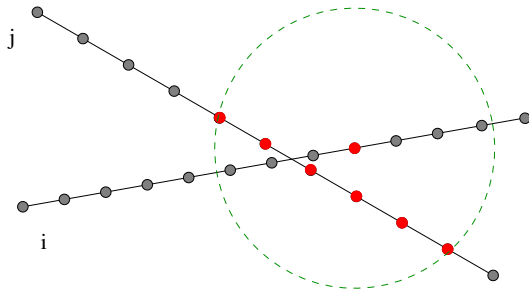
Détection de conflits



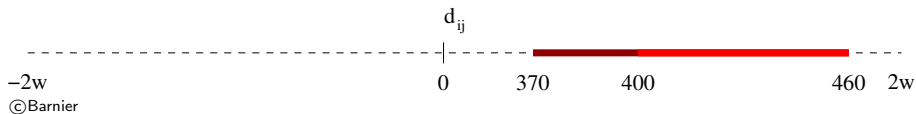
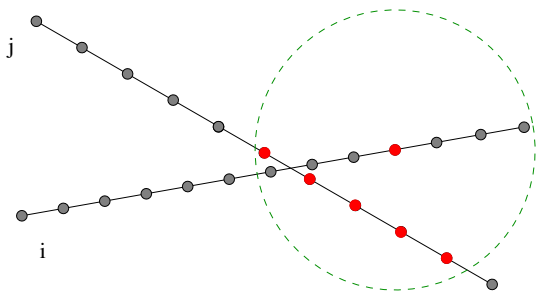
Détection de conflits



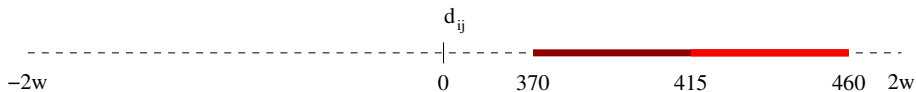
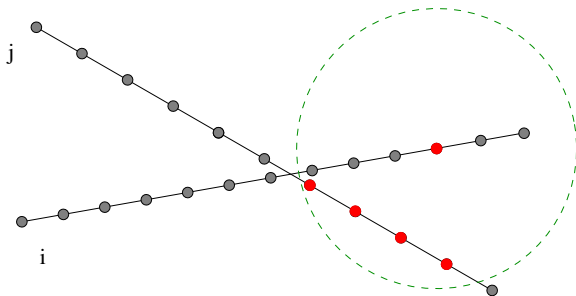
Détection de conflits



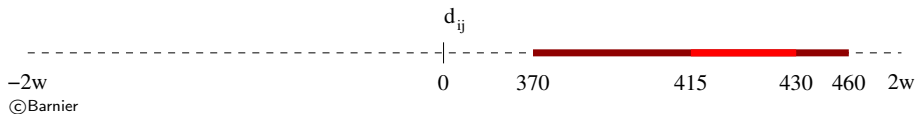
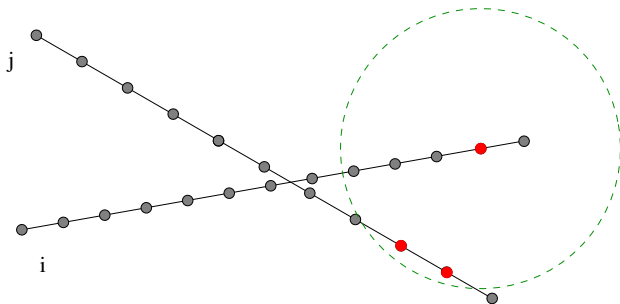
Détection de conflits



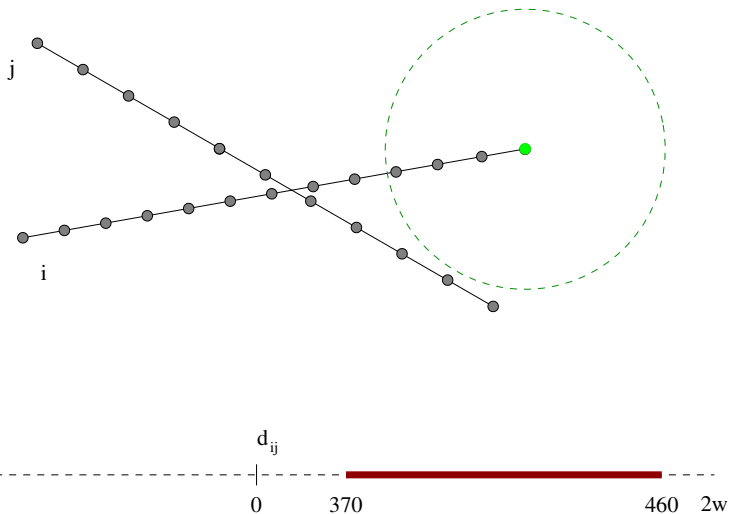
Détection de conflits



Détection de conflits



Détection de conflits



Résultats

Vols retardés

T_w (min)	PPC	AG	RS
30	/	19%	22%
45	/	19%	25%
60	/	18%	31%
90	22%	18%	42%
120	22%	18%	51%
180	23%	18%	58%
360	22%	18%	70%
1440	22%	17%	74%

