

# Optimisation des créneaux de décollage pour la déconfliction des trajectoires 4D d'avions

Cyril Allignol

DSNA/DTI/R&D POM

08 septembre 2009

- 1 Problématique
  - Contexte
  - Objectifs
- 2 Modélisation
  - Méthode
  - Détection de conflits
  - Modèles
- 3 Le simulateur CATS
- 4 Résultats
  - Un monde parfait...
  - Robustesse aux incertitudes
- 5 Perspectives

- 1 **Problématique**
  - Contexte
  - Objectifs
- 2 Modélisation
  - Méthode
  - Détection de conflits
  - Modèles
- 3 Le simulateur CATS
- 4 Résultats
  - Un monde parfait...
  - Robustesse aux incertitudes
- 5 Perspectives

# Contexte opérationnel

## Le trafic européen

- 2008 : environ 30 000 vols quotidiens
- 2020 : environ 50 000 vols quotidiens ( $\times 1.7$  selon Eurocontrol)

# Contexte opérationnel

## Le trafic européen

- 2008 : environ 30 000 vols quotidiens
- 2020 : environ 50 000 vols quotidiens ( $\times 1.7$  selon Eurocontrol)

## L'espace aérien européen

- Espace découpé en secteurs selon le trafic
- Un duo de contrôleurs par secteur
- Saturation bientôt atteinte

# Le problème

## Objectif

Résoudre un maximum de conflits en optimisant l'instant de décollage

# Le problème

## Objectif

Résoudre un maximum de conflits en optimisant l'instant de décollage

## Hypothèse

Suivi parfait des trajectoires 4D

# Le problème

## Objectif

Résoudre un maximum de conflits en optimisant l'instant de décollage

## Hypothèse

Suivi parfait des trajectoires 4D

## Questions

- Faisabilité : totale ou partielle
- Impact en terme de retards
- Robustesse aux incertitudes



- 1 Problématique
  - Contexte
  - Objectifs
- 2 **Modélisation**
  - Méthode
  - Détection de conflits
  - Modèles
- 3 Le simulateur CATS
- 4 Résultats
  - Un monde parfait...
  - Robustesse aux incertitudes
- 5 Perspectives

# Méthode

Génération des trajectoires à partir des plans de vol : CATS

# Méthode

Génération des trajectoires à partir des plans de vol : CATS

Recherche de tous les conflits 3D sur une journée (ex : 450 000 au-dessus du FL 300 sur une journée en France)

# Méthode

Génération des trajectoires à partir des plans de vol : CATS

Recherche de tous les conflits 3D sur une journée (ex : 450 000 au-dessus du FL 300 sur une journée en France)

Modification de l'heure de décollage  
Utilisation d'une fenêtre glissante pour traiter la journée

# Méthode

Génération des trajectoires à partir des plans de vol : CATS

Recherche de tous les conflits 3D sur une journée (ex : 450 000 au-dessus du FL 300 sur une journée en France)

Modification de l'heure de décollage  
Utilisation d'une fenêtre glissante pour traiter la journée

Vérification de la solution dans CATS

# Détection de conflits

## Données

- Trajectoires discrétisées (15 s)
- Notation : vol  $i$  au point  $p_i^k$  au temps  $t_i^k$  sans retard

# Détection de conflits

## Données

- Trajectoires discrétisées (15 s)
- Notation : vol  $i$  au point  $p_i^k$  au temps  $t_i^k$  sans retard

## Variables

- Retard  $\delta_i$  pour le vol  $i$
- Notation :  $\theta_i^k = t_i^k + \delta_i$        $d_{ij} = \delta_j - \delta_i$

