

Automatisation de la gestion du trafic aérien en Europe

Nicolas BARNIER

barnier@recherche.enac.fr

Laboratoire d'Optimisation Globale (LOG)
DTI-SDER (CENA) / ENAC

JFPDA'06 - 10 mai 2006

Plan

- 1 Introduction
- 2 Air Traffic Management (ATM)
- 3 Automatisation de l'ATM
- 4 Design de l'espace aérien
- 5 Régulation des flux de trafic
- 6 Résolution de conflits
- 7 Conclusion

Introduction

Espace aérien saturé

- Congestion du trafic en route (croissance : 5% par an)
- La demande excède la capacité de l'ATM
- Réseau de routes : **allongement** des trajectoire
- Régulation du trafic : **retards**

Introduction

Espace aérien saturé

- Congestion du trafic en route (croissance : 5% par an)
- La demande excède la capacité de l'ATM
- Réseau de routes : **allongement** des trajectoire
- Régulation du trafic : **retards**

Comment y remédier ?

- Optimisation de la capacité de l'espace aérien : Eurocontrol
- Aide à la décision / Automatisation / Optimisation

Introduction

Espace aérien saturé

- Congestion du trafic en route (croissance : 5% par an)
- La demande excède la capacité de l'ATM
- Réseau de routes : **allongement** des trajectoire
- Régulation du trafic : **retards**

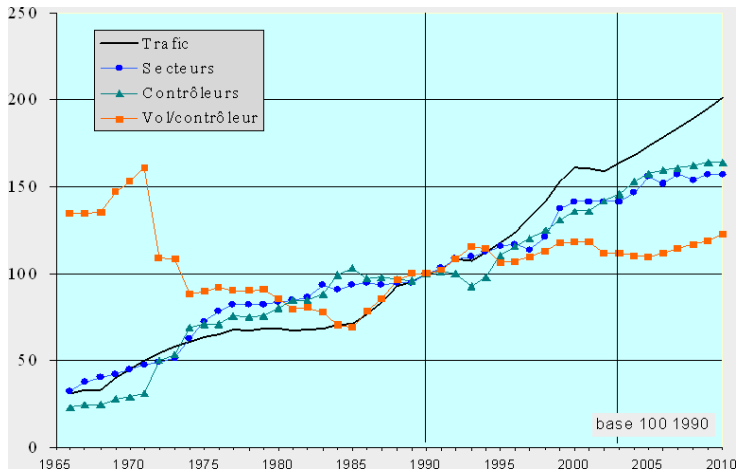
Comment y remédier ?

- Optimisation de la capacité de l'espace aérien : Eurocontrol
- Aide à la décision / Automatisation / Optimisation

Quelques caractéristiques de l'ATM

- Grand nombre d'agents humains et techniques
- Nombreuses sources d'incertitudes
- Arrêt immédiat impossible
- Coûts de développement
- Transitions « continues »

Évolution du trafic et du contrôle



Air Traffic Management (ATM)

Mission

- 1 **Sécurité** : assurer la séparation des aéronefs
 - Plan horizontal : 5 NM^a en route, 3 NM en approche
 - Plan vertical : 1000 ft^b (ou 2000 ft > FL 290^c)
- 2 **Efficacité** : optimiser l'écoulement du trafic

^a1 NM = 1 852 m

^b1000 ft \simeq 300m

^cFL 290 = 29 000 ft

Air Traffic Management (ATM)

Mission

- 1 **Sécurité** : assurer la séparation des aéronefs
 - Plan horizontal : 5 NM^a en route, 3 NM en approche
 - Plan vertical : 1000 ft^b (ou 2000 ft > FL 290^c)
- 2 **Efficacité** : optimiser l'écoulement du trafic

^a1 NM = 1 852 m

^b1000 ft \simeq 300m

^cFL 290 = 29 000 ft

Découpage structurel

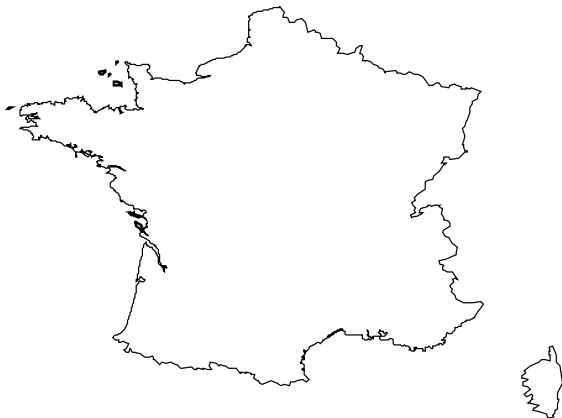
- Airspace Management (ASM)
- Air Traffic Flow Management (ATFM) : régulation
- Air Traffic Control (ATC)

Structure de l'espace aérien

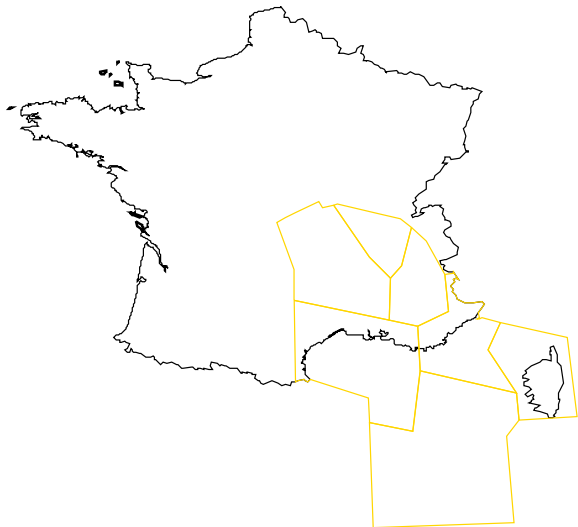
Volumes d'espace et réseau de routes

- **Classes d'espace aérien** (ICAO) : IFR/VFR, niveau de vol, autour des aéroports (Terminal Area - TMA), zones non-contrôlées
- **Secteurs** : 5 centres de contrôle en route (CRNA) en France, découpés en secteurs élémentaires
- **Waypoints** : balises radio ou fictifs (RNAV)
- **Routes** : séquence de waypoints

