



# Formalisation des raisonnements des contrôleurs aériens dans la résolution de conflits

Vincent Dugat, Laurent Lapasset

► **To cite this version:**

Vincent Dugat, Laurent Lapasset. Formalisation des raisonnements des contrôleurs aériens dans la résolution de conflits. RFIA 1998, 18eme conférence sur la Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, Jan 1998, Clermont-Ferrand, France. <hal-01511769>

**HAL Id: hal-01511769**

**<https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-01511769>**

Submitted on 21 Apr 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Formalisation des raisonnements des contrôleurs aériens dans la résolution de conflits

## Formalisation of air controllers reasoning in conflict resolution

M. Vincent Dugat<sup>1</sup>

M. Laurent Lapasset<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de Recherche en Informatique de Toulouse

<sup>2</sup> Centre d'Étude de la Navigation Aérienne

Centre d'Études de la Navigation Aérienne  
7 avenue Edouard Belin, 31055 TOULOUSE Cedex FRANCE  
E-mail:lapasset@cena.dgac.fr,dugat@cict.fr

### Résumé

*Le contrôle du trafic aérien d'un pays gère tous les avions qui volent dans son espace aérien. Il décide de la géométrie des secteurs de contrôle, gère les flux entre les aéroports et les balises, assure la sécurité en maintenant la séparation entre les avions, du décollage jusqu'à l'atterrissage. Il intervient donc à plusieurs niveaux différents. La continue augmentation du trafic aérien constatée et prévue rend indispensable l'étude d'amélioration, de modernisation et de redéfinition du système de contrôle actuel. Dans le cadre de l'automatisation partielle, où l'on prévoit de maintenir l'opérateur humain, nous proposons un système de maintien de séparation construit sur les connaissances des contrôleurs aériens. Il permettra de construire des aides au traitement de l'information, suffisamment proches de ses comportements pour être acceptées par le contrôleur, acceptabilité indispensable dans un tel système de connaissances couplé avec l'opérateur humain.*

### Mots Clef

Contrôle du trafic aérien, Résolution de conflits, Formalisation du raisonnement, Davis et Putnam.

### Abstract

*The Air Traffic Control system of a country manages all the aircrafts that fly in its airspace. It decides geometry of sectors, manages the flows between the different airports and beacons, ensures separation between aircrafts during their flight, from take off up to landing. Thus, it operates at different levels. The continuous increase of air traffic makes indispensable studies of improvement, modernisation and redefinition of the ATC system. In this goal of partial automation, where we keep the human operator in place, we propose a separation maintenance system being build on controllers experience. Thus, it will be possible assistants for informations processing, sufficiently close to controller's behaviour to be accepted, essential point in such coopera-*

*tions configuration, between knowledge based systems and human operator.*

### Keywords

Air traffic control, Conflicts resolution, Formalisation of reasoning, Davis and Putnam.

## 1 Introduction

La tâche principale des contrôleurs aériens est de surveiller les avions présents dans la zone de l'espace placée sous leur responsabilité. S'ils détectent la présence d'un conflit entre un certain nombre d'avions, pour prévenir ce conflit et maintenir la séparation, les contrôleurs donnent des *ordres de manœuvres* aux pilotes. On dit qu'ils donnent des *ordres de résolutions*, et plus simplement qu'ils *résolvent le conflit*. Nous rappelons que deux avions sont en *conflit* si et seulement si il existe un instant où leur distance est inférieure à une distance réglementaire, appelée *distance de séparation*.

De nombreuses études ont eu pour objectifs de modéliser les raisonnements de résolutions. Le principal écueil est la très forte combinatoire du problème et il n'existe pas à ce jour une solution exacte. Les tentatives d'utilisation de techniques exhaustives, calculs linéaires, parcours de graphes quand à elles, aboutissent à une explosion combinatoire lorsque le nombre d'avions augmente. Parmi les études, on distingue différentes approches :

- les approches d'automatisations globales. On distingue : d'une part les projets basés sur des algorithmes géométriques avec [14] utilisant des tubes 4D et [22], [21], [23] avec une organisation de filtres successifs de la prérégulation à la résolution de conflits de deux avions ; et d'autre part les projets utilisant des techniques stochastiques ayant un soucis de résolutions et d'optimisations globales ([16], [12], [20]), des moments magnétiques ([24],[2],[19]), des réseaux de neurones ([13]).

- des approches “systèmes experts” comme [6], [1], pour la résolution de conflits à deux avions. Citons [18], [5] et [15] une application de l’apprentissage symbolique qui montre que les modèles logiques doivent être réduits pour pouvoir être exploitables en temps réel.

La première catégorie présente l’inconvénient de ne pas proposer des solutions acceptables pour les contrôleurs, car trop éloignées de leurs habitudes. C’est une condition nécessaire pour intégrer des outils d’aides à la décision dans leur environnement de travail. La deuxième catégorie ne répond pas au problème général de résolution de conflits à  $n$  avions.

C’est sur ce dernier problème que nous présentons cette contribution. Dans le cadre de l’étude de ces règles de résolutions utilisées par les contrôleurs aériens, nous avons construit un ensemble de figures géométriques composées de deux trajectoires horizontales d’avions en conflits. Les contrôleurs considèrent deux situations géométriques auxquelles ils se ramènent systématiquement : les deux trajectoires se croisent sur un point ou sur un segment. Un nombre important de figures a été réalisé dans un objectif d’étude systématique.

Dans le premier cas les trajectoires sont constituées de deux segments reliés par un *point tournant*. Les deux trajectoires se croisent sur leur point tournant, point commun appelé *point de croisement*. Dans le deuxième cas les trajectoires sont constituées de trois segments, reliés par deux points tournants. Le segment central des deux trajectoires est commun et est appelé *le segment de croisement*. On pourra trouver une présentation des ces figures et des résolutions associées dans [17], [9] et [10].

L’objet de ce papier est de présenter un *formalisme en logique du premier ordre* permettant de modéliser les situations de conflit et l’expertise des contrôleurs. En ce qui concerne ce dernier point nous manipulerons principalement des règles de productions de la forme :

*Description spatio-temporelle d’un conflit*  $\rightarrow$  *Action(s)*.

En effet les raisonnements des contrôleurs, pour résoudre les conflits aériens, peuvent être décomposés suivant deux parties distinctes : l’*identification* du conflit ; la résolution. L’*identification* consiste, une fois le conflit détecté, à comprendre sa nature géométrique et temporelle. Ici intervient l’expérience des contrôleurs : ce sont eux qui indiquent les angles pertinents, les cas des décalages temporels entre les avions au point de croisement et les différentes vitesses relatives qu’il faut retenir.