# Détection de conflits

## Contraintes

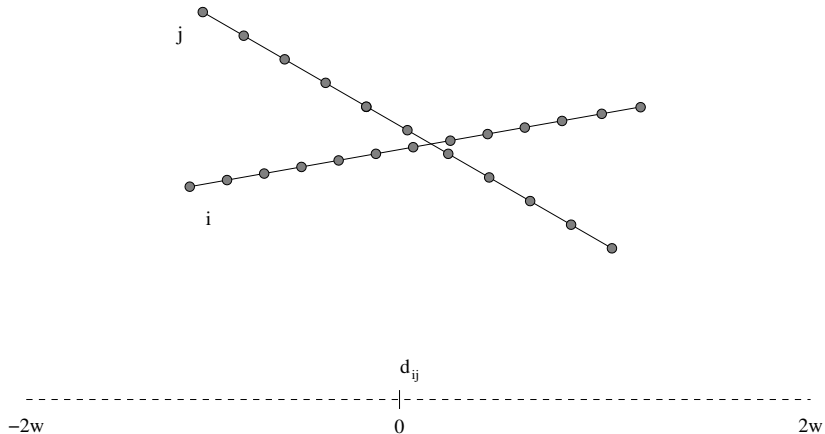
2 vols ne peuvent pas être à 2 points en conflit au même instant :

$\forall i \neq j, \forall k, l$ , tels que  $d_h(p_i^k, p_j^l) < 5 \text{ NM} \wedge d_v(p_i^k, p_j^l) < 1000 \text{ ft}$  :

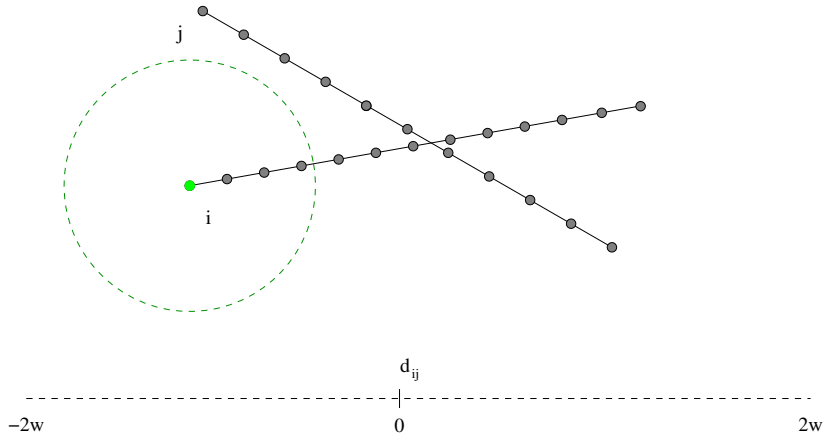
$$\begin{aligned} \theta_i^k &\neq \theta_j^l \\ t_i^k + \delta_i &\neq t_j^l + \delta_j \\ d_{ij} &\neq t_i^k - t_j^l \end{aligned}$$



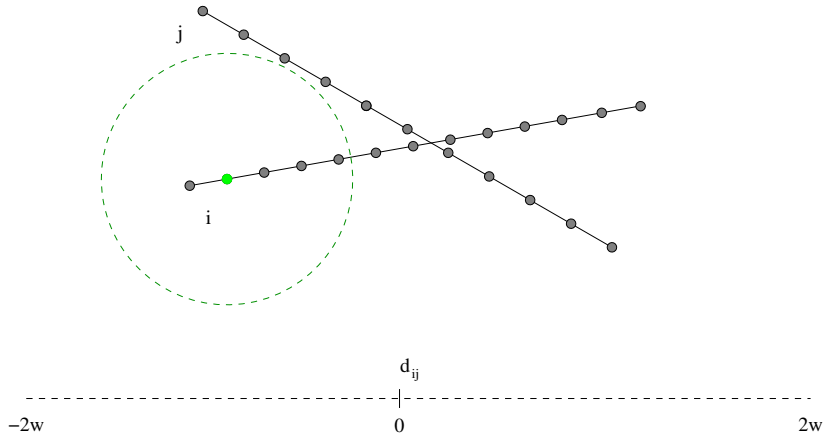
# Détection de conflits



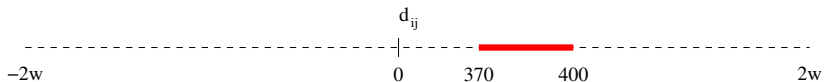
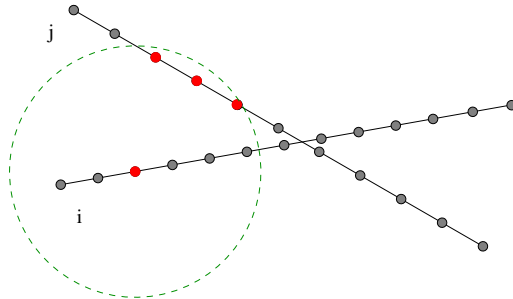
# Détection de conflits



