Résolution de conflits aériens par régulation en vitesse

Roadef - Marseille 2015

Alexandre Gondran

ÉNAC, École Nationale de l'Aviation Civile, Toulouse, France

25 février 2015

Sommaire

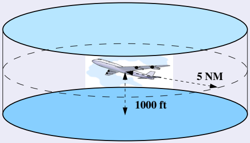
1. Contexte
2. Modélisation : problème à contraintes binaires
3. Méthodes d'optimisation
4. Tests et Résultats
5. Conclusions et perspectives

Sommaire

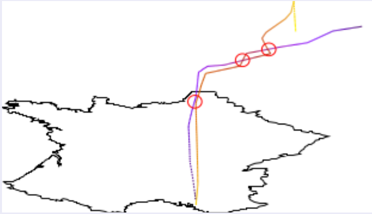
1. Contexte
2. Modélisation : problème à contraintes binaires
3. Méthodes d'optimisation
4. Tests et Résultats
5. Conclusions et perspectives

Contexte

Distance de sécurité



Conflit potentiel entre deux avions



contrôleurs aériens: garantir à tout instant cette distance de sécurité

- Manœuvres verticales : changer de niveau de vol
- Manœuvres horizontales : changer de cap
- Manœuvres en vitesses : modifier la vitesse de l'avion
  - Variation de la vitesse dite 'subliminale' si $\in [-6\% ; +3\%]$ / vitesse nominale
  - Objectifs : 1) Minimiser le nombre de conflits potentiels
    2) Minimiser les variations de vitesses

Travaux précédents [Cafieri et Durand 2014]

Modélisation MINLP

- Il existe de nombreuses modélisations possibles
- Problème non linéaire à variables mixtes (MINLP) :
  - [1] S. Cafieri, N. Durand, *Aircraft deconfliction with speed regulation : new models from mixed-integer optimization*, Journal of Global Optimization, 58(4) :613-629, 2014.
  - changements des vitesses simultanées et une seule fois (horizon de 30 min)

Résolution MINLP

- Résolution exacte par des solveurs MINLP (instances $\leqslant 6$ avions).
- Résolution approchée à l'aide de solveurs MINLP (instances > 6 avions).

Notre approche

- Discrétiser le domaine des variables continues $\Longrightarrow$ problème totalement discret.

$\Longrightarrow$ Résoudre des instances de problèmes comptant plus de 6 avions.

$\Longrightarrow$ Solutions initiales pour les solveurs MINLP

Sommaire

1 Contexte

2 Modélisation : problème à contraintes binaires

3 Méthodes d'optimisation

4 Tests et Résultats

5 Conclusions et perspectives

Modélisation : problème d'affectation à variables discrètes et à domaines finis [2]

Changements des vitesses simultanées et une seule fois (horizon de 30 min)

Variables de décision

- n variables de décision x_i : variations en vitesses des n avions.
- Domaine des variables : $x_i \subset [0.94,\ 1.03]$ (correspond à $[6\%,\ +3\%]$)
  Exemple : 10 valeurs possibles ($m = 10$) si on discrétise tous les 1%
  ($m = 91$ si on discrétise tous les 0.1%)

Données du problème

- Pour toutes paires d'avion (i, j) : $\delta_{(i,j)}(k, l) = \{0,\ 1\}$
  conflit si les avions i et j effectuent les manœvres k et l.
- $cost(i, k)$: coût d'affectation de la variable i à la manœuvre k
  ici : $cost(i, k) = (1 - x_i)^2$.

Modélisation : problème d'affectation à variables discrètes et à domaines finis [2]

Objectifs et contraintes du problème

Trouver $S = (x_1, x_2, ...x_n)$ qui minimise :

$$f(S) = \sum_{i \in I} (1 - x_i)^2$$

sous les contraintes : $\forall (i,j) \in I^2, \quad \delta(i,j,x_i,x_j) = 0]$
$\forall i \in I, \quad x_i \in D$

- uniquement des contraintes binaires
- fonction objectif séparable

$\Longrightarrow$ CSP binaire avec une fonction objectif séparable

Sommaire

1. Contexte
2. Modélisation : problème à contraintes binaires
3. Méthodes d'optimisation
4. Tests et Résultats
5. Conclusions et perspectives

Méthodes d'optimisation

Méthode Tabou

- Espace de recherche et fonction optimisée :
  1. minimiser le nombre de contraintes violées (MinCSP)
  2. minimiser le coût des manœuvres (2nd objectif)
- Voisinage : changer la valeur d'une variable critique
- Stratégie : recherche tabou
  - déplacement vers la meilleure solution voisine non tabou
  - liste tabou : mouvement inverse (couple (variable, valeur)), durée tabou dynamique

Algorithme Mémétique

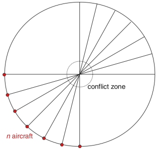
- Algorithme évolutionnaire où la mutation est remplacée par une recherche locale (RL)
  - Algorithme évolutionnaire où les individus sont tous des minimum locaux
  - 99% du temps : RL et 1% : croisements, sélection, remplacement

  $\Longrightarrow$ amélioration de RLs parallèles via des opérateurs de croisement
- pas utile pour les problèmes traités