Retard maximal (min)

T_w (min)	PPC	AG	RS
30	/	87	89
45	/	84	84
60	/	90	84
90	88	88	84
120	84	88	84
180	84	88	84
360	84	88	88
1440	84	89	84

Journée du 10/10/2008, 8 695 vols, **5 433 variables**

Résultats

Somme des retards (min)

T_w	PPC	AG	RS
30	/	8 197	5 870
45	/	9 205	6 022
60	/	10 146	6 901
90	5 102	10 673	8 733
120	4 782	11 755	10 960
180	4 739	13 731	13 542
360	4 785	17 103	18 497
1440	4 677	35 590	21 861

Retard/vol retardé (min)

T_w (min)	PPC	AG	RS
30	/	6.92	4.32
45	/	7.98	3.94
60	/	9.07	3.60
90	3.67	9.78	3.38
120	3.44	10.68	3.50
180	3.41	12.52	3.77
360	3.45	15.66	4.29
1440	3.38	33.08	4.78

Journée du 10/10/2008, 8 695 vols, **5 433 variables**

Résultats

Temps de calcul (s) — Intel Xeon @ 2.66GHz

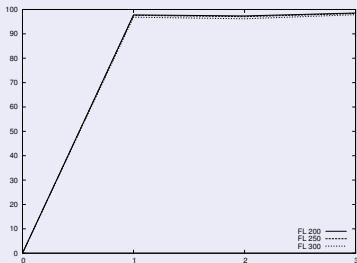
T_w (min)	PPC	AG	RS
30	/	21 584	4 815
45	/	32 264	5 989
60	/	43 123	7 215
90	2 096	69 853	9 626
120	2 435	97 153	12 123
180	2 830	172 675	17 884
360	6 093	470 355	37 575
1440	24	507 155	6 159

Journée du 10/10/2008, 8 695 vols, **5 433 variables**

Robustesse aux incertitudes

Constat

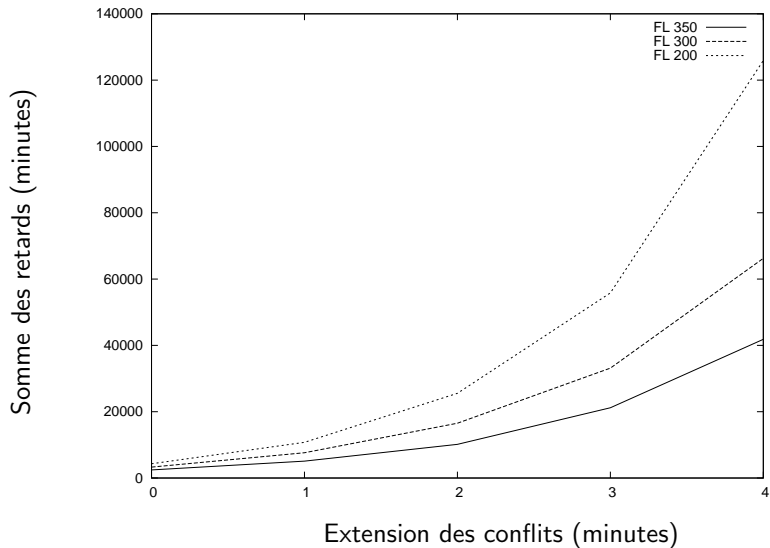
- Solutions non robustes
- Incertitude sur l'heure de décollage choisie de manière uniforme dans $[-\frac{err}{2}, \frac{err}{2}]$