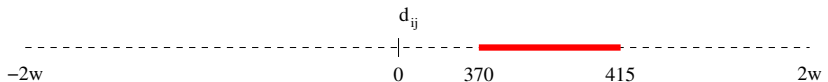
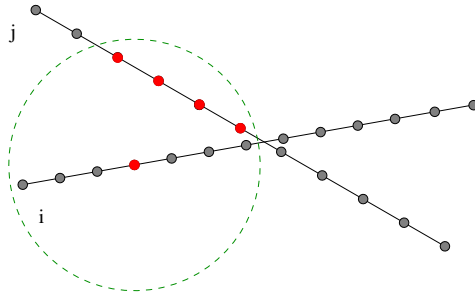
# Détection de conflits



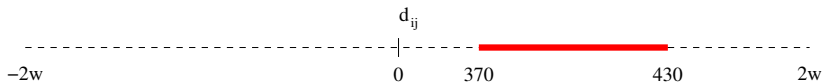
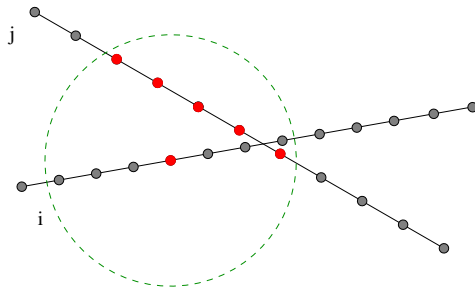
# Détection de conflits



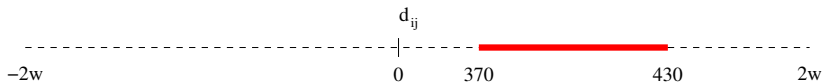
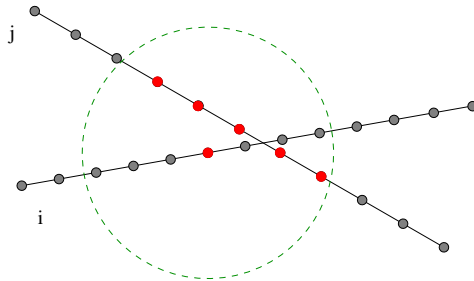
# Détection de conflits



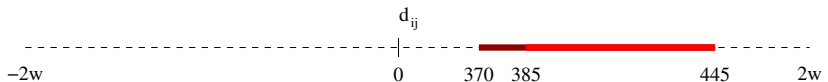
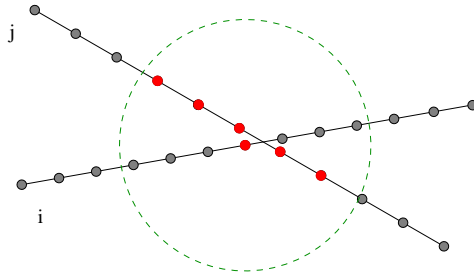
# Détection de conflits



# Détection de conflits

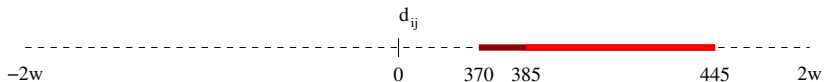
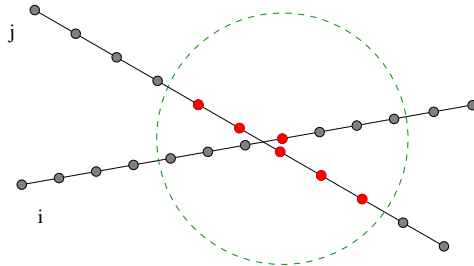


# Détection de conflits

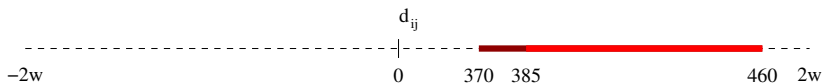
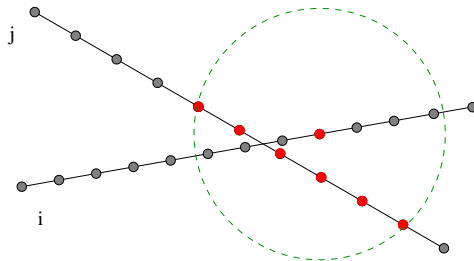




