HAL
open science

ADAM : aide au duel aerien moderne : theorie des jeux differentiels et programmation symbolique appliquees au probleme de l'Amraam

Stephane Le Menec

To cite this version:

Stephane Le Menec. ADAM : aide au duel aerien moderne : theorie des jeux differentiels et programmation symbolique appliquees au probleme de l'Amraam. [Rapport de recherche] RR-2032, INRIA. 1993. inria-00074639

HAL Id: inria-00074639

https://inria.hal.science/inria-00074639

Submitted on 24 May 2006

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.

INRIA

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE

ADAM : Aide au Duel Aérien Moderne. Théorie des jeux différentiels et programmation symbolique appliquées au problème de l'Amraam.

Stéphane LE MÉNEC

N° 2032

Septembre 1993

PROGRAMME 2

Calcul symbolique,
programmation
et génie logiciel

Rapport de recherche

1993

ADAM : Aide au Duel Aérien Moderne. Théorie des jeux différentiels et programmation symbolique appliquées au problème de l'Amraam.

Stéphane LE MÉNEC

Programme 2 — Calcul symbolique, programmation et génie logiciel
Projet Secoia

Rapport de recherche n° 2032 — Septembre 1993 — 47 pages

Résumé : Le développement de nouveaux missiles à moyenne distance du type Mica/Amraam* accroît le nombre de phases d'un duel aérien et introduit de nouvelles stratégies de tir et d'évasion plus complexes. Nous présentons d'abord les duels à moyenne distance avant de les étudier sous la forme de sous-jeux différentiels. Puis nous expliquons comment développer un système d'aide à la décision grâce à des simulations réalisées avec des systèmes experts utilisant les barrières de sous-jeux différentiels.

(Abstract: pto)

*Missile d'Interception de Combat et d'Auto-défense/Advanced Medium Range Air to Air Missile

Unité de recherche INRIA Sophia-Antipolis
2004 route des Lucioles, BP 93, 06902 SOPHIA-ANTIPOLIS Cedex (France)
Téléphone : (33) 93 65 77 77 – Télécopie : (33) 93 65 77 65

ADAM : Decision Support System in Modern Aerial Duels. Theory of Differential Games and Symbolic Programming Applied to the Amraam Game.

Abstract: The improvement of guidance possibilities of the medium range missiles with new missiles like the Mica/Amraam increases the number of phases in aerial duels and implicates new shooting and escape strategies, which are more complexe. At the beginning, we describe what aerial medium range duels are, before studying them as differential sub-games. Then we explain how to carry out a decision support system with several simulations developed with expert systems techniques using barriers of differential sub-games.

Adam : Aide au Duel Aérien Moderne

Théorie des jeux différentiels et programmation symbolique appliquées au problème de l'Amraam[1]

Adam : Decision Support System in Modern Aerial Duels

Theory of Differential Games and Symbolic Programming Applied to the Amraam Game

Stéphane Le Ménec

INRIA-CERMICS Sophia Antipolis
2004, Route des Lucioles, B.P. 93
06902 Sophia Antipolis Cedex

lemenec@sophia.inria.fr

[1]Dans le cadre d'une collaboration DRET (contrat n^0 90/532) avec MATRA-DEFENSE Vélizy, qui étudie de nouvelles approches d'aide au pilote lors de combats aériens avec des missiles du type Mica, l'INRIA s'est intéressé à la théorie des jeux appliquée aux duels avec des missiles à moyenne distance. Cette étude, fait l'objet d'une collaboration au sein de l'INRIA de Sophia-Antipolis entre le projet Miaou pour l'aspect théorie des jeux et le projet Secoia en ce qui concerne les techniques de programmation avancée.

Je tiens à remercier vivement Messieurs P. Bernhard, T. Joubert et B. Neveu de leur conseils avisés dans cette étude.

Ce système a fait l'objet d'une démonstration à l'IJCAI'93 de Chambéry.

Résumé : Le développement de nouveaux missiles à moyenne distance du type Mica/Amraam[2] accroît le nombre de phases d'un duel aérien et introduit de nouvelles stratégies de tir et d'évasion plus complexes. Nous présentons d'abord les duels à moyenne distance avant de les étudier sous la forme de sous-jeux différentiels. Puis nous expliquons comment développer un système d'aide à la décision grâce à des simulations réalisées avec des systèmes experts utilisant les barrières de sous-jeux différentiels.