Ensuite, suivant la nature du conflit, une ou plusieurs actions seront décidées pour résoudre le conflit. Ces actions sont également dictées par les contrôleurs. Elles correspondent aux actions utilisées en règle générale. Nous considérerons donc naturellement que la partie *identification* correspond à la partie prémisses des règles, et la partie conclusion correspond à la partie *action* des règles.

Précisons que ces règles ne seront appliquées qu’une seule fois pour un conflit donné c’est à dire un couple d’avions. L’expertise recueillie est déterministe.

Ce document s’organise comme suit. La *description de la situation* est une expression en logique du premier ordre exprimée à l’aide des prédicats présentés dans le paragraphe suivant. Les *actions* sur les avions sont des manœuvres de

résolution du conflit. Elles sont présentées, dans le paragraphe 5 page 5.

Nous présentons enfin l’ensemble des axiomes nécessaires à un système logique de *résolution qualitative de conflits à  $n$  avions*. Pour cela, ce système logique applique des règles d’expertise à tous les couples d’avions parmi  $n$ . Ces résolutions indépendantes concernant des couples sont ensuite associées pour obtenir une résolution globale sur  $n$  avions. Il assure en même temps le maintien de la cohérence de la résolution globale. Nous donnons un exemple de fonctionnement de ce *mécanisme de résolution globale* à la fin de ce document. Dans le reste du papier, nous serons amenés à manipuler les ensembles suivants :

- L’ensemble des avions considérés est noté  $\mathcal{A} = \{1 \dots n\}$ , où  $1, 2 \dots$  sont les identifications des avions, et  $n$  le nombre d’avions en conflit.
- L’ensemble des valeurs qualitatives de description géométrique est noté  $\mathcal{M} = \{G, D, P\}$ . Par commodité nous noterons  $\mathcal{M}'$  l’ensemble  $\{G, D\}$ , sous-ensemble trivial de  $\mathcal{M}$ . L’atome  $G$  indique l’orientation gauche, l’atome  $D$  indique l’orientation droite et l’atome  $P$  indique l’orientation définie par défaut.
- L’ensemble des éléments géométriques définissant le croisement de deux avions est noté  $\mathcal{C} = \{S, PT\}$ . L’atome  $S$  indique le segment et l’atome  $PT$  indique le point.
- Enfin les atomes du sens de déplacement sont notés respectivement  $MS$ , pour l’atome indiquant le *même sens* et  $SI$ , pour l’atome indiquant le *sens inverse*. L’ensemble  $\{MS, SI\}$  sera noté  $S$ .

## 2 Prédicats de descriptions des situations de conflits

Deux catégories de prédicats sont distinguées : les prédicats purement géométriques et les prédicats à caractère temporel.

Précisons que dans la réalité la trajectoire d’un avion  $i$  en forme de droite brisée, évoquée ci-dessus est un tronçon de la *trajectoire complète*. Celle-ci, étant définie par le cheminement de l’avion du décollage jusqu’à l’atterrissage, est appelée *plan de vol*. Le tronçon du plan vol, sur lequel nous considérons les avions est appelé *trajectoire initiale* des avions. Elle sera composée d’un premier *segment d’entrée*, le segment  $[E_i, C]$  et d’un deuxième *segment de sortie*, le segment  $[C, S_i]$ . Rappelons que cette trajectoire est la route prévue par l’avion avant décollage. Le plan de vol est souvent différent de la route effectivement suivie, en cas de déroutement dû à un conflit par exemple.

### 2.1 Les éléments géométriques

Du fait de l’expertise retenue, nous considérons deux types de trajectoires d’avions : la trajectoire en deux segments et les trajectoires en trois segments. La combinaison de ces deux types de trajectoires donnent trois types de couples à considérer :

1. Les couples d'avions ayant des trajectoires composées chacune de deux segments. Cette catégorie est appelée les couples deux segments.
2. Les couples d'avions ayant des trajectoires composées chacune de trois segments. Cette catégorie est appelée les couples trois segments.
3. Les couples d'avions mixtes, ayant des trajectoires composées chacune de deux segments et de trois segments. Cette catégorie est appelée les couples mixtes.

Nous allons présenter respectivement ces trois types de couples, et les éléments géométriques pertinents qu'il faudra retenir dans notre langage logique descriptif. Nous supposons que les avions  $i$  et  $j$  sont en conflit.

**Les couples deux segments.** Les situations géométriques étudiées sont définies par les éléments suivants :

1. deux avions  $i$  et  $j \in \mathcal{A}$ ,
2. un point de croisement des deux avions, noté  $C$ ,
3. une trajectoire par avion définie par :
  - un point de position initiale, noté respectivement pour l'avion  $i$  et l'avion  $j$ ,  $E_i$ , et  $E_j$ .
  - un point de sortie, noté respectivement pour l'avion  $i$  et l'avion  $j$ ,  $S_i$ , et  $S_j$ .
  - les avions se déplacent de leur position initiale  $E$ , vers leur point de sortie,  $S$ .

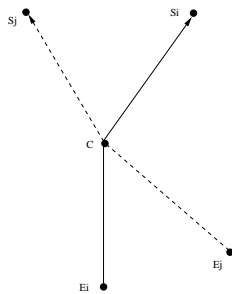


Figure 1: Exemple d'un croisement deux segments

**Les couples trois segments.** Les figures géométriques étudiées sont définies par les éléments suivants :

1. deux avions  $i$  et  $j \in \mathcal{A}$ ,
2. un segment de croisement des deux avions, noté  $S$ ,
3. une trajectoire par avion définie par un droite brisée constituée de trois segments :
  - un point de position initiale, noté respectivement pour l'avion  $i$  et l'avion  $j$ ,  $E_i$ , et  $E_j$ .
  - un point d'entrée dans le segment de croisement, noté respectivement pour l'avion  $i$  et l'avion  $j$ ,  $ES_i$ , et  $ES_j$ .
  - un point de sortie du segment de croisement, noté respectivement pour l'avion  $i$  et l'avion  $j$ ,  $SS_i$ , et  $SS_j$ .

- un point de sortie de la trajectoire, noté respectivement pour l'avion  $i$  et l'avion  $j$ ,  $S_i$ , et  $S_j$ .
- les avions se déplacent de leur position initiale  $E$ , vers leur point de sortie,  $S$ .

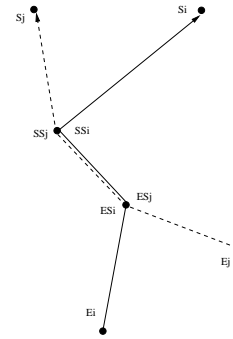


Figure 2: Exemple d'un croisement trois segments

**Les couples mixtes.** Comme décrit en introduction de ce paragraphe, l'existence de deux types de trajectoires conduit naturellement à envisager les conflits mixtes, illustrés dans la figure 3, constitués d'un avion ayant une trajectoire composée de deux segments et d'un avion ayant une trajectoire composée de trois segments.