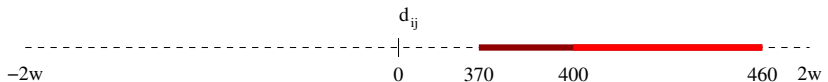
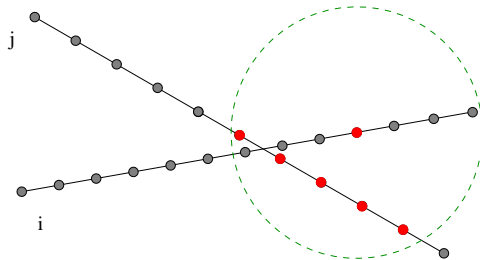
# Détection de conflits



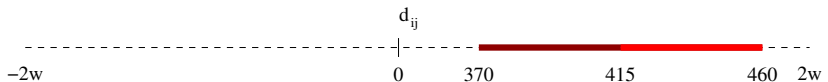
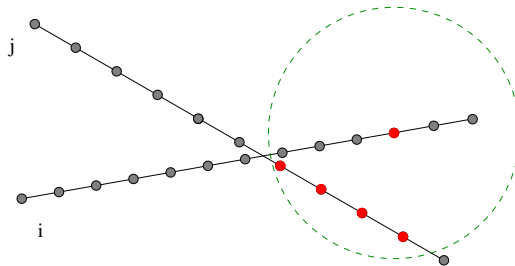
# Détection de conflits



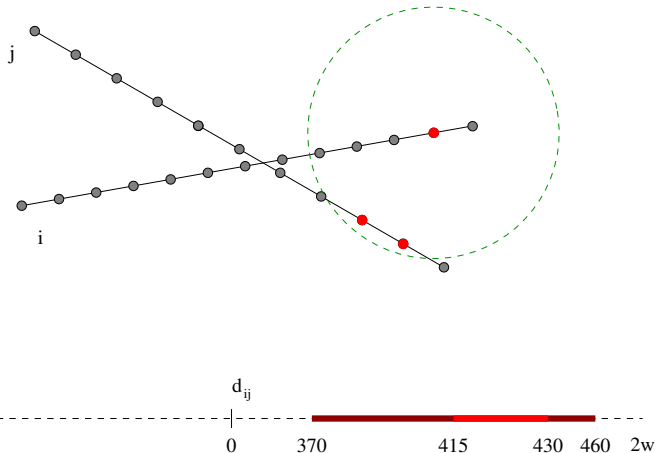
# Détection de conflits



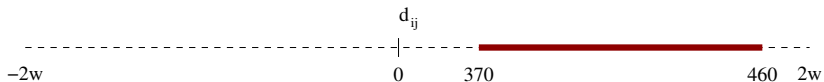
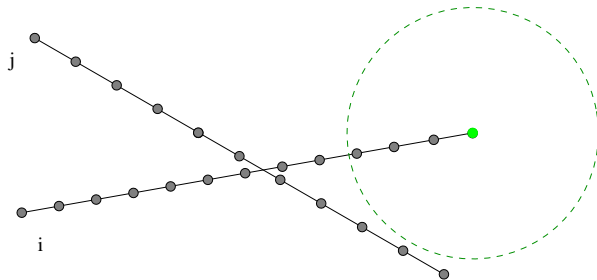
# Détection de conflits



# Détection de conflits



# Détection de conflits



# Modèles

## CSP

- **Variables** :  $\delta_i$   $d_{ij}$
- **Contraintes** :  $\forall i \neq j, \forall k, l$ , tels que  
 $d_h(p_i^k, p_j^l) < 5 \text{ NM} \wedge d_v(p_i^k, p_j^l) < 1000 \text{ ft}$  :

$$\theta_i^k \neq \theta_j^l$$

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

- **Critère d'optimisation** :  $\max_{i=1}^n \delta_i$

# Modèles

## CSP

- **Variables** :  $\delta_i$   $d_{ij}$
- **Contraintes** :  $\forall i \neq j, \forall k, l$ , tels que  
 $d_h(p_i^k, p_j^l) < 5 \text{ NM} \wedge d_v(p_i^k, p_j^l) < 1000 \text{ ft}$  :

$$\theta_i^k \neq \theta_j^l$$

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

- **Critère d'optimisation** :  $\max_{i=1}^n \delta_i$

## Algorithme génétique

- **Variables** :  $\delta_i$
- **Critère d'optimisation** :  $\sum_{i=1}^n \delta_i^2$