Abstract : The improvement of guidance possibilities of the medium range missiles with new missiles like the Mica/Amraam increases the number of phases in aerial duels and implicates new shooting and escape strategies, which are more complexe. At the beginning, we describe what aerial medium range duels are, before studying them as differential sub-games. Then we explain how to carry out a decision support system with several simulations developed with expert systems techniques using barriers of differential sub-games.

[2]Missile d'Interception de Combat et d'Auto-défense/Advanced Medium Range Air to Air Missile

Table des matières

1 Introduction **5**
1.1 Format et conventions typographiques 6
1.2 Présentation du jeu 7
1.2.1 Sanctions du jeu 8
1.3 Jeux qualitatifs en théorie des jeux 8

2 Théorie des jeux et duel Amraam **10**
2.1 Sous-jeux du duel Amraam 10
2.1.1 Barrières 10
2.1.2 Limites de domaines de tir 13
2.2 Nécessité des simulations 13
2.2.1 Loi de guidage des missiles dans les simulations 13
2.2.2 Manœuvre d'évasion des avions dans les simulations 14
2.3 Hypothèses 14
2.4 Réalisation d'un système d'aide à la décision 15

3 Stratégies de tir et d'évasion **17**
3.1 Instants de tir 17
3.2 Instants d'évasion 19
3.2.1 Stratégie d'évasion de AB 19
3.2.2 Autres évasions de AB et de AR 20

4 Système d'aide à la décision en Smeci **22**
4.1 Smeci 23
4.2 Modélisation des stratégies du duel aérien 24
4.2.1 Stratégie de AB 24
4.2.2 Phases de pré-tir et de post-tir 26
4.2.3 Option maintien-lam 26
4.3 SE duel 27
4.3.1 Comportements rouges 28
4.4 Fins possibles d'un duel 30
4.5 SE observateur 31
4.5.1 Règles de l'observateur 31
4.5.2 Instant de tir adverse difficile à imaginer 32
4.6 SE simulateur 34
4.7 SE analyseur 35
4.8 Sélection de la stratégie de représailles de AB 36

5 Conclusion **37**

A Modélisation du jeu à courte distance **41**

B Jeu à moyenne distance **42**

C Autres jeux calculés **43**

Table des figures

1 Représentation schématique des limites des domaines de tir. 17
2 Structure générale du système d'aide. 23
3 Organisation des systèmes experts dans le système d'aide. 38
4 Exemple de trajectoires du `SE simulateur`. 39
5 Exemple d'arbre de choix du `SE simulateur`. 40
6 Repère des sous-jeux :Repère en coordonnées polaires lié au poursuivant. . . 42
7 Jeu à moyenne distance contraint. 43

1 Introduction

L'objectif de la théorie des jeux [21] est l'étude mathématique des situations conflictuelles. L'étude de telles situations peut avoir des applications très variées comme l'étude de stratégies militaires [17], l'analyse de situations économiques ou politiques, ou la gestion de ressources etc ...

Une des applications de la théorie des jeux est l'étude de jeux de poursuite du type chat et souris. Un problème consiste à savoir quels sont les états initiaux du jeu à partir desquels un joueur peut s'assurer la victoire (ou la défaite) quoi que fasse son adversaire. Par exemple, à quelle distance de son abri la souris peut-elle s'aventurer si elle veut être sûre de pouvoir battre en retraite dès que le chat arrive ? L'étude de tels jeux consiste à calculer la frontière de ces zones, ou barrière.

Dans le cas de la poursuite d'un avion par un missile à courte distance à guidage autonome, on calcule une zone de capture et une zone d'évasion donnant les configurations du missile et de l'avion cible conduisant respectivement à une destruction de l'avion et à une perte du missile. On calcule les conditions initiales de la poursuite (caractérisées par des variables du jeu comme la vitesse du missile, la distance entre le missile et sa cible, l'angle de visée du missile ...) assurant à l'avion de s'évader quelle que soit la loi de guidage du missile et au missile de toucher l'avion quelle que soit la manœuvre de l'avion.

La théorie des jeux s'intéresse également aux duels aériens entre deux avions avec des missiles [15]. Seulement, ces duels posent des problèmes, comme celui de la détermination du rôle des avions [14, 23]. En effet, maintenant un avion est à la fois un fugitif et un poursuivant, puisqu'il veut échapper à l'avion adverse et aussi tirer son missile dans de bonnes conditions.