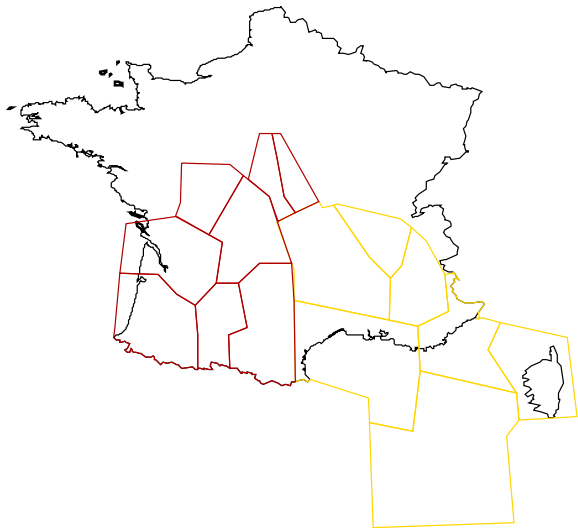
Centres et secteurs de contrôle



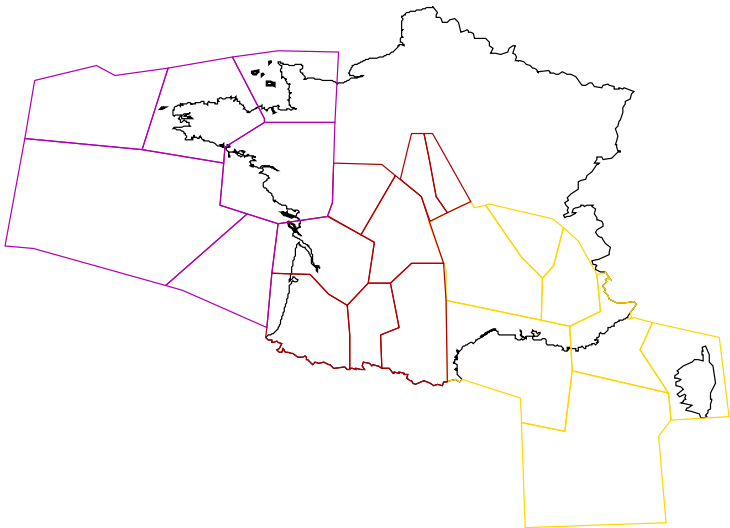
Centres et secteurs de contrôle



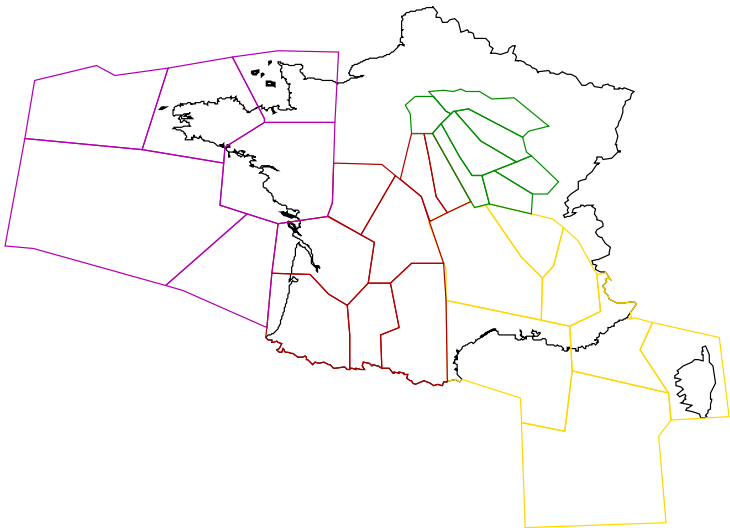
Centres et secteurs de contrôle



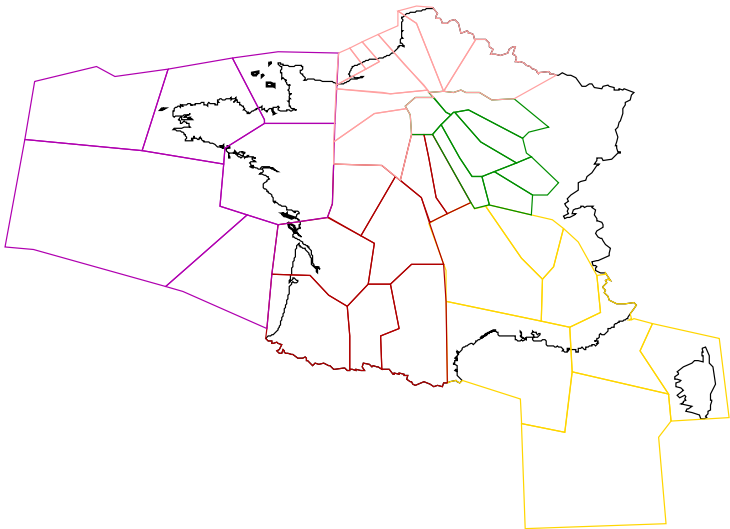
Centres et secteurs de contrôle



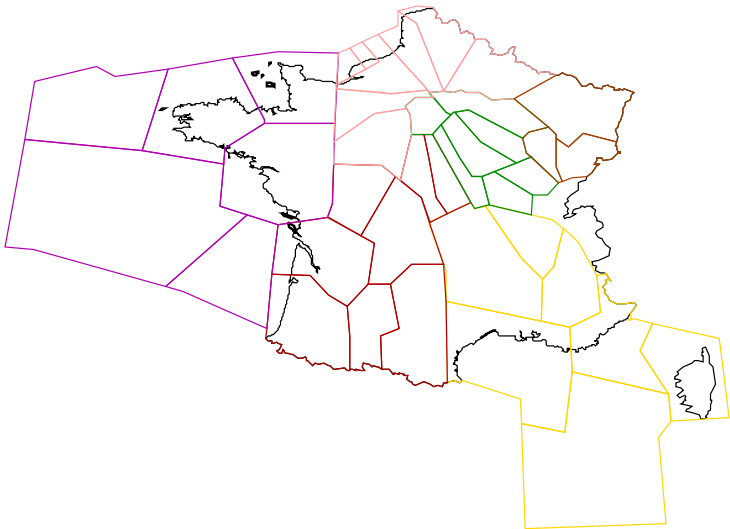
Centres et secteurs de contrôle



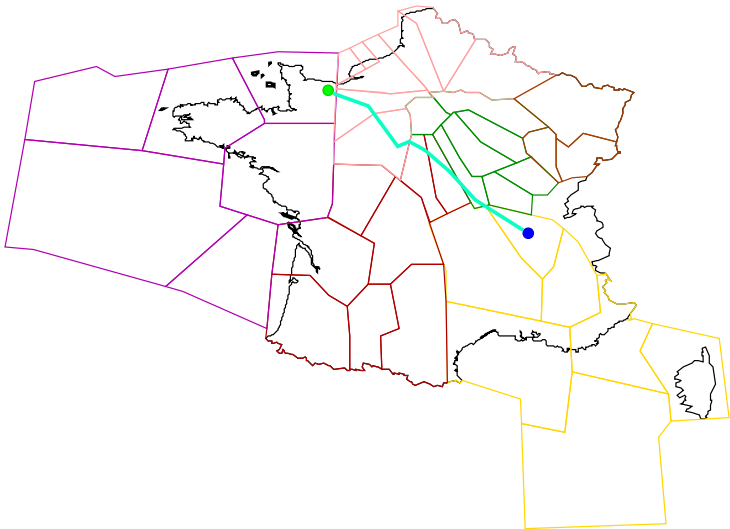
Centres et secteurs de contrôle



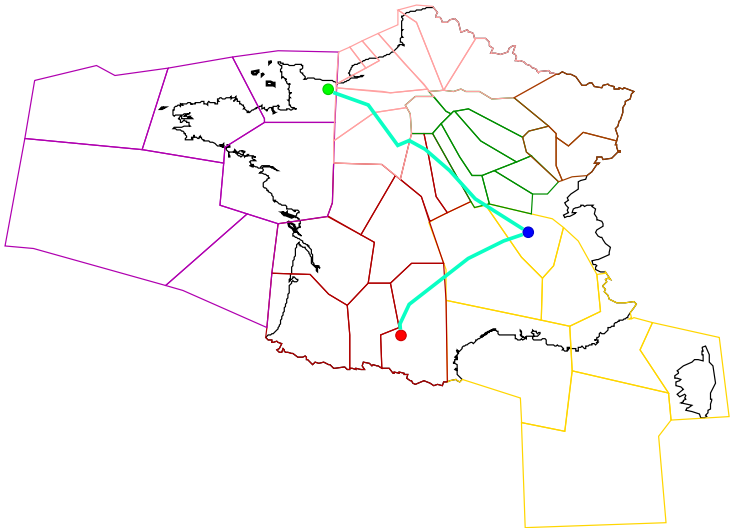
Centres et secteurs de contrôle



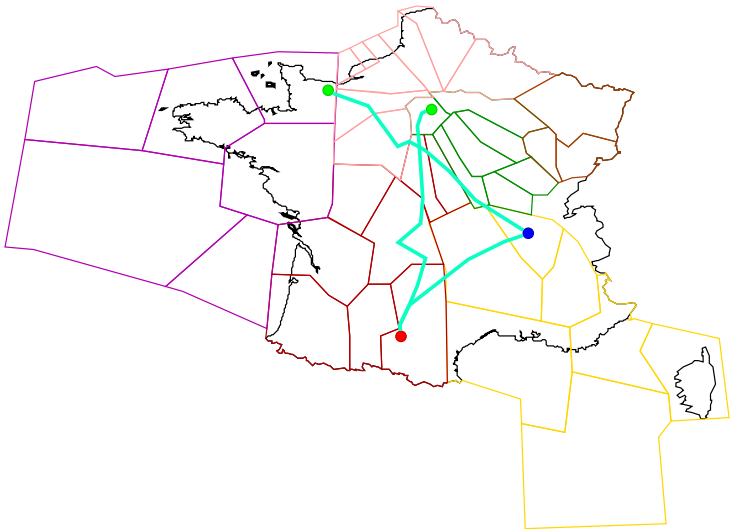
Centres et secteurs de contrôle



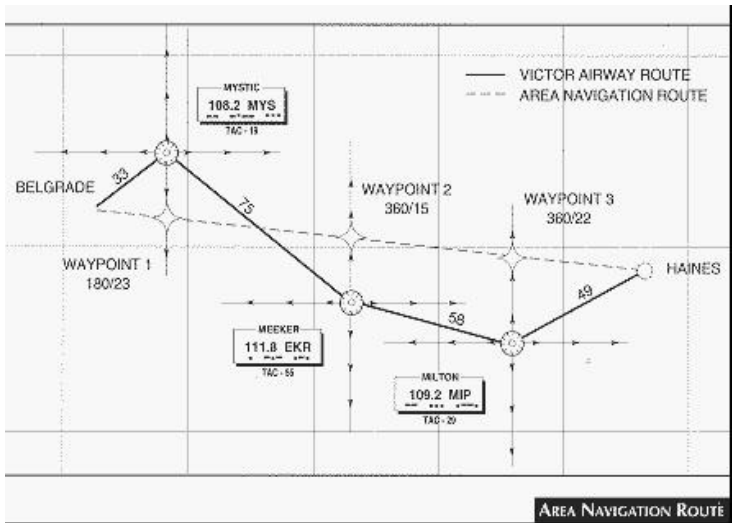