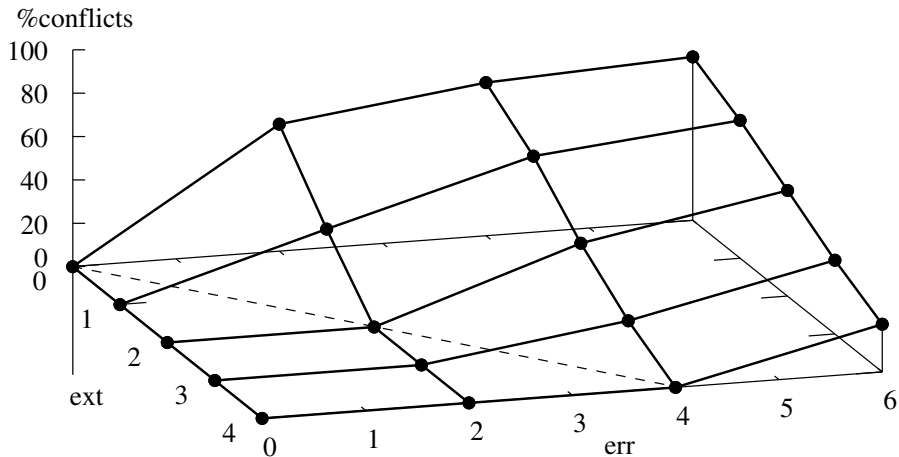
Prise en compte des incertitudes

- Chaque conflit élargi de $\frac{ext}{2}$ minutes à ses extrémités
- Pas de conflit lorsque $ext \geq err$, comme attendu
- Augmentation importante de la somme des retards avec ext

Robustesse aux incertitudes



Conflits restants en fonction de l'extension des conflits et de l'incertitude



1 Introduction

- Contexte
- Le problème

2 Résolution de conflits par allocation de créneaux

- Modèle
- Résultats
- Robustesse aux incertitudes

3 Perspectives

Perspectives

Instances de plus grande taille

- Instances européennes, jusqu'à 30 000 vols
- Hybridation méta-heuristiques / PPC

Perspectives

Instances de plus grande taille

- Instances européennes, jusqu'à 30 000 vols
- Hybridation méta-heuristiques / PPC

Modèle plus réaliste

- Contraintes de rotation des appareils
- Incertitudes sur les vitesses verticale et horizontale

Perspectives

Instances de plus grande taille

- Instances européennes, jusqu'à 30 000 vols
- Hybridation méta-heuristiques / PPC

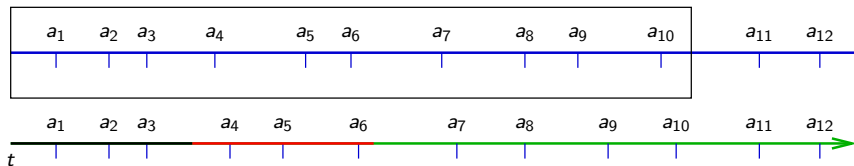
Modèle plus réaliste

- Contraintes de rotation des appareils
- Incertitudes sur les vitesses verticale et horizontale

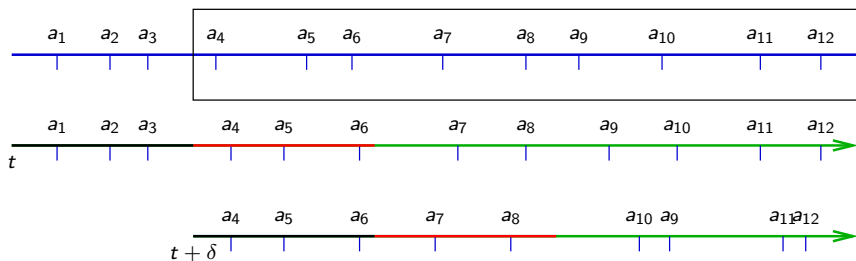
Degrés de liberté

- Allocation préalable de niveau de vol
- Couplage allocation de niveau de vol / allocation de créneau
- Prise en compte des conflits restants à l'aide des modules de résolution automatique de CATS [Granger, Durand, Alliot 2001]

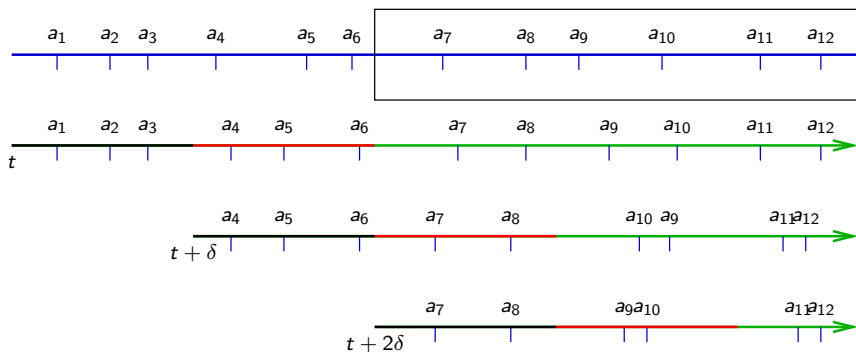
Fenêtres glissantes



Fenêtres glissantes



Fenêtres glissantes



Fenêtres glissantes