Puis, de nouveaux missiles air-air à moyenne distance avec des modes de guidage plus complexes rendant leur tir et une partie de leur vol indétectables sont récemment apparus. Ces nouveaux missiles accroissent alors le nombre de phases d'un duel aérien moderne et introduisent de nouvelles stratégies de tir et d'évasion plus compliquées. De sorte que l'on s'intéresse à des méthodes algorithmiques pour explorer ces nouveaux duels, que l'on modélise difficilement uniquement avec les techniques classiques de la théorie des jeux.

Nous avons étudié les différentes phases d'un duel aérien avec des missiles à moyenne distance sous la forme de sous-jeux. Ce rapport présente des simulations de duels aériens modernes utilisant les informations des barrières de ces sous-jeux. Ces simulations développées avec des langages de programmation évolués permettent la conception d'un système d'aide à la décision qui conseille à un des deux avions des stratégies de jeu pour profiter des maladresses de l'autre joueur.

L'utilisation de la théorie des jeux sur seulement des parties d'un problème plus important donne des résultats que l'on manipule dans des systèmes informatiques à bases de connaissances. Cette nouvelle façon de procéder nous permet d'étudier un jeu complexe, que l'on explore jusqu'à présent uniquement par des techniques de simulations et d'heuristiques[25].

1.1 Format et conventions typographiques

Ce rapport respectent les conventions suivantes.

- Les barrières de jeux ont des noms écrit en $math - mode$ du type $B_{\alpha-\beta}$.
  - Où α vaut :

    CD pour Courte Distance,
    MD pour Moyenne Distance,
    MDC pour Moyenne Distance avec fugitif Contraint,
    $MDSE$ pour Moyenne Distance Sans Evasion ou
    LD pour Longue Distance
  - et où β désigne le nom du poursuivant de ce jeu différentiel de poursuite-évasion. β désigne un missile ou un avion, bleu ou rouge : MB, MR, AB ou AR.
- On parle également de limite de domaine de tir $D_{\alpha-\beta}$, qui correspond à une partie de la barrière $B_{\alpha-\beta}$.
- On utilise parfois la notation B_α avec α valant CD, MD, ... ou $MDSE$. On parle dans ce cas de la barrière d'un jeu de poursuite entre un avion et un Mica/Amraam, sans préciser de nom de missile en particulier.

On utilise des polices de caractères différentes pour distinguer certains mots :

- La police Sans Serif est utilisée pour toutes les abréviations concernant le Mica/Amraam comme :
  - le nom du missile lui-même (Mica/Amraam) et
  - les abréviations décrivant les modes de guidage du Mica/Amraam (Lam, Ad).
- Le *Slanted* sert à écrire les sanctions du duel (*victoire*, *égalité*...)
- Le SMALL CAPS est l'écriture des noms des outils logiciels utilisés (SMECI, GAMES),
- Le `Typewriter` est la police pour écrire le nom des systèmes experts réalisés en SMECI (`SE duel`, `SE simulateur`, ...).

1.2 Présentation du jeu

Nous considérons un duel à moyenne distance opposant deux avions identiques que nous appelons l'avion bleu (AB) et l'avion rouge (AR). Chaque avion porte un missile Mica/Amraam, appelé missile bleu (MB) pour AB et missile rouge (MR) pour AR.

Ces missiles à moyenne distance possèdent plusieurs modes de guidage. Le Mica/Amraam vole

- en mode informé,
  - avec son Ad[3] accroché sur la cible; l'avion cible est alors dans le cône radar du missile; par la suite, on parle toujours du radar du missile, même si l'Ad d'un missile est un capteur d'une autre forme
  - ou en mode Lam[4]; on dit encore qu'un avion rafraîchit les informations du missile qu'il a tiré en le renseignant sur la position de sa cible (par exemple, MB est en mode Lam si MB et AR sont dans le cône radar de AB)
- ou en guidage inertiel; le missile se dirige alors vers la position estimée de sa cible qu'il extrapole d'après les positions passées de celle-ci.

Un missile peut tout d'abord voler en mode Lam, puis continuer en guidage inertiel pour accrocher son Ad en fin de course. Réellement, le guidage en mode Lam et le guidage avec Ad accroché ne sont pas tout à fait équivalents, car durant la phase de rafraîchissement, le missile peut recevoir moins d'informations que pendant la phase finale avec Ad accroché et avoir ainsi un guidage moins efficace.

L'intérêt de guider un missile depuis l'avion lanceur est de profiter du radar de l'avion beaucoup plus puissant que celui du missile et donc de tirer de plus loin. Avec un Mica/Amraam, un avion se rapproche moins de son adversaire. Seulement, dans les premiers instants après son tir, il doit éclairer son missile et sa cible. Avec un Mica/Amraam, un avion ne peut plus rompre immédiatement le duel après le tir et doit continuer à voler en direction de la menace adverse le temps que son missile accroche la cible ou soit du moins bien placé pour accrocher sur sa lancée (en mode inertiel).