Centres et secteurs de contrôle



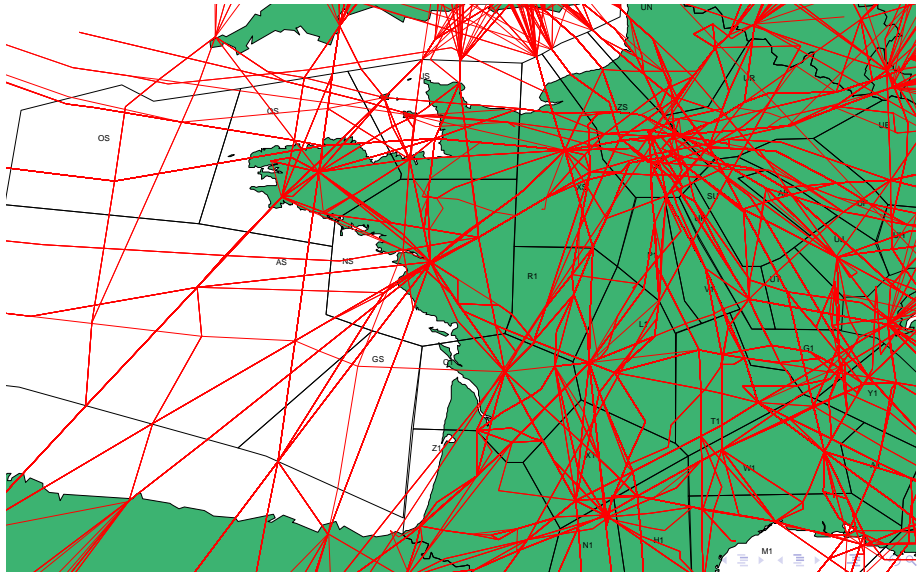
Centres et secteurs de contrôle



Waypoints et route aérienne



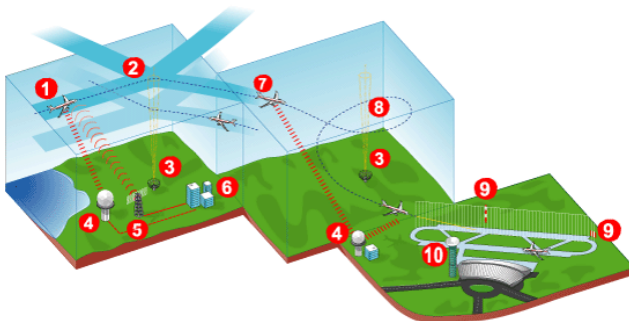
Réseau de routes



Contrôle aérien

Air Traffic Control (ATC)

- Contrôle d'aérodrome / Contrôle au sol
- Contrôle d'approche : attente en *stack*, séquençement
- Contrôle en route



Organisation de l'ATM

Une série de filtres

- 1 **Stratégique** (1 an / 6 mois) : organisation de l'espace (ASM)

Organisation de l'ATM

Une série de filtres

- 1 **Stratégique** (1 an / 6 mois) : organisation de l'espace (ASM)
- 2 **Pré-tactique** (qqs jours) : schémas d'ouverture (capacités)