- 1 Problématique
  - Contexte
  - Objectifs
- 2 Modélisation
  - Méthode
  - Détection de conflits
  - Modèles
- 3 **Le simulateur CATS**
- 4 Résultats
  - Un monde parfait...
  - Robustesse aux incertitudes
- 5 Perspectives

# CATS : Complete Air Traffic Simulator

Développé au CENA au milieu des années 90

# CATS : Complete Air Traffic Simulator

Développé au CENA au milieu des années 90

Structure légère

- Simulations rapides
- Pas d'interface graphique

Stats sur des données de trafic réel (COURAGE, TACT...)

# CATS : Complete Air Traffic Simulator

Développé au CENA au milieu des années 90

Structure légère

- Simulations rapides
- Pas d'interface graphique

Stats sur des données de trafic réel (COURAGE, TACT...)

Propose différents modules de résolution automatique de conflits

- Routes directes / Routes standards
- Résolutions embarquées / Résolutions centralisées
- Résolutions en cap, en vitesses en niveaux
- Modélisation par fenêtres glissantes

- 1 Problématique
  - Contexte
  - Objectifs
- 2 Modélisation
  - Méthode
  - Détection de conflits
  - Modèles
- 3 Le simulateur CATS
- 4 Résultats**
  - Un monde parfait...
  - Robustesse aux incertitudes
- 5 Perspectives

## Quelques chiffres

### Résultats obtenus avec le modèle CSP [Barnier 2009]

- 100% de conflits résolus
- Retard max : 90' - 182'
- Retard moyen : 1' - 2'
- Temps de calcul : 1' pour la plus grande instance traitée

Plus grande instance traitée : 6500 vols

## Quelques chiffres

### Résultats obtenus avec le modèle CSP [Barnier 2009]

- 100% de conflits résolus
- Retard max : 90' - 182'
- Retard moyen : 1' - 2'
- Temps de calcul : 1' pour la plus grande instance traitée

Plus grande instance traitée : 6500 vols

## Quelques chiffres

### Résultats obtenus avec l'algorithme génétique

Données	Conflits résolus	Vols retardés	Retard moyen	Retard max
2006 S	99%	55%	2'40	86' - 87'
2006 D	99%	55%	2'30	66' - 89'
2020 S	97%	68%	8'30	87' - 89'
2020 D	98%	67%	7'30	84' - 90'

S : routes standard, D : routes directes

temps de calcul très élevé (quelques heures)



## Quelques chiffres

### Résultats obtenus avec l'algorithme génétique

Données	Conflits résolus	Vols retardés	Retard moyen	Retard max
2006 S	99%	55%	2'40	86' - 87'
2006 D	99%	55%	2'30	66' - 89'
2020 S	97%	68%	8'30	87' - 89'
2020 D	98%	67%	7'30	84' - 90'

S : routes standard, D : routes directes

temps de calcul très élevé (quelques heures)

## Quelques chiffres

### Résultats obtenus avec l'algorithme génétique

Données	Conflits résolus	Vols retardés	Retard moyen	Retard max
2006 S	99%	55%	2'40	86' - 87'
2006 D	99%	55%	2'30	66' - 89'
2020 S	97%	68%	8'30	87' - 89'
2020 D	98%	67%	7'30	84' - 90'

S : routes standard, D : routes directes

temps de calcul très élevé (quelques heures)

Dans les 2 cas...

Solutions non robustes aux incertitudes

# Robustesse aux incertitudes

## Prise en compte des incertitudes

- Chaque conflit élargi de  $\frac{ext}{2}$  minutes à ses extrémités
- Incertitude sur l'heure de décollage choisie uniformément dans  $[-\frac{err}{2}, +\frac{err}{2}]$