Nous appelons actif un missile que l'on ne peut tirer qu'une fois son Ad accroché sur la cible et nous choisissons de dire qu'un missile est passif quand il n'est pas guidé par des capteurs ou un radar embarqués sur le missile. Le Mica/Amraam fonctionne en mode passif (mode Lam et guidage inertiel) et en mode actif (Ad accroché). Un avantage de tirer un missile en mode passif est de rendre son tir indétectable. Un avion ne voit les missiles ennemis que lorsqu'ils accrochent, en détectant leurs Ad. Cela suppose qu'un avion ne détecte jamais la Lam adverse, ce qui fait partie des hypothèses que nous retenons et que nous détaillons par la suite.

Le Mica/Amraam est un missile accéléré lors du tir et non propulsé en phase de croisière qui en volant en ligne droite perd de la vitesse régulièrement dans le temps, mais

[3] Auto-Directeur
[4] Liaison Avion Missile

qui consomme encore davantage d'énergie lorsqu'il manœuvre et d'autant plus que ses manœuvres sont fréquentes et violentes.

Dans cette étude, nous nous limitons à un jeu dans le plan, nous négligeons donc les effets dus à des altitudes différentes des missiles et des avions. Un duel à moyenne distance débute généralement par un engagement symétrique en face à face. Au début du duel, chaque avion est suffisamment éloigné de son adversaire pour refuser le combat s'il le souhaite. Il n'y a engagement du duel que si les deux avions ont des chances de victoire équitables, s'ils se présentent en face à face et à la même altitude.

1.2.1 Sanctions du jeu

Les sanctions sont données pour AB, une victoire de AB correspond à une défaite de AR (sanction *victoire*) et une défaite de AB à une victoire de AR (sanction *défaite*). Une *victoire* signifie la destruction de AR avec l'évasion réussie de AB, alors que dans une *défaite*, AB est l'avion détruit.

Un duel peut également se terminer par un match nul. On parle alors d'*égalité* lorsqu'aucun missile n'atteint son but et de *destruction mutuelle* si les deux avions sont détruits. Dans les duels aériens avec des missiles à courte distance et surtout à moyenne distance, la destruction des deux avions n'a pas nécessairement lieu en même temps, du fait du temps de vol des missiles.

1.3 Jeux qualitatifs en théorie des jeux

La théorie des jeux s'intéresse en particulier aux jeux de poursuite à deux joueurs et somme nulle (ce qui signifie que ce qu'un joueur gagne, l'autre le perd) [11, 3]. La poursuite d'un avion par un Mica/Amraam avec Ad accroché constitue un exemple que la théorie des jeux différentiels peut étudier en modélisant la cinématique du missile et de l'avion.

On peut décrire un jeu dynamique, comme une généralisation d'un problème de commande optimale [5, 6]. Le jeu ou système est alors gouverné par une équation différentielle. Cette modélisation donne l'évolution en temps continu, des variables d'état décrivant le jeu de poursuite, en fonction des commandes des joueurs. On étudie l'évolution de cette dynamique dans l'espace des variables d'état par des techniques de minimisation-maximisation, le poursuivant voulant minimiser le temps de capture et le fugitif cherchant à maximiser ce dernier. Une évasion du fugitif correspond alors à un temps de capture infini. Le jeu prend fin lorsque l'état du jeu pénètre un sous-ensemble de l'espace d'état que l'on appelle la cible[5].

L'étude qualitative d'un jeu différentiel permet la construction d'une surface, appelée la barrière optimale du jeu séparant les conditions initiales conduisant à la capture du fugitif, des états initiaux donnant une évasion du fugitif. Le calcul de cette barrière séparant la zone de capture de la zone de non capture donne également, au niveau de la barrière, les commandes des joueurs leur permettant de ne pas traverser la barrière optimale vers la zone

[5]Par la suite le mot cible est employé aussi bien pour désigner l'avion-cible objectif d'un missile, que pour parler du sous-ensemble de l'espace d'état définissant la fin d'un jeu différentiel.

en leur défaveur. Le fugitif peut empêcher l'état du jeu de franchir la barrière optimale de la zone de non capture vers la zone de capture quoi que fasse le poursuivant. De même, l'état du jeu ne peut traverser la barrière de la zone de capture vers la zone de non capture que si le poursuivant l'accepte. C'est pourquoi, on appelle une barrière optimale, une surface semi-perméable donnant la sanction d'un jeu de poursuite en fonction des conditions initiales.