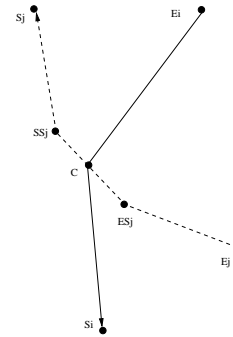


Figure 3: Exemple d'un croisement mixte

L'expertise n'est pas disponible pour ce type de croisement, cependant il apparaît possible de transformer la figure 3 pour obtenir un croisement sur un point, telle que la figure 4. Après transformation nous nous ramenons à un type de croisement dont l'expertise est connue. Nous nous proposons de transformer systématiquement ces croisements pour les besoins de la résolution qualitative présentée dans cette étude.

Remarquons pour finir que cette transformation considère implicitement un point de croisement. La présence de plusieurs avions deux segments avec plusieurs avions trois segments impose donc aux trajectoires des avions qu'il n'y ait qu'un seul point de croisement. Il est donc commun à tous les avions deux segments. Cette restriction à ce type de figures n'est pas contraignant dans le mesure où la présence de plusieurs points de croisements induirait plusieurs conflits séparés géométriquement, traités à part, et ne contenant qu'un seul point de croisement.

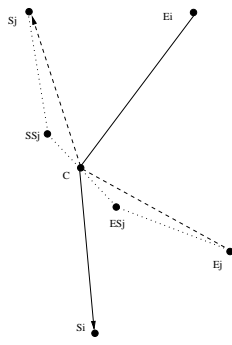


Figure 4: Transformation du croisement sur un segment en croisement sur un point

## 2.2 Prédicats géométriques

Nous présentons les prédicats nécessaires pour la description des trois types de situations géométriques, figures 1, 2 et 3.

- Nous définissons le prédicat  $CONFLIT(i, j)$ , qui indique si les avions  $i$  et  $j$  sont en conflit.
- $CROISEMENT(i, j)$  est vrai si le croisement entre les deux avions  $i$  et  $j$  suit la condition suivante : le point  $S_i$  est dans le demi-plan opposé au demi-plan contenant le point  $E_i$ , demi-plans définis par les deux segments  $E_jC$  et  $CS_j$ , définissant le tronçon de la trajectoire de l'avion  $j$ .
- $SENS(i, j, e, s)$  indique que le croisement entre les avions  $i$  et  $j$  est sur un élément géométrique  $e$  avec  $e \in \{S, PT\}$  et de sens  $s$  avec  $s \in \{MS, SI\}$ . Considérer le sens des avions n'a de raison d'être uniquement pour les conflits sur un point et sans franchissement des trajectoires d'une part, et d'autre part pour les croisements sur un segment. Le sens des avions se croisant sur un point lorsque il y a franchissement des trajectoires n'a pas de signification.
- $POSITION(i, G, j)$  est le prédicat désignant la position relative des avions  $i$  et  $j$  avant le point de croisement  $C$  ou le segment de croisement  $S$  suivant le cas. Il indique que l'avion  $i$  est à gauche de l'avion  $j$  avant le point de croisement  $C$ , respectivement le segment de croisement  $S$ , compte tenu de leur sens de déplacement. Le cas symétrique :  $POSITION(i, D, j)$ , indiquant que l'avion  $i$  est à droite de l'avion  $j$  avant le point de croisement  $C$ , respectivement le segment de croisement  $S$ .
- Dans le cas de couples deux segments, après le point de croisement  $C$ , compte tenu du sens de déplacement, la trajectoire initiale d'un avion  $i$  est formalisée par le prédicat  $TOURNE(i, m)$  avec  $m \in \{G, P, D\}$ . Le premier segment temporellement sur lequel l'avion se déplace est appelé le *segment d'entrée*, et le deuxième segment atteint par l'avion est appelé le *segment de sortie*. Les configurations possibles sont :

1. La trajectoire initiale a le segment de sortie dans le demi-plan de droite après le point de croisement, demi-plan définie par la droite passant par

le segment d'entrée de la trajectoire initiale. On caractérise ce type de trajectoire par le prédicat :

$$TOURNE(i, D)$$

2. La trajectoire initiale tourne a le segment de sortie dans le demi-plan de gauche après le point de croisement, demi-plan définie par la droite passant par le segment d'entrée de la trajectoire initiale. On caractérise ce type de trajectoire par le prédicat :

$$TOURNE(i, G)$$

3. La trajectoire initiale est rectiligne après le point de croisement, les segments d'entrée et de sortie sont colinéaires. On caractérise ce type de trajectoire par le prédicat :

$$TOURNE(i, P)$$

En l'absence de prédicat caractérisant une trajectoire, la trajectoire *rectiligne* sera considérée comme la trajectoire par défaut.

## 2.3 Prédicat temporel

Du fait de l'expertise retenue, nous considérons le prédicat décrivant une propriété temporelle suivant :

- $PREMIER(i, j)$  est vrai si l'expert considère les estimés de passages des avions  $i$  et  $j$  au point de croisement comme décalées.

## 2.4 Prédicat supplémentaire

Le temps est un paramètre simplifié à l'extrême par les contrôleurs, lorsqu'ils mettent en œuvre leurs résolutions. Ils considèrent deux ordres de passages différents entre deux avions en leur lieu de croisement : passage simultané ; passage séquentiel. Nous retiendrons donc ces deux seuls éléments dans notre langage descriptif.

Pour une facilité d'écriture nous définissons le prédicat temporel suivant :

- $SIMUL(i, j)$  est vrai si l'expert considère les estimés de passages des avions  $i$  et  $j$  au point de croisement comme équivalents.

## 3 Formalisation des situations de conflits

Chaque règle est écrite sous forme d'une implication. La partie prémisses est décomposée en deux sous-expressions logiques :

1. l'expression de la *Situation Géométrique*, notée  $SG$  qui est une description d'une interaction géométrique entre deux avions à l'aide des prédicats précédents ;
2. l'expression de l'*ordre de passage* des avions au point de croisement  $C$ .

La partie conclusion des règles est l'ensemble des manœuvres qui sont suffisantes pour la résolution du problème exprimé en partie condition. Cette partie sera présentée dans un paragraphe particulier. Nous allons présenter l'ensemble exhaustif des prémisses acceptés.