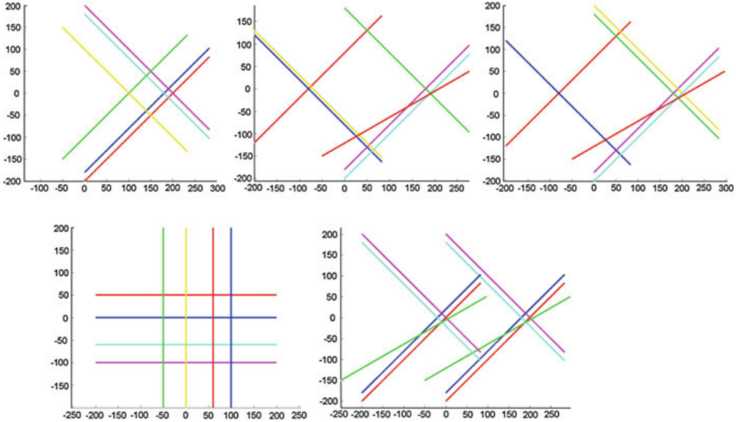
Sommaire

1. Contexte
2. Modélisation : problème à contraintes binaires
3. Méthodes d'optimisation
4. Tests et Résultats
5. Conclusions et perspectives

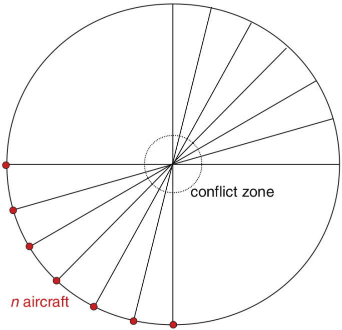
Tests issus de [Cafieri et Durand, 2014]



- 9 instances de tests du cercle de 2 à 10 avions
- 5 instances plus 'réelles' de 6 à 10 avions



Algorithme glouton pour les instances autour d'un cercle



- Ordre implicite des avions
- Si on fixe la première variation de vitesse, alors toutes les autres sont fixées
- Méthode exacte ?

Données test : DIMACS benchmark - 1992

Instance	exacte[1] COUENNE		heuristique[1]		glouton (time<0.1)	Tabu 1% (time<0.1)	Tabu 0.1%	
	obj	time(s)	obj	time	obj	obj	obj	time
cercle_n2	**25.31**	0.15	X	X	**25.31**	29	25.81	<0.1
cercle_n3	**16.67**	1.45	X	X	**16.67**	18	17.41	0.1
cercle_n4	**40.09**	12.87	57.68	3.87	**40.29**	54	42.33	0.16
cercle_n5	**30.33**	841.33	47.18	4.12	**30.56**	45	34.16	0.3
cercle_n6	**60.33**	51863	64.02	17.33	**60.88**	(1) 46	67.01	0.3
cercle_n7	X	X	**81.44**	22.99	no	(2) 60	(1) 82	0.4
cercle_n8	X	X	**75.51**	39.66	83.22	(3) 56	(1) 63	0.6
						0.01% : 89.1 en 115.9		
cercle_n9	X	X	**92.38**	97.41	no	(4) 64	(2) 64	0.5
cercle_n10	X	X	**140.47**	484.49	no	(5) 90	(3) 76	0.3
reel_n6	X	X	49.26	6.19	X	18	**13.44**	0.3
reel_n7a	X	X	77.33	48.9	X	24	**17.61**	0.2
reel_n7b	X	X	83.19	13.99	X	23	**17.24**	0.4
reel_n8	X	X	124.97	3.75	X	31	**24.91**	0.8
reel_n10	X	X	114.14	3731	X	29	**15.60**	0.7

Sommaire

1. Contexte
2. Modélisation : problème à contraintes binaires
3. Méthodes d'optimisation
4. Tests et Résultats
5. Conclusions et perspectives

Conclusions

Intérêt de discrétiser les problèmes continues

- Métaheuristique efficace pour des instances de grande taille
- Solutions initiales pour les solveurs MINLP

Méthode tabou générique pour problèmes à contraintes binaires

- Avec fonction objectif séparable
- Maintient incrémental de la matrice de delta-évaluation $\Rightarrow$ performence de l'algo
- Exemples d'application :
  - Manœuvres horizontales (ensemble de manœuvres possibles): http://cluster.enac.fr
  - Allocation de niveaux de vol
  - Retard aux décollages
  - Ordonnancement d'avions à l'atterrissage
  - Coloration de graphe avec objectif (sum coloring)

Perspectives

Algorithme mémétique générique pour problèmes à contraintes binaires

- Non utile dans ce cas
- Utiliser un bon croisement : [Durand 1996] pour les fonctions partiellement séparables
- Croisement glouton fondé sur les contraintes satisfaites

Algorithme mémétique générique pour problèmes à contraintes n-aires

- Première ébauche pour les PNLE

Bibliographie

- S. Cafieri, N. Durand, Aircraft deconfliction with speed regulation: new models from mixed-integer optimization, *Journal of Global Optimization*, 58(4):613-629, 2014.
- A. Gondran, Recherche tabou générique pour problèmes à contraintes binaires, rapport technique, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01063343v2, 2014.
- N. Durand,