La barrière optimale est donc construite une fois pour toute dans l'espace d'état du jeu et on ne se restreint pas à des stratégies particulières de poursuite et d'évasion pour calculer la zone de capture et la zone d'évasion.

Lors de la résolution de la forme qualitative d'un jeu de poursuite, on obtient avec la barrière les commandes optimales des joueurs sur celle-ci. On ne connaît les commandes optimales des joueurs que sur la barrière. A l'intérieur de la zone de capture, on connaît la sanction du jeu, mais on n'a pas défini de critère d'optimalité à ce stade.

2 Théorie des jeux et duel Amraam

2.1 Sous-jeux du duel Amraam

2.1.1 Barrières

On étudie les différentes phases de vol d'un Mica/Amraam à travers plusieurs jeux différentiels. Nous présentons des jeux de poursuite entre MB et AR. Ces jeux doivent également être vus comme des poursuites entre MR et AB, puisque les missiles et les avions sont identiques. Nous étudions d'abord la phase terminale de la poursuite, puis nous expliquons comment on lie un sous-jeu à un autre sous-jeu modélisant une phase antérieure.

Des annexes à la fin de ce rapport décrivent de façon plus détaillée la dynamique des jeux différentiels présentés dans la suite de ce paragraphe.

Cette succession de sous-jeux donne des informations sur les différentes phases du duel à moyenne distance moyennant quelques hypothèses raisonnables que nous détaillons au paragraphe 2.3 et les paragraphes 3.1 et 3.2 expliquent comment nous utilisons les barrières de ces sous-jeux dans des simulations SMECI.

- **Jeu à courte distance** de MB poursuivant AR (voir Annexe A page 41)
  - Ad du missile accroché
  - cible du jeu : destruction de AR quand la distance entre MB et AR = R_{final}
  - barrière de ce sous-jeu MB poursuivant AR : B_{CD-MB}
    MR poursuivant AB : B_{CD-MR}

Remarque : On utilise par la suite des raccourcis pour exprimer les positions d'un joueur par rapport à une barrière. Dans le nom de la barrière, on a choisi d'écrire le nom du poursuivant. Quand on parle de MB, alors nécessairement le fugitif considéré est AR... Quand on dit que AB doit tirer avant B_{CD-MB}, cela signifie que AB doit tirer avant que l'état du sous-jeu MB poursuivant AR ne pénètre dans la zone de capture définie par la barrière B_{CD-MB}.

La barrière du jeu à courte distance donne les compromis entre les paramètres :

↪ distance (R) entre un missile et sa cible,

↪ vitesse du missile,

↪ et angle de visée,

permettant à un missile accroché de toucher un avion quoi que fasse cet avion (tir sûr). En se plaçant du côté du fugitif, on peut dire que hors de B_{CD}, un avion peut échapper à tout missile en guidage autonome (évasion garantie).

On parle de dernière évasion garantie pour l'avion sur B_{CD}, car le missile pourrait utiliser une loi de guidage non optimale permettant à un avion de s'évader depuis l'intérieur de B_{CD}. De même, un missile qui accroche un avion hors de B_{CD} pourrait toucher un avion qui ne s'évade pas ou qui s'évade mal.

- **Jeu à moyenne distance** (voir Annexe B page 42)

  - cible : zone de capture du jeu à courte distance correspondant à $R = R_{lock}$, R_{lock} étant la portée du radar du missile
  - missile en guidage Lam, supposé informé en permanence
  - avion voyant le missile en guidage Lam
  - nous appelons les barrières de ces sous-jeux : B_{MD-MB} et B_{MD-MR}

  Si à $R = R_{lock}$, AR est hors de B_{CD-MB}, il pourra y rester même si R diminue encore. C'est pour cela que l'on cherche les conditions initiales du jeu à moyenne distance aboutissant dans $B_{CD-MB}(R = R_{lock})$ (intersection de la zone de capture du jeu à courte distance et de la sphère $R = R_{lock}$). Pour tous les jeux à moyenne distance, on utilise la même cible. On peut ainsi presque oublier la phase précédente et ne plus penser qu'au nouveau but, pour MB atteindre cette nouvelle cible $B_{CD-MB}(R = R_{lock})$ et pour AR l'éviter.

  B_{MD-MB} donne la zone de capture d'un missile rafraîchi tout au long de son vol pour AR voyant MB. Comme dans la réalité, AR ne voit pas MB en guidage Lam, AR ne joue certainement pas durant cette phase une évasion optimale. De plus, AR cherche aussi à tirer le mieux possible MR.