Organisation de l'ATM

Une série de filtres

- 1 **Stratégique** (1 an / 6 mois) : organisation de l'espace (ASM)
- 2 **Pré-tactique** (qqs jours) : schémas d'ouverture (capacités)
- 3 **Tactique** ($j - 2, j - 1, j$) : régulation des flux (ATFM), créneaux (retards), Central Flow Management Unit (CFMU) à Bruxelles

Organisation de l'ATM

Une série de filtres

- 1 **Stratégique** (1 an / 6 mois) : organisation de l'espace (ASM)
- 2 **Pré-tactique** (qqs jours) : schémas d'ouverture (capacités)
- 3 **Tactique** ($j - 2, j - 1, j$) : régulation des flux (ATFM), créneaux (retards), Central Flow Management Unit (CFMU) à Bruxelles
- 4 **Temps réel** (10/15 min) : contrôle (ATC)
surveillance / résolution de conflits / coordination

Organisation de l'ATM

Une série de filtres

- 1 **Stratégique** (1 an / 6 mois) : organisation de l'espace (ASM)
- 2 **Pré-tactique** (qqs jours) : schémas d'ouverture (capacités)
- 3 **Tactique** ($j - 2, j - 1, j$) : régulation des flux (ATFM), créneaux (retards), Central Flow Management Unit (CFMU) à Bruxelles
- 4 **Temps réel** (10/15 min) : contrôle (ATC)
surveillance / résolution de conflits / coordination
- 5 **Urgence** (qqs min) : filets de sauvegarde

Sol

- Short Term Conflict Alert (STCA)
- Minimum Safe Altitude Warning (MSAW)

Air

- Traffic alert and Collision Avoidance System (TCAS)
- Ground Proximity Warning System (GPWS)

Projets abandonnés

Résolution de conflits automatique

Approches centralisées

- AERA 3 (Federal Aviation Administration - FAA)
[Niedringhaus 89]
- ARC 2000 (Eurocontrol)
[Fron 93]
- SAINTEX (CENA)
[Angerand 92]

Projets abandonnés

Résolution de conflits automatique

Approches centralisées

- AERA 3 (Federal Aviation Administration - FAA)
[Niedringhaus 89]
- ARC 2000 (Eurocontrol)
[Fron 93]
- SAINTEX (CENA)
[Angerand 92]

Approches distribuées

- Méthode des forces répulsives (ONERA)
[Zeghal 94]
- FREER (Eurocontrol)
[Duong 96]

Systèmes automatisés opérationnels

Actuellement

- Allocation de créneau : CASA @ CFMU (experts + algo glouton)
- Séquencement pour le contrôle d'approche : Maestro (Paris) calcul et optimisation des séquences d'arrivée et de départ AMAN/DMAN (Arrival/Departure Manager)
- Short Term Conflict Alert : alarme (pas de résolution)
- TCAS : alarme et résolution d'urgence (manœuvre verticale)

Comment améliorer la capacité de l'espace aérien ?

Futur de l'ATM

- Instruments de navigation : tenue précise / prévision de trajectoires 4D
 - Récemment : Area Navigation (RNAV), Reduced Vertical Separation Minimum (RVSM)
 - Futur : FMS 4D
- ASM : design du réseau de routes et des secteurs
- Calcul de tubes 4D, séparation par niveau de vol
- ATFM : allocation de créneaux, schémas d'ouverture
- ATC : résolution de conflit, approche centralisée/distribuée

Réseau de routes

Objectifs

- Minimiser l'allongement par rapport à la route directe
- Minimiser les routes en conflit

Réseau de routes

Objectifs

- Minimiser l'allongement par rapport à la route directe
- Minimiser les routes en conflit

Modèles

Simplification

- Espace aérien supérieur
- Affectation d'une route par flux

Degré de précision

- Tubes 2D/3D/4D
- Performances des aéronefs
- Phases de montée/descente
- Degré de liberté des manœuvres

Allocation de niveau de vol

Modèle

- Routes directes en 2D, trafic en route, séparation verticale
- Flux de vols de même origine/destination
- Graphe d'intersection
- Problème de coloration de graphe : minimiser le nombre de niveau de vol alloués

Allocation de niveau de vol

Modèle

- Routes directes en 2D, trafic en route, séparation verticale
- Flux de vols de même origine/destination
- Graphe d'intersection
- Problème de coloration de graphe : minimiser le nombre de niveau de vol alloués

Algorithme

- Programmation par Contraintes (CP) avec FaCiLe
- Recherche de cliques (glouton et complet) :
 - Borne inférieure
 - Contraintes « tous différents »
 - Heuristique par taille décroissante

Résultats

Solutions optimales

n_{min}	flux	inter	FL
5	352	10581	12
4	434	16106	14
3	610	33059	15
2	912	68759	18

- Nombre de niveaux de vol réaliste pour les gros flux
- Modèle très simpliste mais indicateur de la capacité globale
- Testé en entrée du simulateur CATS :
conflits restants surtout en rattrapage sur le même flux

Routes 3D (plus) réalistes [Gianazza 04]

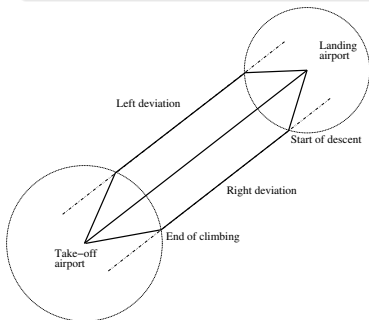
Modèle

- Phases de montée, en route et descente

Routes 3D (plus) réalistes [Gianazza 04]

Modèle

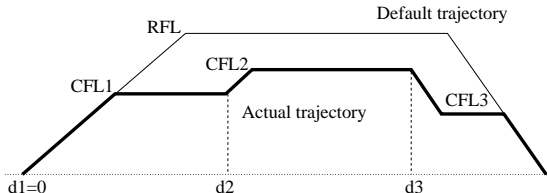
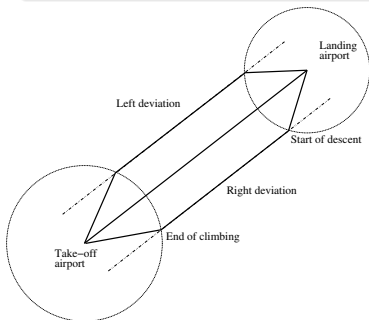
- Phases de montée, en route et descente
- 3 routes possibles dans le plan horizontal



Routes 3D (plus) réalistes [Gianazza 04]

Modèle

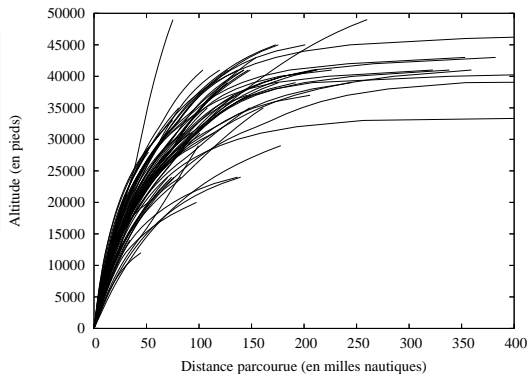
- Phases de montée, en route et descente
- 3 routes possibles dans le plan horizontal
- 3 manœuvres verticales possibles