# Robustesse aux incertitudes

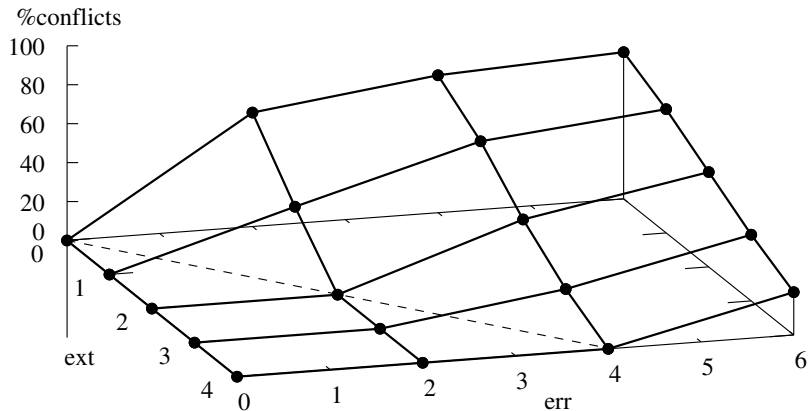
## Prise en compte des incertitudes

- Chaque conflit élargi de  $\frac{ext}{2}$  minutes à ses extrémités
- Incertitude sur l'heure de décollage choisie uniformément dans  $[-\frac{err}{2}, +\frac{err}{2}]$

## Résultats (CSP)

- Tous les conflits sont résolus pour  $ext \geq err$
- Augmentation importante (exponentielle?) du retard total avec  $ext$

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



- 1 Problématique
  - Contexte
  - Objectifs
- 2 Modélisation
  - Méthode
  - Détection de conflits
  - Modèles
- 3 Le simulateur CATS
- 4 Résultats
  - Un monde parfait...
  - Robustesse aux incertitudes
- 5 Perspectives

# Travaux futurs

## Concept

- Allocation préalable de niveaux de vol
- Utilisation de la résolution de CATS (quelle influence sur la solution trouvée?)

# Travaux futurs

## Concept

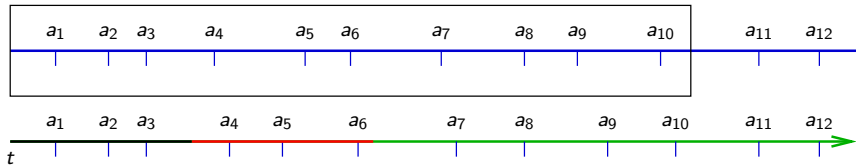
- Allocation préalable de niveaux de vol
- Utilisation de la résolution de CATS (quelle influence sur la solution trouvée?)

## Modèle

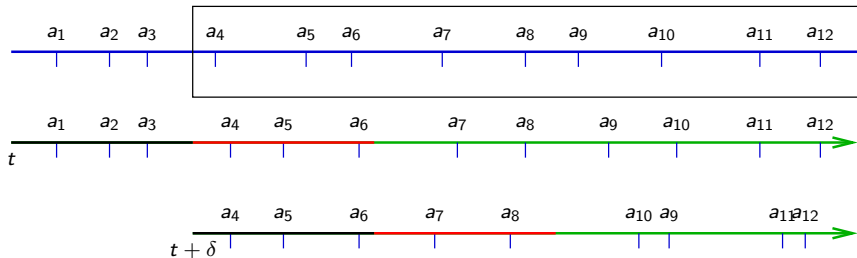
- Utilisation d'autres métaheuristiques
- Couplage métaheuristiques / CSP



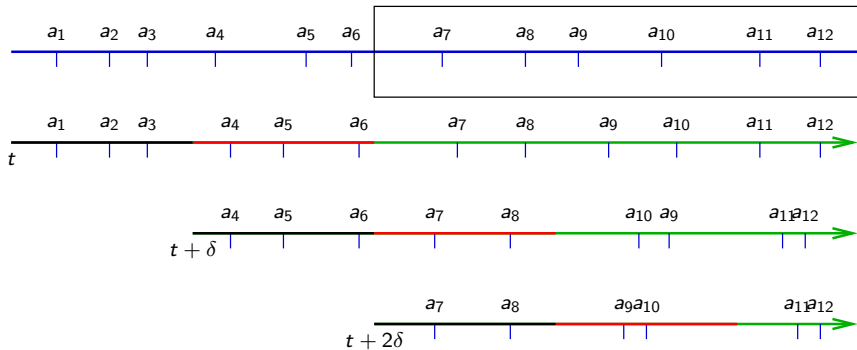
# Fenêtres glissantes



# Fenêtres glissantes



# Fenêtres glissantes



# Fenêtres glissantes