  Pour cette raison, nous avons défini d'autres sous-jeux aboutissant à des barrières plus grandes. En effet, la portée d'un missile dépend de la manœuvre de l'avion cible. Un avion qui ne s'évade pas permet de tirer de plus loin. Un avion ne voit le missile adverse que lorsqu'il accroche son Ad. Au moment du tir de MB, AR peut être hors de B_{MD-MB} qu'il ne voit pas et rentrer dedans pour finalement être accroché dans $B_{CD-MB}(R = R_{lock})$.

- **Jeu à moyenne distance avec contrainte** (voir Annexe C page 43)

  Ce sous-jeu est identique au précédent en imposant à l'avion cible de choisir sa direction dans un angle de directions de bissectrice la ligne de visée. Dans le cas de MB poursuivant AR, AR effectue une évasion optimale face à MB qu'il voit parfaitement, en choisissant ses commandes parmi des commandes admissibles l'obligeant à voler vers MB, c'est à dire approximativement dans la direction de MR. En effet, MB vole de AB vers AR et MR de AR vers AB, on peut donc dire que MB et MR volent à peu près dans la même direction, en sens opposé.

  Ce sous-jeu modélise un avion s'évadant de la menace adverse en gardant la Lam avec son missile. C'est probablement cette barrière qui donne la meilleure idée de la véritable portée d'un Mica/Amraam.

  L'étude de ce sous-jeu aboutit à la construction de B_{MDC-MB} et de B_{MDC-MR}.

- **Jeu à moyenne distance sans évasive**

  Il s'agit d'un jeu identique au premier jeu à moyenne distance étudié en considérant un avion-cible volant vers le missile adverse. On peut encore comparer le sous-jeu à moyenne distance sans évasive au jeu à moyenne distance avec contrainte en choisissant un angle de directions possibles réduit à la ligne de visée.

  Cette barrière donne la portée maximale d'un missile. Il faut remarquer que ce problème n'est plus exactement un jeu, car seul le missile choisit encore sa commande.

  Les barrières de ces sous-jeux traduisent les avantages et les désavantages cinématiques d'un missile par rapport à un avion. Les missiles et les avions ont des rayons de courbure minimum différents. Un missile effectue des manœuvres qu'un avion plus gros ne peut pas réaliser, mais un missile consomme beaucoup d'énergie en manœuvrant et diminue alors son temps de vol ... Ces barrières n'ont de sens que pour des missiles tirés. Tant que le missile n'est pas tiré, il ne consomme pas d'énergie et il faut considérer d'autres sous-jeux.

  Les barrières des jeux à moyenne distance considérées avec comme vitesse du missile, la vitesse initiale du missile lors du tir donnent des cibles pour des jeux à longue distance entre les deux avions. On définit avec les jeux à moyenne distance de nouvelles cibles pour des jeux à longue distance d'une façon comparable au passage de la phase à courte distance à la phase à moyenne distance.

- **Jeu à longue distance** [20]

  - cible : B_{MD} restreinte à $vitesse_{missile} = vitesse_{missile-initiale}$
  - barrière B_{LD-AB} (AB poursuivant AR) et B_{LD-AR} (AR poursuivant AB)

  Le sous-jeu à longue distance AB poursuivant AR donne les configurations initiales depuis lesquelles AB peut manœuvrer pour amener AR dans la cible définie ci-dessus, quoi que fasse AR. Ce sont les configurations initiales depuis lesquelles AB peut se

placer en position de tir pour tirer un MB, qui s'il est correctement informé touchera AR quoi que fasse AR. Au début du duel, chaque avion a la possibilité de rompre le combat et de s'enfuir. Cela signifie que AB est hors de B_{LD-AR} et que AR est hors de B_{LD-AB}.

2.1.2 Limites de domaines de tir

Nous appelons "limite du domaine de tir" les barrières des jeux à moyenne distance et à courte distance calculées précédemment avec le missile non encore tiré, c'est à dire avec $vitesse_{missile} = vitesse_{missile-initiale}$ et avec la position du missile coïncidant avec celle de son avion (figure 1). On nomme ces limites de domaines de tir D_{MD-MB}, D_{CD-MR} ...

Remarque : B_{CD} n'est définie que pour $R \leq R_{lock}$, ainsi D_{CD-MB} donne les conditions initiales pour tirer avec succès MB avec Ad accroché, quoi que fasse AR.