Performances des avions

Performances différentes

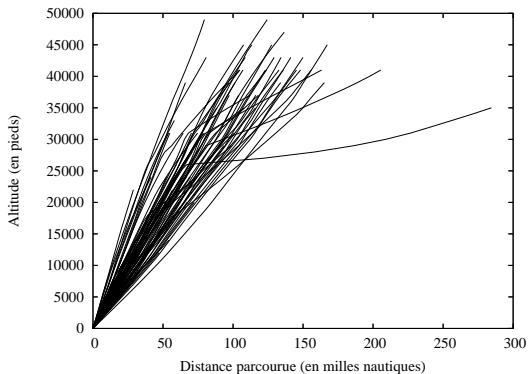
- Montée



Performances des avions

Performances différentes

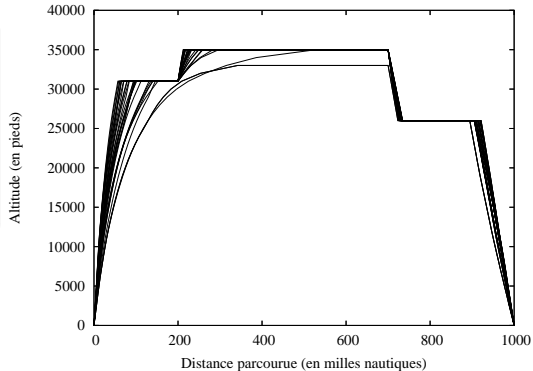
- Montée
- Descente



Performances des avions

Performances différentes

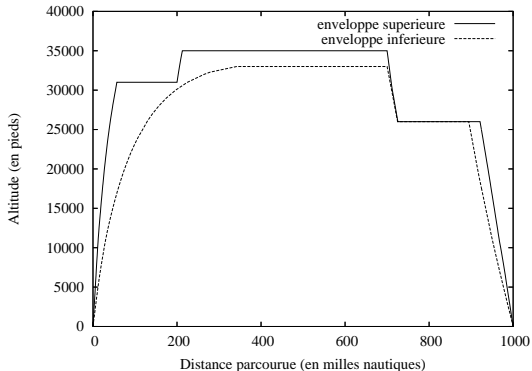
- Montée
- Descente
- Dans un même flux



Performances des avions

Performances différentes

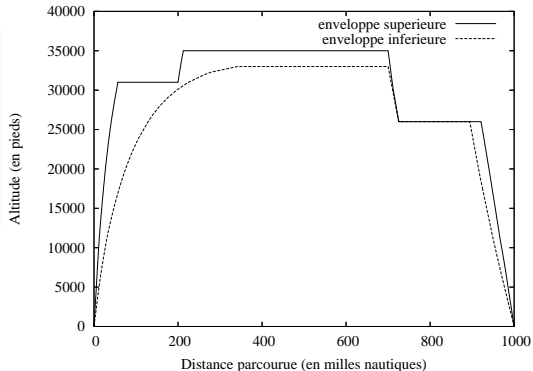
- Montée
- Descente
- Dans un même flux
- Enveloppe d'incertitude



Performances des avions

Performances différentes

- Montée
- Descente
- Dans un même flux
- Enveloppe d'incertitude



Modèles

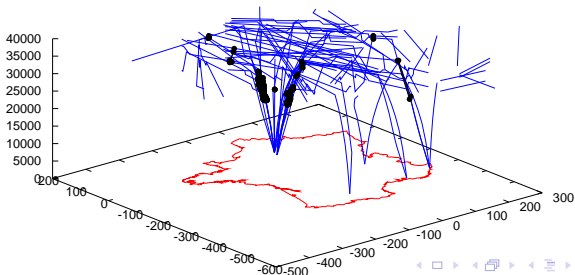
- Une seule trajectoire par flux : tube 3D plus large
- Sous-flux de performances similaires

Résolution avec un AG + A*

Validation avec CATS

- Conflits restants en rattrapage ou autour d'aéroports communs
- 30 – 40% du trafic français pris en compte
- Réduction du nombre de conflits 10 – 25%
- Allongement des routes 0.5 – 2%
- Ajout de la dimension temporelle : tubes 4D

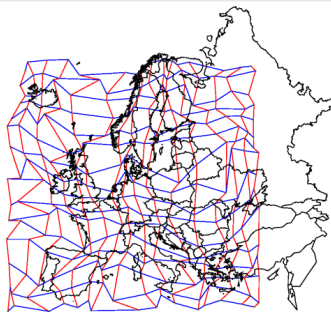
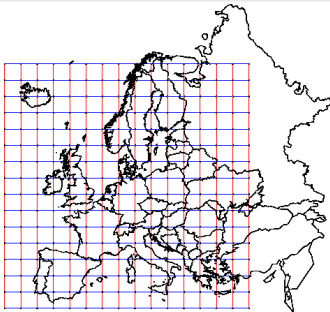
trajectoires —
conflits —●—



Concepts SectorLess/Supersector (Eurocontrol)

Nouveaux concepts d'ATM

- Contrôle par flux
- Réseau « d'autoroutes » : grille
- Règles de croisement, dépassements
- Déformation de la grille pour minimiser l'allongement [Rivière 05]



Centres et secteurs de contrôle

Équilibrage : surveillance, résolution de conflits, coordination

- Design des waypoints et des secteurs [Mehadhebi 00] (LS)
- Problèmes de partitionnement de graphe :
 - Design des secteurs [Baptiste 01] (CP+LS)
 - Design des centres de contrôle à partir des secteurs élémentaires [Bichot 06] (LS)

Optimisation des schémas d'ouverture

- Regroupement/Dégroupement de secteurs élémentaires
- Prédéfinis dans chaque centre

Centres et secteurs de contrôle

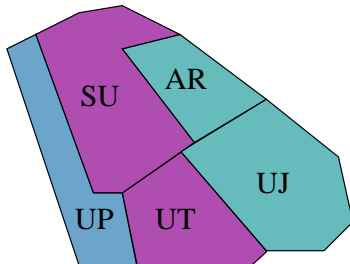
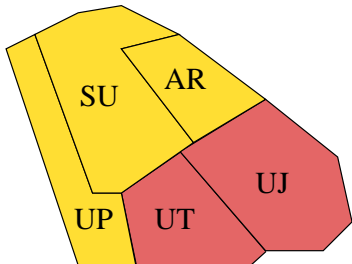
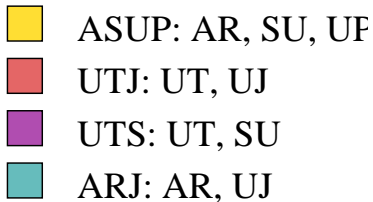
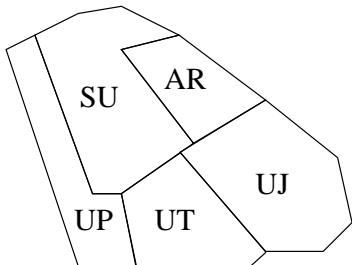
Équilibrage : surveillance, résolution de conflits, coordination