### 3.1 Croisements deux segments, avec franchissement des trajectoires

Soit un couple d'avions  $i, j \in \mathcal{A}$ . Supposons que nous ayons :  $POSITION(i, m, j)$ . Le nombre de cas possibles correspond au nombre de combinaisons possibles de la formule :

$$\forall s \in \mathcal{S}, \forall i, j \in \mathcal{A} \text{ avec } i \neq j, \forall m, m' \in \mathcal{M}, \forall n \in \mathcal{M}', \\ POSITION(i, n, j) \wedge SENS(i, j, PT, s) \wedge \\ CROISEMENT(i, j) \wedge TOURNE(i, m) \wedge \\ TOURNE(j, m')$$

La combinatoire porte sur l'expression  $TOURNE(i, m) \wedge TOURNE(j, m')$ . Compte tenu du fait que les avions  $i$  et  $j$  jouent le même rôle, il existe pour cette expression neuf instanciations possibles avec  $m, m' \in \mathcal{M}$ , numérotées de 1 à 9.

### 3.2 Croisements deux segments, sans franchissement des trajectoires

Les formules considérées sont de la forme :

$$\forall s \in \mathcal{S}, \forall i, j \in \mathcal{A} \text{ avec } i \neq j, \\ SENS(i, j, PT, s) \wedge \neg CROISEMENT(i, j)$$

Le nombre total d'instanciations de cette formule, en ajoutant les deux ordres de passages au point de croisement, est de quatre. Elles sont numérotées de 10 à 13.

### 3.3 Les croisements trois segments

Le nombre total de situations de croisements trois segments correspond au nombre de combinaisons possibles des prédicats  $SENS(i, j, S, s)$  avec le franchissement et le non franchissement des trajectoires et compte tenu de deux ordres de passages au point de croisement. Le nombre total est donc de huit instanciations possibles, numérotées de 14 à 21.

### 3.4 Combinatoire totale

Les situations géométriques sont mutuellement exclusives. En effet, un couple d'avions d'un conflit donné, correspondra au plus à une situation géométrique. Les neuf premières situations géométriques, croisements sur un point avec franchissement de trajectoires, couvrent l'ensemble du plan, modulo  $2\pi$ . Un couple d'avions en conflit sur un croisement deux segments, avec franchissement des trajectoires, correspondra donc au moins à une situation géométrique répertoriée.

Les quatre situations géométriques du paragraphe 3.2, concernent les croisements sur un point sans franchissement des trajectoires. L'ensemble du plan est également couvert, modulo  $2\pi$ . Ainsi pour tous couples d'avions coplanaires se

croisant sur un point et entrant dans cette catégorie de croisement, il existera une règle descriptive parmi les règles de 3.2.

Enfin, les huit dernières situations possibles des croisements trois segments (paragraphe 3.3) couvrent le plan, modulo  $2\pi$ . Les prémisses étant mutuellement exclusives, il existera une et une seule règle à tout couple d'avions correspondant à ce type de croisement.

Ces trois ensembles de règles ci-dessus forment un ensemble combinatoire où chaque prémisses est en exclusion mutuelle avec les autres et recouvrent tout le plan modulo  $2\pi$ . Ainsi, pour un couple d'avions d'un conflit plan donné, il ne sera possible d'inférer qu'une et une seule règle d'expertise pour la résolution.

## 4 Les actions sur les avions

Les actions sur les avions, associées aux différentes situations géométriques, ont pour objectif de résoudre le conflit entre les avions en présence. Conformément à l'expertise, les actions possibles sur un avion  $i$  sont de trois types et correspondent dans la réalité à des évolutions horizontales :

1. le prédicat  $MANOEUVRE(i, D)$  correspond à l'action de faire virer l'avion  $i$  à droite, par rapport à son sens de déplacement ;
2. le prédicat  $MANOEUVRE(i, G)$  correspond à l'action de faire virer l'avion  $i$  à gauche, par rapport à son sens de déplacement.
3. l'avion persiste sur sa trajectoire définie dans  $SG$  :  $MANOEUVRE(i, P)$ . En l'absence de prédicat de manœuvre, la trajectoire *initiale* sera considérée comme la trajectoire par défaut.

Nous rajoutons le prédicat  $DIRECT(i, G)$ , qui indique que l'avion  $i$  a la possibilité de faire une manœuvre à gauche de *mise en directe* sur le point de sortie  $S_i$ . Le prédicat  $DIRECT(i, D)$  indique que l'avion  $i$  a la possibilité de faire une manœuvre à *droite* de *mise en directe* sur le point de sortie  $S_i$ .

## 5 Les axiomes

Les *axiomes* sont divisés en trois catégories :

- les axiomes de *dépendances* entre prédicats ;
- les axiomes de l'*expertise* ;
- les axiomes de *manœuvres compatibles*.

### 5.1 Les axiomes de dépendances entre prédicats

Nous noterons  $\oplus$  l'opération *ou exclusif* de la logique classique. Soient  $\forall i, j \in \mathcal{A}$  avec  $i \neq j, \forall m, m' \in \mathcal{M}'$  avec  $m \neq m'$ ,

- Axiome de symétrie géométrique du prédicat  $POSITION$  :

$$POSITION(i, m, j) \oplus POSITION(i, m', j) \quad (1)$$

$$POSITION(i, m, j) \leftrightarrow POSITION(j, m', i) \quad (2)$$

- Axiomes de symétrie géométrique du prédicat *SENS* :

$$\forall e \in \mathcal{C}, \forall s \in \mathcal{S}, \quad SENS(i, j, e, s) \leftrightarrow SENS(j, i, e, s) \quad (3)$$

$$\forall e, e' \in \mathcal{C} \text{ avec } e \neq e', \forall s, s' \in \mathcal{S} \text{ avec } s \neq s', \quad SENS(i, j, e, s) \oplus SENS(i, j, e', s') \quad (4)$$

- Axiome de définition du prédicat *DIRECT* :

$$\forall m \in \mathcal{M}, \quad MANOEUVRE(i, m) \wedge TOURNE(i, m) \rightarrow DIRECT(i, m) \quad (5)$$

- Propriété d'exclusivité du prédicat *TOURNE* :

$$(TOURNE(i, G) \oplus TOURNE(i, D) \oplus TOURNE(i, P)) \quad (6)$$

- Relation entre le prédicat *SIMUL* et *PREMIER* :

$$\neg PREMIER(i, j) \wedge \neg PREMIER(j, i) \leftrightarrow SIMUL(i, j) \quad (7)$$