2.2 Nécessité des simulations

Les rôles complexes des avions qui sont à la fois des poursuivants et des fugitifs posent des problèmes de détermination de rôle compliqués en théorie des jeux. La variété des rôles pour un même avion, mais également la multiplicité des phases de jeu (phase de pré-tir, phase de guidage Lam, phase d'évasion) et le nombre d'issues possibles (victoire, défaite, évasion des deux avions, destruction des deux avions) rendent les duels aériens complexes à étudier.

Il faut aussi pouvoir expliciter si un joueur préfère terminer un duel par une *égalité* ou par une *destruction mutuelle*, s'il ne peut pas gagner.

De plus, les deux pilotes peuvent être amenés à jouer des stratégies coopératives pour obtenir une sanction du type *égalité* au lieu d'une *destruction mutuelle* s'ils préfèrent tous les deux une *égalité* à une *destruction mutuelle*. Or la théorie des jeux différentiels s'intéresse principalement aux jeux non coopératifs à somme nulle [2].

Ces remarques rendent un duel comme celui du Mica/Amraam pratiquement insoluble uniquement par des techniques de théorie des jeux et expliquent pourquoi nous ne pouvons pas donner les stratégies optimales des joueurs avec la succession des sous-jeux étudiés.

C'est pourquoi, nous avons décidé d'étudier ce jeu par l'intermédiaire de simulations utilisant les barrières des sous-jeux précédemment présentés [26].

2.2.1 Loi de guidage des missiles dans les simulations

Un missile utilise pour se guider une loi de navigation proportionnelle [28], sauf sur une barrière d'un de ses sous-jeux où il utilise la loi de poursuite optimale pour garder l'état du jeu dans la zone de capture qui lui est favorable. Rappelons que la théorie des jeux différentiels qualitatif ne propose les commandes optimales des joueurs que sur les barrières des sous-jeux [10].

Prenons l'exemple du sous-jeu à courte distance. A l'intérieur de la zone de capture, nous ne connaissons pas la stratégie optimale du missile. En jouant sur B_{CD} la commande

de poursuite optimale du sous-jeu à courte distance et partout ailleurs une loi de guidage quelconque, le missile joue une stratégie sous-optimale. Dans B_{CD}, la destruction de l'avion n'a pas lieu en un temps optimal, mais la sanction du jeu de poursuite est optimale, à savoir la destruction de l'avion.

Dans la phase à courte distance, comme le missile a son Ad accroché sur la cible, le missile sait placer l'état du jeu à courte distance par rapport à B_{CD}. Dans les autres phases, le missile voit la cible s'il est en guidage Lam et utilise alors toutes les barrières des jeux à moyenne distance. Si le missile est en guidage inertiel, il utilise l'emplacement supposé de la cible pour calculer la position de l'état du jeu à moyenne distance par rapport aux barrières.

2.2.2 Manœuvre d'évasion des avions dans les simulations

Lorsqu'un avion s'évade, il utilise une manœuvre d'évasion préconisée que l'on estime assez bonne, mais si malgré cette évasive, l'état du jeu rejoint une barrière d'un sous-jeu le considérant comme fugitif, l'avion utilise alors la commande optimale d'évasion lui permettant de ne pas franchir cette barrière. Pour utiliser la barrière optimale d'un sous-jeu de poursuite-évasion avec un missile, l'avion doit voir le poursuivant, pour pouvoir calculer cette barrière. C'est ainsi que AR ne peut utiliser pour son évasion, comme barrière de jeu l'opposant à un missile, que la barrière B_{CD-MB}. De même, AB ne pourrait utiliser que la barrière B_{CD-MR}, s'il ne supposait la position de MR alors que MR est encore invisible, comme on le voit par la suite dans le paragraphe 3.2.1.

Cette façon de procéder nous permet de simuler des comportements des missiles efficaces, proches des lois de guidage réelles complexes et des évasions des avions réalistes.

2.3 Hypothèses

Au cours de l'étude du jeu du Mica/Amraam, nous avons retenu un ensemble d'hypothèses simplificatrices raisonnables.

1. Un avion ne réalise qu'une évasion qui est alors définitive.
2. Un avion ne peut pas tirer pendant sa manœuvre d'évasion.
3. Un avion ne peut pas maintenir la Lam pendant son évasion.
4. Un avion s'évade systématiquement dès qu'il est accroché par l'Ad ennemi.
5. Un avion ne tire pas après l'évasion adverse.
6. En mode Lam, un missile est aussi bien informé qu'en guidage autonome avec Ad accroché.