- Design des waypoints et des secteurs [Mehadhebi 00] (LS)
- Problèmes de partitionnement de graphe :
 - Design des secteurs [Baptiste 01] (CP+LS)
 - Design des centres de contrôle à partir des secteurs élémentaires [Bichot 06] (LS)

Optimisation des schémas d'ouverture

- Regroupement/Dégroupement de secteurs élémentaires
- Prédéfinis dans chaque centre

Schémas d'ouverture des CRNA



Schémas d'ouverture des CRNA

Problème

- Conçus par des experts pour adapter la capacité au trafic prévu
- Planning des secteurs ou groupes de secteurs ouverts
- Nombre de positions de contrôle limité

Modèle et algorithme

- Partitionnement
- Minimiser les écarts capacité/demande
- Minimiser les transitions (regroupements/dégroupements)
- Programmation par contraintes avec FaCiLe

Schémas d'ouverture des CRNA

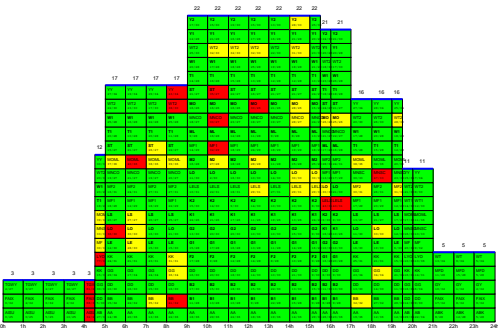
Problème

- Conçus par des experts pour adapter la capacité au trafic prévu
- Planning des secteurs ou groupes de secteurs ouverts
- Nombre de positions de contrôle limité

Modèle et algorithme

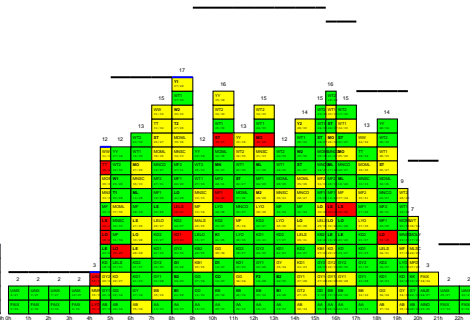
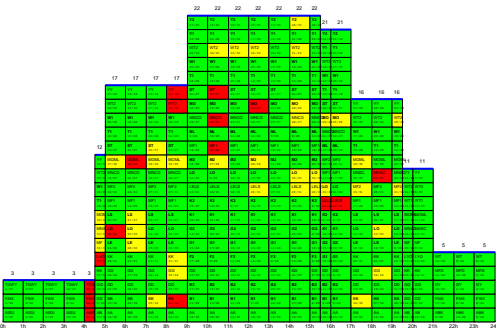
- Partitionnement
- Minimiser les écarts capacité/demande
- Minimiser les transitions (regroupements/dégroupements)
- Programmation par contraintes avec FaCiLe

Résultats sur le centre d'Aix



Initial

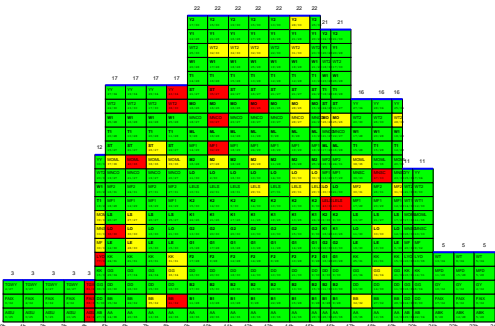
Résultats sur le centre d'Aix



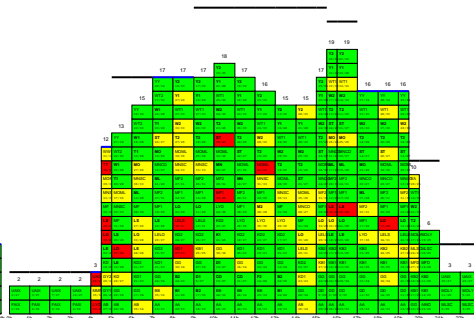
Initial

Optimisé

Résultats sur le centre d'Aix



Initial



Optimisé avec transitions

Allocation de créneaux

Problème

- Données :
 - Centres : schémas d'ouverture
 - Vols : route, date d'entrée dans les secteurs
- Respecter les contraintes de **capacité** en **retardant** les vols au décollage
- Minimiser les retards (max, sum...)

Outils existants

- CFMU : CASA algorithme glouton **incomplet** mais opérationnel
- CENA/RFM : SHAMAN (CP) mais **pics** de trafic

Marabout

- CP avec interprétation continue de la capacité
- **Lissage** de la charge de travail

Allocation de créneaux

Problème

- Données :
 - Centres : schémas d'ouverture
 - Vols : route, date d'entrée dans les secteurs
- Respecter les contraintes de **capacité** en **retardant** les vols au décollage
- Minimiser les retards (max, sum...)

Outils existants

- CFMU : CASA algorithme glouton **incomplet** mais opérationnel
- CENA/RFM : SHAMAN (CP) mais **pics** de trafic

Marabout

- CP avec interprétation continue de la capacité
- **Lissage** de la charge de travail

Allocation de créneaux

Problème

- Données :
 - Centres : schémas d'ouverture
 - Vols : route, date d'entrée dans les secteurs
- Respecter les contraintes de **capacité** en **retardant** les vols au décollage
- Minimiser les retards (max, sum...)

Outils existants

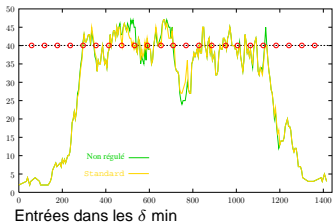
- CFMU : CASA algorithme glouton **incomplet** mais opérationnel
- CENA/RFM : SHAMAN (CP) mais **pics** de trafic

Marabout

- CP avec interprétation continue de la capacité
- **Lissage** de la charge de travail

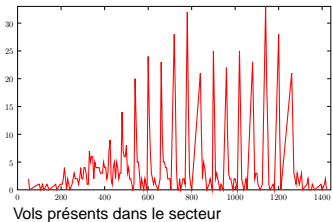
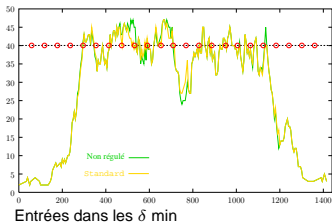
Résultats

Modèle standard



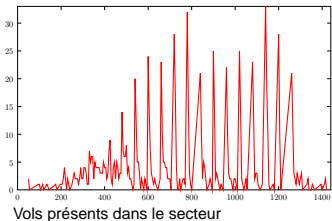
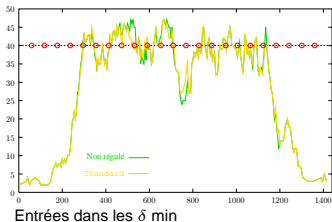
Résultats