- Relation entre les prédicats *CONFLIT* et *SIMUL* :

$$SIMUL(i, j) \rightarrow CONFLIT(i, j) \quad (8)$$

- Propriété d'exclusivité du prédicat *MANOEUVRE* :

$$(MANOEUVRE(i, D) \oplus MANOEUVRE(i, G) \oplus MANOEUVRE(i, P)) \quad (9)$$

- Axiome d'interdiction du face à face entre avions :

$$\forall m, m' \in \mathcal{M}', m \neq m', \quad MANOEUVRE(i, m) \wedge POSITION(i, m', j) \rightarrow \neg MANOEUVRE(j, m') \quad (10)$$

- Axiome d'interdiction du statu quo :

$$MANOEUVRE(i, P) \rightarrow \neg MANOEUVRE(j, P) \quad (11)$$

## 5.2 Formalisation des raisonnements

Les raisonnements se décomposent en deux parties. En premier lieu le contrôleur détermine les manœuvres nécessaires et suffisantes pour résoudre un couple d'avions en conflit. Ensuite, compte tenu de ces manœuvres de résolutions, certains avions peuvent être autorisés à réaliser des manœuvres compatibles, qui ne sont là que pour améliorer la résolution globale, en raccourcissant les trajectoires quand cela est possible.

**Axiomes de résolutions.** Les axiomes d'expertise de *production de solutions de résolutions* indiquent en partie conclusion les manœuvres qualitatives nécessaires et suffisantes pour résoudre le conflit : soit les neuf situations géométriques du paragraphe 3 page 4, soient  $i, j \in \mathcal{A}$ . Les prédicats *CONFLIT* ( $i, j$ ) et *POSITION* ( $i, m, j$ ) appartenants à toutes les règles ci-dessous, ont été volontairement omis. Il faudra donc les considérer implicitement à chaque fois.

$$\forall i, j \in \mathcal{A} \text{ avec } i \neq j, \forall m, m' \in \mathcal{M}' \text{ avec } m \neq m',$$

$$\mathbf{A1} \quad \forall e \in \mathcal{C}, \quad PREMIER(i, j) \wedge SENS(i, j, e, MS) \wedge CROISEMENT(i, j) \rightarrow MANOEUVRE(j, m)$$

$$\mathbf{A2} \quad \forall e \in \mathcal{C}, \quad SIMUL(i, j) \wedge SENS(i, j, e, MS) \wedge (\neg TOURNE(j, m') \vee TOURNE(i, m)) \rightarrow MANOEUVRE(i, m') \vee MANOEUVRE(j, m)$$

$$\mathbf{A3} \quad SIMUL(i, j) \wedge SENS(i, j, PT, MS) \wedge TOURNE(j, m') \wedge \neg TOURNE(i, m) \rightarrow MANOEUVRE(i, m') \vee MANOEUVRE(j, m) \vee MANOEUVRE(j, m')$$

$$\mathbf{A4} \quad \neg CROISEMENT(i, j) \wedge PREMIER(i, j) \wedge \neg SENS(i, j, S, SI) \rightarrow MANOEUVRE(i, m) \vee MANOEUVRE(j, m) \vee MANOEUVRE(j, m')$$

$$\mathbf{A5} \quad SIMUL(i, j) \wedge (\neg CROISEMENT(i, j) \vee CROISEMENT(i, j) \wedge SENS(i, j, S, SI)) \rightarrow MANOEUVRE(i, m) \vee MANOEUVRE(i, m') \vee MANOEUVRE(j, m) \vee MANOEUVRE(j, m')$$

$$\mathbf{A6} \quad SENS(i, j, S, SI) \wedge \neg CROISEMENT(i, j) \wedge PREMIER(i, j) \rightarrow MANOEUVRE(i, m) \vee MANOEUVRE(i, m') \vee MANOEUVRE(j, m')$$

$$\mathbf{A7} \quad SENS(i, j, S, SI) \wedge \neg CROISEMENT(i, j) \wedge PREMIER(i, j) \rightarrow MANOEUVRE(i, m) \vee MANOEUVRE(i, m') \vee MANOEUVRE(j, m)$$

**Axiomes de manœuvres compatibles.** Les axiomes de *manœuvres compatibles* indiquent les manœuvres possibles, pour les avions non manœuvrés, compte tenue des manœuvres de résolutions. Ces axiomes sont donc appliqués après les axiomes de résolutions. Le prédicat *CONFLIT* ( $i, j$ ) appartenant à toutes les règles ci-dessous, a été volontairement omis pour alléger l'écriture de chaque règle.

$$\forall i, j \in \mathcal{A} \text{ avec } i \neq j, \forall m, m' \in \mathcal{M}' \text{ avec } m \neq m',$$

**C1**  
 $(CROISEMENT(i, j) \wedge \neg SENS(i, j, PT, SI)) \vee$   
 $(SENS(i, j, e, SI) \wedge \neg CROISEMENT(i, j))$   
 $\wedge MANOEUVRE(i, m) \rightarrow$   
 $MANOEUVRE(i, m) \vee$   
 $(MANOEUVRE(i, m) \wedge MANOEUVRE(j, m))$

**C2**  
 $\forall e \in C, SENS(i, j, e, MS) \wedge \neg CROISEMENT(i, j) \wedge$   
 $POSITION(i, m, j) \wedge MANOEUVRE(i, m) \rightarrow$   
 $MANOEUVRE(i, m) \vee$   
 $(MANOEUVRE(i, m) \wedge MANOEUVRE(j, m)) \vee$   
 $(MANOEUVRE(i, m) \wedge MANOEUVRE(j, m'))$

**C3**  
 $\forall e \in C, SENS(i, j, e, MS) \wedge \neg CROISEMENT(i, j) \wedge$   
 $POSITION(i, m, j) \wedge MANOEUVRE(i, m') \rightarrow$   
 $MANOEUVRE(i, m') \vee$   
 $(MANOEUVRE(i, m') \wedge MANOEUVRE(j, m'))$

## 6 Algorithme

La formalisation de situations de conflits entre plusieurs avions produit une base de clauses dont on cherche les modèles. Nous avons appliqué deux stratégies pour résoudre ce problème. La première stratégie est présentée ci-dessous et utilise la résolution. La deuxième stratégie consiste à traduire les clauses du premier ordre en calcul propositionnel et à utiliser les outils de résolution de SAT. Dans ce cas on élimine les règles de manœuvres compatibles (voir paragraphe 8).

Nous allons présenter le fonctionnement du module de résolution d'un conflit de  $n$  avions. Il est basé sur les règles précédentes et sur les mécanismes d'inférences classiques ([7]), et se décompose en les étapes suivantes :

1. La première étape consiste à produire l'expertise de résolution pour les  $C_n^2$  couples de  $n$  avions. Pour chaque couple : un des deux avions est manœuvré et l'autre conserve sa trajectoire initiale. Cette manœuvre résout à elle seule le conflit entre les deux avions d'après l'expertise, abstraction faite des autres avions du conflit de départ.