L'hypothèse 4, indiquant qu'un avion accroché par l'Ad ennemi s'évade immédiatement, interdit des comportements très kamikazes dans lesquels un avion cherche par dessus tout la destruction adverse. Il s'agit d'une simplification raisonnable. L'accrochage de l'Ad ennemi

correspond à une menace très proche provoquant une évasion réflexe sans savoir si le missile adverse accroche dans ou hors de la zone de capture à courte distance.

On pourrait bien entendu imaginer un AR qui accroché dans B_{CD-MB}, se sachant perdu, décide de continuer son attaque pour peut-être obtenir une *destruction mutuelle* qui vaut plus qu'une simple *défaite*.

On pourrait aussi considérer qu'un AR accroché hors de B_{CD-MB} continue sa manœuvre courante jusqu'à arriver à proximité de B_{CD-MB}, pour débuter son évasion.

Dans l'étude du duel avec un Mica/Amraam, nous avons simplifié le duel à courte distance pour concentrer notre attention sur le duel à moyenne distance, c'est en effet pendant la première phase de guidage des missiles que les joueurs vont faire la différence.

Nous avons considéré des avions pas assez fous pour pénétrer dans la zone de capture du jeu à courte distance après l'accrochage du missile adverse. Si AR joue trop mal ou est trop kamikaze et traverse B_{CD-MB} à $R < R_{lock}$, la cible du jeu à moyenne distance sans évasion qui donne la portée maximale de tir de MB n'a plus de sens. AB pourrait détruire AR même avec un MB accrochant AR hors de $B_{CD-MB}(R = R_{lock})$. C'est pourquoi, on a estimé que dans la phase à courte distance, comme les avions voient les missiles les menaçant, les avions réalisent toujours des évasions optimales.

Avec l'hypothèse 4, AR s'évade dès l'accrochage de l'Ad ennemi et pas juste avant de traverser B_{CD-MB} et avec les hypothèses 2 et 3, un avion qui s'évade n'influence plus son missile; donc dès l'accrochage de l'Ad de MB, nous ne simulons plus ni MB, ni AR, car on connaît la sanction de la poursuite de AR par MB avec le jeu différentiel à courte distance et le reste du duel se déroule indépendamment.

2.4 Réalisation d'un système d'aide à la décision

Nous considérons deux avions identiques avec chacun un Mica/Amraam. Nous nous intéressons principalement aux situations initiales en face à face. Les avions tirent des missiles à moyenne portée et débutent leur phase de pré-tir à une distance environ deux fois supérieure à leur distance de tir. A une telle distance si les avions ne se rapprochent pas en face à face, alors il n'y a pas d'engagement. Mais dans notre système d'aide, rien n'empêche de placer dès le début du jeu les deux avions beaucoup plus près que dans la réalité des duels à moyenne distance et de donner à un des joueurs une position désavantageuse.

Dans le cas général, la symétrie du jeu au début du duel implique que les avions ont les mêmes chances de victoire. On pourrait imaginer étudier toutes les alternatives de chaque joueur en temps discret et construire un arbre de décisions énorme. Un algorithme de min-max sur un tel arbre de choix impliquerait nécessairement une solution optimale du type *égalité* ou *destruction mutuelle* identique pour chaque joueur.

Cette raison nous a amené à développer un système d'aide à la décision, pour aider un des joueurs, disons AB, à triompher dans un engagement réaliste d'un joueur adverse (AR) plus ou moins bon. En effet, AB ne peut gagner que si AR commet des erreurs, en exploitant les maladresses de AR.

Un avion ne sait pas exactement à quel moment tirer. Plus il porte son missile loin, plus il augmente son taux de succès, mais plus aussi il se rapproche de son adversaire et s'expose au missile adverse. Chaque joueur veut guider son missile (maintenir la Lam) le plus longtemps possible pour augmenter les chances de succès de son missile, mais il veut également débuter son évasion le plutôt possible pour réussir sa dérobade. De plus, comme les tirs sont indétectables, un joueur peut influencer son adversaire en effectuant des dégagements qui laissent supposer un tir ...

C'est pourquoi, ce système veut optimiser l'instant de tir et les manœuvres de la phase de pré-tir et de post-tir de AB en fonction des choix de AR. Nous n'étudions pas différentes manœuvres d'évasion des avions. En effet, nous ne simulons qu'un seul type d'évasion en accord avec les barrières des sous-jeux calculées. Les joueurs choisissent le moment pour débuter leur évasion qui s'effectue alors d'une manière unique déterminée.