Modèle standard

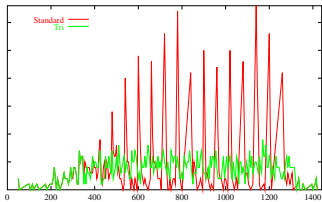
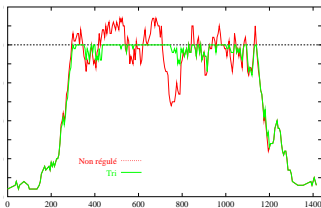


Résultats

Modèle standard



Marabout



Résolution de conflits

Simulateur CATS du LOG

- Modèles de vol tabulé (montée, croisière, descente)
- Adapté pour simuler l'ATC en temps réel
- Temps « accéléré »
- **Prévision** de trajectoire sur une fenêtre temporelle T_w (10 min)
- **Incertitudes** sur les vitesses verticale et horizontale
- **Détection de conflits** et calcul des **clusters**
- Algorithme de **résolution** toutes les δ min (3 min)
- Modèles de vol **différents** pour la simulation et la détection
- Routes **standards** ou **directes**

Résolution de conflit

- **Manœuvres** : horizontales, verticales, simples
- **Centralisée** (ERCOS, SAGES) / **Distribuée** (FACES)

Résolution de conflits

Simulateur CATS du LOG

- Modèles de vol tabulé (montée, croisière, descente)
- Adapté pour simuler l'ATC en temps réel
- Temps « accéléré »
- **Prévision** de trajectoire sur une fenêtre temporelle T_w (10 min)
- **Incertitudes** sur les vitesses verticale et horizontale
- **Détection de conflits** et calcul des **clusters**
- Algorithme de **résolution** toutes les δ min (3 min)
- Modèles de vol **différents** pour la simulation et la détection
- Routes **standards** ou **directes**

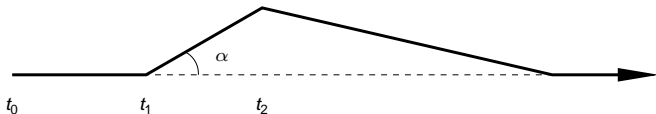
Résolution de conflit

- **Manœuvres** : horizontales, verticales, simples
- **Centralisée** (ERCOS, SAGES) / **Distribuée** (FACES)

Manœuvres

Horizontales

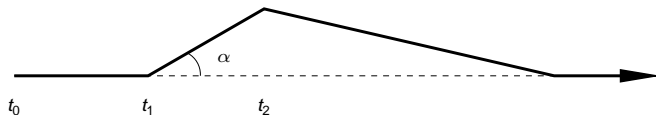
- Déviation au temps t_1
- Angle $\alpha \in \{10, 20, 30\}$ à droite ou à gauche
- Retour sur la trajectoire au temps t_2



Manœuvres

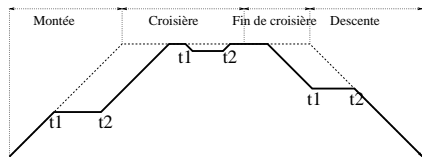
Horizontales

- Déviation au temps t_1
- Angle $\alpha \in \{10, 20, 30\}$ à droite ou à gauche
- Retour sur la trajectoire au temps t_2

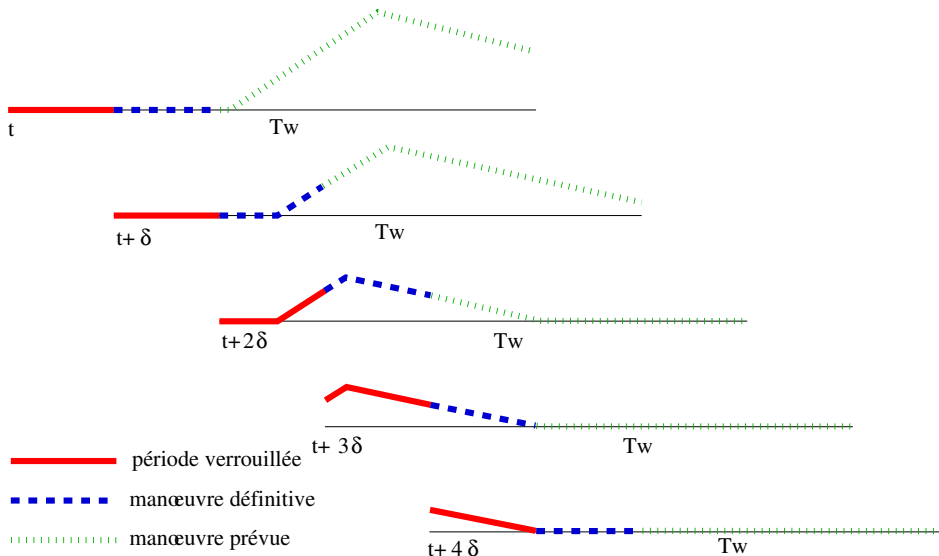


Verticales

- Interruption de montée, anticipation de descente
- Changement de niveau de vol



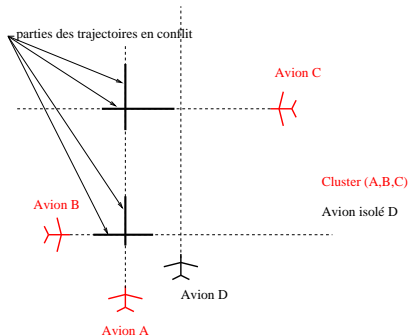
Manœuvres et temps de réponse



Clusters de conflits

Fermeture transitive de la relation de conflit

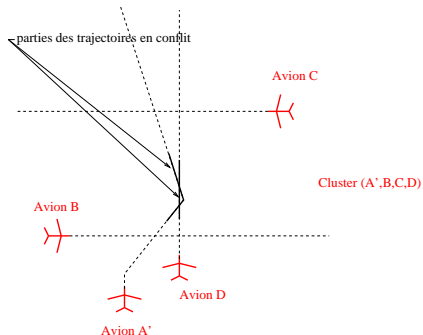
- Un cluster = sous-problème à résoudre globalement
- Complexité de résolution exponentielle avec le nombre d'avions
- Rebouclage de la détection de conflits après résolution



Clusters de conflits

Fermeture transitive de la relation de conflit

- Un cluster = sous-problème à résoudre globalement
- Complexité de résolution exponentielle avec le nombre d'avions
- Rebouclage de la détection de conflits après résolution



Gestion des incertitudes

Sources d'incertitudes

- Opérateurs humains : pilotes, contrôleurs
- Environnement : météo
- Modèles de vol : équipement, masse, pannes

Modèle pour la prévision de trajectoire

- En croisière : cap et altitude précise
- Vitesse horizontale : e_g (5%)
- Vitesse verticale : e_v (15-20%)