Pour chaque couple d'avions, le moteur infère une ou plusieurs manœuvres où les prédicats de persistance sont omis volontairement, c'est à dire les prédicats de la forme  $f(\dots, P, \dots)$  où  $f$  est un prédicat quelconque de notre langage logique, ayant une place prenant valeur dans  $\mathcal{M}$ . Ce sera la valeur par défaut qui sera considérée en l'absence de toute autre indication. Par exemple, en l'absence d'action sur un avion  $i$  dans une expression logique donnée, la manœuvre *par défaut* sera la manœuvre  $MANOEUVRE(i, P)$ .

2. POUR chaque couples d'avions FAIRE Augmenter les manœuvres de résolutions par les manœuvres autorisées pour les avions non manœuvrés. FIN POUR
3. Soit la liste des manœuvres résultant des deux étapes précédentes. Chaque élément de cette liste est une formule. À ce stade de l'algorithme, nous avons une telle formule par couple d'avions. La longueur de la liste est donc  $C_n^2$ . Le regroupement de l'expertise des  $C_n^2$  couples est réalisé en faisant la conjonction de tous

les éléments de la liste<sup>1</sup>, puis en transformant la formule obtenue en DNF par un algo de type *force brute* intégrant trois types de simplifications :

4. Trois simplifications dues à l'expertise interviennent à ce stade sur l'expression obtenue ci-dessus, dans l'ordre suivant :
  - (a) Élimination des formules redondantes.
  - (b) Application de l'axiome 10 de compatibilité des manœuvres entre avions.
  - (c) Application de l'axiome 9 d'unicité de la trajectoire que peut prendre un avion donné après son point de croisement.
5. Application de l'axiome 5 sur l'expression finale pour le calcul des mises en directes.

Chaque conjonction est un ensemble de manœuvres résolvant le conflit.

## 7 Exemple de résolution

Nous allons présenter une résolution complète et appliquer le langage logique un exemple de conflit, illustré par la figure 5. La situation géométrique est formalisée avec notre langage logique descriptif. Puis l'expertise de résolution est produite et enfin les règles de cohérences sont appliquées pour obtenir la *résolution globale* du conflit.

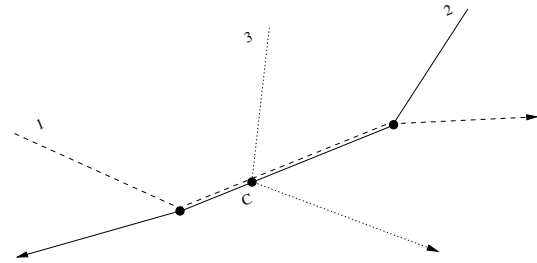


Figure 5: Exemple d'un conflit à résoudre

La figure 5 illustre la géométrie des trajectoires des avions en conflit. De plus, l'ordre temporel des avions au point de croisement  $C$  est le suivant : l'avion 1 arrive au point de croisement avant l'avion 3 et qu'il arrive dans le segment avant l'avion 2. Les avions 2 et 3 sont considérés comme simultanés.

### 7.1 Représentation logique du conflit

Le conflit ci-dessus est décomposé en trois couples d'avions : (1, 2), (1, 3) et (2, 3).

Le couple composé des avions 1 et 2, noté (1, 2), est un croisement sur un segment avec franchissement des trajectoires et en sens inverse. Nous avons donc les faits  $CROISEMENT(1, 2)$  et  $SENS(1, 2, S, SI)$ .

Le couple (1, 3) est un croisement sur un point avec franchissement des trajectoires. Nous avons donc les faits  $CROISEMENT(1, 3)$  et  $SENS(1, 3, PT, MS)$ . La forme de la trajectoire de l'avion 1 relativement au point de croisement  $C$  est  $TOURNE(1, G)$ .

<sup>1</sup>On peut faire en sorte que la formule résultante soit en CNF.



Le couple (2, 3) est un croisement sur un point avec franchissement des trajectoires. Nous avons donc les faits  $CROISEMENT(2, 3)$  et  $SENS(2, 3, PT, s)$ . La forme de la trajectoire de l'avion 1 relativement au point de croisement  $C$  est  $TOURNE(1, G)$ .

Enfin la forme de la trajectoire de l'avion 3 est  $TOURNE(3, G)$ .

D'après la figure 5, les positions relatives des avions sont les suivantes :

- $POSITION(1, D, 3)$
- $POSITION(1, D, 2)$
- $POSITION(3, D, 2)$

Les prédicats temporels indiquants les ordres de passages, compte tenu des hypothèses sont :

- $PREMIER(1, 2)$
- $SIMUL(1, 3)$
- $SIMUL(2, 3)$

Ces faits sont rajoutées à notre base de clauses.

## 7.2 Actions de résolutions

Les formules du premier ordre décrivant respectivement les situations spatio-temporelles des couples sont les suivantes :

- $SENS(1, 2, S, SI) \wedge CROISEMENT(1, 2) \wedge PREMIER(1, 2)$
- $SENS(1, 3, PT, MS) \wedge CROISEMENT(1, 3) \wedge PREMIER(1, 3)$
- $SENS(2, 3, PT, s) \wedge CROISEMENT(2, 3) \wedge PREMIER(2, 3)$ , où  $s$  est un élément de  $(MS, SI)$ .

Les actions de résolutions :

- En appliquant l'axiome 6 on obtient pour le couple (1, 2) les manœuvres suivantes :  $MANOEUVRE(1, D) \vee MANOEUVRE(1, G) \vee MANOEUVRE(2, G)$ .
- En appliquant l'axiome 1 on obtient pour le couple (1, 3) les manœuvres suivantes :  $MANOEUVRE(3, D)$ .
- En appliquant l'axiome 2 on obtient pour le couple (2, 3) les manœuvres suivantes :  $MANOEUVRE(3, G) \vee MANOEUVRE(3, D)$ .