Gestion des incertitudes

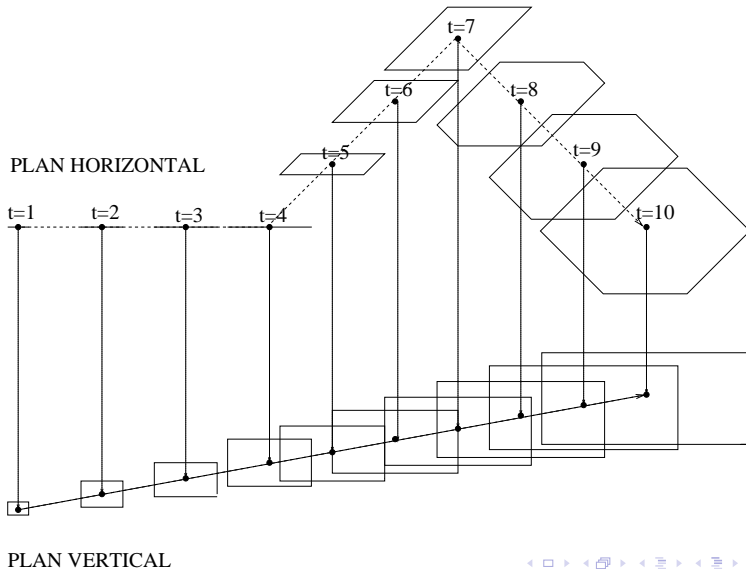
Sources d'incertitudes

- Opérateurs humains : pilotes, contrôleurs
- Environnement : météo
- Modèles de vol : équipement, masse, pannes

Modèle pour la prévision de trajectoire

- En croisière : cap et altitude précise
- Vitesse horizontale : e_g (5%)
- Vitesse verticale : e_v (15-20%)

Modèle d'incertitudes



Influence des incertitudes

Résolution de conflit

- Horizon de prévision T_w
- Détection de conflit entre enveloppes d'incertitudes
- Taille des clusters
- Modèle statistique : 100% de conflits détectés en plus pour $e_g < 1.4\%$ et $e_v < 10\%$ ($T_w = 10\text{min}$)

T_w	e_g	e_v	P_d	P_s
4	0.02	0.01	+28%	+45%
4	0.02	0.40	+93%	+127%
4	0.16	0.01	+161%	+395%
4	0.16	0.40	+248%	+547%
12	0.02	0.01	+70%	+135%
12	0.16	0.40	+724%	+2373%

Influence des incertitudes

Résolution de conflit

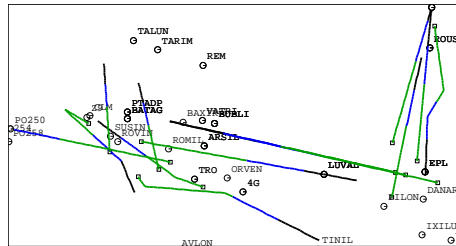
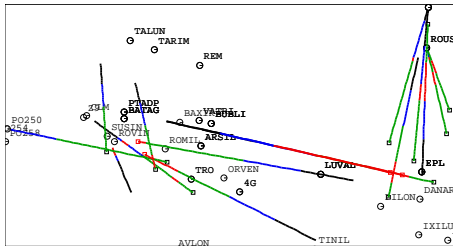
- Horizon de prévision T_w
- Détection de conflit entre enveloppes d'incertitudes
- Taille des clusters
- Modèle statistique : 100% de conflits détectés en plus pour $e_g < 1.4\%$ et $e_v < 10\%$ ($T_w = 10\text{min}$)

T_w	e_g	e_v	P_d	P_s
4	0.02	0.01	+28%	+45%
4	0.02	0.40	+93%	+127%
4	0.16	0.01	+161%	+395%
4	0.16	0.40	+248%	+547%
12	0.02	0.01	+70%	+135%
12	0.16	0.40	+724%	+2373%

Approches centralisée

ERCOS

- Résolution par AG (sophistiqué)
- Minimisation des déviations
- Permet de résoudre une journée de trafic français (FL>60)
- Routes directes : 30% de conflits en moins
- Résolution en vitesse ? SAGES



Approches distribuées

FACES [Archambault 04]

- Volume de détection limité
- **Communication** : prévision de trajectoire, « jetons »
- Résolution **séquentielle** : à chaque étape, un avion calculé avec un A* une trajectoire sans conflit avec les précédentes
- **Ordre** de résolution : ordre total grâce à un algorithme de distribution de jetons
- Mêmes manœuvres que l'approche centralisée

Résultats

- **Sensibilité à l'ordre** : heuristiques
- **Moins capacitif** que l'approche centralisée
- Espaces peu denses (FL > 300)

Approches distribuées

FACES [Archambault 04]

- Volume de détection limité
- **Communication** : prévision de trajectoire, « jetons »
- Résolution **séquentielle** : à chaque étape, un avion calculé avec un A* une trajectoire sans conflit avec les précédentes
- **Ordre** de résolution : ordre total grâce à un algorithme de distribution de jetons
- Mêmes manœuvres que l'approche centralisée

Résultats

- **Sensibilité à l'ordre** : heuristiques
- **Moins capacitif** que l'approche centralisée
- Espaces peu denses (FL > 300)

Lenteur de l'évolution de l'ATM

Difficultés opérationnelles

- Incertitudes : trajectoires, capacités des secteurs
- Transition « continues » :
 - Matériels, fonctionnalités : hétérogènes, interopérabilité, compatibilité ascendante
 - Difficulté d'évaluer l'intérêt d'une amélioration élémentaire
- Investissements très lourds en ATM
- Panne des systèmes automatiques :
 - Reprise par l'homme trop complexe
 - Arrêt rapide et sûr impossible
- Rôle des pilotes, contrôleurs

Recherche en ATM

- Domaine très récent (ATM, ICRAT, DASC)
- Beaucoup de « concepts », peu d'algorithmes validés
- Complexité de la résolution d'un cluster de conflits

Lenteur de l'évolution de l'ATM

Difficultés opérationnelles

- Incertitudes : trajectoires, capacités des secteurs
- Transition « continues » :
 - Matériels, fonctionnalités : hétérogènes, interopérabilité, compatibilité ascendante
 - Difficulté d'évaluer l'intérêt d'une amélioration élémentaire
- Investissements très lourds en ATM
- Panne des systèmes automatiques :
 - Reprise par l'homme trop complexe
 - Arrêt rapide et sûr impossible
- Rôle des pilotes, contrôleurs

Recherche en ATM

- Domaine très récent (ATM, ICRAT, DASC)
- Beaucoup de « concepts », peu d'algorithmes validés
- Complexité de la résolution d'un cluster de conflits

Perspectives

Ségrégation des trafics suivant l'équipement et le service attendu

Gestion centralisée des trajectoires 4D

- Espaces denses
- Instruments coûteux : réduction des incertitudes
- Trafic optimisé
- Gestion stratégique pour le trafic commercial

Avions autonomes

- Espaces peu denses
- Aviation générale : coûts des systèmes embarqués ?