## 7.3 Manœuvres compatibles

Après avoir calculé les manœuvres suffisantes pour résoudre le conflit, nous allons inférer les manœuvres compatibles :

- En appliquant l'axiome 1 on obtient pour le couple (1, 2) les manœuvres suivantes :

$$\begin{aligned} &MANOEUVRE(1, D) \vee \\ &(MANOEUVRE(1, D) \wedge \\ &MANOEUVRE(2, D)) \vee \\ &MANOEUVRE(1, G) \vee \\ &MANOEUVRE(2, G) \vee \\ &(MANOEUVRE(2, G) \wedge \\ &MANOEUVRE(1, G)) \end{aligned}$$

- En appliquant l'axiome 1 on obtient pour le couple (1, 3) les manœuvres suivantes :

$$\begin{aligned} &MANOEUVRE(3, D) \vee \\ &(MANOEUVRE(3, D) \wedge \\ &MANOEUVRE(1, D)) \end{aligned}$$

- En appliquant l'axiome 1 on obtient pour le couple (2, 3) les manœuvres suivantes ::

$$\begin{aligned} &MANOEUVRE(3, G) \vee \\ &(MANOEUVRE(3, G) \wedge \\ &MANOEUVRE(2, G)) \vee \\ &MANOEUVRE(2, D) \vee \\ &(MANOEUVRE(2, D) \wedge \\ &MANOEUVRE(3, D)) \end{aligned}$$

## 7.4 La résolution

La transformation en DNF de la conjonction des trois ensembles de manœuvres ci-dessus donne l'ensemble des résolutions suivantes :

$$\begin{aligned} &(MANOEUVRE(1, D) \wedge \\ &MANOEUVRE(2, D) \wedge \\ &MANOEUVRE(3, D)) \vee \\ &(MANOEUVRE(2, D) \wedge \\ &MANOEUVRE(3, D)) \end{aligned}$$

qui donne deux ensembles de manœuvres pour résoudre le conflit.

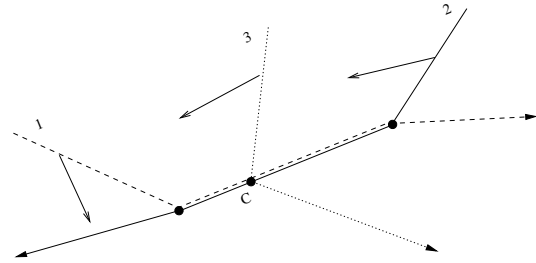


Figure 6: Résultat de la résolution

## 8 Liens avec le problème SAT

L'étape 3 de l'algorithme de résolution consiste à transformer une formule écrite de CNF en DNF. Ce problème a une complexité exponentielle et c'est la phase la plus coûteuse des calculs. Cependant des algorithmes rapides basés sur la procédure de Davis et Putnam existent comme par exemple

ceux développés par Castell et Cayrol [11]. De tels outils sont applicables ici modulo quelques adaptations. Nous reprenons dans la suite les notations de [11] et [4].

Tout littéral de la formule CNF est du type  $MANOEUVRE(i, m)$  où  $i$  et  $m$  sont instanciées respectivement dans les ensembles  $\{1..n\}$  et  $\{G, D\}$ . Ces littéraux peuvent être considérés comme des variables propositionnelles. Il est à noter que la formule CNF ne contient aucun littéraux négatifs. Nous redéfinissons certains termes :

- Le complémentaire d'un littéral  $l$  représentant une Manœuvre  $m \in \{D, G\}$  est le littéral représentant la Manœuvre inverse  $m' \in \{D, G\} \setminus \{m\}$ .
- Deux littéraux  $l$  et  $l'$  sont incompatibles s'ils sont interdits par l'axiome 10.
- Un ensemble de littéraux est non contradictoire s'il ne contient pas de littéraux complémentaires ni incompatibles.

Les définitions du produit unioniste et du produit unioniste global restent les mêmes, et on a :

**Proposition 1** : *L'ensemble des impliquants premiers de la formule CNF est égal à l'ensemble des Manœuvres minimales résolvant les conflits.*

**Preuve 1** : *D'après la proposition 1 de [11], si  $B$  est une base de clauses sous forme conjonctive on a :*

1.  $e \in \bigotimes_G B \Leftrightarrow e'$  est un impliquant premier de  $B$   
*si  $e$  est un impliquant premier alors  $e \in \bigotimes_G B$ ,  $e$  est non contradictoire et minimal par construction, et  $e$  contient un littéral de chaque clause de  $B$ , donc une manœuvre résolvant chaque conflit. Par conséquent  $e'$  est une résolution globale et minimale de l'ensemble des conflits.*
2. *tout ensemble  $e$  de Manœuvres résolvant l'ensemble des conflits est une conjonction non contradictoire de littéraux provenant des disjonctions de Manœuvres des clauses d'expertise. Chacun de ces littéraux résout un conflit de l'ensemble des conflits. Donc  $e$  appartient au produit unioniste de  $B$ . Si  $e$  est minimal alors  $e$  est un impliquant premier.*

**Remarque 1** : *En supprimant la minimisation par rapport à la sous-sommation on calcule les impliquants de la formule CNF et donc tous les ensembles de Manœuvres résolvant les conflits.*

Les procédures de [11] sont donc applicables et donnent des algorithmes rapides pour résoudre l'étape 3 de notre méthode. De tels outils peuvent s'avérer utiles dans le cas d'un nombre important d'avions, c'est à dire d'une formule CNF ayant un grand nombre de littéraux.

Dans le même ordre d'idée, on peut utiliser les algorithmes rapides de recherche de modèles d'une base de clauses en logique propositionnelle (problème SAT) pour chercher les solutions de notre problème. En effet la modélisation produit une base de clauses en logique du premier ordre avec un domaine de valeurs réduit pour chaque variable. On peut donc transformer ce formalisme en une base de clauses propositionnelle. Les Manœuvres deviennent un ensemble de

trois variables propositionnelles  $\{iD, iG, iP\}$  pour chaque avion  $i$ . La clause d'exclusion mutuelle garantit que ces trois variables ne peuvent recevoir la valeur vraie en même temps.

Les modèles de la base de clause formées par les axiomes de dépendance entre prédicats correspondent chacun à un ensemble de manœuvres résolvant le conflit. Parmi ces modèles certains sont préférés ou considérés comme non souhaitables par les experts. Les axiomes de résolutions sont introduits pour éliminer ces derniers. Les procédures de type Davis et Putnam (voir [4]) donnent les interprétations avec les différentes possibilités d'instanciations des variables de Manœuvre résolvant l'ensemble des conflits, ce qui permet l'économie des règles de Manœuvres compatibles.

## 9 Conclusion

Une maquette a été réalisée à partir des règles précédentes. Le prototype est codé en *Prolog SICStus 2.1* ([3]). Les temps de réponse pour un conflit de 5 avions sont inférieurs à la seconde (voir le paragraphe suivant 9.1). Sur <http://www.cenatls.cena.dgac.fr/~lapasset> on trouvera des documents relatifs à l'utilisation d'outils SAT pour trouver les modèles d'une base de clauses formalisant un conflit à 3 avions.

Les travaux en cours consistent à valider les résultats obtenus avec le prototype par des contrôleurs aériens. Nous évaluons combien de types de conflits sont couverts par le prototype. Pour cela on utilise les différentes combinaisons possibles des configurations de couples d'avions reconnues par l'expertise pour établir l'ensemble des situations reconnues. A partir d'une étude de fréquences des situations de conflits d'un trafic aérien réel, on pourra évaluer le degré de recouvrement du prototype entre situations reconnues et situations réelles.

### 9.1 Complexité

La complexité algorithmique de notre approche peut-être évaluée. En effet, un conflit de  $n$  avions comporte  $\mathcal{C}_n^2$  couples d'avions. Chaque couple est associé à une règle. Prenons l'axiome de résolution qui génère le plus de littéraux. Appliquons ensuite l'axiomes de manœuvres compatibles générant le plus de littéraux. Nous pouvons donc avoir au total jusqu'à neuf littéraux pour un couple donné, c'est à dire neuf littéraux par clause et  $\mathcal{C}_n^2$  clauses. L'étape la plus coûteuse est la transformation CNF en DNF, qui nous conduit à une complexité en  $O(9^{n^2})$ .

### 9.2 Propositions d'extensions

Du fait de nombreuses hypothèses qualitatives sur les situations étudiées, les extensions possibles sont nombreuses. On pourra citer les principales extensions envisagées :

- Les avions d'un conflit donné, sont tous considérés comme étant en conflit. Et jusqu'à présent, les conflits considérés sont pris indépendamment du reste du trafic aérien. Si cela est possible, il est nécessaire parfois, pour la résolution, de prendre en compte un certain nombre d'avions non directement impliqués dans le conflit. L'élargissement de l'ensemble des avions en

conflit par la prise en compte d'avions *contraintes*. L'obtention de résolutions contextuelles permettrait de classer les avions et d'envisager par exemple deux niveaux de la fonction de filtrage des avions, du projet ERATO ([8]).

Plus généralement, il paraît souhaitable d'introduire une résolution avec contraintes de déplacements dues à la présence d'avions gênants et/ou dues à la présence d'une ou plusieurs zones d'espaces impénétrables (zone militaire, perturbation météorologique).

- La prise en compte de l'altitude permettra d'élargir aux situations suivantes :
  - lorsqu'une situation ne se résout pas par guidage radar, un ou plusieurs avions peuvent être changés de niveau ;
  - les décollage et atterrissage, induisent des intentions d'évolutions verticales. Ces intentions peuvent aider au choix du niveau destination, lorsqu'un avion doit libérer un niveau, suite à une résolution proposant une telle manœuvre.

## Bibliographie

- [1] Luc Angerand and Hervé Le Jeannic. Bilan du projet SAINTEX. Technical report, CENA, Mars 1992. R92009.
- [2] Jean Bourrely. Etude d'algorithmes d'évitement pour la navigation aérienne. Technical report, ONERA, octobre 1996. No 8/8944.
- [3] D.L Bowen, L. Byrd, F.C.N Pereira, L.M. Pereira, and D.H.D Warren. *SICStus Prolog User's Manual*. Swedish Institute of Computer Science, 2.1 edition, October 1991.
- [4] Thierry Castell. *Consistance et déduction en langage propositionnel*. Thèse de doctorat, Université Paul-Sabatier, Janvier 1997.
- [5] Annie Ceron. *Définition et implémentation d'un environnement de travail pour le système expert SALoME*. Mémoire, CNAM, December 1991.
- [6] C.Shively and K-B. Schwamb. AIRPAC : Advisor for the intelligent resolution of predicted aircraft conflicts. Technical report, The MITRE Corporation, October 1984. MTR-84W164.
- [7] Subrata Kumar Das. *Deductive Database and Logic Programming*. Addison-Wesley, 1992. ISBN 0-201-56897-7.
- [8] Pascal Deketelaere. Algorithmes de détections des interactions ERATO. Technical report, CENA, avril 1995. CENA/ERATO/N95-897.
- [9] Marcel Leroux et Laurent Lapasset. Expertise qualitative de résolutions de conflits plans à deux avions : le croisement sur un point. Technical report, IRIT/CENA, Février 1996. NR96-756.
- [10] Marcel Leroux et Laurent Lapasset. Expertise qualitative de résolutions de conflits plans à deux avions : le croisement sur un segment. Technical report, IRIT/CENA, Novembre 1996. NR97-501.
- [11] Thierry Castell et Michel Cayrol. Une nouvelle méthode de calcul des impliquants et des impliqués premiers. *CNPC'96*, mars 1996.
- [12] K.Bousson et P.Paglione. An optimal aircraft conflict resolution system based on hybrid models. In *ICAS Proceedings*, volume 5, pages 2065–2070. IAIAA, May 30 1996.
- [13] Gervais Gaudière. *Résolution de conflit par réseaux de neurones*. Rapport de DEA, ENAC, juillet 1995.
- [14] G.Dean, X.Fron, W.Miller, and J-P.Nicolaon. Arc 2000 : An investigation into the feasibility of automatic conflict detection and resolution. In *Air Traffic Control Quaterly*, volume 3, pages 229–259, 1996.
- [15] J.J.Cannat, G.Bisson, J.Sayous, and J.Goubert. Rapport final de la convention Iri/cena : PERSPICACE sur l'utilisation de l'apprentissage symbolique automatique pour la résolution de conflits. Technical report, CENA, Décembre 1988. R8821.
- [16] Laurent Lapasset. Algorithme génétique et recuit simulé pour la résolution de conflits ATC : implantation et optimisations. Technical report, CENA, Septembre 1993. N93778.
- [17] Laurent Lapasset. Étude de l'expertise de résolutions des contrôleurs aériens. Technical report, IRIT/CENA, décembre 1995. N95-802.
- [18] Mamede Lima-Marques. *De la connaissance à la paraconsistance : un modèle d'application pour la résolution des conflits aériens*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, December 1992.
- [19] Thierry Miquel. Présentation de la logique smacs. Technical report, CENA, juillet 1997. NT96939.
- [20] N.Durand. *Résolution optimale de conflits en route*. Thèse de doctorat, INTP, Mai 1996.
- [21] William P. Niedringhaus. Automated planning for aera 3 : Maneuver option manager. Technical report, FAA, April 1989. Final DOT/FAA/DS-89/21.
- [22] William P. Niedringhaus. A mathematical formulation for planning automated aircraft separations for aera 3. Technical report, FAA, April 1989. Final DOT/FAA/DS-89/20.
- [23] William P. Niedringhaus. Maneuver option manager : Automated simplification of complex air traffic control problems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 22(5):1047–1057, Sept/Oct 1992.
- [24] Karim Zeghal. *Vers une théorie de la coordination d'action. Application à la navigation aérienne*. Thèse de doctorat, Université Paris VI, 1994.